



Facultat de Ciències

Memòria del Treball Final de Grau

Títol del treball:

Seguiment d'una planta pilot de bioreactor de membranes (MBR) i validació del sistema de control basat en eines de lògica difusa per a l'optimització energètica.

Estudiant: Arnau Pradas Planella

Grau en Biotecnologia

Correu electrònic: u1945326@campus.udg.edu

Tutor: Hèctor Monclús

Institució: LEQUIA

Vistiplau tutor i (cotutor):

Nom del tutor:	Hèctor Monclús Sales
Nom del cotutor:	Albert Galizia Amoraga
Institució:	LEQUIA
Correu electrònic:	hector.monclus@udg.edu

Data de dipòsit de la memòria a secretaria de coordinació:

AGRAÏMENTS

M'agradaria expressar el meu més sincer agraïment a tothom que m'ha ajudat, ja sigui directa o indirectament en la realització d'aquest treball final de grau.

En primer lloc donar gràcies al Dr. Hèctor Monclús per donar-me aquesta oportunitat i guiar-me en aquest projecte, al doctorant Albert Galizia pel seu temps i les seves ensenyances, i al Dr. Joaquim Comas per el seu suport durant la meva estada al LEQUIA .

També m'agradaria agrair el suport rebut per part de la família, la Núria i els amics durant la realització d'aquest treball, i durant aquests 5 anys de carrera.

Gràcies a tots per la comprensió, el temps dedicat i, sobretot, per la paciència.

RESUM

Les depuradores d'aigua residual tracten l'aigua modificada per els humans per tal de evitar les aigües contaminades al medi natural, i mantenir la resiliència en el cicle de l'aigua. Els tractaments convencionals que es duen a terme en aquestes depuradores, permeten eliminar l'excés de matèria orgànica i contaminants de l'aigua, però presenten moltes limitacions.

Aquestes limitacions es poden superar a través de la implementació de tecnologies que complementin i optimitzin els processos existents i, que acabin generant, una millor qualitat de l'aigua tractada. Una d'aquestes tecnologies és la tecnologia de bioreactors de membrana (MBR de l'anglès *membrane bioreactor*) aplicats a les depuradores convencionals.

Els MBR generen una qualitat més alta de l'aigua i requereixen volums de reactors més petits, però les membranes que el formen presenten processos d'embrutiment que disminueixen l'eficiència del procés.

Un dels sistemes més utilitzats per la minimització de l'embrutiment es basa en crear turbulències a partir de l'aeració de les membranes per tal de netejar-les i millorar l'eficiència. Aquest procés té una despesa energètica molt alta, i en el present estudi, s'han estudiat dues propostes de sistemes d'ajut a la decisió que actuen sobre el cabal d'aeració amb la finalitat d'estalviar energia. Un d'aquests sistemes es basa en lògica binària i ja ha estat validat en plantes reals, mentre que l'altre, basat en lògica difusa, s'ha desenvolupat i es presenta en aquest estudi.

Finalment, també s'ha comparat la resposta que aquests sistemes d'ajut a la decisió proposen quan treballen amb canvis horaris (modificar la consigna cada hora) respecte a canvis diaris.

Els resultats han mostrat un potencial d'estalvi major amb l'ús del sistema de control basat en lògica difusa respecte la lògica binària. A més, quan s'ha treballat amb respostes horàries, s'ha generat més estalvi que en respostes diàries.

RESUMEN

Las depuradoras de agua residual tratan el agua modificada por los humanos para evitar las aguas contaminadas al medio natural, y mantener la resiliencia en el ciclo del agua. Los tratamientos convencionales que se llevan a cabo en estas depuradoras permiten eliminar el exceso de materia orgánica y contaminantes del agua, pero presentan muchas limitaciones.

Estas limitaciones se pueden superar a través de la implementación de tecnologías que complementen y optimicen los procesos existentes y, que acaben generando, una mejor calidad del agua tratada. Una de estas tecnologías es la aplicación de la tecnología de biorreactores de membrana (MBR del inglés *membrane bioreactor*) a las depuradoras convencionales.

Los MBR generan una calidad más alta del agua y requieren volúmenes de reactores más pequeños, pero las membranas que lo forman presentan procesos de ensuciamiento que disminuyen la eficiencia del proceso.

Uno de los sistemas más utilizados para la minimización del ensuciamiento se basa en crear turbulencias a partir de la aireación de las membranas para limpiarlas y mejorar la eficiencia. Este proceso tiene un gasto energético muy alto, y en el presente estudio, se han estudiado dos propuestas de sistemas de ayuda a la decisión que actúan sobre el caudal de aireación con el fin de ahorrar energía. Uno de estos sistemas se basa en lógica binaria y ya ha sido validado en plantas reales, mientras que el otro, basado en lógica difusa, se ha desarrollado y presentado en este estudio.

Finalmente, también se ha comparado la respuesta que estos sistemas de ayuda a la decisión cuando trabajan con cambios horarios (modificar la consigna cada hora) respecto a cambios diarios.

Los resultados han mostrado un potencial de ahorro mayor con el uso de sistema de control basado en lógica difusa respecto la lógica binaria. Además, cuando se ha trabajado con respuestas horarias, se ha generado más ahorro que en respuestas diarias.

ABSTRACT

Wastewater treatment plants treat water modified by humans in order to avoid contaminated water in the natural environment and maintain resilience in the water cycle. Conventional treatments carried out in these treatment plants make it possible to remove excess organic matter and pollutants from the water but have many limitations.

These limitations can be overcome through the implementation of technologies that complement and optimize existing processes and, in the end, generate better quality of treated water. One of these technologies is the use of membrane bioreactor technology (MBR) applied to conventional sewage treatment plants.

MBRs generate higher water quality and require smaller reactor volumes, but the membranes that make it up have fouling processes that decrease process efficiency.

One of the most widely used systems for minimizing fouling, is based on creating turbulences by aeration on the membranes in order to clean them and improve efficiency. This process has a very high energy expenditure, and in the present study, two proposals for air-scour control systems to save energy have been studied. One of these systems is based on binary logic and has already been validated in real plants, while the other, based on fuzzy logic, has been developed and presented in this study.

Finally, two responses of the decision support systems were tested, one proposal working with hourly time changes (proposing an air-scour modification every hour) and has been compared to daily changes.

The results have shown greater savings potential with the use of the fuzzy logic-based control system over binary logic. In addition, when working with hourly responses, more savings were generated than in daily responses.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1. ESTACIONS DEPURADORES D'AIGÜES RESIDUALS	1
1.2. BIORREACTORS DE MEMBRANA	2
1.2.1. PARÀMETRES DE SEGUIMENT	3
1.2.2. AVANTATGES I INCONVENIENTS DELS MBR	4
1.2.3. SISTEMA DE CONTROL DE L'AERACIÓ	5
1.3. FUZZY LOGIC	5
1.4. MOTIVACIÓ DE L'ESTUDI	7
2. OBJECTIVES	8
3. METODOLOGIA I DISSENY EXPERIMENTAL	9
3.1. DESCRIPCIÓ DE LA PLANTA PILOT	9
3.1.1. CONTROL DE LA PLANTA.....	10
3.1.2. CONDICIONS D'OPERACIÓ	10
3.2. SISTEMA DE CONTROL DE L'AERACIÓ	11
3.2.1. DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE SEGUIMENT.....	11
3.2.2. TRACTAMENT DE DADES	12
3.2.3. DISSENY DEL SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA BINÀRIA (SmartAirMBR®)	13
3.2.4. DISSENY DEL SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC)	14
3.3. PLA DE TREBALL	15
4. RESULTATS I DISCUSIÓ	16
4.1. DETERMINACIÓ DE LES CONDICIONS DE FUNCIONAMENT I ANÀLISIS DE L'EVOLUCIÓ DE LA PLANTA PILOT	16
4.2. ADEQUACIÓ DELS RANGS DE LES VARIABLES DE CONTROL	17
4.3. DETERMINACIÓ DELS RANGS EN ELS SISTEMES DE CONTROL	18
4.3.1. CONTROL AMB LÒGICA BINÀRIA (SmartAirMBR®).....	18
4.3.2. CONTROL AMB LÒGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC)	19
4.4. RESPOSTA DELS SISTEMES D'AJUT A LA DECISIÓ	20
4.4.1. ESTALVI D'AIRE ASSOLIT.....	21
4.4.2. CONSUM ENERGÈTIC I ESTALVI ECONÒMIC.....	22
5. CONCLUSIONS	25
6. CRITERIS D'ÈTICA I SOSTENIBILITAT	24
7. BIBLIOGRAFIA	26
8. ANNEX: CODI DE MATLAB PER EL TRACTAMENT DE DADES	28

1. INTRODUCCIÓ

L'aigua és un factor clau en la vida quotidiana i és un dels recursos naturals més preuats pels humans. Durant el seu cicle, el humans canviem les propietats de l'aigua a través de processos de captació pel consum, l'indústria o l'agricultura, i transformem l'aigua potable en aigües residuals que no es poden descarregar en el medi natural (Cooley et al., 2021). Si no es gestionen bé les aigües provinents d'aquests processos, es corre el risc de modificar els patrons hídrics, distorsionar el cicle de l'aigua, i afectar els ecosistemes que en depenen (Abbott et al., 2019).

Per tant, tractar l'aigua residual és un pas clau per mantenir la resiliència en el cicle de l'aigua i evitar efectes perjudicials en els ecosistemes. Els punts de tractament de la majoria d'aquests efluentes modificats per l'activitat humana són les estacions depuradores d'aigües residuals (EDARs).

1.1. ESTACIONS DEPURADORES D'AIGÜES RESIDUALS

Les estacions depuradores d'aigües residuals (EDARs) es basen en la combinació de processos físics, químics i biològics per depurar l'aigua. En les EDARs convencionals, conegudes com a sistemes CAS (de l'anglès *Conventional activated sludge*), es poden dividir els processos de tractament en tres etapes (pretractament, tractament primari i tractament secundari) centrades en eliminar una càrrega contaminant diferent (Figura 1):

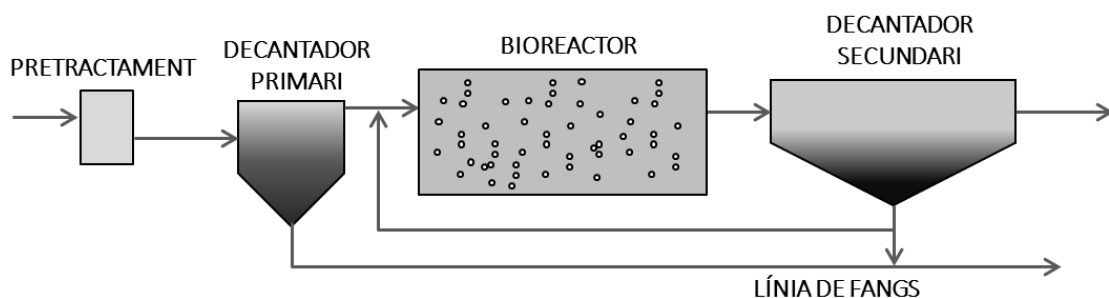


Figura 1 Esquema d'una EDAR amb *Conventional activated sludge* (CAS)

En la primera etapa o pretractament, s'eliminen els sòlids de gran mida que arriben a la planta per tal de evitar que afectin als processos següents.

El tractament primari té com a objectiu eliminar la gran majoria de sòlids en suspensió, com pols o sorra, a partir de tractaments físics (filtres i decantadors) i/o tractaments químics afegint coagulants i floculats que faciliten la decantació d'aquestes partícules.

