

SISTEMA D'AJUT A LA DECISIÓ PER LA SELECCIÓ DE SISTEMES DE SANEJAMENT

Alba Castillo Llorens

Per citar o enllaçar aquest document:

Para citar o enlazar este documento:

Use this url to cite or link to this publication:

<http://hdl.handle.net/10803/402947>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'exploació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



TESI DOCTORAL

**Sistema d'ajut a la decisió per la
selecció de sistemes de
sanejament**

Alba Castillo Llorens

2017



TESI DOCTORAL

**Sistema d'ajut a la decisió per la
selecció de sistemes de
sanejament**

Alba Castillo Llorens

2017

PROGRAMA DE DOCTORAT EN CIÈNCIA I TECNOLOGIA DE
L'AIGUA

Director: Manel Poch Espallargas

Memòria presentada per optar al títol de doctora per la Universitat de Girona

Certificat de direcció de tesi

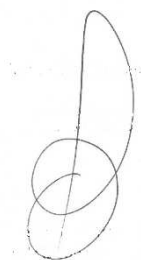
MANEL POCH ESPALLARGAS

Catedràtic del Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària de la Universitat de Girona.

DECLARA:

Que aquest treball titulat "Sistema d'ajut a la decisió per la selecció de sistemes de sanejament" que presenta la llicenciada en Ciències Ambientals Alba Castillo Llorens, per a l'obtenció del títol de Doctora, ha estat realitzat sota la meua direcció i que compleix els requeriments per poder optar a la Menció Internacional.

I, perquè així consti i tingui els efectes oportuns, signo aquest document.



Dr. Manel Poch Espallargas
Director de la Tesi



Alba Castillo Llorens
Doctoranda

Girona, 30 de Gener 2017

Aquesta tesi es desenvolupa en el marc del Doctorat Industrial 2013-DI-038 i ha estat cofinançada pel govern Català a través de l'AGAUR i per l'empresa AQUATEC, Proyectos para el sector del agua SAU (empresa del grup SUEZ) . A més, l'estada a la Universitat de Cranfield ha estat cofinançada també pel programa COST Action Water2020 (COST-STSM-ES1202-010216-075844).

Aquesta tesi s'ha desenvolupat de forma parcial entre l'empresa AQUATEC, Proyectos para el sector del agua SAU (empresa del grup SUEZ) (<http://www.suez.es/>), i el Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (LEQUIA, <http://lequia.udg.cat>) de la Universitat de Girona, que té el reconeixement de grup de recerca del Govern Català amb el codi 2014-SGR-1168. A més, aquesta tesi ha comptat amb el suport del director del departament de Desarrollo de Negocio, Vicente Gómez Martínez i de la jefa del departament d'Aigües Urbanes, Emma Parpal Llorens.

***“Solo podrás recuperar el
sosiego y la concentración y vivir
plenamente la vida si te detienes.***

***Al estar sentado en quietud,
detener las actividades del cuerpo
y la mente y dejar que se haga el
silencio en ti, tu estabilidad y
concentración aumentan, y tu
mente experimenta una gran
claridad. Solo así podrás ser
consciente de lo que está
ocurriendo dentro y fuera de ti”***

Thich Nhat Hanh, Silencio 2015

Al meu company de viatge, a la meva família i als meus amics

Agraïments

Com puc expressar tota la gratitud que senc en només unes paraules? Aquí va una mostra:

Vull donar les gràcies a totes les persones i situacions que han estat presents a la meva vida. Sense tot aquest conjunt aquesta tesi no seria com és.

Per començar, vull agrair als que senc més prop, als que han fet possible que jo sigui com sóc i que lluite cada dia per aconseguir els meus somnis: la meva parella, Sergio, por todo el apoyo incondicional en cada momento, indescriptible y por compartir la aventura de la vida conmigo. Esta ha sido una gran etapa, muy intensa, gracias por constuirla conmigo, a nuestra manera. A ma mare, mon pare i al meu germà, per proporcionar-me les eines per viure i gaudir al màxim de cada moment, imprescindible per la nostra felicitat, gràcies. A la meva avia Isabel, per transmetre'm que el bon humor només depén d'un mateix.

Estic molt agraïda a Manel P. per haver-me donat l'oportunitat de dur a terme aquest projecte i per haver confiat en mi en cada etapa d'aquesta tesi. Cada reunió amb tu ha estat revitalitzant, sempre he sortit veient les coses molt més clares, gràcies per fer-ho tot més fàcil del que semblava, i per la teva comprensió i recolzament. A Quim, ha estat un plaer treballar amb tu, sempre amb un somriure.

Els "desayunos" amb les companyes d'Aquatec: Marta, Rocío, Viviane, Alicia, Cèlia (i Carles quan venia), han estat imprescindibles per a la bona marxa de la tesi. La dosi necessària de risses d'un dia condensada en 30 minuts, muchas gracias chicas!

També vull agrair als meus responsables a l'empresa, Vicente G. i Emma P., per la vostra comprensió i per donar-me la llibertat necessària per desenvolupar aquesta tesi. A Xavi B., Pasqual V., Sadurní i Miquel B. per compartir el vostre coneixement.

Estic molt contenta i agraïda d'haver compartit despatx i dinars amb els companys de Lequia, Serni, Teresa, Montse, Elena, Julian, Sara, Ramiro, Narcís, Antonia, Ana... La veritat és que estic molt contenta d'haver tingut l'oportunitat de treballar amb l'equip del Lequia, és un grup molt competent i que transmet la motivació pel seu treball. Adria R. i Manel G., moltes gràcies per la vostra ajuda, ha estat tot un plaer treballar amb vosaltres.

A Gürkan i Peam, de la Universitat tècnica de Dinamarca, it has been hard but I have learnt a lot, thank you for your help.

A l'Ana Soares i als companys de la Universitat de Cranfield, sobretot a Mar, Carlos, Lola i David, muchas gracias por haberme acogido y tratado como una más de la familia.

Encara que ell no em coneix, almenys en persona, també vull donar-li les gràcies a qui em va informar sobre l'existència dels doctorats industrials, gracias Jose Luis C por haber contestado con información tan relevante aquel correo de alguien desconocido.

Gràcies a la secció de Vilafamés a Barcelona, Àngela, Puchi i Fabian, el vostre suport ha estat imprescindible per realitzar aquest esforç, gràcies per aquesta relació sincera i plena de complicitat.

Als meus amics del poble que, encara que en aquest temps no he pogut gaudir d'ells tant com hagués volgut, hem sabut trobar molt bons moments, mil gràcies per ser com sou, cadascun únic i imprescindible per formar aquest meravellós grup: Isa, Marta, Carmen, Sara T., Lledó D., Sara T., Nuria, Reies, Marta C., Marta B., Lledó, Cova, Alejandro, Puchi, Fran, Joan, Sepe, Ferran, Pablo, Néstor, Guido, Palau, Chema, Juven, Jose, Paco i Martí.

Als meus companys d'estudis, que sempre estan ahí: Mónica M., Isabel B., Fran B., Vero R. i Sara G., gràcies per tot el compartit en les diferents etapes, sou uns cracks.

I a tots els que han participat d'alguna manera en aquesta tesi, GRÀCIES!

I gràcies a la vida, per totes aquestes experiències i oportunitats

Estructura de la Tesi

Aquesta tesi es presenta com a compendi de tres articles científics. En el moment de presentació de la tesi aquests articles estan publicats, com es detalla a continuació.

Abans dels articles científics s'inclou una introducció (Capítol 1) on es descriu la complexitat del procés de presa de decisió en la selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals. Així com el resultat d'una exhaustiva revisió bibliogràfica per analitzar les metodologies desenvolupades fins ara per a la sistematització del procés de presa de decisions, identificant els reptes a aconseguir amb aquest treball. A continuació, al Capítol 2 s'inclouen els objectius d'aquesta tesi. Els Materials i Mètodes emprats estan inclosos al Capítol 3, corresponent als articles científics, així com els Resultats i Discussió dels mateixos. Seguidament, a la Discussió (Capítol 4) es discuteixen els principals resultats de la tesi. Finalment, es detallen les Conclusions (Capítol 5) del treball desenvolupat en aquesta tesi i la Bibliografia utilitzada (Capítol 6).

Les publicacions incloses en aquesta tesi son:

Castillo, A., Porro, J., Garrido-Baserba, M., Rosso, D., Renzi, D., Fatone, F., Gómez, V., Comas, J. and Poch, M., 2016a. Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection 184, 1–10. *J. Environ. Manag.* doi:10.1016/j.jenvman.2016.09.087 (factor d'impacte 3.131; primer quartil).

Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., Sin, G., 2016b. An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environ. Model. Softw.* 84, 177–192. doi:10.1016/j.envsoft.2016.06.019 (factor d'impacte 4.207; primer quartil).

Castillo, A., Vall, P., Garrido-Baserba, M., Comas, J., Poch, M., 2017. Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: a multi-criteria assessment. *J. Clean. Prod.*, 143, 180–190. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.132 (factor d'impacte 4.959; primer quartil).

Contribucions científiques addicionals relacionades amb aquesta tesi

Castillo, A., Vall, P., Garrido-Baserba, M., Comas, J., Poch, M., 2015. *Information Technology application for the selection of industrial wastewater treatment technologies: an integrated approach*. Contribució oral. En els "Proceedings" de "New Developments in IT & Water Conference". IWC (International Water Conferences). Rotterdam, Holanda, 2015.

A. Castillo, V. Gómez, J. Porro, M. Garrido-Baserba, J. Comas and M. Poch. *An EDSS for wastewater treatment selection successfully bridged the gap from science to market*. Contribució oral (per M. Garrido-Baserba) al "12th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies". Hong Kong, China, 2015.

Garrido-Baserba, M., Reif, R., Molinos-Senante, M., Larrea, L., **Castillo, A.**, Verdaguer, M., Poch, M., 2016. Application of a multi-criteria decision model to select of design choices for WWTPs. *Clean Technol. Environ. Policy* 18, 1–13.

A. Castillo, J. Comas, M. Garrido, Francesc Hernández-Sancho, M. Poch. *A knowledge-based system for process treatment selection in the 3R wastewater management paradigm*. Contribució amb Pòster. En els "Proceedings" de "EcoSTP16. 3rd IWA Specialized International Conference on Ecotechnologies for Wastewater Treatment". Cambridge, UK, 2016.

Alba Castillo, Joaquim Comas, Manel Garrido-Baserba, Francesc Hernández-Sancho, Ulf Jeppsson, Ignasi Rodríguez-Roda i Manel Poch. *Environmental decision support Systems*. Chapter 5.1. Cost Action. *Pendent de publicació*

Actualment s'està treballant per acabar de desenvolupar el EDSS per al paradigma 3R i s'està preparant l'article per la publicació d'aquest treball.

A més, Alba Castillo és co-autora del capítol del llibre relacionat amb els sistemes d'ajuda a la decisió de la Cost Action. S'espera la publicació d'aquest llibre per a Març del 2017.

La formació d'Alba Castillo s'ha completat mitjançant dues estades durant el període de desenvolupament de la tesi. La primera estada, de 6 setmanes, va ser a la Universitat tècnica de Dinamarca (DTU) on es va treballar en la integració de l'optimitzador desenvolupat a DTU amb Novedar_EDSS. La segona estada, de 7 setmanes, va tenir lloc al "Cranfield Water Science Institute", de la Universitat de Cranfield, UK on es va treballar en l'adquisició de coneixement sobre tecnologies de recuperació de recursos en el tractament d'aigües residuals.

Finalment, Alba Castillo va co-dirigir 3 treballs final de grau relacionats amb l'estudi de la complexitat del tractament d'aigües residuals de diferents sectors industrials, per tal de començar a establir les directrius per al desenvolupament de sistemes d'ajuda a la decisió per al tractament d'efluents industrials. Aquests treballs són: (i) *Generació i tractament d'efluents de la indústria paperera*. Francisca González, 2016; (ii) *Anàlisi dels efluents i tractaments en el sector del petroli i gas*. Marc Nogué, 2016. (iii) *Tractament d'efluents farmacèutics amb tècniques d'oxidació avançada*. Xavier Domènech, 2016.

Índex General

Agraïments.....	IX
Estructura de la Tesi	XI
Contribucions científiques addicionals relacionades amb aquesta tesi.....	XII
Índex de Taules.....	XVII
Índex de Figures.....	XVIII
Llista d'Abreviatures.....	XIX
RESUM.....	XXIII
RESUMEN	XXV
SUMMARY.....	XXVII
1. INTRODUCCIÓ GENERAL.....	1
1.1 Què és una EDAR?	1
1.2 Com es dissenya una EDAR?.....	1
1.3 Com es fa el procés de decisió per la selecció d'alternatives?.....	2
1.3.1 Informació de partida.....	5
1.3.2 <i>Brainstorming 1</i>	5
1.3.3 Tecnologies aplicables	8
1.3.4 Càlculs	8
1.3.5 <i>Brainstorming 2</i>	8
1.3.6 Selecció de la tecnologia	9
1.4 Principals punts crítics en el problema de la selecció d'alternatives	9
1.5 Com millorar el procés de selecció?.....	11
1.6 Revisió de metodologies	15
1.6.1 Mètodes d'intel·ligència artificial	16
1.6.2 Sistemes d'ajuda a la decisió.....	18
1.6.2.1 Sistemes d'ajuda a la decisió per generar alternatives.....	19
1.6.2.2 Sistemes d'ajuda a la decisió mitjançant anàlisi multi-criteri	20
1.6.2.3 Sistemes d'ajuda a la decisió que integren les dues fases: generació d'alternatives i anàlisi multi-criteri	25
1.6.3 Programació matemàtica (optimitzadors).....	29
1.6.3.1 Optimitzadors d'alternatives de tractament.....	29
1.6.3.2 Optimitzadors de disseny.....	30
1.6.4 Models de simulació.....	31
1.6.4.1 Tipus de models de simulació	31
1.6.4.2 Marc de referència per al control d'EDAR	32
1.6.4.3 Altres models.....	33

1.6.5	EDSS combinats amb models matemàtics	33
1.6.5.1	EDSS per generar alternatives amb optimitzadors	34
1.6.5.2	EDSS per fer anàlisi muti-criteri amb optimitzadors	35
1.6.5.3	Tècniques d'intel·ligència artificial amb models "white-box"	35
1.7	Limitacions dels EDSS desenvolupats	42
1.8	Novedar_EDSS	44
1.9	Reptes a aconseguir amb aquesta Tesi	47
2.	OBJECTIUS	49
3.	RESULTATS	53
3.1	Castillo, A., Porro, J., Garrido-Baserba, M., Rosso, D., Renzi, D., Fatone, F., Gómez, V., Comas, J. and Poch, M., 2016a. Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection 184, 1–10. J. Environ. Manag. doi:10.1016/j.jenvman.2016.09.087... 55	
3.2	Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., Sin, G., 2016b. An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. Environ. Model. Softw. 84, 177–192. doi:10.1016/j.envsoft.2016.06.019..... 67	
3.3	Castillo, A., Vall, P., Garrido-Baserba, M., Comas, J., Poch, M., 2017. Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: a multi-criteria assessment. J. Clean. Prod., 143, 180–190. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.132..... 85	
4.	DISCUSSIÓ GENERAL	99
4.1	Adaptació del software al mercat	102
4.2	Avenços en la sistematització del procés de decisió per a la selecció d'alternatives de tractament	111
4.3	Contribucions amb aquesta investigació	120
4.4	Aplicacions potencials del EDSS i possibles limitacions	121
4.5	Perspectives de futur	123
5.	CONCLUSIONS	129
6.	BIBLIOGRAFIA	135

Índex de Taules

Taula 1. Resum de les diferents eines desenvolupades per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals que utilitzen tècniques d'intel·ligència artificial.	37
Taula 2. Resum de les diferents eines desenvolupades per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals que utilitzen programació matemàtica i simuladors i models.	40
Taula 3. Característiques de l'influent i requeriments de l'efluent dels Casos 2, 3, 4 i 5.	104
Taula 4. Criteris i percentatge de pes corresponent seleccionats en cada cas d'estudi.	105
Taula 5. Característiques de l'influent del cas d'estudi aplicat per a la validació de la metodologia integrada.	112
Taula 6. Línies de tractament proposades per a cada escenari amb la metodologia integrada i cost total de cadascuna d'elles (inclou CAPEX i OPEX), tenint en compte les característiques de l'influent de la Taula 5 i les variacions ($\pm 25\%$) en la concentració dels diferents paràmetres de l'influent.	114
Taula 7. Característiques de les aigües a tractar i dels requeriments d'efluent per a cadascun dels casos d'estudi seleccionats per a la validació del EDSS industrial.	117
Taula 8. Criteris i pesos seleccionats per a la puntuació de les alternatives de tractament secundari al EDSS.	118
Taula 9. Treballs i investigadors de la Water_2020 Cost Action entrevistats sobre les tecnologies corresponents.	124

Índex de Figures

Fig. 1. Esquema general per a la presa de decisió en la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals (Elaboració personal).....	4
Fig. 2. Exemple esquema EDAR urbana.	6
Fig. 3. Exemple esquema EDAR industrial.....	7
Fig. 4. Esquema amb eines per a la sistematizació parcial per a la presa de decisió en la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals (Elaboració Personal).....	14
Fig. 5. Esquema de les diferents etapes en la selecció i disseny d'un procés de tractament d'EDAR.....	16
Fig. 6. Esquema de la metodologia aplicada a Novedar_EDSS.	46
Fig. 7. Seqüència d'innovació (Ford et al., 2007).	102
Fig. 8. Esquema del "Valley of Death" (Osawa i Miyazaki, 2006).	102
Fig. 9. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau)..	106
Fig. 10. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau)..	106
Fig. 11. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau).	107
Fig. 12. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau)..	108
Fig. 13. Procés d'adaptació del software a l'usuari per la seva comercialització.	109
Fig. 14. Característiques i diagrama de procés del EDSS per a aigües residuals industrials del sector d'alimentació i begudes.	116
Fig. 15. Diagrama de flux considerat al Novedarplus_EDSS per a la concepció de 3R de les EDAR.	125

Llista d'Abreviatures

AF	de l'anglès "Anaerobic filter"
AHP	de l'anglès "Analytical hierarchy process"
ANP	de l'anglès "Analytic network process"
ASM	de l'anglès "Activated sludge models"
BF	Biofiltres
BNR	de l'anglès "Biological nutrient removal"
BREF	de l'anglès "Best available techniques reference document"
BSM	de l'anglès "Benchmark simulation models"
CAPEX	de l'anglès "Capital expenditure"
Ckb-units	de l'anglès "Compatibility knowledge base"
DAF	de l'anglès "Dissolved air flotation"
DBO	Demanda biològica d'oxigen
DEMATEL	de l'anglès "Decision making trial and evaluation laboratory"
DQO	Demanda química d'oxigen
DRAMA	de l'anglès "Decision rationale management system"
DTU	Universitat tècnica de Dinamarca

DSS	de l'anglès "Decision support system"
EA	de l'anglès "Extended aeration"
EB_FB	de l'anglès "Expanded bed and fluidized bed"
EDAR	Estació depuradora d'aigües residuals
EDSS	de l'anglès "Environmental decision support system"
EEUU	Estats Units
EGSB	de l'anglès "Expanded granular sludge bed"
FAHP	de l'anglès "Fuzzy analytical hierarchy process"
GAMS	de l'anglès "General algebraic modeling software"
GIS	de l'anglès "Geographic information system"
GRA	de l'anglès "Grey relational analysis"
IC	de l'anglès "Internal circulation reactor"
IFAS	de l'anglès "Integrated fixed film activated sludge"
IWA	de l'anglès "International water association"
LCA	de l'anglès "Life cycle analysis"
LCCA	de l'anglès "Life cycle cost analysis"
MAUT	de l'anglès "Multi-attribute utility technique"

MBR	de l'anglès "Membrane bioreactor"
MBBR	de l'anglès "Moving bed biofilm reactor"
MDS	de l'anglès "Multidimensional scaling"
MI(N)P	de l'anglès "Mixed integer non-linear programming"
MLA	de l'anglès "Multi-level amalgamation"
MLE	de l'anglès "Modified Ludzack-Ettinger"
NH₄-N	Amoni
NSGA-II	de l'anglès "Non-dominated sorting genetic algorithm"
NT	Nitrogen total
NKT	Nitrogen Kjeldahl total
OPEX	de l'anglès "Operational expenditure"
OxD	de l'anglès "Oxidation ditch"
PC	de l'anglès "Primary clarifier"
PROMETHEE	de l'anglès "Preference ranking organization method for enrichment evaluation"
PT	Fòsfor total
PWM	de l'anglès "Plant wide model"

Q	Cabal
SBR	Reactors seqüencials per càrregues
SF	de l'anglès "Step feed"
Skb-units	de l'anglès "Specification knowledge base"
SST	Sòlids suspesos totals
TAC	de l'anglès "Total annualized cost"
TF	de l'anglès "Trickling filters"
TOPSIS	de l'anglès "Technique for order preference by similarity to ideal solutions"
UASB	Reactor de flux suspès
UV	Radiació ultraviolada

RESUM

La selecció del tractament més adequat per a les aigües residuals implica un procés de presa de decisió complex. Aquesta complexitat és deguda a la necessitat de considerar diferents fonts de coneixement i diverses variables per tal d'aconseguir els objectius necessaris en cada cas. És per això que en els darrers anys s'ha fet un esforç en la sistematització del procés de presa de decisió. El desenvolupament d'eines per ajudar a la selecció d'alternatives de tractament té com objectiu facilitar-ne la tasca i millorar-ne els resultats. En aquest sentit, els sistemes d'ajuda a la decisió han demostrat ser eines amb capacitat de fer front a aquest repte, ja que poden gestionar elevats volums de dades integrant bases de dades i models, incloent coneixement expert de diferents fonts i tot en una interfície intuïtiva. En concret, Novedar_EDSS (desenvolupat per Garrido-Baserba (2013) a la UdG) representa un pas endavant, fent front a moltes de les limitacions que presenten les eines desenvolupades fins ara.