Un cop s'han eliminat les partícules en suspensió, l'aigua residual passa al tractament secundari per disminuir la càrrega de matèria orgànica (MO) i nutrients. Aquest tractament secundari és un tractament biològic, que utilitza un cultiu de microorganismes anomenats llots o fangs actius responsables de degradar la matèria orgànica i eliminar nutrients (nitrogen i fòsfor) a partir de la combinació de condicions aeròbiques, anaeròbiques i anòxiques. Després d'aquest procés biològic, els fangs passen a un decantador gravitacional i es separen de l'efluent que es retorna al medi natural (Metcalf & Eddy Inc. et al., 1980).

Les EDARs basades en sistemes CAS permeten un tractament d'aigua senzill amb un cost operacional baix que garanteix que l'aigua abocada al medi compleix amb la legislació vigent, i que no malmeti l'ecosistema.

La principal limitació dels sistemes CAS es deu a la poca resiliència del seu sistema ja que les plantes disposen d'una infraestructura que està dissenyada per tractar volums d'aigua específics. L'aigua, degut als processos físics i biològics de les plantes CAS, ha de mantenir un temps de residència hidràulic (TRH) mínim dins el sistema que garanteixi l'eliminació de la MO i els nutrients. Per aquest motiu, l'EDAR no pot afrontar pics de volum d'aigua d'entrada, i moltes vegades l'única opció que tenen les plantes CAS en moments d'alts cabals d'entrada és descarregar aigua no tractada al medi ambient (Martínez et al., 2006).

L'augment de la producció d'aigua residual i el control més estricte de la qualitat de l'aigua tractada, ha portat a les depuradores que treballaven amb sistemes CAS convencionals a treballar amb tractaments terciaris que les complementin (Metcalf & Eddy Inc. et al., 1980). Els tractaments terciaris permeten complir amb la legislació, millorar la qualitat de l'aigua i fer-la apropiada per la seva reutilització. Un d'aquests tractaments es basa en la incorporació de tecnologia de membranes que, acoblada als CAS, es coneix amb el nom de bioreactors de membrana o MBR, de l'anglès *membrane bioreactors*.

1.2. BIORREACTORS DE MEMBRANA

Els MBR han patit un augment exponencial de la seva instal·lació en les EDARs durant els últims 20 anys (Judd and Judd, 2008). Aquesta tecnologia es basa en millorar el tractament secundari dels sistemes CAS, substituint la funció del decantador secundari per un sistema de filtres amb membranes que s'encarreguen de separar els fangs actius de l'aigua tractada a través d'un procés de filtrat (Figura 2).

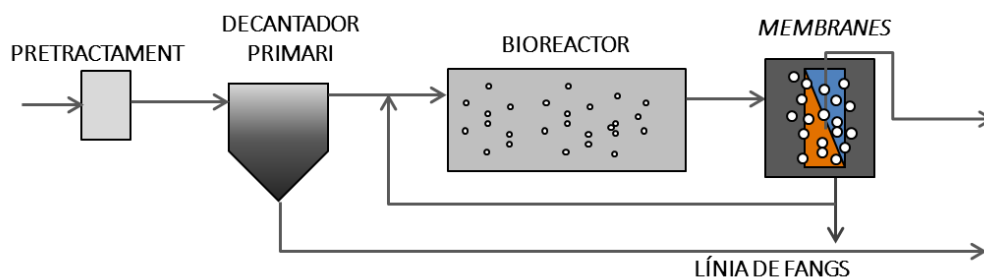


Figura 2 Esquema d'una EDAR amb tecnologia MBR

La filtració es duu a terme a través de membranes agrupades en mòduls. El tipus de filtració es pot classificar en funció de la mida del porus de les membranes entre microfiltració (0.1-1 μ m) o ultrafiltració (0.005-0.1 μ m).

S'han desenvolupat una gran varietat de MBR a partir de diferents materials, que i treballen amb diferents configuracions. En funció de la forma i el material de les membranes, els MBR es poden dividir en tres categories (Fane, 2002):

- **Membranes planes (FS, de l'anglès *flat sheet*):** membranes submergides dins el reactor biològic. Acostumen a treballar per aspiració o gravetat, no és necessari realitzar contrarrentats i el seu manteniment és senzill. Acostumen a tenir una vida útil de 10 anys.

- **Membrana de fibra buida (HF, de l'anglès *hollow fibre*):** membranes filamentosos i buides per dins. El diàmetre del porus és inferior a 0.1µm. Requereixen un menor consum energètic, són resistents i flexibles, i la seva vida útil és de 8-10 anys.
- **Membrana tubular (MT):** membranes rígides i tubulars amb diàmetre d'entre 1 mm i 5 cm.

En funció de la localització dels mòduls, els MBR es poden dividir en configuració interna o externa. Els MBR que treballen en configuració interna tenen les membranes dins el bioreactor. Aquesta configuració permet la instal·lació dels mòduls aprofitant l'espai del bioreactor però, dificulta les tasques de manteniment. Per altra part, els reactors en configuració externa tenen les membranes fora del reactor principal, i gràcies a això, requereixen un manteniment més senzill i el cost inicial és menor, però necessiten un espai d'instal·lació més gran i sistemes extres de recirculació per retornar els fangs al bioreactor principal (Fane, 2002).

Els bioreactors de membranes treballen amb condicions molt diferents depenent de la configuració i la forma de la membrana, tot i això, tots els MBR comparteixen un seguit de paràmetres de seguiment que proporcionen informació rellevant del procés de filtració.

1.2.1. PARÀMETRES DE SEGUIMENT

Embrutiment o *Fouling*: és el procés natural d'embrutiment de les membranes. Es deu a sòlids en suspensió, fibres o microorganismes que s'uneixen a les membranes i en bloquegen els porus. Aquest fet produeix una disminució de la eficiència de filtració, que es manifesta en una disminució del cabal filtrat, o un augment de la pressió transmembrana (TMP). Les membranes presenten diferents mecanismes d'embrutiment depenent de les partícules que el formen, i la interacció d'aquestes amb la membrana (Judd and Judd, 2008):

- **Fouling reversible:** Procés d'embrutiment superficial que es deu al bloqueig extern dels porus per partícules de gran mida que impedeixen la filtració i disminueixen el rendiment. Aquest embrutiment es pot reduir a través de processos físics. Un dels més utilitzats és l'agitació de les membranes per aeració i també mitjançant contrarentats (Cui et al., 2003).
- **Fouling irreversible:** Embrutiment profund causat per partícules petites que bloquegen internament els porus i que no es pot mitigar amb processos físics. Es requereixen tractaments químics per poder recuperar l'eficiència de membranes. S'utilitzen neteges actives o passives amb àcids per eliminar les substàncies inorgàniques i bàsics per eliminar les orgàniques (Akhondi et al., 2017).
- **Fouling permanent:** Embrutiment resultant de l'operació de les membranes. No es pot recuperar amb tractaments físics ni químics i està lligat a la vida útil de les membranes.

Flux (J): Mesura del cabal permeat per unitat d'àrea de membrana. Unitat estandarditzada del cabal que permet comparar cabals de filtració en membranes de diferent àrea (Eq1).

$$J = \frac{Q}{A}$$

J: flux (LMH = L·m⁻²·h⁻¹).

Q: cabal de permeat (L·h⁻¹).

A: superfície de membrana (m²).

Eq. 1

Flux crític (Jc): Flux a partir del qual les accions correctores físiques no son suficients per contrarestar la velocitat d'embrutiment de les membranes. Aquest valor depèn de les membranes utilitzades, de la qualitat dels fangs i de la qualitat de l'aigua tractada (Li and Li, 2015). La determinació d'aquest valor es realitza de manera empírica a través de un *stress test* de les membranes en les condicions de treball (Le Clech et al., 2003).

Pressió transmembrana (TMP): diferència de pressió aplicada entre les dues cares de la membrana per tal de permetre el pas de fluid. Aquesta pressió varia en funció de les condicions d'operació, de la tipologia de membrana, i l'embrutiment que la membrana presenta (Judd and Judd, 2008).

Permeabilitat (K): Paràmetre que relaciona el flux de treball amb la TMP del sistema. Valor de referència de l'estat de les membranes que dona un valor numèric associat amb l'embrutiment de les membranes (Monclús et al., 2015) (Eq. 2).

$$K = \frac{J}{TMP}$$

Eq. 2

K: permeabilitat (LMH·bar⁻¹ (L·m⁻²·h⁻¹·bar⁻¹))

J: flux (LMH = L·m⁻²·h⁻¹)

TMP: pressió transmembrana (bar)

1.2.2. AVANTATGES I LIMITACIONS DELS MBR

Els sistemes basats en MBR presenten una barrera física entre el bioreactor i l'efluent que proporciona avantatges significatius respecte els sistemes convencionals. Primer de tot, els MBR produeixen una qualitat d'efluent molt més alta que els sistemes CAS, ja que les membranes permeten retenir substàncies en suspensió, bacteris i alguns virus (Marti et al., 2011). Aquest augment en la qualitat, els permet tractar influents més difícils, com influents industrials complexes, i permet la reutilització de l'aigua en molts més processos que les depuradores CAS. Aquesta barrera física, també permet treballar a concentracions de fangs més altes i tractar volums d'aigua en bioreactors més petits que les depuradores convencionals (Collivignarelli et al., 2019). Finalment, l'absència de decantadors permet modificar fàcilment els cabals de treball i permet, als MBR, ser més resilents en moments d'alta demanda (Lopetegui and Trouvé, 2004). No obstant, l'ús de membranes en sistemes MBR comporta varies limitacions.

Les membranes, al ser filtres, es veuen afectades per processos d'embrutiment que disminueixen el flux de permeat i augmenten la pressió transmembrana (TMP) disminuint l'eficiència de filtració. Aquest embrutiment produeix estrès en les membranes, en disminueix la vida útil i augmenta la despesa econòmica (Akhondi et al., 2017).

L'embrutiment principal és el de tipus reversible, i es pot controlar a partir de l'aeració de les membranes per generar turbulències i reduir la incrustació superficial (Cui et al., 2003). Aquest sistema millora les condicions de filtració i allarga l'ús de les membranes, però al dependre d'un consum d'aire constant comporta associada una despesa energètica molt elevada. En alguns casos acaba sent responsable de fins el 50% de la despesa energètica del tractament d'una EDAR amb tecnologia MBR (Monclús et al., 2015).

1.2.3. SISTEMA DE CONTROL DE L'AERACIÓ

L'aeració que recomanen els fabricants per la neteja de les membranes acostuma a ser excessiva i té l'objectiu d'assegurar la màxima neteja física de les membranes, però augmenta les despeses d'operació. Amb l'objectiu de disminuir aquesta despesa, s'han desenvolupat diferents estratègies com reduir el cabal nominal de l'aeració de les membranes, treballar amb aeració intermitent o fins i tot desenvolupar sistemes d'ajuda a la decisió (SAD) pel control i optimització del cabal d'aeració.

Un software d'optimització de l'aeració és l'SmartAirMBR® (Rodríguez-Roda et al., 2011). L'SmartAirMBR® és un sistema basat en lògica binària que analitza l'evolució de la permeabilitat de les membranes al llarg del temps per tal de generar una proposta en el canvi d'aeració (Ferrero et al., 2011a). Aquest sistema permet estalviar aire en els moments en que les membranes tenen menys embrutiment i no necessiten tant d'aire per a la neteja. S'ha validat en planta real aconseguint un 15% d'estalvi energètic (Monclús et al., 2015).