L'objectiu d'aquesta tesi és contribuir a la millora del procés de presa de decisió en la selecció d'alternatives de tractament d'aigües. Per això, es treballa en el desenvolupament de Novedar_EDSS per ampliar la seva aplicació i per continuar fent front a les limitacions identificades en els EDSS actuals.

Es per això, que el primer objectiu d'aquesta tesi és el pas previ abans d'estendre l'ús d'un programa: la seva validació. En aquest sentit es va dur a terme la validació de l'eina comparant la seva resposta amb els resultats obtinguts en diferents casos reals. Els resultats mostren com Novedar_EDSS proporciona respostes molt similars a les dels estudis d'alternatives desenvolupats pels experts en cada cas. De manera que aquest EDSS proporciona una base fiable per a l'ajuda a la decisió en la selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals.

A més, es va treballar amb els encarregats de la presa de decisió a l'empresa per tal d'adaptar Novedar_EDSS a l'usuari final. De manera que es van definir les noves funcionalitats del programa per millorar l'experiència de l'usuari a l'utilitzar el programa, augmentant-ne la probabilitat d'èxit de la seva aplicació.

D'altra banda, per tal d'avançar en la sistematització i agilització del procés de presa de decisió, es va desenvolupar un projecte on s'integra Novedar_EDSS amb un optimitzador desenvolupat a DTU. Aquesta nova metodologia permet considerar de forma conjunta el coneixement expert i models matemàtics d'optimització, obtenint-ne resultats satisfactoris en la selecció de l'alternativa de tractament òptima.

La casuística de les aigües residuals industrials implica la utilització d'eines diferents a les emprades per a aigües residuals urbanes. Tenint en compte les característiques del sector d'alimentació i begudes, s'ha determinat la metodologia i les característiques d'un EDSS per fer front a la selecció d'alternatives de tractament en aquest sector industrial. Aquest EDSS s'ha validat amb casos reals, demostrant-ne la seva viabilitat. De manera que es contribueix a la millora del procés de presa de decisions en la selecció de tractaments d'aigües residuals del sector d'alimentació i begudes.

Finalment, la sistematització del procés de selecció requerirà de diferents tipus d'eines en funció del context i del paradigma present a cada moment. És per això que, mitjançant el coneixement de diferents experts de la Water_2020 Cost Action, s'han definit les característiques i funcionalitats d'un EDSS per fer front al paradigma 3R de les EDAR, en el qual passen de ser instal·lacions per al tractament d'aigües a ser instal·lacions per a la recuperació de recursos.

Per tant, amb aquesta tesi es contribueix a la sistematització del procés de presa de decisions en la selecció d'alternatives de tractament. Aquest avanç en la sistematització es duu a terme mitjançant la validació i l'adaptació a l'usuari de Novedar_EDSS per tal d'assegurar-ne la seva aplicabilitat al "món real". A més a més, la integració de diferents metodologies permet una avaluació més completa de les alternatives de tractament a aplicar, el que proporciona una major utilitat a aquest tipus d'eines. A banda d'això, es contribueix a cobrir les necessitats de suport a la decisió al sector de la depuració industrial, re-dissenyant Novedar_EDSS per a aplicar-lo al sector d'alimentació i beguda. Finalment, es treballa en l'expansió del EDSS per tractar el nou paradigma 3R a les EDAR, per tal d'adaptar-se als nous requeriments en la gestió de les aigües residuals.

RESUMEN

La selección del tratamiento de aguas residuales más adecuado implica un proceso de toma de decisión complejo. Esta complejidad se debe a la necesidad de considerar diferentes fuentes de conocimiento y diversas variables para conseguir los objetivos necesarios en cada caso. Por ello, en los últimos años se ha hecho un esfuerzo en la sistematización del proceso de toma de decisión. El desarrollo de herramientas para ayudar en la selección de alternativas de tratamiento tiene como objetivo facilitar esta tarea y mejorar los resultados. En este sentido, los sistemas de ayuda a la decisión han demostrado ser herramientas con capacidad para hacer frente a este reto, ya que pueden gestionar elevados volúmenes de datos, integrando bases de datos y modelos, incluyendo conocimiento experto de diferentes fuentes y todo en una interfaz intuitiva. En concreto, Novedar_EDSS (desarrollado por Garrido-Baserba (2013) en la UdG) representa un paso adelante, superando muchas de las limitaciones que presentan las herramientas desarrolladas hasta ahora.

El objetivo de esta tesis es contribuir a la mejora del proceso de toma de decisión en la selección de alternativas de tratamiento de aguas. Para ello, se trabaja en el desarrollo de Novedar_EDSS para ampliar su aplicación y continuar en el proceso de superar las limitaciones identificadas en los EDSS actuales.

Por ello, el primer objetivo de esta tesis es el paso previo antes de extender la aplicación de un programa: su validación. En este sentido, se llevó a cabo la validación de la herramienta comparando su respuesta con los resultados obtenidos en diferentes casos reales. Los resultados muestran como Novedar_EDSS proporciona respuestas muy similares a los estudios de alternativas desarrollados por los expertos en cada caso. De modo que este EDSS proporciona una base fiable para ayudar a la decisión en la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales.

Además, se trabajó con los encargados de la toma de decisión en la empresa para adaptar Novedar_EDSS al usuario final. De manera que se definieron las nuevas funcionalidades del programa para mejorar la experiencia del usuario al utilizarlo, aumentando la probabilidad de éxito de su aplicación.

Por otro lado, para avanzar en la sistematización y agilización del proceso de toma de decisión, se desarrolló un proyecto en el que se integra Novedar_EDSS con un optimizador, desarrollado en la DTU. Esta nueva metodología permite considerar de forma conjunta el conocimiento

experto y los modelos matemáticos de optimización, obteniendo resultados satisfactorios en la selección de la alternativa de tratamiento óptima.

La casuística de las aguas residuales industriales implica la utilización de herramientas diferentes a las aplicadas para aguas residuales urbanas. Teniendo en cuenta las características del sector de alimentación y bebidas, se ha determinado la metodología y las características de un EDSS para ayudar en la selección de alternativas de tratamiento de este sector industrial. Este EDSS se ha validado con casos reales, demostrándose su viabilidad. De manera que se contribuye a la mejora del proceso de toma de decisiones en la selección de tratamientos de aguas residuales del sector de alimentación y bebidas.

Finalmente, la sistematización del proceso de selección requerirá de diferentes tipos de herramientas en función del contexto y del paradigma presente en cada momento. Por ello, mediante el conocimiento de diferentes expertos de la Water_2020 Cost Acton, se han definido las características y funcionalidades de un EDSS para tratar el paradigma 3R de las EDAR, en el que pasan de ser instalaciones para el tratamiento de aguas a ser instalaciones para la recuperación de recursos.

Por lo tanto, con esta tesis se contribuye a la sistematización del proceso de toma de decisiones en la selección de alternativas de tratamiento. Este avance en la sistematización se lleva a cabo mediante la validación y adaptación al usuario de Novedar_EDSS, para asegurar su aplicabilidad al “mundo real”. Además, la integración de diferentes metodologías permite una evaluación más completa de las alternativas de tratamiento a aplicar, lo que proporciona una mayor utilidad de este tipo de herramientas. Por otra parte, se contribuye a cubrir las necesidades de apoyo a la decisión en el sector de la depuración industrial, re-diseñando Novedar_EDSS para aplicarlo en el sector de alimentación y bebidas. Finalmente, se trabaja en la expansión del EDSS para tratar el nuevo paradigma 3R en las EDAR, para adaptarse a los nuevos requerimientos en la gestión de las aguas residuales.

SUMMARY

The selection of the most appropriate wastewater treatment involves a complex decision making process. This complexity is related to the need to consider different sources of expertise as well as many variables to achieve the objectives in each specific case. For that reason, a great effort has been made in recent years to systematize the decision making process. Hence, some tools have been developed in recent years not only to facilitate the task of decision making but also to improve the results obtained. In this sense, decision support systems are recognized feasible tools to achieve this challenge, since they have the capacity to manage huge volumes of data, integrating databases and models under a graphical user interface, at the same time that expert knowledge from different sources can be included. Novedar_EDSS (developed by Garrido-Baserba (2013) in the UdG) overcomes some limitations from the tools developed to date.

This thesis aims to improve the decision making process in wastewater treatment selection. In order to achieve this challenge, it is focused on continuing the development of Novedar_EDSS in order to expand its applicability and to overcome the limitations identified in the current tools.

For that reason, the first goal of this thesis is related to the step required before a software expansion: the rigorous validation process. This evaluation was performed by comparing a set of real case studies with the EDSS outcomes obtained when those real cases are applied in the tool. Results in the validation process performed show that Novedar_EDSS provides a reliable bases to support decision makers to select properly treatment alternatives in wastewater treatment plants.

Moreover, in order to adapt Novedar_EDSS to the final user, new functionalities have been defined through a rigorous work with the decision makers in the company. These new functionalities will improve the user's experience, which is necessary for the successful implementation of this tool.

On the other hand, in order to moving ahead in the systematization of the decision making process, an integrated framework including Novedar_EDSS and an optimization tool, developed in DTU, was developed. This new methodology allows to consider expert knowledge and expertise together with mathematical models to select the most appropriate treatment alternative.

The tools required to assist decision makers to select feasible technologies to treat industrial effluents are different from those needed in urban wastewater. The methodology and characteristics of an EDSS to achieve this challenge in the food and beverage industrial sector have been defined, taking into account the characteristics of this sector. A set of case studies are presented in this work in order to validate the feasibility of the EDSS developed. Therefore, a contribution has been made to help decision makers in to select wastewater treatments in the food and beverage sector.

Finally, different tools will be required depending on the paradigm. In that sense, the 3R paradigm in WWTP, where WWTP move from pollutant removal to water resource recovery facilities, will require new tools. In this work, it has been defined the methodology and characteristics involved in an EDSS to tackle the 3R paradigm in WWTP and the knowledge acquisition step involves interviews with the Water_2020 Cost Action experts.

Therefore, this thesis contributes to systematize the decision making process for wastewater treatment selection. This progress is carried out through the validation and the user's adaptation of Novedar_EDSS to ensure its implementation in the "real world". Moreover, the integration of different methodologies allows a further evaluation of the treatment alternatives, which increase the usefulness of this kind of tools. Apart from this, a contribution to support decisions in the industrial sector has been made by re-designing Novedar_EDSS considering the casuistry in the food and beverage sector. Finally, in order to tackle the 3R paradigm in WWTP, the methodology and characteristics of the new EDSS have been defined.

1. INTRODUCCIÓ GENERAL

1.1 Què és una EDAR?

Una Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR) és una instal·lació per tractar les aigües residuals amb l'objectiu que es retornin al medi natural amb el menor impacte possible (Rodríguez-García et al., 2011). Les aigües residuals són les aigües subministrades després d'haver sigut utilitzades en una gran varietat d'aplicacions (Metcalf & Eddy, 2014). Aquestes aigües es generen tant a nivell domèstic com industrial i presenten característiques molt diferents en funció del seu origen.

En una EDAR, l'aigua és conduïda a través d'una sèrie de processos, per tal d'aconseguir l'efluent desitjat. Aquests processos poden ser físics o bé basar-se en reaccions químiques o biològiques i proporcionen diferents nivells de tractament. La línia de tractament convencional de les EDAR urbanes comprèn: pre-tractament, tractament primari, tractament secundari i tractament avançat o terciari (Metcalf & Eddy, 2014). Al pre-tractament, s'eliminen sòlids gruixuts, mitjançant processos físics, per evitar danyar els equips dels processos posteriors. El tractament primari és una operació física on s'eliminen sòlids suspesos i, es pot combinar amb un tractament físic-químic per millorar l'eliminació de sòlids suspesos així com de material coagulable. Al tractament secundari s'elimina la matèria orgànica mitjançant processos biològics i químics. Finalment, al tractament avançat, que combina processos físics i químics, s'eliminen els sòlids suspesos que puguin quedar o altres constituents que no s'han eliminat al tractament secundari (Balaguer et al., 2007).

D'altra banda, els constituents eliminats de l'aigua residual conformen els fangs. Aquests fangs generats es tracten a la línia de fangs, per tal d'estabilitzar-los i disminuir l'impacte que puguin generar en el seu destí final. La línia de fangs convencional consta dels següents processos: espessament (per concentrar-los, disminuint la proporció d'aigua), digestió (per estabilitzar-los) i deshidratació (per acabar de concentrar-los)(Balaguer et al., 2007; Metcalf & Eddy, 2014).

1.2 Com es dissenya una EDAR?

Abans de construir una EDAR, s'ha de fer el disseny. Aquest disseny és un procés complex que inclou moltes etapes abans d'arribar al disseny definitiu. El primer punt a tenir en compte és la necessitat de recopilar tota la informació necessària sobre l'aigua a tractar i sobre els resultats

d'efluent a obtenir. A més, és necessari conèixer els processos que es poden aplicar per tractar les aigües per tal d'aconseguir l'efluent objectiu.

Un cop es disposa de tota aquesta informació, el següent pas és un punt clau: es tracta de seleccionar el tractament a aplicar. Hi ha una gran varietat de tractaments que poden funcionar-hi correctament, però en cada cas hi haurà alguns que seran els més adients. El procés de selecció implica una avaluació detallada de varis factors a considerar quan s'avaluen els diferents processos (Poch et al 2004). La selecció del tractament més adequat implica un exhaustiu coneixement tant dels tractaments disponibles al mercat com de les característiques i prestacions de cadascun d'ells. El ventall de tecnologies aplicables en cada cas és molt gran, per la qual cosa, la selecció del procés més adequat representa un repte molt important (Chamberlain et al., 2014).

Un cop seleccionat el tractament a aplicar, es realitza el disseny conceptual de tota l'EDAR a nivell d'enginyeria bàsica. Açò implica la realització de càlculs, tant del procés de tractament de l'aigua com hidràulics, d'obra civil i equipaments. A partir del disseny de la planta es demanen ofertes dels diferents materials i equips necessaris a proveïdors i s'elabora el pressupost corresponent, tenint en compte tant els costos d'inversió (CAPEX) com els costos d'explotació (OPEX) (Comunicació Personal, AQUATEC 2016). En el cas d'un client industrial, en molts casos, es fa un pilotatge per comprovar si el procés de tractament seleccionat funciona, abans de construir la planta per al tractament de tot el cabal necessari.

El següent pas és la generació de l'oferta per al client. El client pot ser l'administració o una empresa constructora, en el cas d'EDAR urbana, o bé un client industrial, en el cas d'EDAR industrial.

En el cas que el client accepti l'oferta, es redacta el projecte d'enginyeria de detall. En aquest darrer pas, es demanen ofertes a més proveïdors per fer estudis comparatius i per tenir una informació més detallada tant dels materials a utilitzar en l'EDAR com dels pressupostos (CAPEX i OPEX).

1.3 Com es fa el procés de decisió per la selecció d'alternatives?

Segons Simon (1997), en general, un *procés de decisió* es pot descompondre en quatre fases bàsiques: *intel·ligència*, *disseny*, *elecció* i *implementació*. La fase d'intel·ligència fa referència a

l'exploració inicial tenint en compte totes les dades necessàries. Mentre que les fases de disseny i elecció son fases creatives on, el disseny implica la creació i anàlisis de diferents solucions per al problema (per saber fins quin punt les solucions resolen el problema i a quin cost) i l'elecció es fa en funció de les solucions proposades i analitzades per finalment dur a terme la implementació.

Les decisions que es prenen en el disseny conceptual d'una EDAR tenen gran impacte en les fases següents. Segons McGuire and Jones (1989) més del 80% del CAPEX d'una planta es determina durant el procés de disseny conceptual.

El procés de selecció d'alternatives és el punt clau en el disseny d'una EDAR. La selecció de l'alternativa de tractament òptima representa un repte molt important, ja que el nombre de processos s'incrementa contínuament (Joksimovic et al., 2006). Aquesta selecció, requereix una especial atenció ja que, errors en aquest pas tenen conseqüències no només en el CAPEX, sinó també poden implicar problemes en l'explotació de la planta i amb els clients, amb les conseqüents pèrdues de diners (ja que s'haurà de canviar el procés o modificar-ne part de l'inicial).

Aquest procés de selecció d'alternatives ha anat evolucionant al llarg del temps. A l'inici, el ventall de possibilitats era més reduït i la selecció es basava només en l'experiència. En canvi, amb el temps s'han anat desenvolupant eines per tal d'optimitzar tant el temps necessari com la qualitat dels càlculs que s'apliquen per determinar les característiques que tindria cadascuna de les alternatives.

A hores d'ara, el procés que es segueix per seleccionar les alternatives de tractament a aplicar implica: recopilar tota la informació necessària, aplicar eines informàtiques per desenvolupar diferents càlculs i, sobretot, el coneixement expert. Hi ha algunes diferències en el procés de selecció d'alternatives segons l'origen de l'aigua sigui domèstic o industrial, no obstant això amb la informació recopilada d'entrevistes amb diferents experts s'ha identificat l'esquema general del procés que es segueix (Fig. 1).

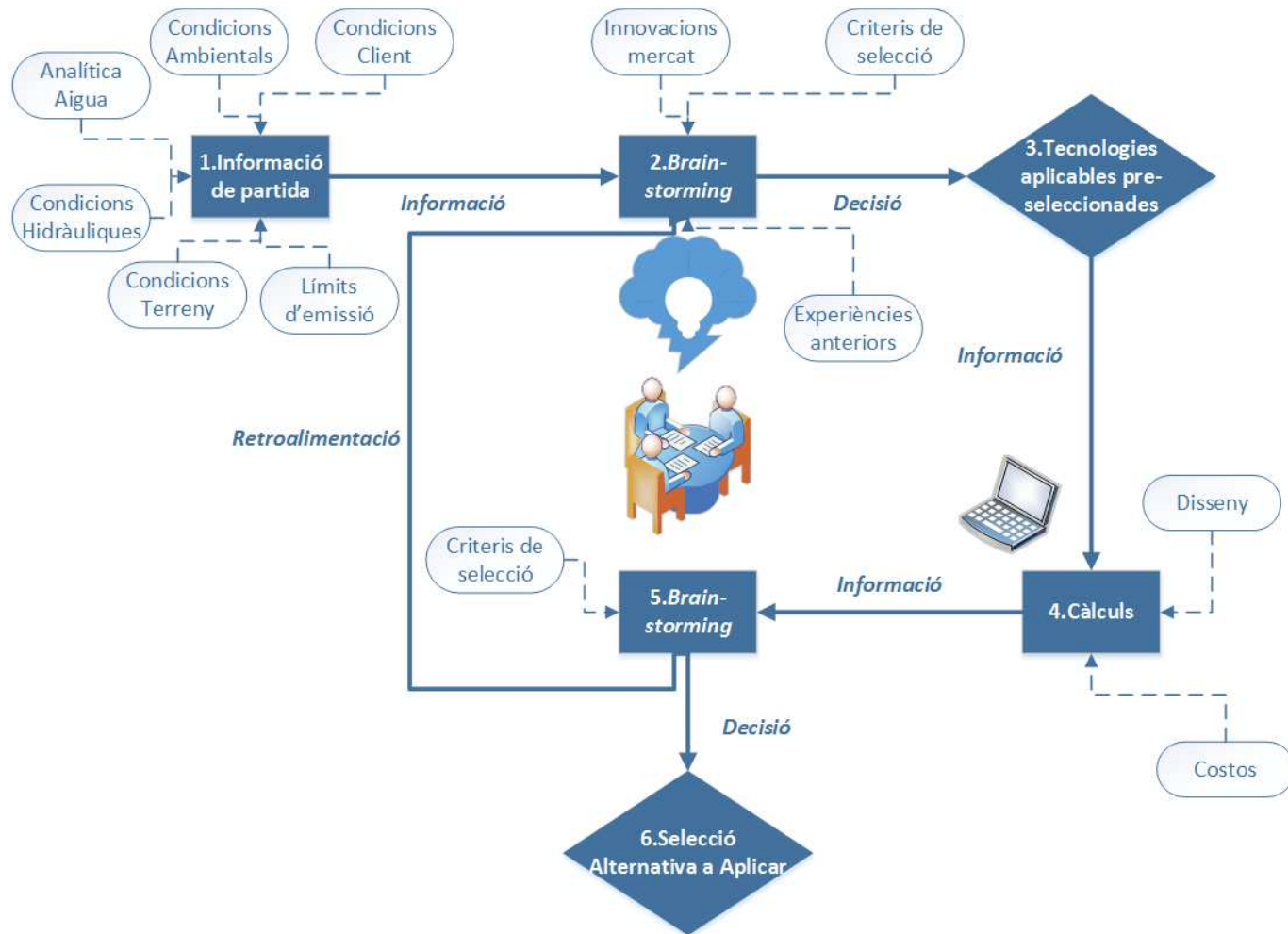


Fig. 1. Esquema general per a la presa de decisió en la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals (Elaboració personal).

1.3.1 Informació de partida

En primer lloc, s'ha de tenir una **informació de partida** fiable i exhaustiva tant sobre l'aigua a tractar com sobre l'efluent a aconseguir i els condicionants ambientals, hidràulics (cabals), del terreny i del client.

Per tal de conèixer amb detall les característiques de l'aigua a tractar es disposa d'analítiques facilitades pel client o bé s'analitzen mostres d'aigua recollides en campanyes de mostreig.

A continuació, és imprescindible saber quines característiques ha de tenir l'efluent, per poder definir tant els contaminants com la seva càrrega a eliminar de l'aigua.

Els condicionants ambientals fan referència als impactes ambientals generats per la instal·lació, que poden ser: visuals, per olors i per soroll. En funció d'aquests condicionants es podran aplicar uns tractaments o uns altres (per exemple, si la instal·lació està dintre d'un parc natural, els límits d'alguns paràmetres poden variar).

Quant als condicionants hidràulics, fan referència al cabal d'aigua d'entrada a considerar. Per dissenyar la instal·lació s'ha de tenir en compte tant el cabal promig com el cabal punta en condicions habituals de temps sec, l'estacionalitat (per exemple, si la població augmenta a l'estiu), cabal en temps de pluja i els cabals que poden haver en uns escenari futurs (Comunicació Personal, Canals 2016).

Les condicions del terreny també determinaran el tipus de tractament a aplicar, s'han de tenir en compte característiques com el desnivell i el tipus de sòl.

Per últim, els condicionants del client poden ser: (i) limitacions d'espai, (ii) minimització de la generació de residus, (iii) en el cas d'una EDAR industrial, possibilitat d'actuar en processos interns: separació d'efluents abans de tractar-los, per donar-los un tractament diferent o (iv) preferència per un determinat tractament.

1.3.2 *Brainstorming* 1

A partir de tota aquesta informació, el següent pas implica un **brainstorming per tal d'identificar totes les tecnologies** que puguin ser d'aplicació en cada cas, és a dir, que puguin tractar l'aigua d'entrada aconseguint l'efluent desitjat i complint amb els condicionants de cada client. Aquest punt es desenvolupa de forma diferent en funció de si es tracta del disseny d'una EDAR urbana

o industrial. Aquestes diferències són degudes tant al tipus d'aigua a tractar com al tipus de client.

En el cas d'EDAR urbana, es pot considerar que les característiques de les aigües segueixen un patró estable. Per aquest motiu, el procés de tractament és un esquema que està ben definit (Fig.2), per la llarga experiència en els anys i perquè les característiques de les aigües urbanes són bastant constants i similars entre els diferents indrets. En aquest sentit, el tractament secundari és el central, el més important i, per tant, s'incideix en la selecció d'aquest procés, ja que és el tractament que elimina els principals paràmetres contaminants (demanda química d'oxigen (DQO), demanda biològica d'oxigen (DBO), nitrogen total (NT) i fòsfor total (PT)). El pre-tractament i el tractament primari es seleccionen en funció del tractament secundari seleccionat, de manera que hi siguin compatibles.

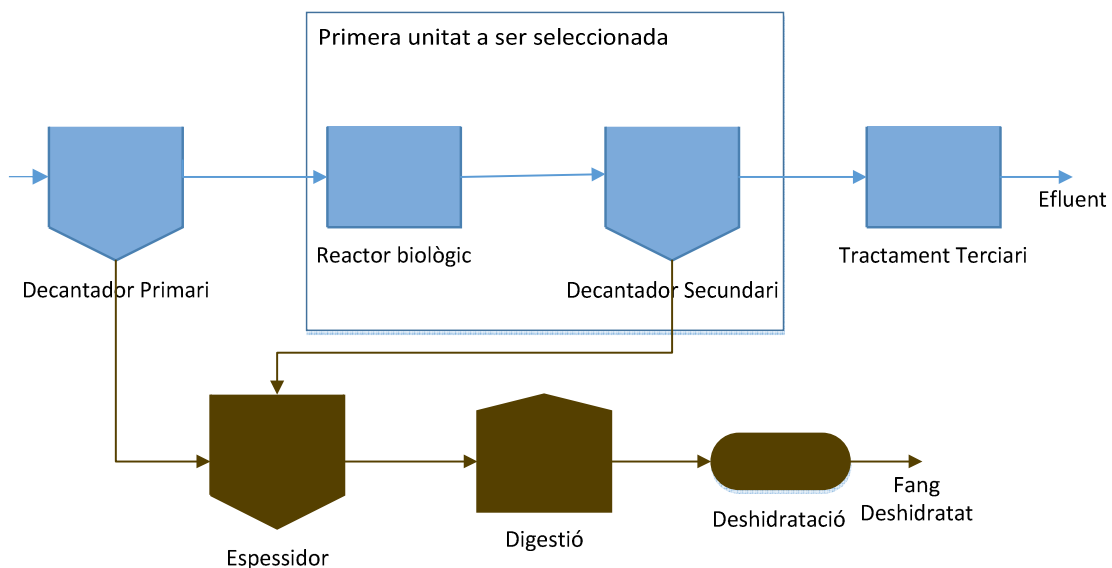


Fig. 2. Exemple esquema EDAR urbana.

En canvi, en una EDAR industrial les característiques de les aigües a tractar varien molt en funció dels sectors industrials, inclús dins del mateix sector industrial es dona el cas que cada empresa aplica uns processos de producció diferents, que generen aigües residuals molt diferents (Wukovits et al., 2003). En el cas d'EDAR industrial, es selecciona en primer lloc el tractament físic-químic i/o primari, després el secundari i finalment el tractament terciari. És a dir, que la selecció dels processos segueix el diagrama de flux del procés que seguirà l'aigua, ja que, en primer lloc es veu si s'ha d'eliminar sòlids, metalls, etc (Fig. 3).

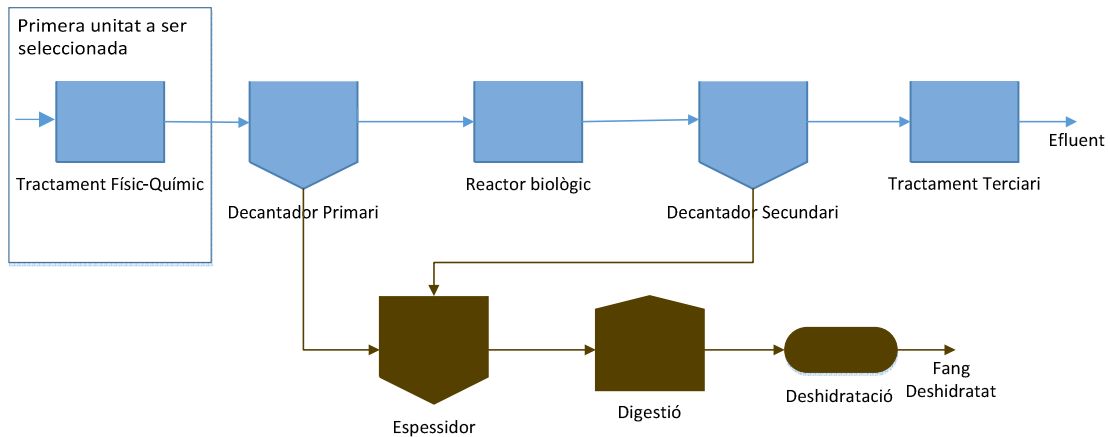


Fig. 3. Exemple esquema EDAR industrial.

Quant a la selecció del tipus de tractament a aplicar, també hi ha diferències destacables entre EDAR urbana i industrial:

En el cas d'EDAR urbana, les tecnologies que es consideren en aquest *brainstorming* es basen sobretot en experiències anteriors (on havien de tractar una aigua similar per aconseguir un efluent similar). En molts casos, el client ja estableix sobre quines tecnologies s'ha de fer l'estudi d'alternatives i inclús, en alguns casos, s'estableix quina és la tecnologia a aplicar. Per tant, en els casos en que el ventall de tecnologies a considerar no es massa gran, els punts més crítics, tenint en compte l'esquema definit a la Fig.1, són el 4 (Càlculs) i el 5 (*Brainstorming* 2). És a dir que el primer *brainstorming* (punt 2) no té tanta rellevància quan ja es tenen acotades les tecnologies a considerar dins l'estudi d'alternatives.

En canvi, en el cas d'EDAR industrial, el rang de tecnologies a considerar és molt ampli, per la qual cosa, el primer *brainstorming* (punt 2) és clau, ja que si es descarten aquí tecnologies que haurien de ser considerades, s'està perdent la possibilitat d'aplicar el millor procés possible.

Els efluent industrial presenten composicions variables en el temps, a més, les característiques d'aquests efluent són molt diferents en funció del sector industrial considerat. Els processos que tenen lloc dins de la indústria determinaran la composició d'aquests efluent a tractar. És per això, que hi ha una gran varietat de processos a aplicar i cada sector industrial, així com cada indústria, necessitarà un tractament diferent per a les seves aigües (Degremont, 2014).

En el *brainstorming* per seleccionar les tecnologies més adients en cada cas, es tenen en compte tant experiències anteriors aplicades com experiències que s'han aplicat per altres empreses en el mateix sector industrial d'actuació. Això és així perquè s'ha de tenir en compte si hi ha referències de l'aplicació d'una tecnologia per al tractament d'aigües similars, per tal d'assegurar-se'n de que el tractament funcionarà. En les ocasions en que s'aplica una nova

tecnologia en un sector industrial es fa amb garanties de l'empresa que ha desenvolupat la nova tecnologia, ja que no es pot assumir el risc d'aplicar un tractament que no funcioni correctament.

1.3.3 Tecnologies aplicables

A partir del *Brainstorming* anterior es determinen les tecnologies que poden ser adequades per a cada cas concret. En aquest punt ja es fa una pre-selecció de les tecnologies aplicables basant-se en els criteris a prioritzar en cada cas. La "puntuació" que obté cada alternativa de tractament en aquest punt es basarà en l'experiència dels encarregats de prendre la decisió. És a dir, que en aquest punt no es fan càlculs detallats, si no no es fins el següent punt, el punt 4, on es fan els càlculs detallats per a cadascuna de les alternatives pre-seleccionades (ja que si s'haguessin de fer els càlculs per a totes les tecnologies aplicables, s'alentiria molt el procés).

Per tant, de entre totes les tecnologies adequades, es selecciona un nombre reduït, en funció el cas concret i dels criteris de selecció a aplicar.

1.3.4 Càlculs

El següent pas implica els **càlculs** per fer el pre-disseny d'aquestes alternatives d'EDAR per tal de conèixer amb més detall quines son les implicacions de l'aplicació d'una o altra alternativa. Es fan els càlculs per conèixer la qualitat de l'efluent, els consums energètics, producció de residus, superfície necessària de la instal·lació, etc. A més, es demana informació als proveïdors d'equips per tal d'elaborar un pressupost o bé s'utilitzen bases de dades amb preus obtinguts en ofertes anteriors. Amb tota aquesta informació es fa una estimació de CAPEX, OPEX, requeriments d'espai, etc. de manera que es disposa de la informació necessària respecte a cada alternativa per tal de prendre la decisió final en el següent pas.

1.3.5 *Brainstorming 2*

El següent pas consisteix en un **brainstroming** amb tota la informació recavada de les alternatives pre-seleccionades en cada cas. Aquest punt no presenta diferències significatives per a EDAR urbana i industrial. Aquí és molt important tenir ben definits els criteris que es volen prioritzar per fer la selecció. Aquests criteris dependran de les necessitats dels clients. A hores d'ara, en la majoria dels casos, es solen prioritzar criteris econòmics, però hi ha una diferència

considerable si el criteri a prioritzar és CAPEX o OPEX. En cas que sigui OPEX, una reducció d'OPEX implica criteris de millora de l'eficiència energètica, de minimització de residus, etc. Mentre que la prioritat en criteris de CAPEX pot dur associada una reducció en les necessitats d'espai, per tant, l'aplicació de tecnologies més compactes.

En molts casos, després d'aquest *brainstorming* 2 es torna al *brainstorming* 1, ja que es tracta d'un procés que es retroalimenta. Un cop obtinguda tota la informació de les alternatives pre-seleccionades (mitjançant els càlculs del pas anterior) és pot decidir incloure alguna alternativa que no s'havia tingut en compte o descartar alguna del llistat de tecnologies pre-seleccionades. De manera que es tornen a fer els càlculs i l'anàlisi multi-criteri.

1.3.6 Selecció de la tecnologia

A partir de les tasques de les etapes anteriors es **selecciona la tecnologia** que es considera més adequada en cada cas, per tal d'elaborar l'oferta corresponent.

L'anàlisi de la Fig.1, porta a concloure que la selecció d'alternatives és un procés en que intervenen tant el raonament, com la lògica, l'experiència i la realització de càlculs. Es tracta, per tant, d'un tipus de procés complex.

A hores d'ara, s'apliquen eines que ajuden a fer els càlculs en la fase 4, però encara queda molt per sistematitzar. Tractar de sistematitzar tot el procés és molt complicat. A més, s'ha de tenir present que es poden desenvolupar eines que ajuden en la fase de *brainstorming*, però no substituir la figura de l'humà en aquest procés.

1.4 Principals punts crítics en el problema de la selecció d'alternatives

A partir de l'experiència assolida en aquesta tesi es considera que els principals punts crítics en el problema que suposa la selecció d'alternatives son els següents:

- **Limitació d'informació:** En alguns casos no es disposa de suficient informació sobre l'aigua a tractar, per la qual cosa s'han de fer suposicions en les característiques d'aquesta aigua. Quan es tracta d'aigües urbanes, com que presenten una composició més semblant en els diferents indrets, l'error que es pot cometre normalment és assumible. En canvi, en aigües residuals industrials l'error pot ser major, tot i això, dintre

d'un determinat sector industrial i, coneixent els processos de fabricació que s'apliquen en el cas concret, és pot tenir una idea de la composició de les aigües. Quant el tractament a aplicar es selecciona sense conèixer les característiques necessàries de l'aigua a tractar, es pot errar i estar aplicant un tractament que realment no sigui efectiu. S'ha de saber tota la informació abans de seleccionar una tecnologia, tant la informació d'aigua d'entrada com informació de la qualitat que ha de tenir l'efluent (per tenir en compte tot el que s'ha d'eliminar, de vegades passa que si no s'ha tingut en compte algun dels paràmetres, s'ha de tornar enrere per modificar tot el procés proposat) per evitar riscos innecessaris.

- **Limitació de temps:** un estudi d'alternatives requereix moltes hores de dedicació, per la qual cosa un dels factors limitants més importants és el temps. El temps dedicat a fer un estudi d'alternatives està molt acotat degut a les exigències del client (tant públic com privat). Per tant, és important optimitzar el temps en que es prenen les decisions.
- **Moltes tecnologies al mercat:** s'ha investigat i s'està investigant molt en el desenvolupament i millora de tecnologies per al tractament d'aigües. Molta d'aquesta investigació ja està al mercat i, a més, va evolucionant. Per tant, hi ha un gran ventall de possibilitats per tractar les aigües, el que dificulta la selecció del procés més adequat en cada cas (Kalbar et al., 2012, Garrido-Baserba et al., 2016). En les tecnologies de tractament d'aigües s'hauria de buscar no només que "eliminen" els contaminants, si no que siguin el més eficients possible a nivell energètic, econòmic i ambiental. A més, hi ha molts factors que precisen del desenvolupament i millora de les tecnologies, com son: la reducció d'espai, l'impacte ambiental, el tancament del cicle de nutrients, etc. per tal d'incrementar la sostenibilitat dels tractaments.
- **Desconeixement de les tecnologies disponibles:** estar-ne al corrent de totes les tecnologies disponibles al mercat implica una gran inversió de temps. A banda d'això, aplicar una nova tecnologia o una tecnologia en la qual no es té experiència duu associat un risc. Per la qual cosa, molts cops s'opta per elegir entre un llistat molt reduït de tecnologies, ja conegudes i que se'n sap que funcionen (Chamberlain et al., 2014). Aplicar tecnologies ja conegudes vol dir que els càlculs de disseny es poden fer molt més ràpid i els resultats que s'obtindran son més fiables, ja que s'ha provat en altres ubicacions o casos. En aquest punt hi ha diferències significatives entre les EDAR urbanes i industrials ja que, en una EDAR urbana es solen aplicar tractaments més

convencionals, perquè les característiques de les aigües son molt similars entre les diferents ubicacions i, a més, la decisió final depèn de l'administració. A les EDAR industrials, en canvi, es sol innovar més ja que cada sector industrial presenta unes característiques diferents i, a més, aquestes característiques dels efluents també van evolucionant conforme evolucionen els processos en els diferents sectors industrials, per la qual cosa es necessiten adaptar les tecnologies per al tractament de les aigües.

- **Definició dels criteris:** els criteris a considerar afectaran a la decisió final en la selecció del tractament a aplicar. Per això, és molt important conèixer bé quines son les característiques més importants a l'hora d'aplicar un tractament o un altre. El tractament òptim a aplicar hauria de ser aquell que té en compte al mateix temps criteris ambientals, socials, legislatius, econòmics i tècnics (Hidalgo et al., 2007; Chamberlain et al., 2014). Normalment, els criteris que es prioritzen son els tècnics (com el rendiment d'eliminació de diferents contaminants) i els econòmics (tant d'inversió com d'exploració) (Hamouda et al., 2009). Però també hi ha altres punts que poden ser clau, com per exemple l'espai disponible per la instal·lació, les especificacions del client (com les preferències per un tractament o un altre). Per tant, s'han de definir bé tant els criteris per a la prioritització d'unes o altres alternatives de tractament com la importància de cadascun d'aquests criteris.

1.5 Com millorar el procés de selecció?

Per tal de millorar el procés de selecció és pot influir en tots els passos del procés (Fig.4):

En primer lloc, es tracta d'aconseguir una informació de partida fiable. Per a açò, és pot facilitar la tasca de recollida de dades, per exemple, informant al client (administració o indústria) de tots els paràmetres que es necessiten. Encara que sembli una cosa molt evident, en molts casos no es compta amb una informació de qualitat o no es disposa de l'anàlisi completa, amb tots els paràmetres necessaris perquè el client desconex que sigui important o imprescindible aquesta informació.