SmartAirMBR® analitza l'evolució de la permeabilitat a curt termini (últims 4 dies) i l'evolució de la permeabilitat a llarg termini (últims 14 dies) (Ferrero et al., 2011b), de tal manera que una millora dels pendents de a curt i llarg termini implica major permeabilitat i menor embrutiment, el que es pot traduir en un estalvi d'energia.

Una problemàtica que presenta aquest SAD és que degut a que aquest programa es basa en un sistema de lògica binària (verdader – fals), genera una resposta de sortida escalonada que en alguns casos es pot traduir en canvis bruscos en el cabal d'aeració. A més, només utilitza variables històriques per generar la resposta de control, el que provoca que no ponderi l'estat de les membranes en el moment de l'actuació, i pugui generar respostes errònies. Per generar una resposta més acurada i amortitzada, es poden aplicar altres aproximacions en el sistema de control, com per exemple, utilitzar altres tipus de lògiques com la lògica difusa (*fuzzy logic* en anglès).

1.3. FUZZY LOGIC

La lògica difusa (o *fuzzy logic*) és una metodologia utilitzada en sistemes de control lingüístics que interpreta el raonament humà i proporciona respostes que tenen en compte la imprecisió de les situacions reals. La lògica difusa es basa en graus de pertinença en lloc del veritable o fals en què es basa la lògica binària, i això li permet generar respostes més acurades (Zadeh, 1965).

Quan els humans descrivim el nostre entorn, generem grups de dades categoritzats (molta calor, persones baixes, gossos grans, etc.) que es basen en quantificadors imprecisos (gran, baix, poc, etc.) i que permeten correlacionar i comparar objectes entre si. L'objectiu de la lògica difusa és generar normes que interpretin aquestes relacions i que es puguin fer servir per aplicar el coneixement humà a un sistema de control (Novák et al., 1999).

En un grup de dades categoritzat, no tots els objectes tenen el mateix grau de propietat, i, mentre alguns objectes pertanyen indubtablement a aquest grup, per altres és més difícil assegurar-ho. Per quantificar aquesta imprecisió, la lògica difusa categoritza les dades amb un grau de pertinença a través de un gradient definit entre 0 i 1, on els objectes amb un grau de pertinença

de 0 a un grup categoritzat no contenen la propietat, i els que tenen una pertinença de 1 contenen la propietat indubtablement (son objectes prototip) (Zadeh, 1965).

D'aquesta manera, a través del coneixement expert, es pot definir una funció de pertinença que relacioni els valors de les dades, amb el grau de propietat (**Figura 3**). A partir d'aquesta funció, també es pot extrapolar el grau de propietat que presenta un valor dins el grup.

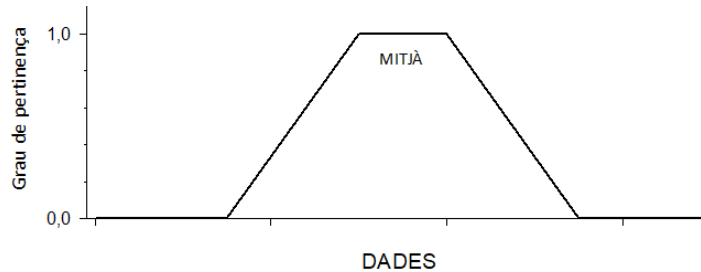


Figura 3 Exemple funció de pertinença de un fuzzy set "mitjà"

Un cop s'ha determinat la funció de pertinença per un sol grup (o *fuzzy set*), es poden combinar diversos grups categoritzats per omplir tot l'univers de dades (Figura 4). Qualsevol dada dins aquest univers es pot definir com una combinació de valors de pertinença en cada un dels *fuzzy set*.

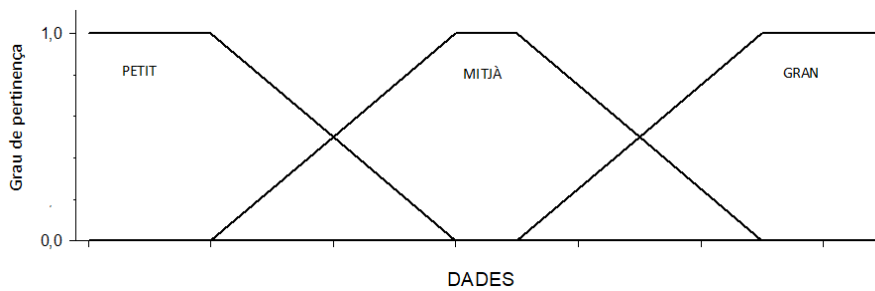


Figura 4 Funcions de pertinença per els tres Fuzzy Sets (petit, mitjà i gran) de un rang de valors.

La categorització de les dades com a graus de pertinença als diferents *fuzzy sets* permet als sistemes de control tractar processos complexos basant-se, només, en un conjunt de regles heurístiques. Aquestes normes es determinen a partir d'un coneixement expert amb la relació *if* \rightarrow *then* entre els *fuzzy sets* d'entrada i sortida. Si el fuzzy set en la variable d'entrada és X, decidim que el fuzzy set en la variable de sortida serà Y.

El procés de treball d'un sistema de control difús per proporcionar una resposta a un sistema es pot dividir en 4 passos: obtenció de dades, *fuzzificació*, inferència difusa i *defuzzificació* (Figura 5).

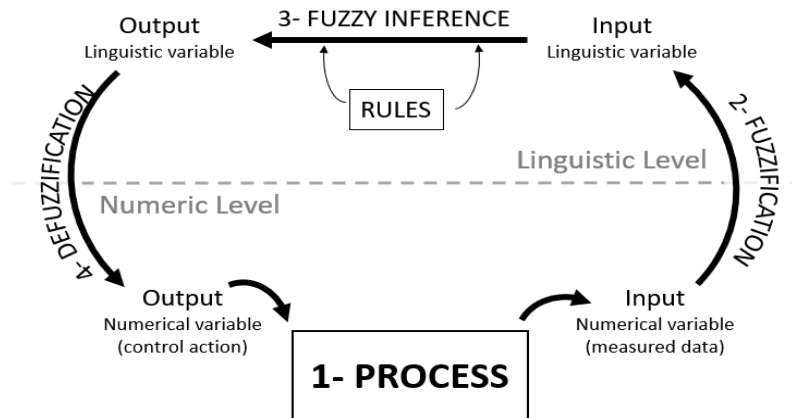


Figura 5 Funcionament de un sistema de control difús

El pas d'obtenció de dades llegeix les variables numèriques directament del procés i realitza un tractament de les dades si és necessari. Aquestes dades, es fuzzifiquen a variables lingüístiques difuses, amb un grau de pertinença a cada *fuzzy set*.

El tercer pas consisteix en realitzar la inferència de la variable d'entrada lingüística a una variable de sortida. Per obtenir aquesta variable de sortida, es pondera la importància de cada *fuzzy set* a la variable d'entrada a través del grau de pertinença. Després, s'apliquen les normes heurístiques dissenyades a priori que donen un valor de sortida lingüístic que presenta graus de pertinença als *fuzzy sets* de la variable de resposta (Raya, 2002).

Finalment, es defuzzifica la variable de sortida lingüística a una dada numèrica a través de funcions de pertinença, i s'obté una variable de resposta numèrica que es pot aplicar en el procés.

1.4. MOTIVACIÓ DE L'ESTUDI

Les limitacions que presenta el sistema de control de l'aeració basat en lògica binària SmartAirMBR® han incentivat el disseny de un nou sistema de control que pugui donar una resposta més acurada. Una de les modificacions que es proposa és la substitució de la lògica binària per la lògica difusa. Juntament amb incorporació de la TMP com a variable discriminant per determinar la resposta. A més, és vol comprovar l'efecte de proposar canvis per hores en lloc de diaris per adaptar l'aeració a les condicions de treball més immediates.

2. OBJECTIVES

The aim of this study is to improve the basis of the SmartAirMBR® control system through the introduction of fuzzy logic. Moreover, it is wanted to check if a control system that analyses the evolution of the permeability at hourly level is more efficient than the day-based system.

To achieve these objectives, four subobjectives were established:

- Define the working period of the pilot plant and monitor its evolution.
- Establish the working ranges for the control and response variables.
- Calibrate the air scour control systems inside the working ranges.
- Compare the results to determine the best approach for the air-scour control system

3. METODOLOGIA I DISSENY EXPERIMENTAL

Per complir els objectius proposats s'ha utilitzat una planta pilot situada a la EDAR de Quart. Aquesta planta té instal·lat un mòdul de membranes amb una superfície de 1 m² en un reactor aerobi. La planta està preparada per poder treballar alternant filtració, contrarrentat i relaxació, semblant al funcionament d'una planta real. L'alimentació està preparada per treballar en continu amb aigua residual urbana real provinent de l'entrada de la mateixa EDAR (Figura 6).

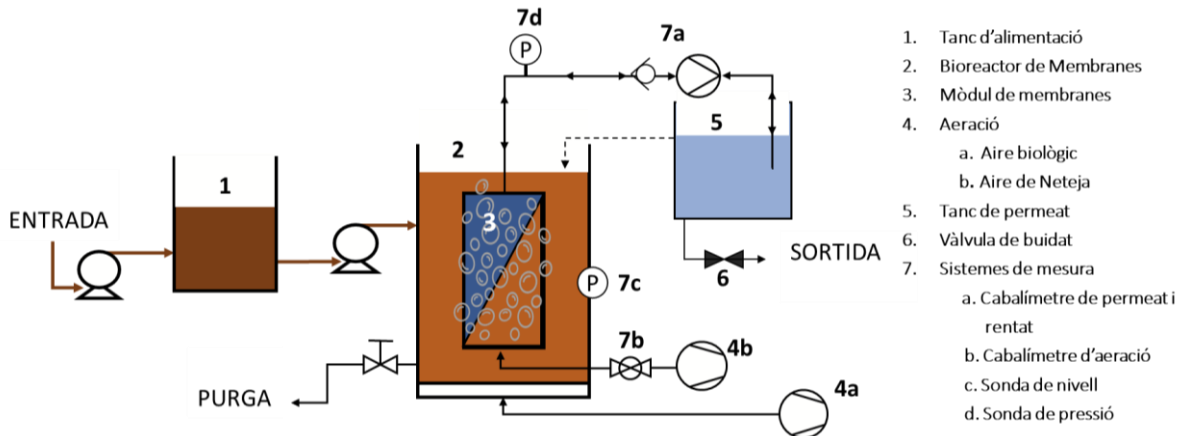


Figura 6 Esquema de la planta pilot MBR de l'EDAR de Quart

3.1. DESCRIPCIÓ DE LA PLANTA PILOT

Tanc d'alimentació: Tanc de 500L de capacitat amb una reixa que actua com a pretractament per eliminar objectes de gran mida. La seva configuració interna afavoreix la precipitació de partícules sedimentables. Està alimentat per una bomba peristàtica que bombeja aigua residual provinent de l'arqueta d'entrada de l'EDAR de Quart.

Bioreactor de Membranes: Reactor de metacrilat quadrat de 30L alimentat directament des del tanc d'alimentació a través d'una bomba Watson-Marlow 3230.

Mòdul de membranes: Mòdul d'ultrafiltració de fibra buida amb una superfície de filtració de 1m². Ha estat proporcionades per Chemipol® (Scinor).