En el punt 2, el *brainstorming* del procés de selecció, es poden aplicar millores si es forma al personal en eines de vigilància tecnològica, per tal d'optimitzar el temps que s'aplica en la recerca de noves tecnologies o en noves aplicacions de tecnologies existents. A més a més, seria recomanable disposar de bases de dades amb tots els projectes anteriors on hi hagi una

descripció del procés aplicat i dels motius pels que es va aplicar el procés. D'aquesta forma, s'optimitza el temps de recerca de projectes anteriors i s'assegura que es tenen en compte totes les experiències que poden ser útils, per al nou projecte. En aquesta base de dades s'haurien d'indicar les característiques necessàries per poder extreure "conclusions" de perquè s'ha aplicat un determinat procés. D'aquesta forma, a partir de les característiques del nou projecte, es sap quines experiències anteriors cal consultar per ajudar a seleccionar el tractament més adient a aplicar a en el projecte (Rodríguez-Roda et al., 2000)

Quant a les tecnologies aplicables, si s'ha completat el punt anterior, aquí es tindrà un llistat amb les tecnologies candidates a ser aplicades. Estaria bé tenir un fitxer amb les característiques de cada tecnologia, d'aquesta forma, quan s'arriba al punt on ja hi ha un nombre finit de tecnologies aplicables (punt 3, Fig. 4), es pot tenir una idea més detallada de en què consisteix cadascuna i, a més, permet fer un nou cribratge, ja que potser es troben característiques que fan incompatible alguna d'eixes tecnologies amb les necessitats del cas d'estudi concret. Per fer la pre-selecció d'alternatives tenint en compte els criteris específics de cada cas, es podria buscar la forma d'automatitzar aquest procés que, en realitat, esdevé una anàlisi multi-criteri basada en l'experiència i coneixement de cadascuna de les alternatives de tractament aplicables.

Un cop es disposa de les tecnologies pre-seleccionades, el càlcul dels diferents paràmetres i característiques de cadascuna d'elles es fa mitjançant eines informàtiques. Aquestes eines inclouen, entre altres, software de simulació (com "Plant wide model" (PWM)) per determinar les característiques de funcionament de l'EDAR i software per al càlcul de pressupostos (Capdet), per tal de fer una estimació del CAPEX i del OPEX de la instal·lació (Fig. 4).

A més, per tal de millorar aquest pas es pot incidir en l'aplicació d'eines per a calcular paràmetres que, de moment, no s'estan exigint per llei, però que representen un impacte molt important i que en un futur poden estar legislades, com són els contaminants anomenats emergents, les emissions de gasos d'efecte hivernacle, etc. En aquest sentit s'estan desenvolupant models que permeten efectuar aquests càlculs. Amb l'aplicació d'aquestes noves eines, s'aconsegueix un coneixement més exhaustiu de les característiques de cadascuna de les alternatives de tractament considerades. Açò implica una major informació, que resulta de gran ajuda per prendre les decisions encertades quan es seleccioni la tecnologia a aplicar. És molt important que els resultats d'aquests càlculs siguin correctes, ja que la selecció final de la tecnologia es basarà en aquests resultats.

Al primer *brainstorming*, a l'hora de definir els criteris de selecció considerats, normalment es tenen en compte exigències del client, però també afecten els processos de raonament intern

de la persona que pren la decisió. Es pot millorar aquest procés aplicant eines d'anàlisi multicriteri. És molt important definir bé els criteris en aquestes eines per recollir, no només les necessitats del client, si no també, els criteris que aplica el tècnic a l'hora de fer aquesta selecció, així com la importància que li dona a cada criteri.

Actualment hi ha eines desenvolupades que es poden aplicar a cadascun dels punts descrits, en canvi, per tal d'optimitzar el temps dedicat a un estudi d'alternatives, interessa l'aplicació d'eines que puguin incloure o englobar més d'un punt.

L'objectiu d'aplicar eines en el procés de selecció d'alternatives és millorar aquest procés, assegurant-se d'estar considerant totes les tecnologies aplicables així com de tenir en compte totes les variables necessàries per realment seleccionar la tecnologia més adient en cada cas. El fet de sistematitzar alguns processos en els punts de *brainstorming* implica una ajuda però no la substitució del raonament humà. De manera que, es busca facilitar i optimitzar el procés de decisió però pensant en que aquest procés el dugui a terme un expert o grup d'experts. En canvi, els punts de recollida d'informació i de càlculs sí que es poden sistematitzar, ja que no impliquen processos de raonament complexos.

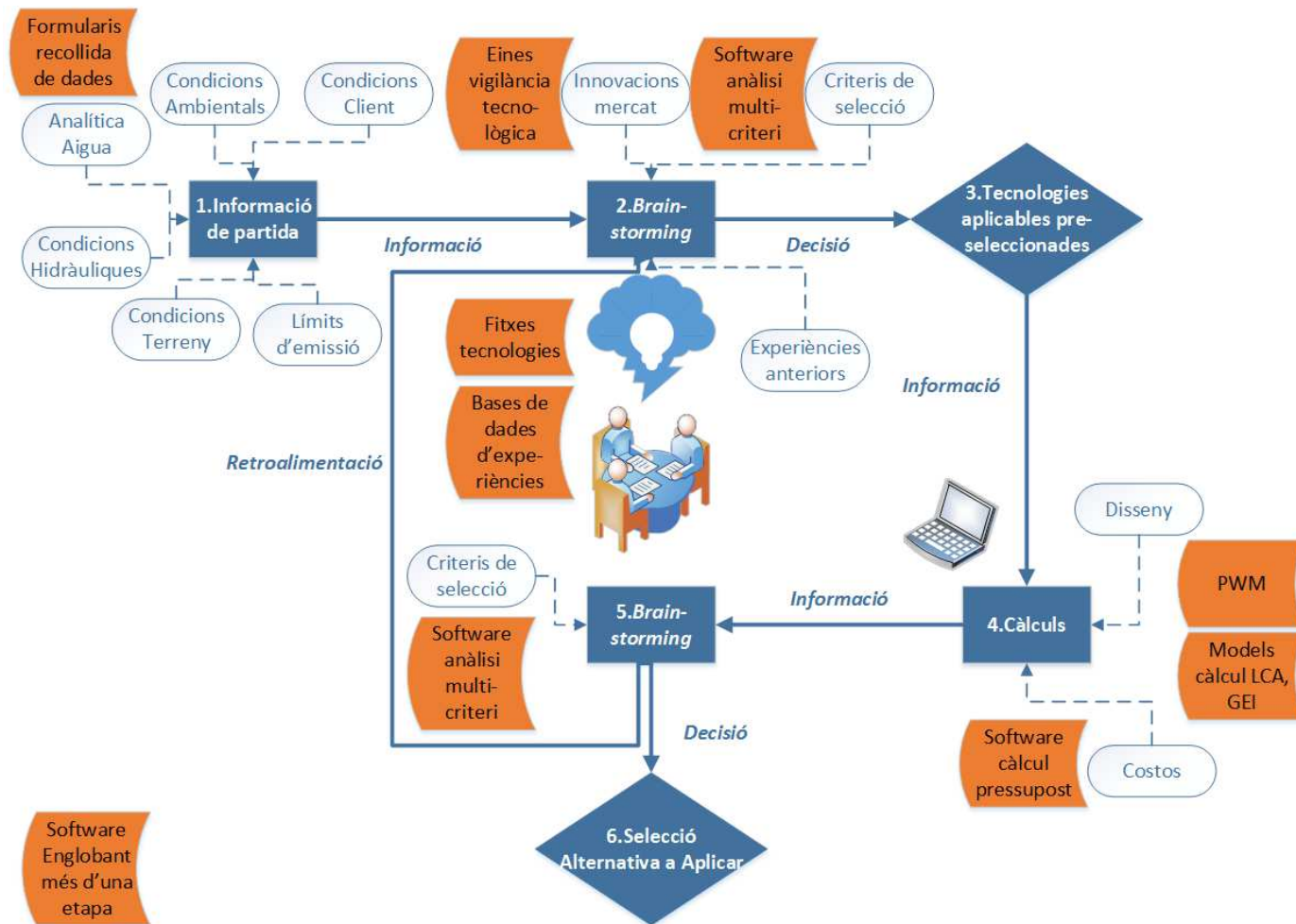


Fig. 4. Esquema amb eines per a la sistematització parcial per a la presa de decisió en la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals (Elaboració Personal).

1.6 Revisió de metodologies

Des de fa anys s'ha estat treballant en la millora de les decisions que afecten al disseny conceptual d'una EDAR. En aquest sentit, s'han desenvolupat diferents tipus d'eines per tal de sistematitzar el procés de selecció d'alternatives descrit al diagrama de la Fig. 4 (Taula 1).

Aquestes eines precisen de coneixement, és a dir, requereixen informació així com formes de raonament i d'interpretació d'aquesta informació. La *representació d'aquest coneixement* es pot fer mitjançant diferents mètodes o una combinació d'aquests, en funció tant dels objectius com del tipus i complexitat del coneixement disponible, aquests son: (i) mètodes d'intel·ligència artificial, (ii) programació matemàtica i (iii) models de simulació (Hamouda et al., 2009).

És per això que les diferents eines desenvolupades utilitzen diferents mètodes per a representar el coneixement, en funció del seu objectiu específic, que pot ser: fer la pre-selecció d'alternatives, aplicar una optimització al llistat d'alternatives pre-seleccionades o obtenir paràmetres de disseny i de funcionament a les alternatives finalistes.

En general, quan es desenvolupa un mètode per sistematitzar la selecció d'alternatives de tractament d'aigües, el plantejament més comú és començar amb un mètode de coneixement basat en regles heurístiques, per tal de fer un primer cribratge i obtenir un llistat de tecnologies pre-seleccionades (Hamouda et al., 2009). A continuació es poden utilitzar eines d'optimització per tal de refinar i optimitzar les alternatives que han estat pre-seleccionades (Freitas et al., 2000, Loetscher & Keller, 2002). Finalment, l'aplicació de simuladors permet calcular de forma acurada paràmetres de disseny i de funcionament en diferents circumstàncies (Quaglia et al. 2014, Castillo et al., 2016b) (Fig. 5).

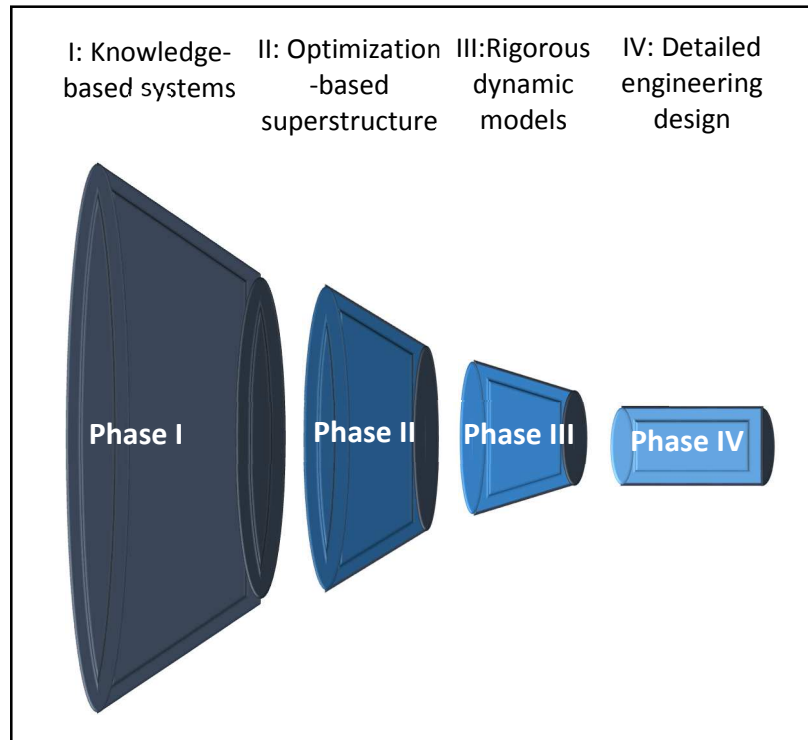


Fig. 5. Esquema de les diferents etapes en la selecció i disseny d'un procés de tractament d'EDAR (Quaglia, 2003), junt amb les eines aplicades en cada etapa (Castillo et al., 2016).

Per tal de conèixer les eines desenvolupades fins ara per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives, s'ha fet una revisió bibliogràfica del tema. L'objectiu d'aquesta recerca és doble, d'una banda conèixer les eines desenvolupades fins ara i d'altra identificar les possibles mancances i necessitats per avançar en la sistematització i millora del procés de selecció d'alternatives. Al següents apartats s'inclou una descripció dels tipus d'eines i tècniques involucrades en la sistematització del procés de selecció d'alternatives amb les referències més destacades en cada cas, tant per les metodologies emprades per al desenvolupament de sistemes d'ajuda a la decisió (DSS, de l'anglès "decision support system") com d'optimitzadors i de simuladors.

1.6.1 Mètodes d'intel·ligència artificial

Les eines d'intel·ligència artificial intenten imitar el comportament humà a l'hora de prioritzar una alternativa mitjançant l'aplicació de coneixement heurístic i de diferents tipus de metodologies, entre les que Cortés et al. (2011) destaquen:

- a) Els "knowledge based systems" (sistemes basats en el coneixement), que imiten el comportament humà mitjançant l'aplicació de coneixement d'una determinada disciplina (Hamouda et al., 2009). Aquesta tècnica permet representar el raonament

heurístic i treballar amb informació qualitativa. S'hi troben referències d'eines desenvolupades per a ajudar en el procés de selecció d'alternatives, com és el cas de Freitas et al. (2000), Wukovits et al. (2003), Comas et al. (2004).

- b) Els “case based systems” (sistemes basats en casos), estimen la solució del problema basant-se en les solucions aplicades a problemes anteriors similars. De manera que s'identifiquen quines eren les causes del problema i com es van resoldre. Aquesta metodologia s'aplica a les eines desenvolupades per Sánchez-Marrè et al. (1999), per a la supervisió d'EDAR, i per Kalbar et al. (2016), per a la selecció d'alternatives.
- c) La “fuzzy logic” (lògica difusa) s'aplica en aquells casos en que la major part de la font d'informació és lingüística, de manera que utilitza variables lingüístiques (Dubois et al., 2011). La utilització de paraules permet tenir en compte la imprecisió i s'aproxima a la intuïció humana (Mathworks, 2016). La lògica difusa s'ha utilitzat en algunes de les eines que utilitzen una anàlisi multi-criteri per a la prioritització d'alternatives de tractament. En concret, quan s'aplica la tècnica “analytical hierarchy process” (AHP), en molts casos es complementa amb lògica difusa, per tal d'eliminar la incertesa en les comparacions (Karimi et al., 2011; Ilangkumanaran et al., 2013; Ouyang et al., 2015).
- d) Les “artificial neural networks” (xarxes neuronals artificials), són mètodes utilitzats per fer prediccions que extreuen coneixement d'experiències passades i l'utilitzen com a aprenentatge per a resoldre problemes similars. En alguns casos s'utilitza aquesta metodologia per optimitzar la selecció de l'alternativa de tractament a aplicar, com és el cas de Krovvidy et al. (1991) que es basen en la minimització del cost per trobar el tractament òptim o Hamed et al. (2004) que apliquen aquesta tècnica per preveure els rendiments d'una EDAR.
- e) Els “decision trees” (arbres de decisió) s'utilitzen per organitzar i documentar el coneixement i permeten extraure regles basades en aquesta informació, recorrent cada branca des de l'arrel fins a les fulles (Hamouda et al., 2009). Les regles extretes dels arbres de decisió es poden codificar per descartar o afavorir les diferents alternatives en funció de les seves característiques. Hi ha moltes aplicacions per a l'estudi de plantes de tractament d'aigües residuals, entre les que destaquen les tècniques desenvolupades per Evenson i Baetz (1994), Freitas et al. (2000) i Comas et al. (2004).

- f) “Agent based systems” son sistemes que inclouen agents intel·ligents, que es defineixen com entitats autònomes amb capacitat per percebre el seu ambient i dur a terme accions dirigides a la consecució d’objectius (Wooldridge, 2001). Aquests sistemes s’apliquen en els casos en que es requereixen accions flexibles autònomes per adaptar-se a les condicions canviants, ja que presenten una elevada modularitat i escalabilitat (Aulinas et al., 2009). L’aplicació d’aquests sistemes per a DSS es sol utilitzar per distribuir i compartir la presa de decisions entre els diferents experts i agents involucrats. Hi ha moltes aplicacions en diferents sectors ambientals, entre les que destaca l’aplicació per al control del procés de depuració (Sánchez-Marrè et al., 2004).

1.6.2 Sistemes d’ajuda a la decisió

Les eines esmentades a l’apartat anterior es poden integrar en sistemes més globals, com son els sistemes d’ajuda a la decisió. Els sistemes d’ajuda a la decisió que s’utilitzen per resoldre problemes ambientals s’anomenen EDSS (incorporen la paraula en anglès “Environmental”).

Un EDSS és un sistema d’informació intel·ligent, que incorpora diferents mòduls on hi ha la cooperació de varis elements i proporcionen respostes ràpides perquè està tot integrat en una plataforma (Cortés et al., 2000).

Aquests sistemes, ajuden als encarregats de la presa de decisions mitjançant la consideració de criteris per a l’avaluació d’alternatives o per a la justificació de les decisions (Cortés et al., 2000), ja que incorporen un procés de decisió basat en una sèrie de principis teòrics que justifiquen la racionalitat d’aquest procés (Aulinas et al., 2009).

Els principals *avantatges* d’utilitzar EDSS per resoldre problemes ambientals estan relacionats amb el fet que aquestes eines permeten (Aulinas et al., 2009):

- Adquirir, representar i estructurar el coneixement
- Separar les dades dels models
- Utilitzar informació geoespacial (incorporant sistemes d’informació geogràfica (GIS), per exemple)
- Proporcionar coneixement expert (incorporant bases de coneixement específiques)
- Ser utilitzats de forma efectiva per a diagnosi, planificació, gestió i optimització
- Ajudar a l’usuari en la formulació del problema i en la selecció dels mètodes per solucionar-lo

Tot i això, s'ha de tenir en compte que la decisió final depèn de l'usuari, és a dir, que aquestes eines no reemplacen la decisió de l'humà, encara que milloren l'eficàcia del procés de presa de decisions (Janssen, 1990).

Segons Poch et al. (2004), els EDSS son eines flexibles amb capacitat per donar suport als processos d'aprenentatge i de presa de decisió, ja que utilitzen tècniques d'intel·ligència artificial i models, proporcionant un accés directe a l'expertesa.

Els EDSS han generat gran expectació en els darrers anys per a ajudar a la resolució de problemes complexos, on s'ha de tenir en compte l'experiència d'experts per trobar una solució (Poch et al., 2004), com és el cas del procés de selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals.

En aquest context, s'han desenvolupat sistemes d'ajuda a la decisió amb diferents objectius. Alguns d'ells es centren en la generació d'alternatives de tractament, a partir de les dades de l'aigua a tractar, mentre que altres desenvolupen una anàlisi multi-criteri a un nombre reduït d'alternatives de tractament. D'altra banda, hi ha algunes eines més integrades que inclouen els dos objectius: la generació d'alternatives i l'anàlisi multi-criteri.

1.6.2.1 Sistemes d'ajuda a la decisió per generar alternatives

Les eines per a la generació d'alternatives de tractament tenen en compte, a més de la informació de l'aigua a tractar, característiques tècniques dels diferents tractaments, per tal de generar les línies de tractament (com rendiments, compatibilitat entre els diferents tractaments de les diferents operacions unitàries, etc.), per tant necessiten disposar d'aquest coneixement, ja sigui incorporant bases de dades internes o mitjançant altres aplicacions externes.

En aquest sentit, **Freitas et al. (2000)** desenvolupen una eina per al disseny conceptual d'EDAR industrial tenint en compte el tipus d'indústria i les característiques de l'influent i de l'efluent. Amb aquesta metodologia, cada operació unitària es tracta per separat, aplicant finalment algunes regles per tal d'articular les diferents parts (de moment hi ha desenvolupats el tractament primari i secundari) i fer la proposta de les configuracions de tractament aplicables en cada cas. En primer lloc, es generen les alternatives de tractament secundari i, aquesta informació es transmet al mòdul de tractament primari, per seleccionar els tractaments compatibles amb cada tractament secundari adequat. Es tracta d'un "knowledge based system", que utilitza una base de dades relacional i paradigmes basats en regles orientades a objectes.

D'altra banda, **Maurer et al. (2012)** utilitzen un procediment basat en la compatibilitat entre les diferents operacions per tal de generar alternatives per al sistema de sanejament, de manera

que s'obté un llistat amb un número manejable d'alternatives aplicables, entre les quals es trobarà la solució a aplicar. Aquesta metodologia inclou dues fases, la primera d'elles és la generació de totes les alternatives possibles, mentre que en la segona fase s'identifiquen aquelles línies de tractament que inclouen tecnologies compatibles, conformant el llistat d'alternatives de tractament aplicables. Aquests autors insisteixen en que la majoria de les metodologies desenvolupades per ajudar a la presa de decisió estan enfocades en l'avaluació de les alternatives, però no en el pas previ imprescindible de generar aquestes alternatives a aplicar.

1.6.2.2 Sistemes d'ajuda a la decisió mitjançant anàlisi multi-criteri

Aquests sistemes d'ajuda a la decisió apliquen una anàlisi multi-criteri a un conjunt d'alternatives de tractament d'aigües. La definició d'aquest conjunt d'alternatives es fa en una etapa prèvia, ja sigui mitjançant una pre-selecció pels encarregats de la presa de decisió o amb l'aplicació d'alguna eina capaç de generar alternatives de tractament.

A l'anàlisi multi-criteri es poden considerar diferents tipus de criteris per fer l'avaluació de les alternatives de tractament, en funció dels objectius. Aquests criteris estan relacionats amb les característiques de les alternatives de tractament, tant tècniques com ambientals, econòmiques o socials. Per tal d'establir les característiques de les diferents alternatives, aquestes eines poden integrar diferents metodologies i coneixement per calcular tots els paràmetres necessaris (com anàlisi del cicle de vida (LCA), costos, etc.) o poden requerir de l'aplicació d'altres eines que aportin els càlculs corresponents.

Hi ha diferents metodologies per desenvolupar una anàlisi multi-criteri, les més emprades en el sector de l'aigua són (Hamouda et al., 2009):

- AHP, que permet fer una avaluació subjectiva basant-se en una anàlisi multi-criteri organitzada en una estructura jeràrquica, on el nivell més alt és l'objectiu a complir, el següent nivell correspon als criteris que permeten complir amb l'objectiu i els subcriteris dintre d'aquests criteris i, en el nivell més bàsic es troben les alternatives de tractament considerades. Amb aquesta tècnica es fan les comparacions entre les alternatives de dos en dos, basant-se en els criteris seleccionats i els pesos per a cadascun (Saaty i Vargas, 2001).
- "Pre-ference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation" (PROMETHEE), que utilitza tècniques de rellevància basades en relacions de preferència. Per exemple,

l'alternativa "1" és millor que l'alternativa "2" quan s'aplica la condició "x". Ashley et al. (2008) utilitzen aquesta tècnica per incloure la sostenibilitat a l'hora de prendre decisions en les inversions per al tractament d'aigües residuals.

- Quantificació dels criteris d'avaluació i càlcul de la nota per a cada alternativa com una suma parcial de les notes i pesos de cada criteri per a cada alternativa. En aquest cas, per tal d'obtenir la nota de cada alternativa per a cada criteri, es defineix la millor y la pitjor situació com a punts extrems per al rang d'avaluació, el que facilita la formulació d'equacions matemàtiques per avaluar els efectes intermitjos (Flores et al., 2005). **Flores et al. (2005)** apliquen aquesta metodologia per al disseny conceptual d'una planta de fangs actius.
- Integració de AHP amb "grey relational analysis" (GRA). La tècnica GRA permet fer una anàlisi a diferents nivells tenint en compte les interrelacions entre els diferents factors. Zeng et al. (2007) comproven l'efectivitat d'aquest mètode mitjançant l'aplicació d'un cas d'estudi on avaluen quatre alternatives de tractament, seleccionant aquella que presenta els màxims beneficis (aplicant criteris econòmics i tècnics).
- "Multi-attribute utility technique" (MAUT) utilitza estructures en forma d'arbre per agregar criteris a diferents nivells en l'anomenat "Multi-level amalgamation" (MLA). D'aquesta forma es redueix el nombre de comparacions, ja que s'agrupen els criteris a considerar. Aquesta tècnica permet aplicar quatre mètodes d'agregació diferents: la mitja aritmètica, la mitja geomètrica, la multiplicació i l'equivalència mútua. Loetscher et al. (2002) apliquen MLA per avaluar diferents estratègies de gestió i tractament d'aigües residuals a països en vies de desenvolupament.

A continuació, s'inclouen les referències més rellevants de EDSS on s'apliquen anàlisi multi-criteri. S'observa que, en la majoria dels casos, tant per a EDAR urbana com industrial s'aplica la metodologia AHP amb diferents modificacions, de manera que el AHP s'integra amb altres metodologies per tal de millorar els resultats obtinguts. D'altra banda, més recentment també s'ha identificat l'aplicació de noves metodologies.

Tang et al. (1997), utilitzen AHP per tal de considerar factors subjectius (socio-culturals i condicions ambientals) en la selecció del tractament òptim en països en desenvolupament. El AHP es capaç d'incorporar criteris subjectius i assigna la importància relativa de cadascun per a l'avaluació i selecció de criteris. En aquest cas, es fa una avaluació tant de la línia d'aigües com de fangs, considerant 46 i 94 alternatives de tractament, respectivament, i 22 paràmetres a avaluar. Basant-se en aquesta informació, es pot determinar l'alternativa de tractament més

adient. La limitació d'aquesta metodologia es deu a la inconsistència de l'avaluació quan es consideren varis criteris, ja que no considera les relacions entre els diferents criteris.

D'altra banda, ProSelArt es una eina desenvolupada per **Prasad et al. (2013)** que utilitza també AHP per obtenir una metodologia "multi-hierarchy" i "multi-variable" per tal de fer front a les limitacions de les tècniques tradicionals, on només es consideraven criteris econòmics. En aquest cas s'apliquen 14 factors principals i 13 subfactors per a l'avaluació de les alternatives de tractament d'aigües i fangs.

Zeng et al. (2007) apliquen la tècnica "Hierarchy GRA", que combina el GRA tradicional amb la idea de jerarquia del AHP, per a la selecció òptima d'alternatives de tractament d'aigües residuals. El AHP és útil per considerar múltiples criteris i objectius en el procés de presa de decisions, mentre que el GRA s'utilitza per tenir en compte les interrelacions entre els diferents factors que afecten a la presa de decisions. En aquest cas, es consideren criteris tècnics i econòmics. Aquests autors conclouen que la metodologia desenvolupada permet obtenir resultats científics i raonables per ajudar en el procés de presa de decisions en problemes multi-criteri complexos.

Karimi et al. (2011) utilitzen dues metodologies diferents per fer l'anàlisi multi-criteri, AHP i "Fuzzy analytical hierarchy process" (FAHP), considerant criteris tècnics, econòmics i ambientals per a la selecció del millor tractament d'aigües residuals. FAHP es proposa per tenir en compte la imprecisió del raonament dels encarregats de la presa de decisió. Finalment, es comparen els resultats obtinguts al aplicar AHP i FAHP, sense detectar-ne diferències significatives. I conclouen que, en funció de la situació i l'estructura del problema, s'ha d'aplicar un mètode d'anàlisi multi-criteri o un altre. En aquests cas quan s'han de tenir en compte molts criteris, és millor aplicar un AHP i un software de "expert choice" per tal de simplificar els càlculs, mentre que aquests autors aconsellen utilitzar FAHP quan hi ha imprecisió en els pesos dels criteris a considerar.

Ouyang et al. (2015) desenvolupen una metodologia integrant FAHP amb "Multidimensional Scaling" (MDS) per a la selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals. Els pesos per als diferents criteris es calculen amb el FAHP, mentre que el MDS calcula la puntuació de les diferents alternatives considerades a l'anàlisi. A més, apliquen un anàlisi de sensibilitat als resultats, conclouent que les variacions en els pesos de cada criteri fan variar l'alternativa de tractament òptima.

També s'ha treballat en eines multi-criteri per a diferents sectors industrials. De la revisió efectuada les que es consideren més rellevants són les desenvolupades per:

Aydiner et al. (2016), que aplica AHP per a fer una anàlisi multi-criteri avaluant 5 tecnologies per al tractament d'aigües residuals d'una fàbrica de productes lactis, tenint en compte factors tècnics, econòmics i ambientals de les diferents alternatives. Abans de l'anàlisi multi-criteri, els valors que caracteritzen cada alternativa de tractament s'estimen mitjançant l'aplicació de softwares de simulació. Finalment, apliquen un anàlisi de sensibilitat determinant la robustesa i fiabilitat del model desenvolupat per als criteris d'avaluació considerats.

Pophali et al. (2011) treballen en una metodologia que integra AHP i GRA per a la selecció de l'alternativa òptima a la indústria de curtits. L'avaluació de les diferents alternatives de tractament es fa tenint en compte criteris administratius, econòmics i tècnics. Les dades utilitzades per quantificar els criteris aplicats a les diferents alternatives es basen en dades dels 7 casos reals estudiats.

Bottero et al. (2011) apliquen dues metodologies diferents (AHP i "analytic network process" (ANP)) que proporcionen diferents nivells de complexitat, per a ajudar a seleccionar alternatives de tractament d'aigües a indústries de formatge petites. S'aplica ANP per desenvolupar un model més complet on s'incorporen les relacions d'interdependència entre elements de diferents nivells o del mateix nivell mentre que, a l'aplicar AHP, aquestes relacions no es tenen en compte. Aquestes autors arriben a la conclusió que el mètode ANP obté millors resultats que AHP, perquè aplica una anàlisi més sofisticada.

Ilangkumaran et al. (2013) apliquen dos models híbrids que integren diferents tècniques per a l'anàlisi multi-criteri per tal de seleccionar tractaments a la indústria de la fabricació de paper. El primer model aplica FAHP conjuntament amb PROMETHEE, mentre que el segon model integra FAHP amb GRA. En ambdós casos, FAHP s'utilitza per determinar els pesos dels criteris i, a continuació, PROMETHEE i GRA s'apliquen per classificar les diferents alternatives. Els resultats al aplicar ambdues metodologies no presenten diferències significatives en la puntuació de les diferents alternatives considerades.

En altres casos s'apliquen algorismes de decisió, com **Fenner et al. (2007)** que utilitzen un algorisme de decisió per la selecció de tractaments d'aigües en camps de refugiats. Aquests autors proposen 23 alternatives de tractament secundari i 16 criteris d'avaluació, considerant aspectes tècnics i econòmics de les diferents alternatives. S'aplica un diagrama de decisió i, tenint en compte les característiques de cadascuna de les línies de tractament, obtenen diferents puntuacions, en funció dels criteris tècnics i econòmics definits per a cada escenari.

En canvi, **Wibowo et al. (2015)** utilitzen una metodologia on apliquen lògica difusa per definir els pesos de cada criteri i els valors de cada criteri per a cada alternativa considerada, per tal de

modelar la subjectivitat i la imprecisió dels processos de presa de decisions. En el cas d'estudi que expliquen, es té en compte l'opinió de tres persones encarregades de prendre les decisions, que determinen els criteris a considerar i els pesos per a cada criteri, avaluant les diferents alternatives en funció d'aquests criteris. Basant-se en tota aquesta informació, s'obtenen les notes per a cada alternativa considerada.

Kalbar et al. (2016) desenvolupen TechSelect1.0, que és un eina d'ajuda a la decisió basada en escenaris, on cada escenari representa una situació específica amb pesos definits segons la importància de cadascun dels criteris considerats. En primer lloc, es proposen les diferents alternatives de tractament a considerar i, a continuació es seleccionen els criteris a aplicar per l'avaluació de les alternatives. El següent pas és la selecció de l'escenari (de entre 6 possibles escenaris), en funció del l'escenari seleccionat s'estableixen els pesos dels criteris. Finalment, s'utilitza "Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solutions" (TOPSIS) per prioritzar les diferents alternatives. Aquesta tècnica es basa en un algoritme fàcil d'entendre i en lògica difusa que imita el raonament humà, en que la millor alternativa és aquella que presenta una distància menor respecte a la solució ideal, mentre que l'alternativa més desfavorable és aquella que està més distanciada de la solució ideal. Té en compte criteris ambientals (LCA), econòmics i socials. Es tracta d'una eina simple i amb una interfície intuïtiva per l'usuari.

Dursun (2016), desenvolupa una metodologia per avaluar alternatives de tractament d'aigües residuals i determinar la més apropiada aplicant tècniques multi-criteri amb lògica difusa, per tal d'incorporar la incertesa i la imprecisió que hi ha en les decisions preses per grups d'experts. És per això que integra dues tècniques: "decision making trial and evaluation laboratory" (DEMATEL) i TOPSIS. De manera que amb DEMATEL es calculen els pesos per als criteris considerats i amb TOPSIS es puntuen les diferents alternatives. Aquests autors apliquen la seva metodologia a un cas d'estudi per al tractament d'aigua residual urbana, on avaluen l'aplicació de 4 alternatives de tractament diferents, basant-se en el consell dels experts (reactors seqüencials per càrregues (SBR), fangs actius, reactor de flux suspès (UASB) seguit d'una llacuna airejada i humedals artificials). Per fer aquesta anàlisi consideren 8 criteris diferents (incloent criteris econòmics, ambientals i tècnics), resultant ser SBR l'alternativa millor puntuada.

Rawal et al. (2016) utilitzen "Life cycle cost analysis" (LCCA) com a tècnica d'anàlisi multi-criteri per a la selecció del tractament més adequat, basant-se en criteris econòmics. LCCA fa una avaluació dels costos a llarg termini mitjançant diferents criteris econòmics (com CAPEX i OPEX). Tenen en compte 3 alternatives de tractament secundari i apliquen la tècnica LCCA per a la selecció de les alternatives en 12 casos diferents.

WAWTTAR és un EDSS (**Finney i Gerheart, 2004**) que fa una pre-selecció de tractaments a aplicar en poblacions petites. En primer lloc, es necessita crear un escenari, tenint en compte una acurada descripció del cas d'estudi, per la qual cosa precisa de molta informació d'entrada, en forma de 54 preguntes fetes pel programa. A continuació, l'usuari fa el procés de generació d'alternatives, mitjançant la selecció de tecnologies disponibles a la base de dades (hi ha 200, ampliables per l'usuari, entre tecnologies per al tractament d'aigües i per a l'abastiment d'aigua). En el següent pas el programa descarta aquelles línies de tractament proposades per l'usuari que no compleixen amb les característiques d'efluent requerides. Finalment, en funció dels pesos que l'usuari ha donat a cada criteri econòmic, el programa puntuja les diferents línies de tractament, d'una forma similar a la proposada posteriorment per Flores et al., 2005, on la nota final és una suma parcial de la puntuació i pes de cada criteri per a cada alternativa.

1.6.2.3 Sistemes d'ajuda a la decisió que integren les dues fases: generació d'alternatives i anàlisi multi-criteri

També s'han desenvolupat sistemes d'ajuda a la decisió que permeten una anàlisi més global, és a dir, que integren una primera fase de generació d'alternatives, i una segona fase on s'avaluen les alternatives generades. Cal destacar que la primera fase de generació d'alternatives implica una pre-selecció, ja que es descarten aquelles que no compleixen amb determinats requeriments d'efluent. Entre les eines que tenen aquest objectiu, hi destaquen:

El "knowledge-based system" desenvolupat per **Rodríguez-Roda et al. (2000)**, que es basa en el treball de Bañares-Alcántara et al. (1995) on, en primer lloc, es defineixen els objectius a aconseguir (requeriments d'efluent, minimització d'espai, etc.) per, a continuació, seleccionar les alternatives de tractament a aplicar mitjançant preguntes que l'usuari ha d'anar responnent, amb l'ajuda de la informació inclosa a l'eina. De forma que es van seleccionant o descartant els diferents tractaments per tal de generar el llistat de tecnologies aplicables en cada cas. A més, l'usuari pot assignar diferents pesos als objectius, per tal d'avaluar les diferents alternatives. Aquest sistema permet, un cop definit l'escenari i seleccionats els diferents tractaments que conformen el diagrama de flux d'una EDAR, determinar si la modificació d'alguns dels objectius (com la qualitat de l'efluent) fa variar tant les alternatives més adients com la puntuació en l'avaluació de les mateixes.

SANEX és un EDSS desenvolupat per **Loetscher et al. (2002)** per ajudar a la presa de decisions en la selecció de tractaments d'aigües residuals a països en vies de desenvolupament. Aquest EDSS utilitza "Conjunctive elimination", que es una tècnica que permet generar un llistat

d'alternatives aplicables en funció de les característiques tècniques de cadascuna. A continuació, l'avaluació de les alternatives generades es fa mitjançant la tècnica MLA per tal d'agrupar criteris, minimitzant el nombre de comparacions a fer. Aquesta avaluació es fa tenint en compte factors tècnics, institucionals i socio-culturals. De les 9 validacions fetes en l'estudi, els usuaris indiquen que les alternatives proposades per SANEX són molt bones. En canvi, els resultats de puntuació de les alternatives proposades presenten algunes disconformitats, ja que els usuaris consideren complicat fer una valoració qualitativa de les alternatives, perquè implica subjectivitat. A banda d'això, molts dels usuaris veien el programa com un model "Black-box", ja que no acabaven d'entendre el funcionament de la tècnica MLA.

Comas et al. (2004) desenvolupen un EDSS que consisteix en un "knowledge based system" per la selecció del tractament d'aigües residuals en petites poblacions. En aquest programa, en primer lloc, l'usuari defineix l'escenari amb les característiques del lloc d'estudi. A continuació, a partir de la informació inclosa a la base de dades, l'eina fa la pre-selecció de les alternatives de tractament adequades per a l'escenari definit. Per a cada alternativa es dona informació sobre CAPEX i OPEX i, a més, s'indica quines alternatives han estat seleccionades, quines descartades i el motiu pel que s'han seleccionat o descartat. Finalment es fa una avaluació dels tractaments seleccionats on s'indiquen els motius (tècnics i/o econòmics) pels quals s'afavoreix una alternativa o una altra. L'eina s'aplica a 3500 casos reals amb resultats satisfactoris, ja que l'opinió dels experts coincideix amb els tractaments proposats per l'eina. Posteriorment, **Alemany et al. (2005)** apliquen aquesta eina a 76 poblacions petites de la conca del riu Fluvià. Els resultats obtinguts per a aquesta conca es comparen amb els obtinguts en altres conques de Catalunya que presenten característiques diferents, per tal d'avaluar quines són les característiques més significatives a l'hora d'identificar els tractaments d'aigües residuals més adients.

La metodologia desenvolupada per **Chamberlain et al. (2014)**, fa servir ontologies per estructurar les bases de dades, de manera que s'inclou coneixement d'experts de diferents camps tenint en compte una terminologia comú. A més, incorporen bases de dades amb les característiques dels tractaments i, per tal de generar les alternatives (inclou en total 25 tecnologies), apliquen un mètode automàtic on es considera cada operació unitària per separat i en combinació amb totes les altres, és a dir, no hi ha cap regla de compatibilitat entre els diferents tractaments de les diferents operacions unitàries, si no que en cada cas es va "descobrint" si són compatibles o no. D'aquesta forma es busca evitar possibles errors al no considerar compatibles alguns tractaments que potser sí que ho serien. Finalment, apliquen un sistema de visualització interactiva per tal d'avaluar les diferents alternatives generades tenint

en compte criteris econòmics, socials i ambientals. Aquesta metodologia és un prototip d'EDSS que integra coneixement de diferents camps on l'usuari pot "jugar" amb els criteris a considerar per l'avaluació de les alternatives generades.

D'altra banda, s'ha de mencionar que també s'apliquen EDSS per al control de procés d'EDAR, com és el cas del sistema DAI-DEPUR (Sánchez-Marrè et al., 1996), que aplica tècniques d'intel·ligència artificial en un EDSS per a la supervisió d'una EDAR. En aquest programa, els processos de l'EDAR estan representats per agents, que col·laboren en una arquitectura en capes. Aquest sistema integra: diferents subsistemes (o agents) que interactuen, una combinació de capacitats per la resolució de problemes, raonament i tasques d'aprenentatge en una mateixa estructura. DAI-DEPUR s'aplica de forma satisfactòria i es va llançar al mercat com ATL-EDAR per l'optimització del procés de depuració (Sánchez-Marrè et al., 2004).

Per tant, d'aquest apartat (1.6.2 Sistemes d'ajuda a la decisió) s'arriba a la conclusió de que la majoria de EDSS han estat desenvolupats per fer una anàlisi multi-criteri d'una pre-selecció d'alternatives de tractament. La tècnica més aplicada per fer aquestes anàlisis ha estat AHP encara que hi ha una tendència creixent a aplicar AHP combinat amb altres tècniques. La combinació de AHP amb les altres tècniques permet una millora dels resultats al considerar interrelacions entre diferents factors (com és el cas del GRA) o al tenir en compte la imprecisió del raonament humà (amb l'aplicació de la lògica difusa). En els darrers anys s'han començat a desenvolupar més eines multi-criteri per al tractament d'aigües residuals industrials, açò està relacionat amb la creixent demanda de tractament de les aigües residuals industrials en origen, el que implica la instal·lació de més EDAR industrials.