Aeració: Dins el Bioreactor de membranes hi ha dos sistemes d'aeració independents:

- **Aire biològic:** Aire amb l'objectiu de mantenir la biomassa en suspensió, evitar que precipiti i aportar oxigen. L'aportació es fa a partir d'un difusor en forma de corona situat a la part inferior del reactor i connectat a una bufant de cabal fix. Les bombolles emeses han de ser petites per millorar la difusió d'oxigen i evitar interferències amb l'aire de neteja (Cui et al., 2003).
- **Aire de Neteja:** A la part inferior del mòdul de fibra buida hi ha porus que funcionen com a difusors de bombolles d'aire gruixudes per crear turbulència i netejar les membranes (Akhondi et al., 2017). Aquest aire prové d'una bufant Nitto Kohki LA-120A, i el cabal aportat està controlat per un cabalímetre i regulat per una electro-vàlvula.

Tanc de permeat: Tanc de polietilè de 25L de volum alimentat de l'aigua provinent de la filtració del mòdul a través de una bomba Micropump HG0024. Està en recirculació contínua amb el bioreactor per sobreexidor.

L'aigua del tanc també actua com a solució de neteja durant els cicles de contrarentat, fent servir la mateixa bomba que s'utilitza per permear.

Vàlvula de buidat: vàlvula de controlada des del PLC que regula el cabal que es recircula, del tanc de permeat al bioreactor principal.

Sistemes de mesura: La planta pilot disposa de tres cabalímetres i tres sondes de nivell:

- **Cabalímetres de permeat i rentat:** format per dos cabalímetres de puls en paral·lel que controlen el cabal de permeat i contrarentat. Cada un d'ells està unit a una vàlvula antiretorn que permet que cada cabalímetre només controli un dels dos sentits de flux (o permear, o contrarentar).
- **Cabalímetre d'aeració:** connectat entre la bufant de neteja i el bioreactor. Té també la capacitat de regular el cabal i està controlat per el PLC a través de un sistema PID.
- **Sonda de nivell:** Per determinar el nivell als tancs hi ha instal·lada una sonda de pressió al fons del bioreactor i una boia al tanc de permeat.
- **Sonda de pressió:** formada per un manòmetre mecànic i una sonda electrònica que permet digitalitzar el valor de pressió en el circuit de permeat.

3.1.1. CONTROL DE LA PLANTA

El funcionament de la planta està regulat per un PLC, que dona la opció a modificar tots els paràmetres de treball. Per poder-se comunicar amb aquest PLC es disposa d'un SCADA que proporciona una interfície gràfica que facilita la modificació de les condicions de funcionament i la obtenció de dades històriques.

3.1.2. CONDICIONS D'OPERACIÓ

Les condicions d'operació de la planta pilot s'han determinat a través d'estudis en *batch* de l'embrutiment de les membranes per estimar-ne el flux crític i conèixer la permeabilitat inicial. El flux crític s'ha estimat seguint la metodologia proposada per Le Clech et al., 2003. A partir del valor del flux crític, s'ha fet un seguiment a mig termini per ajustar les condicions d'operació finals.

Durant tot el procés, s'ha fet un seguiment de l'estat i la concentració dels fangs i s'han realitzat purgues en el bioreactor principal per mantenir les condicions d'operació constants. Per conèixer la concentració dels fangs, s'han realitzat, a diari, els càlculs dels Sòlids Totals en Suspensió (SST) i dels Sòlids Totals Volàtils (SSV), seguint la metodologia proposada a APHA, 1999. Per conèixer l'estat dels fangs, s'ha realitzat el càlcul de la filtrabilitat amb la metodologia proposada per Rosenberger and Kraume, 2002 i el Temps de Succió Capil·lar (CST) seguint la metodologia de Scholz, 2005.

3.2. SISTEMA DE CONTROL DE L'AERACIÓ

En aquest apartat es descriu el sistema de control basat en lògica binària que segueix el protocol proposat per Monclús et al., 2015, i el sistema basat en lògica difusa que s'ha desenvolupat durant aquest estudi.

Els sistemes de control estan programats en el llenguatge de programació Matlab® i generen les respostes als canvis de permeabilitat de les membranes a partir de l'anàlisi dels paràmetres de seguiment establerts. Els sistemes de control primer realitzen el tractament de dades produïdes pel pilot de l'EDAR de quart i en calculen els paràmetres de seguiment. Seguidament, a partir de les normes establertes en els seus algorismes, generen una proposta en el canvi d'aeració.

3.2.1. DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE SEGUIMENT

Els SAD utilitzen quatre paràmetres de seguiment per conèixer l'estat de les membranes: permeabilitat a curt termini, permeabilitat a llarg termini, la relació de les permeabilitats i la TMP:

- **Permeabilitat a curt termini o *short term* (ST):** Pendent calculat a partir de la permeabilitat mitjana de les últimes quatre dades analitzades. En els SAD que treballen a nivell horari es calcula l'ST de les últimes 4 hores, mentre que el treballen a nivell diari calculen l'ST a partir dels 4 últims dies.
- **Permeabilitat a llarg termini o *long term* (LT):** Pendent calculat a partir de la permeabilitat mitjana de les últimes catorze dades analitzades, en el cas de l'ST a nivell horari s'analitzen les últimes 14 hores i a nivell diari s'analitzen els últims 14 dies.
- **Relació de pendents o *slope ratio* (SR):** Rati entre ST i LT que permet conèixer la relació de l'evolució a curt i llarg termini a partir d'una sola dada (Eq.4).

$$SR = \frac{ST}{LT}$$

SR= Slope Ratio

ST = Short term permeability (LMH·bar⁻¹·min⁻¹)

LT = Long term permeability (LMH·bar⁻¹·min⁻¹)

Eq.4

- **TMP:** Valor absolut de la pressió transmembrana en el moment que s'aplica la resposta de control.

El sistema de control basat en lògica binària, utilitza com a paràmetres de seguiment els valors de ST i LT i SR mentre que el sistema de control basat en lògica difusa utilitza els valors de ST i LT i la TMP.

Els rangs dels paràmetres de seguiment, ST, LT, SR i TMP, varien en funció de cada planta. Per calcular els rangs que presenten aquestes variables en la planta pilot de l'estudi, es realitza un histograma i un diagrama d'acumulació:

- **Histograma:** determina quins rangs de dades tenen més densitat de valors, d'aquesta manera es pot determinar quina distribució segueixen les dades. A través de l'histograma es selecciona el rang de valors.
- **Diagrama d'acumulació:** Proporciona el percentatge acumulat de dades. Aquest paràmetre permet comprovar que el rang escollit té un percentatge significatiu de les dades totals.

3.2.2. TRACTAMENT DE DADES

Per calcular els paràmetres de seguiment, s'ha realitzat un programa que interpreta les dades en brut que arriben de la planta pilot i les agrupa en cicles de filtració (Annex). Com que el pilot no treballa en un filtratge continu, el programa de tractament de dades ha de poder reconèixer els moments de filtració i eliminar els temps de contrarentat i relaxació (Figura 7).

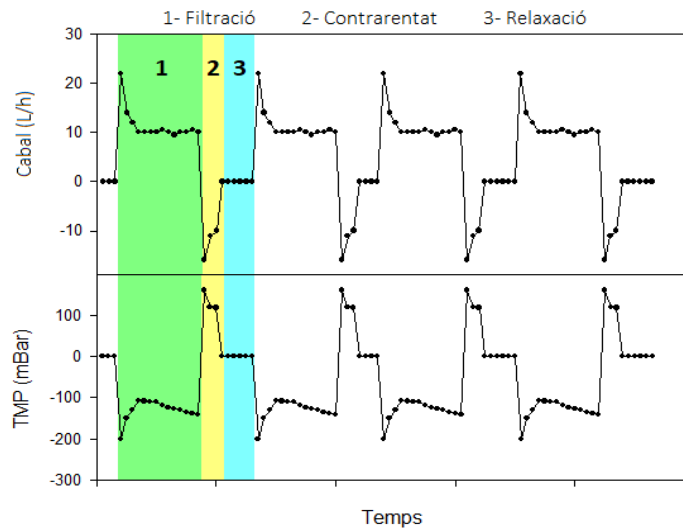


Figura 7 Exemple de l'evolució de les variables controlades durant els períodes de filtració.

La organització de les dades en cicles de filtració es fa a partir de quatre algorismes que: determinen els moments en que la planta està filtrant, descarten els valors fora de rang, realitzen els càlculs per cada cicle de treball i, finalment, calculen les mitjanes dels paràmetres de seguiment per hores i dies que faran servir els sistemes d'ajut a la decisió (Figura 8):

- 1- **Determinar el cicle de filtració:** Les dades que pertanyen a un cicle de filtració han de presentar un valor de cabal de permeat positiu i una TMP negativa:
Cabal permeat > 0: permet eliminar tots els moments en que el sistema està relaxant (ja que la bomba de permeat està aturada i marca cabal = 0).
TMP < 0: aquesta condició permet eliminar els moments en que s'està contrarentant (ja que genera una pressió transmembrana positiva).
- 2- **Descartar valors fora de rang (outliers):** S'eliminen els primers 9 valors de cada cicle de filtració per eliminar l'error causat per l'*overshooting* de la bomba de permeat abans d'arribar a la consigna de cabal (Figura 7). S'han decidit eliminar els 9 primers valors ja que és el temps que tarda la bomba a establir-se.
- 3- **Càlcul de mitjanes dins el cicle de treball:** s'agrupen les dades en els cicles de filtració, es realitzen les mitjanes de TMP i flux, i es calcula el valor mitjà de permeabilitat en el cicle.
- 4- **Càlcul dels paràmetres de seguiment:** Un cop s'han calculat les permeabilitats mitjanes en cada cicle de filtració, es calcula l'evolució de la permeabilitat (càlculs de ST i LT) a nivell diari i horari.

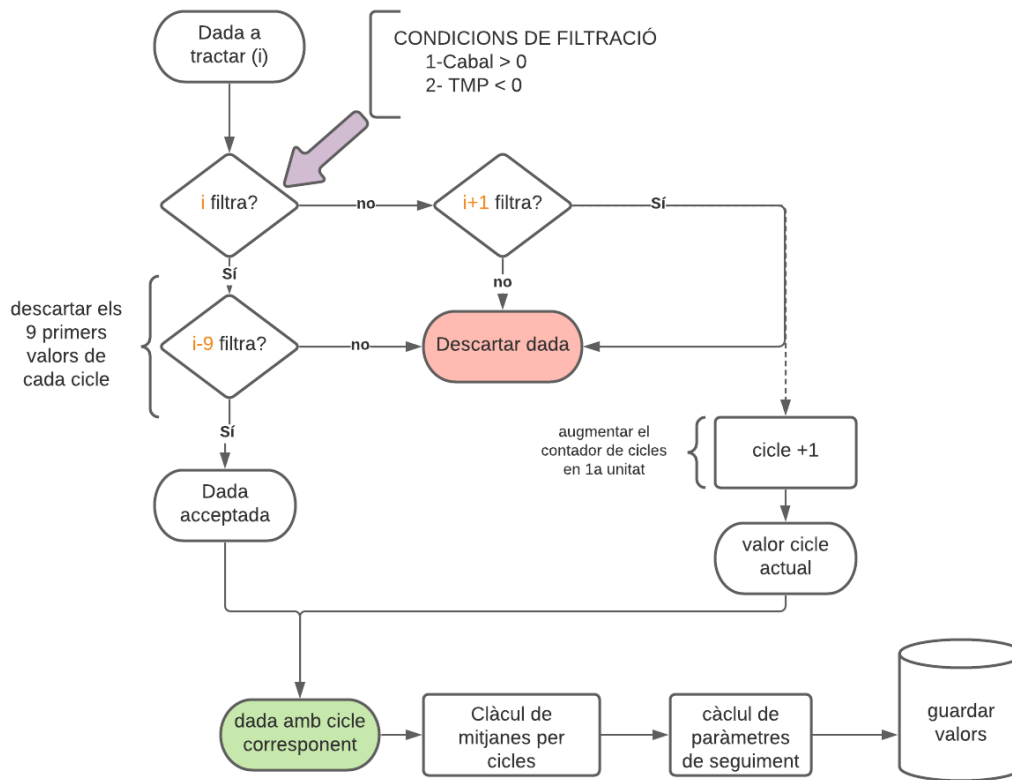


Figura 8 Diagrama del procés utilitzat per el filtrat de dades

3.2.3. ADAPTACIÓ DEL SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA BINÀRIA (SmartAirMBR®)

El control de l'aeració basat en lògica binària proposa canvis en el volum d'aeració a partir de l'anàlisi de la relació de la permeabilitat a LT i ST. La variació de la permeabilitat depèn del grau d'embrutiment de les membranes, el cabal d'aeració, la concentració dels fangs i la temperatura, i en funció d'aquets paràmetres pot tenir tendència a augmentar o disminuir.

Per quantificar aquestes tendències, s'han definit quatre escenaris diferents que relacionen les tendències de la permeabilitat de les membranes a ST i LT (Figura 9|Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

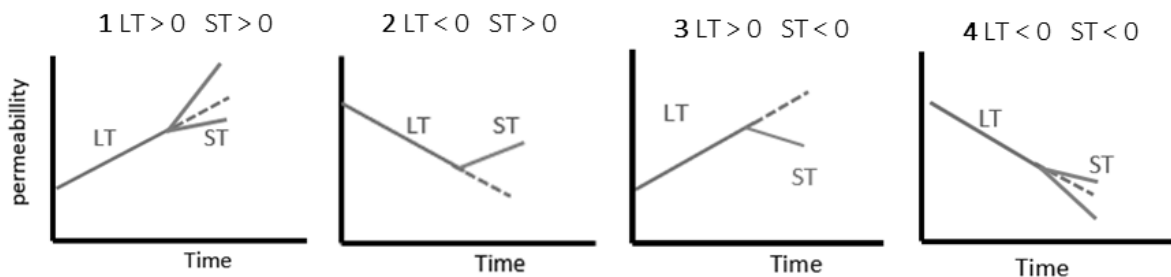


Figura 9 Relacions entre ST i LT que es faran servir per determinar la resposta en l'aeració

Cada un dels escenaris de les tendències de permeabilitat, es relaciona amb un escenari d'estalvi (Taula 1). Quan els valors de ST i LT tendeixen a l'augment, es presenten situacions en que es pot produir estalvi, mentre que quan els valors de LT i ST tendeixen a disminuir, s'incrementa la despesa per mantenir la permeabilitat en les membranes (Monclús et al., 2015).

Taula 1 Normes de treball en el sistema de control basat en lògica binària

ESCENARI	CONDICIÓ	RESPOSTA	JUSTIFICACIÓ
LT > 0 ST > 0	ST > LT	Estalvi màxim	Millor condició possible, la permeabilitat a llarg termini ha millorat i a curt termini continua millorant
	ST < LT	Estalvi gran	Opció d'estalvi possible. La permeabilitat ha estat millorant a llarg termini, i a curt termini millora, però amb un pendent menor
LT < 0 ST > 0	-	Estalvi moderat	El canvi en la tendència de la permeabilitat provoca una condició d'estalvi.
LT > 0 ST < 0	-	Despesa moderada	Canvi en la tendència de la permeabilitat. Per evitar l'empitjorament de les membranes s'augmenta l'aeració.
LT < 0 ST < 0	ST > LT	Estalvi mínim	La tendència de millora de ST provoca una condició d'estalvi mínim.
	ST < LT	Despesa màxima	Pitjor condició possible, s'augmenta l'aeració per evitar l'empitjorament de les membranes.

El sistema de control SmartAirMBR®, utilitza com a paràmetre de seguiment la relació entre ST i LT (SR). A partir d'aquest valor es determina l'escenari d'embrutiment on es troba el procés, i es proporciona una resposta conseqüent. La resposta es genera analitzant un conjunt de grups que relacionen rangs de valors de la variable d'entrada amb un valor de resposta en la variable controlada.

Quants més grups es defineixin en el procés, més natural serà la resposta obtinguda i s'evitaran els salts esglaonats en la resposta. Per altre part, l'augment dels rangs augmenta la demanda computacional del programa i dificulta les tasques d'ajust en cas que hi hagi la necessitat de canviar els rangs de les variables de control.

3.2.4. DISSENY DEL SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC)

El sistema de control basat en lògica difusa genera respostes en el sistema d'aeració a partir de la anàlisi de les tendències de ST, LT i TMP. Les respostes en el sistema fuzzy segueixen les mateixes normes establertes en el sistema SmartAirMBR® (una millora dels pendents de permeabilitat implica una velocitat d'embrutiment menor i, per tant és una opció d'estalvi d'energia), però, s'hi afegeix la variable TMP, de tal manera que quan els valors de TMP són molt alts es prenen accions de control més conservadores per evitar danyar les membranes. Per tant en el sistema fuzzy, la TMP realitza un pas extra de control de seguretat que el sistema basat en lògica binària no presenta.

El sistema de control s'ha basat en el sistema d'interferència Mamdani i s'ha desenvolupat a partir del paquet *Fuzzy Logic Designer* integrat en el llenguatge de programació Matlab®.

3.3. SIMULACIÓ DELS SISTEMES DE CONTROL

Per conèixer la resposta simulada pels sistemes de control, es selecciona una franja de treball de la planta pilot que no contingui cap aturada en les dades. Per donar robustesa a les dades simulades, la franja, ha de tenir mínim 40 dies d'operació on es mostrin tendències d'embrutiment diferents.

Un cop seleccionada la franja de treball, es fan córrer els dos sistemes de control (basat en lògica difusa i basat en lògica binària), en dues configuracions diferents: generant respostes a nivell horari, i generant respostes a nivell diari. Per a generar respostes a nivell horari s'han definit els valors de ST i LT com el pendent de la tendència de la permeabilitat en un rang de 4 i 14h respectivament, mentre que per definir-les en nivell diari, les tendències de la permeabilitat de LT i ST s'han definit en 4 i 14 dies.

3.4. PLA DE TREBALL

El conjunt de tasques que engloba aquest treball ha planificat dins els 8 mesos disponibles per la seva execució. Des de l'inici, incloent la recerca bibliogràfica a la redacció del treball (Taula 2).

En el primer mes de treball s'ha realitzat l'estudi de l'estat inicial de la planta pilot de l'EDAR de quart i s'han establert les condicions de funcionament. A partir del segon mes, i durant 6 mesos, s'ha operat el pilot per tal de recopilar dades de funcionament. Finalment, s'ha escollit una franja de treball en la que s'han fer córrer en llaç obert els dos sistemes d'ajut a la decisió (el basat en lògica binària, i el basat en lògica difusa) i s'han recopilat les propostes generades tant a nivell horari com diari. La franja de treball seleccionada presenta una primera etapa d'estabilització de les condicions de funcionament, i una 2a etapa on es duu a terme la recollida de dades per, i en la que es mantenen les condicions properes al set-point.

Taula 2 Cronologia de l'estudi

TASQUES DEL TREBALL	MES							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Recerca bibliogràfica	■	■	■					
Establir condicions de funcionament	■	■						
Recopilació de dades		■	■	■	■	■	■	
Tractament de dades				■	■	■	■	■
Redacció del treball							■	■

4. RESULTATS I DISCUSIÓ

Els resultats s'han dividit en 4 apartats començant pel seguiment de la planta pilot, el disseny dels rangs de les variables de control, el calibrat dels sistemes de control i finalment, anàlisi de la resposta proposada per els sistemes d'ajut a la decisió.

4.1. DETERMINACIÓ DE LES CONDICIONS D'OPERACIÓ I SEGUIMENT DE LA PLANTA PILOT

Durant el període d'operació, s'ha treballat amb una aeració contínua de les membranes de $1\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ i amb un interval de funcionament de 9 min de filtració a 10LMH, 20 s de contrarrentat i 40s de relaxació. En aquest període, s'ha mantingut també, un temps de residència hidràulic (TRH) de 10h i un temps de residència cel·lular (TRC) de 30 dies.

Les condicions d'operació s'han mantingut significativament inferiors a les del flux crític estimat de 25,52 LMH, quan es treballa amb un cabal d'aeració de $2\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ja que s'ha observat que quan es treballa a cabals d'aeració alts, les turbulències dins el mòdul provoquen el trencament dels floculs del fang provocant un augmenten la velocitat d'embrutiment.

A través de una purga diària, s'ha mantingut una mitjana de SST de $6,3 \pm 0,5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ durant el període de treball, i s'han monitoritzat els valors de SSV, filtrabilitat i CST (Taula 3).

Taula 3 mitjanes dels anàlisis de qualitat dels fangs.

MITJANA SST ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	MITJANA SSV (% de SST)	MITJANA FILTRABILITAT (mL)	MITJANA CST (s)
$6,3 \pm 0,5$	$85,7 \pm 3,5$	$9,9 \pm 3,0$	113 ± 28

El període de treball escollit per fer córrer les simulacions del sistema de control té una llargada de 45 dies. Els primers 14 dies del període s'han utilitzat per establir les condicions de treball i per proporcionar dades històriques que s'utilitzaran per calcular l'evolució de les permeabilitats. A partir del dia 15, i durant 30 dies, s'han mantingut les condicions de funcionament constants i s'han enregistrat les dades d'operació que s'utilitzaran per fer córrer les simulacions del sistema de control.

En aquest període de treball, l'evolució de la permeabilitat de les membranes presenta una tendència oscil·latòria, en la que durant les hores de llum millora la permeabilitat (disminueix la TMP) i durant les hores nocturnes aquesta empitjora. Per evitar l'aturada de la planta pilot per sobrepressió a la nit, s'ha realitzat durant els dies d'operació, un rentat amb hipoclorit sòdic (NaClO) a les membranes que elimina el tortell orgànic i recupera la permeabilitat (Figura 10).

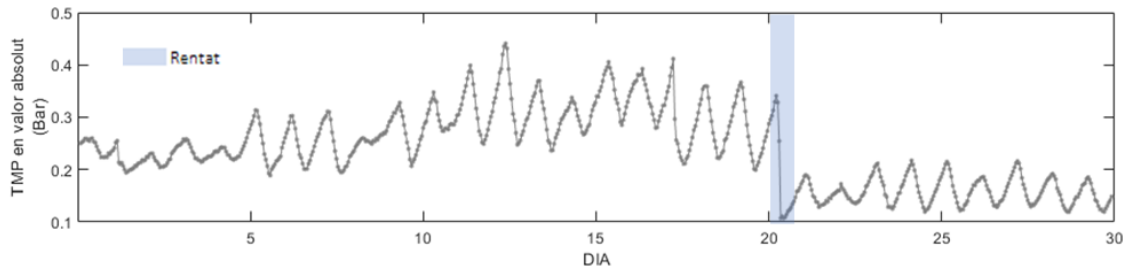


Figura 10 Evolució de la TMP de la planta pilot durant el període de simulació dels sistemes de control

4.2. ADEQUACIÓ DELS RANGS DE LES VARIABLES DE CONTROL

L'anàlisi de la distribució, a partir de l'histograma i el diagrama d'acumulació, de la variable de control SR pel sistema de control SmartAirMBR® s'ha dividit en dos escenaris: LT positiu i LT negatiu. Els histogrames de SR obtinguts mostren una distribució estadística normal tant per LT positiu (Figura 11A) com per LT negatiu (Figura 11B). Els diagrames d'acumulació de SR presenten una gran dispersió de les dades causades per una gran quantitat de valors atípics. Per LT negatiu la mitjana de SR és de 0,95 amb una desviació estàndard de $\pm 140,32$ (Figura 11C) mentre que per LT positiu s'observa una mitjana de 3,86 i presenta una desviació estàndard de $\pm 295,32$ (Figura 11D).