Sembla que s'incideix menys en el desenvolupament d'eines que donin suport a la primera etapa de generació d'alternatives, transferint aquest procés de pre-selecció d'alternatives als experts encarregats de la presa de decisió. Açò implica un risc ja que, en la majoria dels casos, els experts tendeixen a basar la seva proposta en casos recents o més coneguts per a ells, la qual cosa proporciona una visió limitada i esbiaixada del conjunt de tractaments que podrien ser d'aplicació en cada cas (Sánchez-Marrè et al., 2011).

De fet, Hajkowicz i Collins (2007) fan una revisió de les eines d'anàlisi multi-criteri aplicades a la planificació i gestió de l'aigua i conclouen que l'aplicació d'aquestes metodologies al sector està molt estesa i en constant creixement des de finals dels anys vuitanta. En canvi, identifiquen la necessitat de desenvolupar eines que permeten definir l'estructura del problema, es a dir, generar les línies de tractament en un procés previ a la seva avaluació mitjançant eines d'anàlisi

multi-criteri. Per tant, hi ha una necessitat d'eines que donin suport a l'etapa de generació d'alternatives de tractament.

D'altra banda, s'ha pogut identificar que les eines que inclouen ambdues fases (generació i avaluació d'alternatives) utilitzen diferents metodologies, però totes elles inclouen algun tipus de base de dades amb tot el coneixement de les diferents alternatives de tractament disponibles. Una altra característica que tenen en comú, és que apliquen regles per tal de descartar aquelles alternatives que no permeten aconseguir la qualitat d'efluent necessària. Un cop generades les diferents alternatives aplicables, la seva avaluació té lloc en una segona fase, on es tenen en compte criteris econòmics i/o ambientals. L'anàlisi multi-criteri es basa en la quantificació dels criteris i els pesos assignats a cada criteri, excepte en el cas de Loetscher et al. (2002) on s'aplica una anàlisi multi-criteri en forma d'arbre, per agregar diferents criteris. En la majoria dels casos es tracta d'eines que han estat aplicades a escala real (excepte en el cas de Chamberlain et al., 2014, que es un prototip) de les quals s'han publicat els resultats de la seva validació.

Hi ha dos motius principals que poden explicar perquè s'investiga molt més en la sistematització de les anàlisi multi-criteri i no en l'anterior etapa de generació d'alternatives:

1) El primer d'ells és que una eina que té com a objectiu la generació d'alternatives de tractament precisa d'una base de dades amb informació sobre les diferents tecnologies. Per tant, la complexitat que implica la generació de bases de dades completes amb les característiques de tots els tractaments disponibles pot ser un dels motius principals pels quals s'avança menys en la sistematització d'aquesta part del procés de presa de decisions. A més, aquestes bases de dades s'han d'anar actualitzant amb noves tecnologies i amb noves dades de les tecnologies ja incloses per tal que els sistemes no quedin obsolets. Per fer aquesta actualització, és interessant que aquestes bases de dades siguin fàcilment accessibles i modificables per l'usuari.

2) El segon motiu és que, en general, tant a l'administració com a les empreses, a l'hora de fer el primer cribatge de tractaments a aplicar no es consideren tots els tractaments disponibles al mercat, si no aquells més coneguts o dels que se'n coneix l'aplicació en casos similars. Per tant, es limiten a fer una avaluació d'un llistat molt limitat de tecnologies. No obstant això, quan es considera el pre-disseny d'EDAR industrial, el context canvia, ja que és un sector molt més dinàmic que el d'EDAR urbana. Per tant, hi ha un ventall major d'alternatives de tractament a aplicar i la investigació en el tractament d'aigües industrials en els diferents sectors avança ràpidament, per la qual cosa no estan tan delimitats els tractaments a aplicar en cada cas.

Per tant, les eines que incorporen les dues fases (generació d'alternatives i anàlisi multi-criteri), impliquen una major sistematització del procés de presa de decisió. I, a banda d'això, aquest tipus de EDSS permeten fer una anàlisi més detallada de la situació, considerant un rang major de tractaments, evitant descartar, sense haver analitzat, la possible millor solució. Finalment, l'avaluació de les diferents alternatives considerades tenint en compte diferents criteris és un pas imprescindible en un context en que s'han de prioritzar no només criteris econòmics i tècnics, si no que les característiques ambientals dels tractaments seleccionats juguen un paper molt important.

1.6.3 Programació matemàtica (optimitzadors)

La programació matemàtica s'utilitza sobretot per optimitzar una solució minimitzant el valor d'una funció objectiu. Les eines basades en aquesta metodologia consideren un nombre reduït d'alternatives de tractament a aplicar, per tant, s'utilitzen en una etapa posterior als sistemes d'ajuda a la decisió, per tal de determinar l'alternativa de tractament més adequada d'entre el llistat de possibilitats generat per un EDSS (Fig. 5). En aquest cas, la aplicació de diferents models permet obtenir característiques més detallades de les diferents alternatives de tractament considerades (per exemple la generació de fangs i el consum d'oxigen). Entre els darrers optimitzadors desenvolupats, hi destaquen:

1.6.3.1 Optimitzadors d'alternatives de tractament

En el programa desenvolupat per **Bozkurt et al. (2015)**, utilitzen un mètode d'optimització basat en programació matemàtica per tal d'identificar les línies de tractament per a una EDAR. La línia de tractament òptima és aquella que aconsegueix la minimització de la funció objectiu (que considera CAPEX i OPEX) tenint en compte també que compleix amb un límits d'abocament especificats en cada cas. S'utilitza una superestructura per representar les diferents alternatives de tractament, i les característiques de cada tractament s'inclouen en una base de dades. Per calcular els paràmetres i especificacions de les diferents tecnologies, s'apliquen models implementats a Matlab (com ATV design standards (2000)). Finalment, el problema es formula com un "Mixed Integer Non-Linear Programming" (MI(N)P) mitjançant "general algebraic modeling software" (GAMS) i es resol amb el solver CPLEX per tal d'obtenir la solució òptima.

El mètode desenvolupat per **Sueviriyapan et al. (2016)** s'utilitza per al re-disseny de processos industrials ja existents, per tal d'optimitzar la gestió de les aigües de procés i residuals, tenint en

compte criteris tant econòmics com ambientals. En aquest sentit, consideren tot el cicle de l'aigua dins la indústria, des de la generació fins al tractament, optimitzant les línies. Apliquen una metodologia similar a la de Bozkurt et al., 2015, és a dir, una superestructura on el problema es formula com MI(N)P.

Puchongkawarin et al. (2015), utilitzen un optimitzador, també basat en una superestructura, per poder considerar un elevat nombre de tecnologies i les connexions entre elles. L'optimització es fa aplicant MINLP amb un software d'optimització matemàtica (en concret GAMS) i la funció objectiu pot tenir en compte factors ambientals i econòmics. En aquest cas, per estimar els rendiments es tenen en compte els resultats obtinguts en simuladors, com GPS-X, i per als costos s'apliquen els resultats obtinguts amb el software de costos Capdetworks. A partir dels resultats obtinguts amb els simuladors, utilitzen models matemàtics de regressió per calcular els rendiments d'eliminació dels diferents contaminants, així com per estimar els costos de cada tractament. Aquesta metodologia es va desenvolupar per ajudar en el procés de selecció de tractaments en EDAR industrial per a la línia d'aigua, on es prioritza la recuperació de recursos minimitzant els costos. Aquests autors proposen utilitzar simuladors per tal de refinar els rendiments i la predicció de costos de l'alternativa òptima.

1.6.3.2 Optimitzadors de disseny

El programa desenvolupat per **Rivas et al. (2008)** té un objectiu diferent al dels optimitzadors anteriors, ja que presenten una metodologia basada en models que proporciona el disseny òptim d'una EDAR. Aquesta metodologia proposa la formulació del disseny òptim d'una EDAR com un problema d'optimització i soluciona aquest problema combinant tècniques de simulació d'EDAR (càlculs en estat estacionari i simulació dinàmica) amb mètodes d'optimització no lineal. El model s'enfoca a seleccionar els paràmetres de disseny del tractament biològic que minimitzen el volum dels reactors, mentre compleixen amb els requeriments d'efluent. Es presenten dos tipus d'aplicacions del programa, en la primera, es calculen les dimensions òptimes de la planta per a condicions de temperatura baixes, mentre que en la segona s'optimitza el disseny d'una planta per a la seva operació a llarg termini, calculant també paràmetres operacionals com el "set-point" òptim per a l'oxigen dissolt, etc. Algunes enginyeries utilitzen aquest programa i s'han dissenyat unes vint plantes noves a Espanya obtenint resultats satisfactoris.

Per tant, hi ha dos tipus d'optimitzadors, els primers son aquells en que l'objectiu es prioritzar una alternativa de tractament respecte a les altres considerades en un llistat d'alternatives pre-

seleccionades (apartat 1.6.3.1), son els casos en que s'utilitzen superestructures formulant el problema com MILP o MINLP. I els altres tipus d'optimitzadors utilitzen una metodologia diferent que consisteix en optimitzar el disseny d'una alternativa en concret, aplicant models de simulació. Per tant, aquests dos tipus d'optimitzadors es poden fer servir de forma consecutiva, de forma que, en primer lloc, s'optimitze l'alternativa a aplicar i, a continuació, s'optimitza el disseny.

1.6.4 Models de simulació

Els models de simulació s'utilitzen per obtenir un disseny més acurat de l'alternativa seleccionada (o de les alternatives "finalistes" després d'una prèvia selecció d'alternatives)(Fig. 5). Aquestes eines permeten definir variables de disseny i estimar els rendiments en diferents condicions (Hamouda et al., 2009). Per tant, permeten determinar paràmetres com els volums de tanc necessaris (que estan relacionats amb el CAPEX), així com les característiques operacionals més adequades (com les necessitats energètiques i la producció de fangs, relacionades amb l'OPEX).

1.6.4.1 Tipus de models de simulació

Gernaey et al. (2004) classifiquen els models en "white-box" (**Henze et al., 1987**), "black-box" (**El-Din and Smith, 2002**), "stochastic grey-box" (**Bechmann et al. 1998**) i "hybrid models" (**Crowley et al., 2001**). Els models "white-box" (com els "Activated Sludge Models" (ASM) desenvolupats per la "International water association" (IWA) s'utilitzen per descriure determinats processos, com l'eliminació biològica de nitrogen i fòsfor en els processos de fangs actius. Mentre que els altres tres tipus de models complementen el coneixement inclòs en els models "white-box", estimant les concentracions a l'influent, l'activitat de la biomassa i els paràmetres de qualitat de l'efluent (Gernaey et al., 2004).

Dintre dels models de simulació, cal destacar els models basats en el concepte PWM, que fan una simulació integrada de tota la planta mitjançant l'acoblament de diferents models per representar cada tractament en cada operació unitària, açò permet conèixer el comportament de la planta quan s'aplica una determinada línia de tractament completa. Hi ha dues aproximacions per a PWM, l'anomenat (i) "Interfaces" on cada procés es modela per separat i després s'utilitzen uns convertidors per unir les diferents operacions unitàries i obtenir els resultats per al conjunt de la planta (**Copp et al., 2003**) i (ii) "Supermodel", on es tenen en

compte tots els components i transformacions necessaris per reproduir cada procés en el conjunt de la planta (**Seco et al., 2004**). En aquests models els components i les transformacions són comuns per a totes les unitats de procés del model, per la qual cosa no es necessiten convertidors per connectar els diferents models de processos. Per contra, aquests models poden ser innecessàriament complexos, ja que s'inclouen components i transformacions que potser no es requereixen en tots els casos específics.

D'altra banda, **Grau et al. (2007)** apliquen una metodologia diferent que combina aspectes de les dues aproximacions de PWM. Amb aquesta metodologia es selecciona el conjunt de transformacions compatibles de cada procés necessàries per modelar tots els elements de les operacions unitàries de tota la planta, de manera que no necessita convertidors per unir els diferents processos (a diferència de l'aproximació "Interfaces") i, a més, el model es dissenya "a mida" per a cada cas d'estudi, disminuint la seva complexitat i permetent la inclusió de nous processos (a diferència de l'aproximació "Supermodel"). Aquesta metodologia permet simular d'una forma integrada el comportament dinàmic de tota una EDAR al mateix temps que facilita la simulació de la continuïtat de la massa i la càrrega en tota la planta. **Fernández-Arevalo et al. (2014)** han inclòs balanços d'entalpia a aquesta metodologia, per tal de predir de forma dinàmica els fluxos de temperatura i calor en tots els processos unitaris d'una EDAR. La darrera actualització d'aquest model, desenvolupada per **Lizarralde et al. (2015)**, incorpora els models per tenir en compte les transformacions bioquímiques, físic-químiques i químiques. Per tant, el model es va actualitzant per tal de fer front a les noves necessitats i per considerar tots els paràmetres que intervenen en una EDAR de forma integrada.

1.6.4.2 Marc de referència per al control d'EDAR

D'altra banda, s'està treballant contínuament en el desenvolupament d'un protocol de simulació estandarditzat, per tal de millorar les estratègies de control d'operació d'EDAR, que es recull en els "Benchmark Simulation Models" (BSM). Es tracta d'una plataforma que integra diferents models per tal d'establir un marc de referència per al control d'EDAR amb tractament biològic de fangs actius. Aquesta eina ha anat evolucionant des de la seva primera definició (Spanjers et al., 1998) per tal d'apropar-se més a la realitat. Hi destaquen les actualitzacions per tal d'incloure l'EDAR completa, de forma integrada (**Jeppsson et al., 2006**), així com la integració d'un model per generar influents per a simulacions de llarg termini (**Gernaey et al., 2011**). Els BSM s'utilitzen en software de simulació comercials (com GPS-X i WEST).

1.6.4.3 Altres models

Finalment, en aquest grup d'eines també s'inclouen els models per al càlcul de paràmetres que serveixen per a l'anàlisi multi-criteri d'un EDSS (per exemple com un mòdul dins del EDSS), és el cas dels models per al càlcul del LCA. El LCA es un procediment quantitatiu per determinar els impactes ambientals associats a diferents productes, processos i serveis, que s'utilitza per fer l'avaluació d'impacte ambiental (Baumann i Tillman, 2004). En aquest sentit s'han desenvolupat metodologies que permeten calcular l'impacte ambiental de les diferents alternatives de tractament d'aigua (Foley et al., 2010; Hospido et al. 2012), de forma que es pot considera el vector ambiental en la prioritització d'alternatives de tractament.

D'aquest apartat (1.6.4 Models de simulació) s'extreu que hi ha una gran varietat de models en el sector del tractament de l'aigua. Alguns d'ells es centren en els processos concrets que tenen lloc dintre d'un tractament, altres simulen tot el tractament, tenint en compte tots els processos que hi intervenen i, a un nivell més elevat hi ha els models que consideren la integració de diferents models per tenir en compte tota l'EDAR.

En els darrers anys, s'està treballant molt en el desenvolupament de models integrats, sota el concepte PWM, així com en la definició de marcs de referència per al control d'EDAR mitjançant els BSM.

L'aplicació d'uns models o d'uns altres dependrà de l'objectiu específic en cada cas. Quant a la presa de decisió en la selecció d'alternatives de tractament, aquests models permeten definir les característiques (consums energètics i de reactius, etc.) de diferents alternatives de tractament, facilitant la selecció de la més adequada en cada cas.

Per últim, el càlcul dels paràmetres relacionats amb els criteris (econòmics, ambientals i tècnics) per desenvolupar l'anàlisi multi-criteri en un EDSS, es fa mitjançant l'aplicació diferents tipus de models, més o menys complexos en funció de les necessitats específiques.

1.6.5 EDSS combinats amb models matemàtics

Algunes eines combinen EDSS amb models matemàtics de diferents formes:

1.6.5.1 EDSS per generar alternatives amb optimitzadors

Les eines desenvolupades per Wukovits et al. (2003), Statyukha et al. (2008) i Huang et al. (2015), a més de generar línies d'alternatives de tractament, incorporen també models matemàtics que permeten fer l'etapa d'optimització.

Wukovits et al. (2003) apliquen un “knowledge based system” per generar les alternatives de línies tractament segons la composició de l'aigua d'origen industrial a tractar. Per tal de fer la selecció dels diferents tractaments, en cada operació unitària es considera la heurística i l'optimització de costos. La base de dades inclou informació sobre les diferents indústries, els contaminants, i els tractaments a aplicar. El programa inclou l'opció de fer una optimització considerant cada operació unitària per separat (utilitzant un algoritme senzill) o per tota la línia d'aigua (mitjançant un algoritme més complex).

Statyukha et al. (2008), desenvolupen una eina per a ajudar en la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües industrials seleccionant l'alternativa òptima basant-se en el cost. En primer lloc, apliquen una anàlisi “pinch” de l'aigua, junt amb paràmetres per calcular els rendiments, per tal de desenvolupar una estructura inicial. Amb aquesta informació és genera una superestructura, que és el punt inicial per a l'optimització no lineal. S'utilitza un algoritme d'optimització simple però robust amb l'objectiu de minimitzar el CAPEX. Aquesta metodologia s'ha desenvolupat per ajudar a la decisió en la selecció dels tractament d'aigües per plantes industrials petites i mitjanes, obtenint resultats satisfactoris quan s'ha validat amb dades bibliogràfiques.

D'altra banda, hi ha sistemes que integren tot el cicle integral de l'aigua urbana, com és el cas del desenvolupat per **Huang et al. (2015)**, que té en compte la xarxa de sanejament, la gestió d'aigües pluvials, el tractament de les aigües residuals i la reutilització d'aigües. Utilitza: (i) un “knowledge base system” que inclou regles per generar els tractaments a aplicar, així com informació sobre les característiques dels tractaments (rendiments i costos); (ii) un mòdul per generar les alternatives de disseny del sistema, tenint en compte les regles incloses a la “knowledge base” i (iii) un algoritme anomenat “non-dominated sorting genetic algorithm” (NSGA-II) per fer l'optimització en funció dels requeriments de qualitat de l'aigua i de criteris econòmics (CAPEX i OPEX). Aquest model té l'objectiu de ser utilitzat per a fer una planificació preliminar de l'estructura del sistema de l'aigua urbana.

1.6.5.2 EDSS per fer anàlisi muti-criteri amb optimitzadors

La metodologia presentada per **Vidal et al., (2002)** aplica un procés de decisió jerarquitzat incloent models matemàtics. Aquest EDSS incorpora una tècnica d'ajuda a la decisió anomenada "Decision rationale management system" (DRAMA) prèviament desenvolupada per **Bañares-Alcántara et al. (1995)**, que és un procés de decisió jerarquitzat en que es van seleccionant les diferents unitats que conformen una EDAR. En primer lloc es defineixen els objectius del cas d'estudi, a continuació les alternatives a considerar (tenint en compte una sèrie de preguntes) i, per últim, es seleccionen els criteris per avaluar les diferents alternatives, amb els respectius pesos. Finalment, amb el simulador d'EDAR GPS-X s'obté la informació dels paràmetres operacionals de cada alternativa de tractament, que serveix com a base per desenvolupar l'anàlisi multi-criteri.

1.6.5.3 Tècniques d'intel·ligència artificial amb models "white-box"

Hi ha varies aplicacions de models "white-box" combinats amb tècniques d'intel·ligència artificial per a desenvolupar eines per al control d'EDAR. Aquestes eines, encara que no s'utilitzen de forma directa per a la selecció d'alternatives de tractament, si que s'apliquen per a ajudar a la presa de decisió en els processos de control d'EDAR. En aquests tipus de sistemes, els mètodes d'intel·ligència artificial poden maximitzar el coneixement extret de les dades i de l'experiència de l'operador de planta, aplicant aquest coneixement per millorar el control de l'EDAR (Gernaey et al., 2004).

En aquest sentit, **Sánchez-Marrè et al. (1999)** apliquen la metodologia "case-based reasoning" per a sistemes continus, on es generen dades contínuament, com és la supervisió d'una EDAR. Aquesta tècnica permet guardar informació sobre els diferents casos i recuperar-la de forma ràpida. Per això, apliquen un criteri de rellevància perquè el sistema aprengui només de les noves experiències que siguin rellevants (per evitar una acumulació excessiva de casos) i un algoritme anomenat "lazy learning algorithm" per evita la sobrecàrrega.

D'altra banda, **Rodriguez-Roda et al. (2002)** desenvolupen un sistema que incorpora algoritmes de control amb tècniques d'intel·ligència artificial per ajudar en l'operació d'EDAR, en concret es tracta d'un "knowledge-based hybrid supervisory system". Aquest sistema treballa a tres nivells: adquisició de dades, diagnosi i ajuda a la decisió. El primer nivell, a més de l'adquisició de dades inclou la validació de dades i càlculs. Per a la diagnosi i l'ajuda a la decisió s'inclou un

sistema expert, per detectar problemes en l'operació, i una metodologia "case-based reasoning", per classificar les dades operacionals de cada dia com un cas i comparar-lo amb l'històric d'experiències, per tal d'aprendre d'experiències operacionals anteriors. Aquest sistema es va aplicar a una EDAR real de forma satisfactòria per ajudar en temps real a l'operació de la instal·lació.