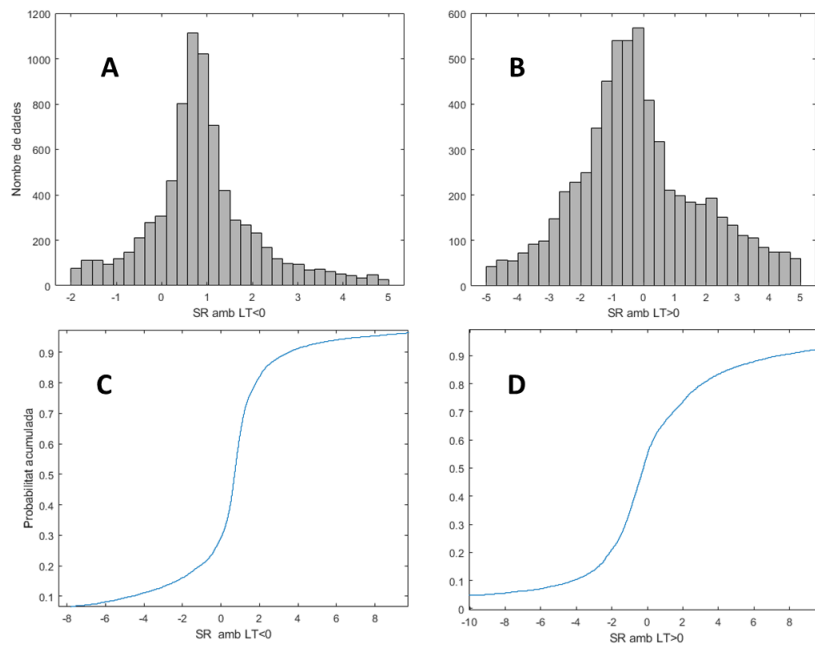


Figura 11 Distribució dels rangs de SR; A: histograma SR amb $LT < 0$; B: histograma SR amb $LT \geq 0$ C: diagrama d'acumulació amb SR amb $LT < 0$ i D: diagrama d'acumulació de SR amb $LT \geq 0$

Per el sistema de control basat en lògica difusa, s'han realitzat els anàlisis de distribució de de les variables de control ST (Figura 12 A), LT (Figura 12B) i MBR (Figura 12C). La variable LT presenta una mitjana de $0.0 \pm 0,32$, la ST $0.0 \pm 0,59$ i la TMP és de 0.24 ± 0.06 . La distribució de les dades en les variables ST i TMP presenten una lleugera asimetria, però per fer més fàcil l'adequació dels rangs de control s'han assumit com a distribucions normals. Els diagrames d'acumulació per ST (Figura 12 D), LT (Figura 12 E) i MBR (Figura 12F) presenten una dispersió menor que les variables de SR, i presenten dispersions molt més baixes, i menys valors atípics.

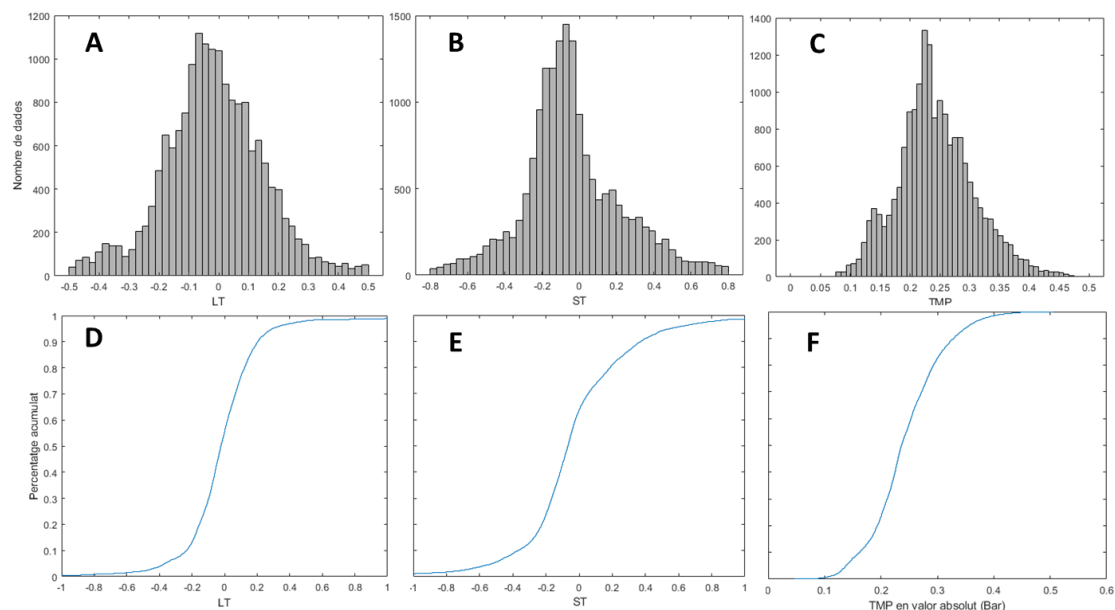


Figura 12 Distribució dels rangs de LT, ST i TMP. A: histograma LT; B: histograma ST; C: histograma TMP, D:diagrama d'acumulació LT, E:diagrama d'acumulació ST, F:diagrama d'acumulació TMP

A partir de les distribucions s'han seleccionat les classes amb 100 o més valors per diferenciar els valors normals de treball dels atípics en les variables de treball. Les classes amb menys de 100 valors s'han considerat atípiques. La resta s'han dividit per crear els rangs de treball. Els extrems dels rangs de treball corresponen a les dades més allunyades de la mitjana. Finalment s'ha calculat el percentatge de dades que queden dins el rang. A causa de la seva variabilitat la variable SR presenta només al voltant del 70% de les dades dins el rang (Taula 4).

Taula 4 Rangs escollits pels 5 paràmetres de seguiment

VARIABLE	NOMBRE DE CICLES ANALITZATS	RANG ESCOLLIT	% DE DADES DINS EL RANG
SR amb $LT > 0$	7966	[-4, 4]	73.26
SR amb $LT \leq 0$	9961	[-1, 3]	68.31
LT	18010	[-0.3, 0.3]	89.56
ST	18010	[-0.4, 0.4]	82.4
TMP	18010	[-0.35, -0.15]	78.36

4.3. DETERMINACIÓ DELS RANGS EN ELS SISTEMES DE CONTROL

En aquest apartat es descriu la distribució dels rangs de les variables de control i variables de sortida en els dos sistemes d'aeració, i es defineix la resposta a partir dels rangs d'entrada.

4.3.1. CONTROL AMB LÒGICA BINÀRIA (SmartAirMBR®)

El rang de treball de la variable de control (SR) s'ha dividit en 6 rangs principals que donen resposta a cada una de les condicions operacionals (Taula 5). Aquests rangs, per la seva part, s'han dividit en 10 sub-rangs d'interval equidistants que esmorteixen la resposta escalonada que es produiria amb només 6 rangs d'entrada.

El rang de treball per la variable de resposta (percentatge d'aeració) s'ha establert entre -8% com a màxima variació d'estalvi i +4% com a màxima variació de despesa. Seguidament, s'ha distribuït equitativament aquestes variacions en els rangs definits per SR (Taula 5).

Taula 5 Rangs de resposta del sistema basat en lògica binària

CONDICIÓ LT ST	RELACIÓ LT ST	RANG SR	RANGS DE MODIFICACIÓ DE L'AERACIÓ (%)
LT > 0 ST > 0	ST > LT	[1, 4]	[-8, -2]
	ST < LT	[0, 1]	[-2, 0]
LT > 0 ST < 0	-	[-4, 0]	[0, 2]
LT < 0 ST > 0	-	[-1, 0]	[-3, -1]
LT < 0 ST < 0	ST > LT	[1, 3]	[-1, 0]
	ST < LT	[0, 1]	[0, 4]

4.3.2. CONTROL AMB LòGICA DIFUSA (FUZZY LOGIC)

Els rangs de treball de les variables d'entrada s'han dividit en 5 categories (*fuzzy sets*) entre *molt baix* i *molt alt*. Les funcions de pertinença per LT (Figura 13A), ST (Figura 13B) i TMP (Figura 13C) estan definides amb dues geometries. Les funcions centrals estan definides per funcions triangulars, mentre que les funcions als extrems estan definides funcions trapezoidals que abasten tots els valors fora dels rangs de treball establerts.

La variable de sortida s'ha dividit en 8 *fuzzy sets* entre *màxim estalvi* i *despesa màxima*. El rang de percentatge de modificació de l'aeració correspon al mateix que el sistema basat en lògica binària, de -8% a +4% (Figura 13 D).

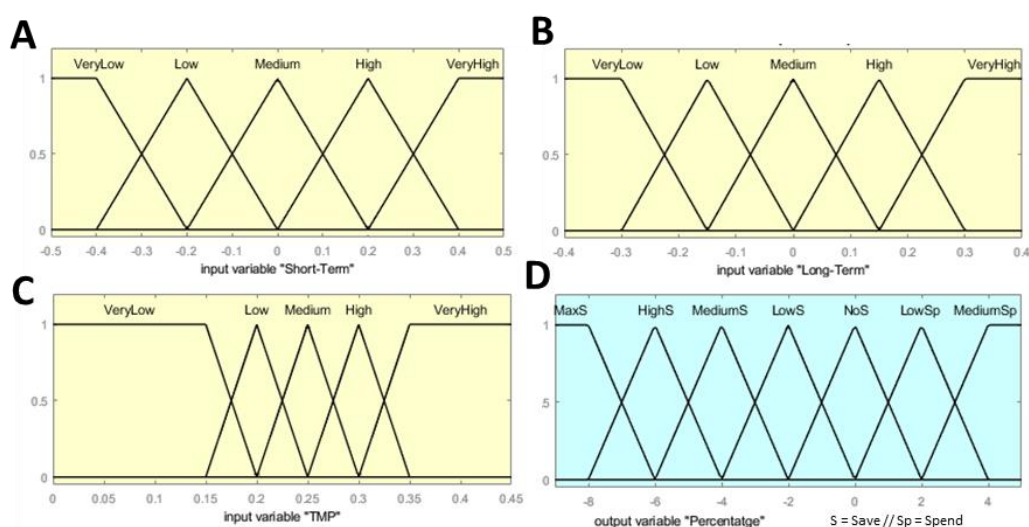


Figura 13 Funcions de pertinença de les variables d'entrada ST (A), LT (B), TMP (C) i de la variable de sortida percentatge de resposta (D)

La resposta del cabal d'aeració s'ha generat a partir de normes heurístiques que relacionen les categories de les variables d'entrada amb les de sortida. Aquestes normes determinen que quan la permeabilitat augmenta (disminueix la TMP i augmenta LT i ST augmenten) augmenta el potencial d'estalvi d'aeració, i quan la permeabilitat disminueix, disminueix el potencial d'estalvi (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

Taula 6 Fuzzificació de les variables d'entrada i sortida per la optimització d'aeració

CATEGORIA	ST (LMH·bar ⁻¹ ·min ⁻¹)	LT (LMH·bar ⁻¹ ·min ⁻¹)	TMP (bar)	POTENCIAL D'ESTALVI
Molt Baix	≥ 0.2	≥ 0.15	<0.2	Màxim
Baix	0.4 , 0	0.3 , 0	0.15 , 0.25	Alt
Mitjà	0.2 , -0.2	0.15 , -0.15	0.2 , 0.3	Baix
Alt	0 , -0.4	0 , -0.3	0.25 , 0.35	Zero
Molt alt	≤ -0.2	≤ -0.15	>0.3	Despesa

La relació entre les variables d'entrada i la de sortida s'ha comprovat observant la resposta de percentatge de modificació entre la TMP i les tendències de la permeabilitat (ST i LT). Treballant a TMP molt baixes i ST molt alt es proposa el màxim d'estalvi (Figura 14A). La mateixa relació s'observa entre la TMP i LT (Figura 14B).

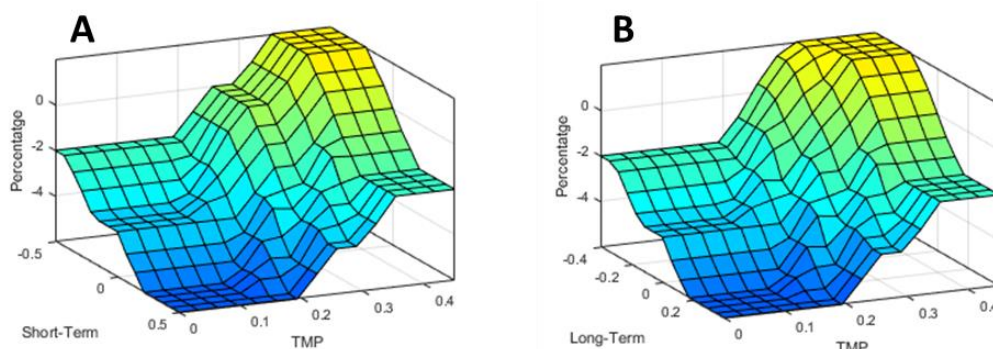


Figura 14 Resposta d'aeració segons les regles Fuzzy; A: ST-TMP-reducció aire; B: LT-TMP-reducció aire

4.4. RESPOSTA DELS SISTEMES D'AJUT A LA DECISIÓ

La Figura 15 mostra l'evolució de la TMP en el procés de filtració durant els 30 dies analitzats, i compara les respostes proposades pels SADS basats en lògica difusa i lògica binària tant en la configuració horària com en la configuració diària.

A nivell horari, el sistema de control difús presenta una resposta en el canvi d'aeració menys agressiva, genera respostes menys escalonades, i evita els pics que es produeixen en la lògica binària quan hi ha canvis bruscos en la tendència de la permeabilitat (Figura 15 C).

A més, el sistema de control basat en lògica difusa s'ajusta molt més a les condicions de la planta pilot ja que incorpora la TMP com a variable d'entrada discriminatòria. Durant les etapes en que es presenta una TMP major (els dies 10 a 20), la resposta de sistema de control fuzzy proposa un augment en l'aeració per tal d'evitar l'embrutiment excessiu de les membranes. Mentre que, després del rentat (dies 20 a 30), el sistema d'ajut a la decisió detecta la millora de la permeabilitat i proposa un estalvi major que el sistema basat en lògica binària (Figura 15B).

Si es compara aquesta resposta amb la del sistema de control basat en lògica binària, es pot veure que, després del rentat, inicialment proposa un estalvi semblant al de la lògica difusa (dies 21 a 23), però després, degut a que el durant 4 dies la permeabilitat es manté relativament constant, la ST s'estabilitza, es disminueix la consigna d'estalvi i es proposa menys estalvi que en la lògica difusa (Figura 15 B).

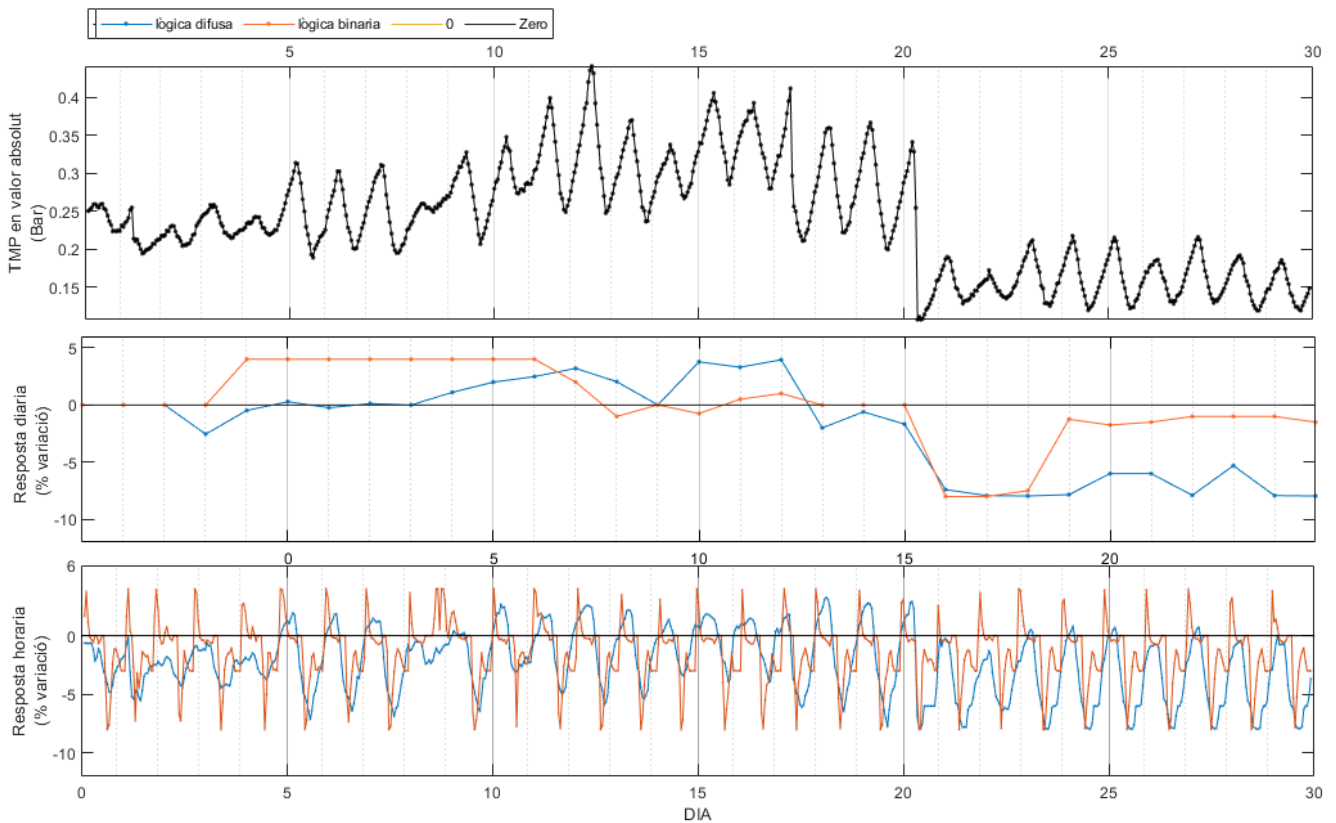


Figura 15 Evolució del paràmetre de seguiment (TMP (A)) i les respostes d'aeració: resposta diària de l'aeració (B) i resposta horària de l'aeració (C) durant el període de treball de 30 dies.

4.4.1. ESTALVI D'AIRE

Per conèixer l'estalvi d'aire total generat durant el període de treball, s'ha calculat la despesa d'aeració acumulada. Per tal d'evitar una reducció dràstica de l'aeració, s'han establert límits en el cabal d'aeració: el cabal nominal ($1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) s'ha definit com a cabal de treball màxim i com a mínim el 50% del cabal nominal ($0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$).

Treballant amb aeració continua amb al 100% del cabal nominal, la planta consumeix 768 Nm^3 d'aire en 30 dies. Fent correccions diàries, amb el sistema de control basat en lògica binària consumiria $688,98 \text{ Nm}^3$, el que suposa un 10,29% d'aire estalviat. El sistema de control basat en lògica difusa consumiria $641,54 \text{ Nm}^3$ l'equivalent a un 16,46% d'estalvi d'aire. Per tant, el SAD amb lògica difusa aconsegueix un 6,17% més d'estalvi que el SAD amb lògica binària (Figura 16A).

Fent correccions horàries, amb el sistema de control basat en lògica binària, la planta pilot consumiria $499,5 \text{ Nm}^3$ el que suposaria un 34,36% del cabal d'aire consumit. El sistema de control per lògica difusa en correccions horàries consumiria $463,5 \text{ Nm}^3$, el que suposaria un estalvi de 39,09%. Per tant en correccions horàries, el SAD basat en lògica difusa aconsegueix un 4,73 % més d'estalvi que el sistema basat en lògica binària (Figura 16 B).

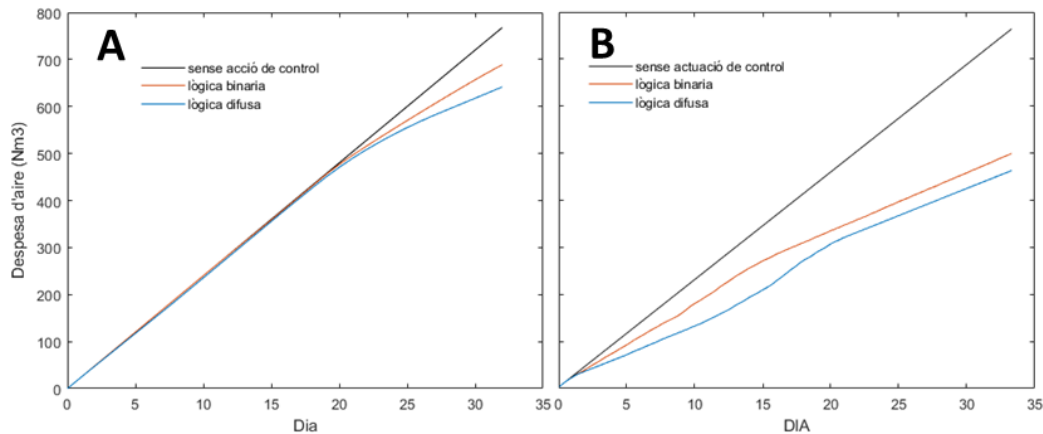


Figura 16 Estalvi d'aire acumulat en el sistema de control basat en respostes diàries (A) i basat en respostes horàries (B)

El sistema de control basat en lògica binària presenta un estalvi energètic més gran que el sistema basat en lògica difusa tant a nivell horari com diari ja que presenta una resposta més ajustada a les condicions de funcionament.

Per altre banda, la diferència d'estalvi que es presenta entre els sistemes d'ajut a la decisió basats en dies i hores es deu als diferents nivells de la gestió de l'embrutiment. El sistema de control basat en dies només té en compte les tendències en canvis de permeabilitat que s'estenen en varis dies consecutius, i no dona resposta a la fluctuació de la permeabilitat que es presenta dins un mateix dia. El sistema basat en control horari, en canvi, sí que dona resposta a les fluctuacions que experimenta la permeabilitat al llarg del dia, i permet al sistema estalviar aire, fins i tot, en processos que presenten tendències d'embrutiment a llarg termini.

4.4.2. CONSUM ENERGÈTIC I ESTALVI ECONÒMIC

L'estalvi d'aire de treball provoca un estalvi energètic i un estalvi econòmic en el sistema.