Per tant, l'aplicació d'eines que inclouen més d'una de les etapes clau del procés de selecció d'alternatives (com és la pre-selecció d'alternatives i l'optimització), permet agilitzar el procés de selecció d'alternatives. En aquest sentit, s'han desenvolupat metodologies que integren EDSS amb optimitzadors, donant lloc a una visió més global del problema.

En els darrers anys la investigació s'ha centrat sobretot en el desenvolupament d'eines que integren la generació d'alternatives a aplicar amb una optimització per tal de determinar l'alternativa més adequada en cada cas.

Taula 1. Resum de les diferents eines desenvolupades per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals que utilitzen tècniques d'intel·ligència artificial.

Referència	Objectiu	Tècniques aplicades	Criteris considerats
Krovvidy et al., 1991	EDAR urbana	“artificial neural networks”	Econòmics
Evenson i Baetz, 1994	EDAR urbana	“decision trees”	Tècnics
Tang et al., 1997	EDAR urbana	“analytical hierarchy process”	Econòmics
Sánchez-Marrè et al., 1999	Control de procés d'EDAR	“case-based reasoning” and “white-box model”	Tècnics
Freitas et al., 2000	EDAR Industrial	“knowledge-based expert System”, “relational data-base”, “rule-based paradigms” i “object-oriented paradigms”	Tècnics
Rodríguez-Roda et al., 2000	EDAR urbana	“knowledge-based system”	Tècnics, econòmics i ambientals
Loetscher et al., 2002	EDAR països en vies de desenvolupament	“conjunctive elimination”, “multi-attribute utility technics” i “multi-level amalgamation”	Tècnics i ambientals
Rodríguez-Roda et al., 2002	Control de procés d'EDAR	“knowledge-based hybrid supervisory system”, “case-based reasoning” i “white-box model”	Tècnics, econòmics i ambientals
Vidal et al., 2002	EDAR urbana	“hierarchical decision process” i “mathematical modelling”	Tècnics, econòmics i ambientals
Wukovits et al., 2003	EDAR industrial	“knowledge based system”, “heuristics”, “process synthesis” i “mathematical programming”	Econòmics

Comas et al., 2004	EDAR urbana menor a 2000 hab-eq	“knowledge base system”	Tècnics, econòmics i ambientals
Finney i Gerheart, 2004	EDAR urbana	N/A	Econòmics
Hamed et al., 2004	EDAR urbana	“artificial neural networks”	Tècnics
Sánchez-Marrè et al., 1996 i Sánchez-Marrè, et al., 2004	Control de procés d’EDAR	“agent based systems”	Tècnics, econòmics i ambientals
Flores et al., 2005	EDAR urbana	suma parcial de notes i pesos dels diferents criteris	Tècnics, econòmics i ambientals
Zeng et al., 2007	EDAR urbana	“hierarchy Grey Relational Analysis”	Tècnics i econòmics
Fenner et al., 2007	EDAR camps de refugiats	“decision algorithm”	Tècnics, econòmics i ambientals
Ashley, 2008	EDAR urbana	“preference ranking organization method for enrichment evaluation”	Tècnics, econòmics i ambientals
Statyukha et al., 2008	EDAR industrial	“wastewater pich techniques” i “mathematical programming”	Econòmics
Bottero et al., 2011	EDAR industrial (formatges)	“analytical hierarchy process” i “analytical network process”	Tècnics, econòmics i ambientals
Karimi et al., 2011	EDAR urbana	“ analytical hierarchy process ” i “fuzzy analytical hierarchy process ”	Tècnics, econòmics i ambientals
Pophali et al., 2011	EDAR industrial (curtits)	“analytical hierarchy process ” i “grey relational analysis”	Tècnics i econòmics
Maurer et al., 2012	EDAR urbana	“compatibility-based procedure”	Tècnics

Ilangkumaran et al., 2013	EDAR urbana	“fuzzy analytical hierarchy process”, “preference ranking organization method for enrichment evaluation” i “grey relational”	Tècnics, econòmics i ambientals
Prasad et al., 2013	EDAR urbana	“ analytical hierarchy process ”	Tècnics, econòmics i ambientals
Chamberlain et al., 2014	EDAR urbana	“ontology”, “database of components”, “community contexts” i “an automated method for generating alternatives”	Tècnics, econòmics i ambientals
Aydiner et al., 2016	EDAR industrial (lactis)	“ analytical hierarchy process ”	Tècnics, econòmics i ambientals
Huang et al., 2015	Cicle integrat de l’aigua	“knowledge base”, “a treatment generation module” i “a multi-objective optimization module”	Tècnics, econòmics i ambientals
Ouyang et al., 2015	EDAR urbana	“fuzzy analytical hierarchy process ” i “multidimensional scaling”	Tècnics, econòmics i ambientals
Wibowo et al., 2015	EDAR urbana	“Interval-valued based intuitionistic fuzzy numbers”	Tècnics, econòmics i ambientals
Dursun, 2016	EDAR urbana	“decision making trial and evaluation laboratory” i “technique for order of preference by similarity to ideal solution”	Tècnics, econòmics i ambientals
Kalbar et al., 2016	EDAR urbana	“technique for order preference by similarity to ideal solutions”	Tècnics, econòmics i ambientals
Rawal et al., 2016	EDAR urbana	“life cycle cost analysis”	Econòmics

Taula 2. Resum de les diferents eines desenvolupades per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals que utilitzen programació matemàtica i simuladors i models.

Referència	Objectiu	Tècniques aplicades	Criteris considerats
Henze et al., 1987	Control de procés d'EDAR urbana	"white-box models"	Tècnics
Bechmann et al. 1998	Control de procés d'EDAR urbana	"stochastic grey-box models"	Tècnics
Crowley et al., 2001	Control de procés d'EDAR urbana	"hybrid models"	Tècnics
El-Din i Smith, 2002	Control de procés d'EDAR urbana	"black-box models"	Tècnics
Copp et al., 2003	Control de procés d'EDAR urbana	"plant-wide models -interfaces"	Tècnics
Seco et al., 2004	Control de procés d'EDAR urbana	"plant-wide models -supermodel"	Tècnics
Jeppsson et al., 2006	Control de procés d'EDAR urbana	"plant-wide models"	Tècnics
Grau et al., 2007	Control de procés d'EDAR urbana	"plant-wide models"	Tècnics, econòmics i ambientals

Rivas et al., 2008	Control de procés d'EDAR urbana	“non-linear optimisation” i “steady-state calculation and dynamic simulation”	Tècnics i econòmics
Foley et al., 2010	EDAR urbana	“life cycle assessment”	Ambientals
Gernaey et al., 2011	Control de procés d'EDAR urbana	“stochastic grey-box models”	Tècnics
Hospido et al., 2012	EDAR urbana	“life cycle assessment”	Ambientals
Fernández-Arevalo et al., 2014	Control de procés d'EDAR urbana	“plant-wide models”	Tècnics, econòmics i ambientals
Bozkurt et al., 2015	EDAR urbana	“superstructure optimization problem formulated as mixed integer (non)linear programming”	Econòmics
Lizarralde et al., 2015	Control de procés d'EDAR urbana	“plant-wide models”	Tècnics, econòmics i ambientals
Puchongkawarin et al., 2015	EDAR urbana	“superstructure optimization problem” i “regression models”	Tècnics, econòmics i ambientals
Sueviriyapan et al., 2016	Gestió d'aigües a la indústria	“superstructure optimization problem formulated as mixed integer (non)linear programming”	Tècnics, econòmics i ambientals

1.7 Limitacions dels EDSS desenvolupats

A partir de la revisió bibliogràfica, on s'identifiquen els EDSS desenvolupats fins a l'actualitat, i, tenint en compte les necessitats a nivell d'aplicació real d'un EDSS (mitjançant tant el treball a l'empresa com les referències bibliogràfiques) es detecten les següents mancances en les eines desenvolupades fins ara:

- **Aplicació al “món real”**

Encara que s'han desenvolupat molts EDSS en els darrers anys, només uns pocs (en concret SANEX i WAWTTAR) han arribat al mercat, és a dir, que realment estan sent aplicats per donar suport als encarregats de la presa de decisions.

El motiu principal pel que no s'apliquen els altres EDSS pot ser perquè son massa complicats per usuaris no experts o bé perquè operen en forma de “black-box”, és a dir, que l'usuari no pot veure ni interferir en el funcionament intern del programa, el que dificulta la confiança dels usuaris en els resultats.

Segons Hamouda et al. (2009), perquè un EDSS pugui ser àmpliament utilitzat, s'han de tenir en compte aquests aspectes:

- que estigui verificat i validat
- que apliqui una interfície intuïtiva per l'usuari
- que els objectius del EDSS estiguin ben definits

- **Adaptació al context actual**

Els primers EDSS desenvolupats tenien en compte només criteris econòmics i/o tècnics. En canvi, una gran part dels EDSS desenvolupats en els darrers 15 anys ja integren el vector ambiental com a criteri a aplicar a l'hora de seleccionar els tractaments. En canvi, alguns dels EDSS desenvolupats més recentment només consideren aspectes econòmics (Maurer et al., 2012, Rawal et al., 2016).

Per tant, és important incidir en la importància de tenir en compte aspectes tant econòmics com ambientals i tècnics per tal de considerar la viabilitat dels diferents tractaments.

- **Etapas del procés de presa de decisions**

La majoria dels EDSS identificats intervenen en el segon *brainstorming* del procés de presa de decisions (Fig. 1). Aquesta etapa fa referència a l'avaluació del llistat de tecnologies seleccionades al primer *brainstorming* del procés. Per tant, la sistematització de l'etapa d'avaluació de les tecnologies pre-seleccionades està bastant estesa però, com apuntaven Hajkowicz i Collins (2007) s'identifica la necessitat de desenvolupar eines per definir l'estructura del problema, és a dir, que actuen en l'etapa de generació d'alternatives de tractament.

L'automatització d'aquesta generació d'alternatives permet reduir el risc d'estar descartant alternatives que es podrien aplicar (potser constituint finalment la millor opció) pel fet que els encarregats de la presa de decisió no hi estan familiaritzats o no hi pensen en el moment de fer l'estudi d'alternatives.

De fet, s'identifiquen algunes eines que integren la etapa de generació d'alternatives amb una anàlisi multi-criteri de les alternatives pre-seleccionades (Comas et al., 2004; Chamberlain et al., 2014).

D'altra banda, les eines que fan servir models matemàtics, com els optimitzadors, poden aplicar-se per sistematitzar el procés de presa de decisions un cop s'han generat i pre-seleccionat les alternatives de tractament. Per tant, aquests sistemes s'han d'aplicar conjuntament amb altres eines o bé amb l'ajuda d'experts que facin els passos previs de generació i pre-selecció d'alternatives de tractament.

Pel que fa als models de simulació, en el procés de selecció d'alternatives (Fig. 1), es poden emprar per automatitzar la fase de càlcul, prèvia al darrer *brainstorming* o bé per definir les característiques de disseny de l'alternativa finalment seleccionada. Per tant, s'apliquen a la part final del procés de selecció.

Per tant, la sistematització del diagrama de decisió implica l'aplicació de diferents eines, per tal dur a terme un anàlisi complet (Fig. 5).

- **Adaptació a l'usuari (informació necessària i interfície intuïtiva)**

Com s'ha esmentat abans, els EDSS han de ser fàcils d'utilitzar, en aquest sentit hi ha dos factors crítics:

- Informació d'entrada necessària. És important tenir en compte que, en la majoria dels casos, només es disposa d'una analítica bàsica de l'influent. Per la qual cosa, com més simplificada sigui la informació necessària per generar un nou cas d'estudi al EDSS, s'amplia l'aplicació de l'eina a més casos. Hi ha EDSS en que s'ha d'especificar un número elevat de paràmetres per poder començar a funcionar (Chamberlain et al., 2014), la qual cosa fa que no es pugui aplicar en la majoria dels casos perquè no es disposa de la informació necessària per al seu funcionament.
- Interfície intuïtiva. Els EDSS han de ser fàcils d'utilitzar, en cas contrari es limita la seva aplicació als experts que han desenvolupat l'eina (Finney i Gerheart, 2004). Per això, es imprescindible que presentin un interfície intuïtiva fàcil de recórrer i d'entendre per l'usuari. Per tant, s'ha d'incidir en presentar la informació a l'usuari de la forma més fàcil possible.

1.8 Novedar_EDSS

En aquest apartat es presenta Novedar_EDSS, que és un EDSS per ajudar a la selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals urbanes.

Aquest programa es va desenvolupar a la Universitat de Girona en el marc de la tesi doctoral de Garrido-Baserba (2013) dintre del programa Novedar, integrat per 8 institucions espanyoles i 2 holandeses. Posteriorment, es va negociar amb l'empresa AQUATEC, Proyectos para el sector del agua SAU (empresa del grup SUEZ) per la seva comercialització.

Per tal d'expandir les aplicacions de Novedar_EDSS així com per adaptar-lo al mercat, es va definir aquest Doctorat Industrial entre la Universitat de Girona i l'empresa AQUATEC, Proyectos para el sector del agua SAU (empresa del grup SUEZ).

A continuació, s'expliquen breument les tècniques emprades per desenvolupar Novedar_EDSS. Tant a la metodologia dels articles inclosos en aquesta tesi com a la tesi doctoral d'en Garrido-Baserba, 2013 es pot trobar una explicació més completa.

Novedar_EDSS es va desenvolupar seguint els cinc passos proposats per Poch et al. (2004) per al desenvolupament d'un EDSS: (i) anàlisi del problema, (ii) adquisició de dades i coneixement, (iii) anàlisi cognitiva, (iv) selecció dels models i (v) integració.

Es tracta d'un "knowledge based system" que aplica les següents tècniques:

- "hierarchical approach", per seleccionar, en primer lloc els tractaments secundaris, a continuació els primaris i terciaris i finalment els tractaments a la línia de fangs.
- "structural network model", per tal de formar les línies de tractament a partir dels tractaments secundaris seleccionats, tenint en compte la compatibilitat entre els diferents tractaments de les diferents operacions unitàries.
- "decision trees", per a la selecció dels tractaments específics d'eliminació de fòsfor i nitrogen.
- "recursive evaluation" per avaluar les línies de tractament generades, tenint en compte si l'efluent final compleix o no amb els característiques d'efluent necessàries. De manera que només aquelles línies que hi compleixen son seleccionades.
- anàlisi multi-criteri per avaluar els tractaments secundaris de cadascuna de les línies de tractament adequades, en funció dels criteris prioritzats per l'usuari.

Aquest EDSS inclou dues bases de coneixement:

1. "Specification knowledge base" (Skb-units): conté la informació (quantitativa i qualitativa) de totes les tecnologies incloses (150 tecnologies en total).
2. "Compatibility knowledge base" (Ckb-units): és una matriu de compatibilitat per determinar la compatibilitat entre les diferents tecnologies de les diferents operacions unitàries.

Per tant, aquest EDSS fa servir informació tant quantitativa com qualitativa, aplicant-se heurística i processos de raonament per generar les alternatives de tractament adequades per a cada escenari específic (Garrido-Baserba et al., 2012).

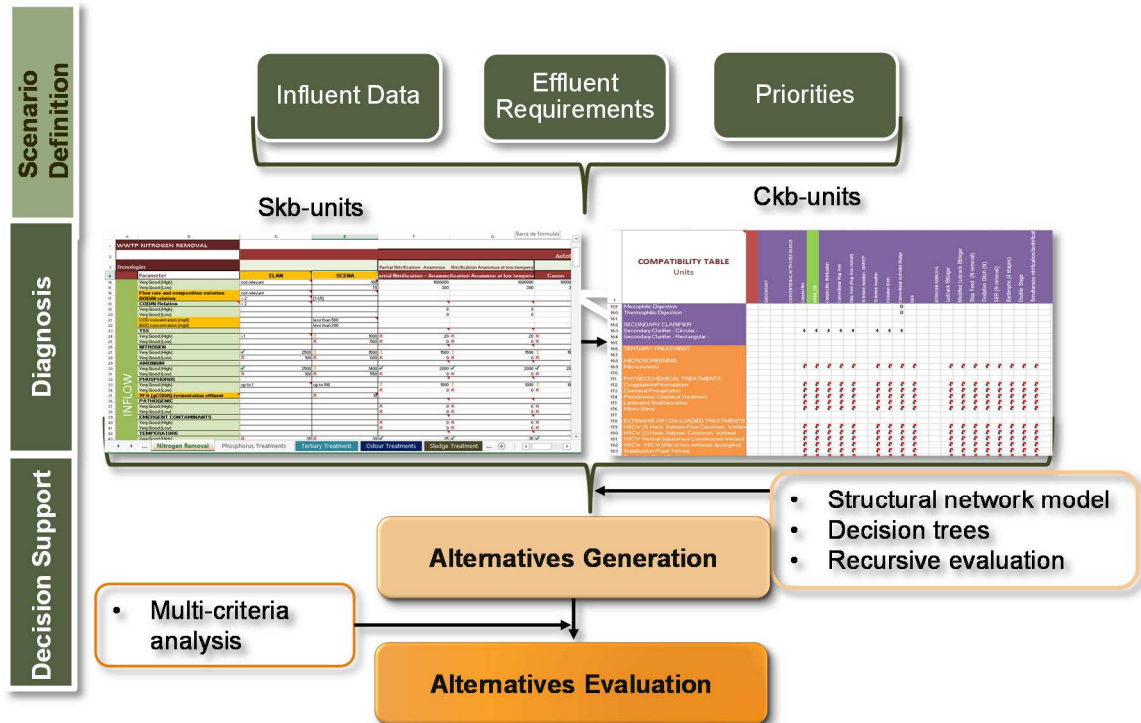


Fig. 6. Esquema de la metodologia aplicada a Novedar_EDSS.

Quant al funcionament de Novedar_EDSS (Fig. 6), el primer pas consisteix en la definició d'un escenari, tenint en compte les característiques de l'aigua d'entrada, els requeriments de l'efluent i la selecció dels criteris a prioritzar per a l'anàlisi multi-criteri. Un cop definit l'escenari, s'executa el programa, de manera que es seleccionen en primer lloc tots aquells tractaments secundaris que poden tractar l'aigua d'entrada.

A continuació, basant-se en la compatibilitat dels tractaments secundaris seleccionats (segons la matriu Ckb-units), es generen les línies de tractament completes, mitjançant les tècniques "hierarchical approach" i "decision trees".

Al següent pas, de totes les línies generades es seleccionen només aquelles que compleixen amb els requeriments d'efluent necessaris, mitjançant l'aplicació de "recursive evaluation".

Finalment, es fa una anàlisi multi-criteri dels tractaments secundaris de les línies de tractament seleccionades, tenint en compte tant els criteris com els pesos definits per l'usuari per a cada criteri. Per a cada criteri, la "millor" alternativa obté un 10 i la "pitjor" un 0. Aleshores, es fa una normalització per tal de puntuar les alternatives que estan entre la "millor" i la "pitjor". Per últim, la nota final de cada alternativa s'obté com la suma parcial de les notes obtingudes per a cada

criteri, tenint en compte el pes assignat a cadascun (essent la suma total dels pesos igual al 100%).

Novedar_EDSS permet la sistematització de part del procés de presa de decisió mitjançant l'aplicació d'una metodologia que considera: (i) un elevat nombre de tecnologies, (ii) integra coneixement considerant paràmetres tant quantitius com qualitius, (iii) permet una avaluació integrada al considerar criteris ambientals, econòmics i tècnics i tot (iv) en una interfície intuïtiva, fàcil d'utilitzar.

Per tant, Novedar_EDSS permet fer front a la majoria de les limitacions que presenten les eines desenvolupades fins ara, representant un salt endavant en el desenvolupament d'eines per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals, ja que:

- ✓ Integra les dues fases de generació d'alternatives i anàlisi multi-criteri.
- ✓ Els càlculs per determinar els valors de cada alternativa de tractament per a cada criteri es generen en la mateixa plataforma, sense necessitat d'aplicar software extern (per exemple de càlcul del LCA).
- ✓ L'avaluació de les tecnologies es fa tenint en compte criteris econòmics, tècnics i ambientals, per tal d'aconseguir una visió integrada.
- ✓ Es desenvolupa en una interfície molt fàcil d'utilitzar per l'usuari.
- ✓ Les dades requerides per definir un escenari són les d'una analítica bàsica de l'aigua, el que facilita la utilització del programa en els casos en que es disposa de poca informació de partida.
- ✓ Permet a l'usuari seleccionar els criteris i pesos per fer l'avaluació de les diferents alternatives de tractament, de manera que les diferents alternatives es puntuen en funció de les prioritats de l'usuari.