Quan es treballa a cabal nominal, el consum de la bufant d'aeració de les membranes ha estat determinat per el fabricant a $130 \text{ W}\cdot\text{h}^{-1}$ (Nitto Kohky, n.d.), el que ha suposat una despesa energètica de 99,45kW en els 30 dies d'operació. Per conèixer la despesa econòmica per filtrar els $2,37 \text{ m}^3$ de permeat produïts els 30 dies d'operació, s'ha assumit un preu mitjà per kW de $0,15\text{€}\cdot\text{kW}^{-1}$, es genera un cost econòmic derivat de l'aeració de 6,28 € per m^3 d'aigua tractada.

Fent correccions diàries, el sistema de control basat en lògica binària té una despesa energètica de 89,57kW, el que suposa un preu per m^3 d'aigua tractada de 5,65€. El sistema de control basat en lògica difusa, en canvi, té una despesa més baixa de 83,04 kW, i redueix el cost econòmic a 5,26 € per m^3 (Figura 17).

Fent correccions horàries, el sistema de control basat en lògica binària, redueix la despesa energètica a 64,9kW durant els 30 dies d'operació, el que suposa un preu per m^3 de 4,01€. Finalment, el màxim estalvi es produeix realitzant correccions horàries amb el sistema basat en lògica binària, que té una despesa de 60,25kW, i un preu per m^3 d'aigua tractada de 3,8€ (Figura 17).

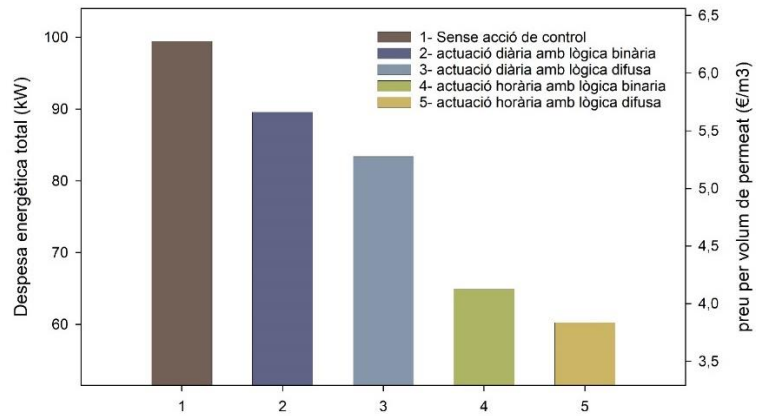


Figura 17 Despesa energètica i cost per volum d'aigua tractada

Aquesta reducció del cost per volum de permeat manifesta el potencial d'estalvi dels sistemes d'ajut a la decisió descrits en aquest treball. Reafirma, també, la importància de tots els passos del disseny que han permès generar la resposta acurada per aquest el sistema, i mostra les possibilitats d'estalvi en els costos operacionals de les depuradores a gran escala.

5. CRITERIS D'ÈTICA I SOSTENIBILITAT

Aquest treball presenta una gran càrrega sostenible, ja que l'objectiu principal és fer més econòmic el sistema MBR. Aquest sistema genera una qualitat més alta en els efluent de l'aigua industrial tractada que els sistemes convencionals. Per tant aquest treball pot potenciar la instal·lació d'aquests sistemes en plantes depuradores que treballen en sistemes CAS, millorant les condicions dels ecosistemes on aquesta aigua és alliberada.

Durant el desenvolupament del procés experimental, s'ha intentat reduir l'ús de reactius i material d'un sol ús, però degut a que s'ha treballat amb material biològic perillós, la prioritat sempre ha estat la seguretat per sobre la sostenibilitat.

Finalment, en aquest estudi s'han citat les fonts de les quals s'ha extret la informació, ja que és molt important a nivell ètic reconèixer la feina feta per altres investigadors, en cas contrari estaria considerat plagi.

6. CONCLUSIONS

Decision support systems (DSS) cannot be applied directly to another plant. It is necessary to determinate the plant normal operational ranges to adjust the DSS to get a better response. This approach can be done with statistical analysis of the data provided during any working period.

The use of fuzzy logic in air-scour control systems improved the savings up to a 6% over the binary control system and generated softer and more accurate response than the binary logic air scour control system approach. Overall, the use of fuzzy logic control systems is the recommended approach due to the higher energy savings and its easier adaptation into other MBR-driven WWTP.

Regarding the hourly and daily strategies, it has been shown that in the pilot plant environment, the hourly approach on the air scour systems can reduce the energy expenditure up to 2.5 times more than the daily approach. Therefore, we can conclude that the use of decision support systems with hourly-level responses is appropriate in small sewage treatment plants, as due to the small amount of volume treated, tend to show more oscillations in a day. On the other hand, large sewage treatment plants have very little in-day oscillation, and long-term fouling processes are the ones that most influence the state of the membranes, and probably a daily response would be most appropriate. However, those results present the opportunity to develop, in future studies, an hourly fuzzy control system in closed loop regime, with the aim of determining the system response in different sized treatment plants when applying the proposed changes. This proposal would allow to know if in an hourly closed-loop system can maintain the same levels of savings as those obtained in the simulation or, on the contrary, the relatively short time changes could present a negative effect on the permeability of the membranes and reduce the saving potential.

7. BIBLIOGRAFIA

- Abbott, B.W., Bishop, K., Zarnetske, J.P., Minaudo, C., Chapin, F.S., Krause, S., Hannah, D.M., Conner, L., Ellison, D., Godsey, S.E., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R.J., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sara Sayedi, S., Ursache, O., Chapin, M., Henderson, K.D., Pinay, G., 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nat. Geosci.* 12, 533–540. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>
- Akhondi, E., Zamani, F., Tng, K.H., Leslie, G., Krantz, W.B., Fane, A.G., Chew, J.W., 2017. The performance and fouling control of submerged hollow fiber (HF) systems: A review. *Appl. Sci.* <https://doi.org/10.3390/app7080765>
- APHA, 1999. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Public Health* 51, 940–940. <https://doi.org/10.2105/AJPH.51.6.940-a>
- Collivignarelli, M.C., Abbà, A., Miino, M.C., Torretta, V., 2019. What advanced treatments can be used to minimize the production of sewage sludge in WWTPs? *Appl. Sci.* <https://doi.org/10.3390/app9132650>
- Cooley, S.W., Ryan, J.C., Smith, L.C., 2021. Human alteration of global surface water storage variability. *Nature* 591, 78–81. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03262-3>
- Cui, Z.F., Chang, S., Fane, A.G., 2003. The use of gas bubbling to enhance membrane processes. *J. Memb. Sci.* [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(03\)00246-1](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(03)00246-1)
- Fane, A., 2002. Membrane bioreactors: Design and operational options. *Filtr. Sep.* 39, 26–29. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(02\)80168-9](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(02)80168-9)
- Ferrero, G., Monclús, H., Buttiglieri, G., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., 2011a. Automatic control system for energy optimization in membrane bioreactors. *Desalination* 268, 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.024>
- Ferrero, G., Monclús, H., Buttiglieri, G., Gabarron, S., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., 2011b. Development of a control algorithm for air-scour reduction in membrane bioreactors for wastewater treatment. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86, 784–789. <https://doi.org/10.1002/jctb.2587>
- Judd, S., Judd, C., 2008. *The MBR book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, 2nd ed, Elsevier.
- Le Clech, P., Jefferson, B., Chang, I.S., Judd, S.J., 2003. Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor. *J. Memb. Sci.* 227, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.07.021>
- Li, X., Li, J., 2015. Critical Flux, in: Drioli, E., Giorno, L. (Eds.), *Encyclopedia of Membranes*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–3. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40872-4_2193-1

- Lopetegui, J., Trouvé, 2004. Criterios técnico-económicos para la implantación de la tecnología de bioreactores de membrana. YACUTEC 62–69.
- Marti, E., Monclús, H., Jofre, J., Rodríguez-Roda, I., Comas, J., Balcázar, J.L., 2011. Removal of microbial indicators from municipal wastewater by a membrane bioreactor (MBR). *Bioresour. Technol.* 102, 5004–5009. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.068>
- Martínez, M., Sánchez-Marrè, M., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., 2006. Case-based reasoning, a promising tool to face solids separation problems in the activated sludge process. *Water Sci. Technol.* 53, 209–216. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.023>
- Metcalf & Eddy Inc., Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D., 1980. Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse. *Adv. Water Resour.* 3, 146. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(80\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(80)90067-6)
- Monclús, H., Dalmau, M., Gabarrón, S., Ferrero, G., Rodríguez-Roda, I., Comas, J., 2015. Full-scale validation of an air scour control system for energy savings in membrane bioreactors. *Water Res.* 79, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.03.032>
- Nitto Kohky, n.d. Blower Model LA-100A & LA-120A [WWW Document]. URL http://www.nitto-kohki.eu/images/stories/products/pumps_and_air_compressors/medo_air_blowers/la_120.pdf (accessed 5.26.21).
- Novák, V., Perfilieva, I., Močkoř, J., 1999. *Mathematical Principles of Fuzzy Logic, Mathematical Principles of Fuzzy Logic.* Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5217-8>
- Raya, A.M., 2002. *Introducción al análisis de datos difusos.* Universidad de Málaga, Departamento de Estadística y Econometría.
- Rodríguez-Roda, I., Comas, J., Poch, M., Ferrero, G., Sipma, J., Clara, P., Canals, J., Rovira, S., Monclús, H., 2011. Procedimiento automatizado de control en tiempo real de un bioreactor de membranas y su sistema de control correspondiente. ES 2 333 837 B1.
- Rosenberger, S., Kraume, M., 2002. Filterability of activated sludge in membrane bioreactors. *Desalination* 146, 373–379. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00515-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00515-5)
- Scholz, M., 2005. Review of recent trends in Capillary Suction Time (CST) dewaterability testing research. *Ind. Eng. Chem. Res.* <https://doi.org/10.1021/ie058011u>
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Inf. Control* 8, 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

8. ANNEX: CODI DE MATLAB PER EL TRACTAMENT DE DADES

CÀLCUL CICLES DE FILTRACIÓ

```
cicle = 1;
comptador = 0;

for i = 5:(height(D))
    if ((D.TMP(i) >= 0) || D.QPerm(i) < (ConsignaCabal)* (1-ErrorCabal))
        comptador = LagInici;
    else
        if (comptador > 0)
            comptador = comptador - 1;
            if (comptador == 0)
                cicle = cicle + 1;
            else
                continue;
            end
        end
        D.Cicle(i) = cicle;
        D(D.Cicle == 0, :) = []; % eliminar valors fora de cicle
    end
end
```

CÀLCUL MITJÀ DE VALORS DELS CICLES I CÀLCUL FOULING RATES

```
""""
Càlcul de mitjanes dels valors de tot el cicle per tenir un valor per cicle de filtració
""""

M = table;
M = grpstats (D, 'Cicle'); % crear mitjanes de D agrupant per cicles

M.mean_Day = fix(M.mean_Day); % posar els dies com a enter evitar decimals a canvi de dia

for i = 1:max(D.Cicle) % Calcular fouling rates
    group = D.Cicle == i;
    dia_frates = polyfit(D.TMin(group),(D.ATMP(group)*1000),1);
    M.FRates(i) = dia_frates(1);
end
```

CALCULAR DADES FORA DE CICLE

```
""""
esborrar tots els cicles definits que tinguin un numero de dades per cicle fora del rang de valor definit
""""

M.Borrar = M.GroupCount < ValorMinCicle | ...
           M.GroupCount > ValorMaxCicle;

M(M.Borrar == 1, :) = [];
M.Borrar = [];
```