1.9 Reptes a aconseguir amb aquesta Tesi

En aquesta tesi doctoral es treballa en el desenvolupament de Novedar_EDSS per continuar fent front a les limitacions identificades en els EDSS actuals així com per ampliar la seva aplicació.

Es per això, que el primer objectiu d'aquesta tesi és el pas previ abans d'estendre l'ús d'un programa: la seva **validació**. En aquest sentit es va dur a terme la validació de l'eina comparant la seva resposta amb els resultats obtinguts en casos reals. Amb aquest treball es va publicar el l'article de Castillo et al., 2016a: "Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection" a la revista *Journal of Environmental Management*. A més, es va treballar amb els encarregats de la presa de decisió a l'empresa per tal de millorar l'adaptació del EDSS a l'usuari, desenvolupant un document funcional per incloure les noves funcionalitats.

D'altra banda, per tal d'avançar en la sistematització i agilització del procés de presa de decisió, es va desenvolupar un projecte on s'**integra Novedar_EDSS amb un optimitzador** mitjançant una estada a la Universitat tècnica de Dinamarca (DTU). A l'article de Castillo et al., 2016b: "An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts", publicat a la revista *Environmental Modelling and Software* es detalla la metodologia utilitzada, així com els resultats i la seva discussió.

A més, degut a la creixent demanda de sistemes de tractament per aigües residuals industrials, es desenvolupa l'adaptació de Novedar_EDSS per aplicar-lo a la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals del **sector industrial** d'alimentació i begudes. Per tal de fer front a la major necessitat d'ajuda en el procés de selecció de tractaments en EDAR industrial. Aquesta contribució s'explica a l'article Castillo et al., 2017: "Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: a multi-criteria assessment", publicat a la revista *Journal of Cleaner Production*.

Finalment, s'ha començat a treballar en el desenvolupament d'un **EDSS 3R** (a partir de Novedar_EDSS) per abordar el paradigma de l'EDAR 3R, on les EDAR ja no són instal·lacions per al tractament d'aigües si no instal·lacions per a la recuperació de recursos. Aquest repte s'ha començat a desenvolupar a partir del coneixement recopilat de qüestionaris i entrevistes amb experts de la Water_2020 Cost Action i de l'estada a la Universitat de Cranfield.

2. OBJECTIUS

L'objectiu d'aquesta tesi és contribuir a la millora del procés de presa de decisió en la selecció d'alternatives de tractament d'aigües. Per això, s'ha utilitzat com a base Novedar_EDSS, que és un sistema d'ajuda a la decisió que es va desenvolupar prèviament a la Universitat de Girona (Garrido-Baserba, 2013).

Els objectius específics, tenint en compte els reptes presentats al capítol anterior, son:

1. Avaluar i demostrar el potencial de Novedar_EDSS. Per això, es van seleccionar un conjunt de casos reals per tal de validar la resposta del EDSS. En aquesta validació es comparen els resultats obtinguts a l'EDSS amb els estudis d'alternatives desenvolupats als projectes reals pels encarregats de la presa de decisions.
2. Identificar les necessitats de l'usuari, mitjançant el treball conjunt amb els tècnics de l'empresa encarregats de seleccionar les alternatives de tractament. D'aquesta forma es pretén definir les característiques i funcionalitats per tal d'adaptar Novedar_EDSS a l'usuari final.
3. Integar Novedar_EDSS amb l'optimitzador desenvolupat a DTU per tal d'obtenir una metodologia integrada on s'aplica tant coneixement expert com models matemàtics.
4. Obtenir un EDSS per seleccionar les alternatives més adequades per al tractament de les aigües residuals del sector industrial d'alimentació i begudes. Per a això, es requereix definir prèviament les característiques i funcionalitats requerides per aquest EDSS.
5. Definir les característiques i les noves funcionalitats d'un EDSS per a tractar el paradigma 3R de les EDAR: recuperació de recursos en compte de tractament d'aigües residuals.

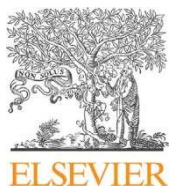
The goal of this PhD thesis is to improve the decision making process to select wastewater treatment alternatives. Novedar_EDSS, previously developed in Universitat de Girona (Garrido-Baserba, 2013) is taken as a basis for this work.

The specific objectives, in accordance with the challenges presented in the previous chapter are:

1. To evaluate and demonstrate the capabilities of Novedar_EDSS. A set of real case studies were selected to validate the results in the EDSS by comparing them with those from the study of alternatives performed by the decision makers in the real projects.
2. To identify the user's needs, by working with the decision makers in the company, in order to define the characteristics and functionalities to adapt Novedar_EDSS to the final user.
3. To integrate Novedar_EDSS with the optimization tool developed in DTU in order to obtain an integrated methodology which includes expert knowledge and mathematical models.
4. To obtain an EDSS to select the most suitable alternative for industrial wastewater treatment in the food and beverage sector. The characteristics and functionalities required in this EDSS need to be previously defined.
5. To define the features and methodology to develop an EDSS to meet the new 3R approach in WWTP: resource recovery instead of wastewater treatment.

3. RESULTATS

-
- 3.1 Castillo, A., Porro, J., Garrido-Baserba, M., Rosso, D., Renzi, D., Fatone, F., Gómez, V., Comas, J. and Poch, M., 2016a. Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection 184, 1–10. *J. Environ. Manag.* doi:10.1016/j.jenvman.2016.09.087



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Environmental Management

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvman

Research article

Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection



A. Castillo^{a, f, *}, J. Porro^a, M. Garrido-Baserba^b, D. Rosso^b, D. Renzi^c, F. Fatone^d,
V. Gomez^f, J. Comas^{a, e}, M. Poch^a

^a Laboratory of Chemical and Environmental Engineering (LEQUIA), Universitat de Girona, Faculty of Sciences, Campus Montilivi s/n, 17071, Girona, Spain

^b University of California, Irvine, Civil & Environmental Engineering Dept., Urban Water Research Center, 844G Engineering Tower, Irvine, CA, 92697-2175, USA

^c Alto Trevigiano Servizi, Srl, Via Schiavonesca Priula, 86, 31044, Montebelluna, Italy

^d University of Verona, Department of Biotechnology, Via Le Grazie 15, 37134, Verona, Italy

^e Catalan Institute for Water Research (ICRA), Emili Grahit 101, Parc Científic i Tecnològic de la UdG, E-17003, Girona, Spain

^f SUEZ ENVIRONNEMENT, Passeig de Zona Franca 48, 08038, Barcelona, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 August 2016

Received in revised form

27 September 2016

Accepted 29 September 2016

Available online 11 October 2016

Keywords:

Demonstration

EDSS

Validation

WWTP process selection

ABSTRACT

Wastewater treatment selection is a complex task usually addressed by applying separate tools for the correct assessment of multi-criteria evaluation. Novedar_EDSS integrates technical, environmental, economic and social assessment capabilities in one single platform. The aim of this work is to evaluate and demonstrate the capabilities of this environmental decision support system (EDSS). For that purpose, 4 case studies of real projects were selected to validate the results in the EDSS by comparing them with those from the study of alternatives performed by the decision makers. Moreover, 1 conceptual case study was applied to support the selection of the most properly strategy for plant retrofitting. Results have demonstrated that the EDSS provides key aspects when deciding the retrofitting process to apply and, when compared to real projects, it recommends analogue treatments as those applied in the projects, ranking them in the same order. Therefore, results in the validation process performed show that this tool provides a reliable basis to support decision makers to select properly treatment alternatives in wastewater treatment plant pre-design.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In the context of the rapid pace of urban development across many parts of the world, specifically China, India, and countries in the Middle East, Africa, and Latin America (City Mayors Foundation, 2013), new wastewater treatment plants are needed to meet the public health and ecological standards that are increasingly being enforced. Where growth is not as fast, like in the U.S. and Europe, new wastewater treatment plants (WWTPs) are in less demand; however, there is still need to retrofit existing WWTPs to meet more stringent water quality regulations. Different factors add complexity to the fundamental drivers for installing new/retrofitted treatment facilities: (i) water scarcity, (ii) growing number of

leading edge alternatives to conventional wastewater treatment, (iii) growing pressure on balancing technical, environmental, economic and social criteria in water projects.

Thus, decision making inherently becomes highly complex, driving to clear need for decision support tools that can address the complexity of selecting wastewater treatment technologies.

Decision support systems (DSS) are recognized feasible tools to support complex decision making processes (Shim et al., 2002; Poch et al., 2004; Guimares Pereira et al., 2005). DSS have the capacity to manage huge volumes of data, integrating databases and models under a graphical user interface, at the same time that expert knowledge from different sources can be included, Zhang et al., 2015). Different capabilities within the same platform allows to retrieve large amount of information in a matter of minutes to evaluate different alternatives.

A variety of EDSS to tackle wastewater treatment selection have been developed in recent years. While Gomez-Lopez et al. (2009) developed an EDSS to select promising disinfection technologies,

* Corresponding author. Laboratory of Chemical and Environmental Engineering (LEQUIA), Universitat de Girona, Faculty of Sciences, Campus Montilivi s/n, 17071, Girona, Spain.

E-mail address: acastillo@aquatec.es (A. Castillo).

Zeng et al. (2007) and Karimi et al. (2011) presented tools to select secondary treatments, among a short list of available treatments. Similarly, plant maintenance also benefit from such decision-making approaches (Kilic and Hamarat, 2010). Even, some tools were developed to optimize decisions in the selection among a pre-selected set of wastewater treatment technologies (Kalbar et al., 2012; Bozkurt et al., 2015; Huang et al., 2015).

Novedar_EDSS overcomes some limitations from the previous approaches, it consists of an EDSS able to consider a huge range of treatment alternatives (more than 150 technologies), and their corresponding combinations within the whole wastewater treatment process (i.e. the whole plant level). The so called Novedar_EDSS supports the analysis of the alternatives through a multi-criteria approach, considering operational, economic and environmental criteria in a user-friendly interface. Moreover, this tool is designed to be flexible and adaptable to knowledge upgrading and allows to explore different solutions in a term of minutes.

A rigorous validation process is essential to widen the potential use of this tool in order to ensure the proper support to decision-makers in the complex process of wastewater treatment selection.

The aim of this work is to evaluate and demonstrate the capabilities of an EDSS tool for the pre-design of wastewater treatment plants (WWTP). This evaluation is performed by comparing a set of four real case studies with the EDSS outcomes obtained when those real cases are applied in the tool. A conceptual case study was also selected to demonstrate the capabilities of the tool when performing retrofitting scenarios. This validation and demonstration process allows to check the correct functioning of the tool, as well as to identify some limitations/gaps which need to be addressed.

Presented herein, two case studies from Italy (conceptual) and USA (real) are performed to demonstrate and validate, correspondingly, the application of the tool for different relevant problems related to retrofitting facilities. After that, three case studies were selected for new facilities from different locations around the world to validate the EDSS response by comparing them with the results in the state-of-the-art approach.

2. Methodology

2.1. How does Novedar_EDSS work?

Novedar_EDSS was developed following the five steps proposed by Poch et al., 2004: (i) analysis of the problem, (ii) data and knowledge acquisition, (iii) cognitive analysis, (iv) model selection and (v) integration.

The architecture of the EDSS is based on a rule-based hierarchical decision approach and uses both quantitative and qualitative information. Hence, heuristics together with the use of reasoning processes (expert judgment) are applied to produce suitable process flow diagrams (PFDs) for any specific scenario. PFDs are then ranked based upon the specific criteria priorities established by the user (Garrido-Baserba et al., 2012a). Two knowledge bases are linked: one about the features of the different technologies, which is called specific knowledge base (Skb-units), and other about the compatibility amongst the different treatments, compatibility knowledge base (Ckb-units). The first step in the methodology consists of defining the scenario (i.e. influent characteristics, effluent discharge requirements and priority setting criteria) (Fig. 1). Once the scenario has been defined, the alternative generation process selects all suitable secondary treatments for the specific scenario, based on parameters as flowrate and Biochemical Oxygen Demand (BOD) concentration (Table 1), with the structural network model. In the next step, based on the Ckb-units, suitable and complete process flow diagrams (based on the among 150 treatment alternatives included in the Skb-units) are generated by

means of the hierarchical approach and the decision trees. Finally those feasible solutions satisfying the effluent requirements will be selected and further evaluated by the recursive evaluation. Detailed information about the EDSS structure and functioning can be found in Garrido-Baserba, 2013.

The Skb-units (Fig. 1) includes both quantitative (e.g. space requirements) and qualitative parameters (e.g. need of specialized staff). Quantitative parameters are calculated based on different formula (Table 1) while qualitative parameters are evaluated in a range from “very low” to “very high” compared to the other treatment alternatives considered. This information (i.e. formula and qualitative information) is based on bibliographic data and expert knowledge (Garrido-Baserba et al., 2012b).

Most parameters (i.e. investment costs) are considered as criteria (i.e. Capital expenditure (CAPEX)) in the multi-criteria evaluation. However, those parameters included in the influent and effluent sections, (e.g. BOD, Total Phosphorus (TP)) are taken into account to define the feasibility of each treatment line. Since each technology performs well in a range of values for some influent parameters (e.g. flow rate) and implies different performance (e.g. BOD removal), therefore only those treatment lines able to treat the defined influent and to achieve the effluent requirements will be selected.

Qualitative parameters include impacts and operational characteristics. Noise potential considers the potential of the treatment alternative to generate noise, while visual impacts evaluates its integration in the landscape. Operational parameters, as “need of specialized staff”, considers skilled staff requirements for a treatment alternative, while “flexibility” measures the process capability to tackle influent disturbances (e.g. changes in the flowrate).

LCA is calculated for each treatment alternative by applying the method developed by the Center of Environmental Science (CML) taking into account the emission factors included in the Ecoinvent database (detailed information about this calculations can be found in Garrido-Baserba et al., 2014).

In the multi-criteria analysis, each treatment alternative is ranked based on the value obtained for each criteria considered. For each criteria, the best mark (i.e. 10) is given to the most properly treatment alternative (i.e. less space requirements), while the worst score (i.e. 0) is given to the least appropriate (i.e. more space requirements). After that, a normalization process is applied to rank the treatment alternatives which are in between the best and the worst alternative. When qualitative criteria are considered, those ranked as “very low” take a “0” and those ranked as “very high” take a “4” (this is for positive criteria, as “flexibility”, while for negative criteria, as “visual impact”, it is the opposite) and the scores are calculated in the same way as for quantitative criteria.

Finally, the user, based on their preferences, defines the weight for each criteria and the total score for each treatment alternative is calculated by applying Equation (4), where the score for each criteria is multiplied by its appropriate criteria weight. Finally, the weighted scores for all criteria are summed up.

$$V(X) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot V_i(X_i) \quad (4)$$

2.2. Demonstration and validation process

In order to verify the feasibility of Novedar_EDSS, two different approaches were validated in this work: (1) the first one tackles with WWTP retrofitting, which can be partially addressed in the current version of the EDSS and (2) the second one is the pre-design of new WWTP, which is the original purpose of the EDSS developed.

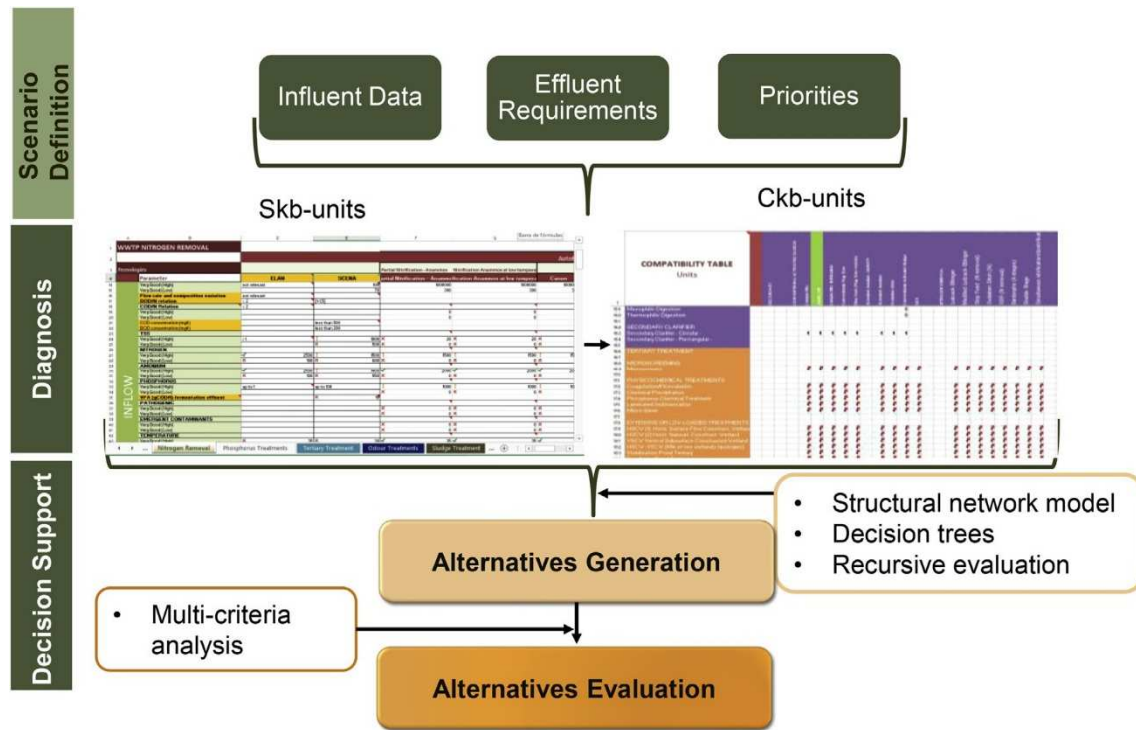


Fig. 1. Scheme about the Novedar_EDSS methodology.

To test Novedar_EDSS outcomes in retrofitting as well as in the pre-design of new WWTP, five case studies were selected. The first one is a demonstration case, while the other case studies are applied to evaluate the EDSS results when compared with the study of alternatives performed by decision makers in the real projects. For a better evaluation, same criteria as those applied by the decision-makers in the real projects was applied to perform the

multi-criteria analysis in the Novedar_EDSS.

2.3. Case studies

2.3.1. Retrofit WWTP

Two case studies were selected to demonstrate the retrofitting capabilities of the EDSS. A different approach was applied in each

Table 1

Information and formula considered to calculate values for some of the criteria considered in the knowledge base Skb-units (Castillo et al., 2016).

Parameter	Data/Formula/Qualitative information
Influent:	
- Flow rate ^a range (m ³ /d)	50–800,000
- Population equivalent ^a range (p.e.)	2400–1000000
Effluent:	
- Nitrogen removal ^b (%)	80–85
Costs	
- Investment costs ^c (for Modified Ludzack-Ettinger (MLE))	
- O&M costs ^c (for MLE) (x is p.e.; y is the total cost expressed as eur/p.e.)	$y = 5635.3 \cdot x^{-0.352}$ (1)
	$y = 309.44 \cdot x^{-0.389} \cdot x$ (2)
- Cost-Benefit Analysis (CBA) based on the Net Profit Value (NPV) Bi are benefits; Ci are costs; t is time (30 years) and r is discount tax (4%).	$NPV = \sum_{i=0}^t \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$ (3)
Environmental	
- Life cycle analysis (LCA) Emission factors from Ecoinvent database.	Categories considered: - Eutrophication - Global warming
Impacts	
- Noise potential (noise generated in the facility)	High
- Visual Impact (based on the integration in the landscape)	High
Operational	
- Need of specialized staff	High
- Flexibility	Low

^a CEDEX, 2013.

^b Moore, 2010.

^c EDSS-PSARU, 2002.

case: Case study 1 aims to demonstrate how the tool can help in the decision strategy, while in the second case the EDSS response is compared to the process applied in the real facility to select the treatment alternative.

In **case 1** (Table 2), the tool was applied to compare the feasibility of upgrading/retrofitting three decentralized wastewater treatment plants versus the construction of one large centralized plant and decommissioning the existing plants in Italy.

Each existing plant was evaluated individually using the Novedar_EDSS and selecting the configuration best matching the actual planned retrofit. On the other hand, it was defined a new scenario taking into account the total flow rate and loading for the three existing plants, in order to identify the best strategy to treat this influent in one bigger facility, achieving the required quality of effluent. The technical, environmental, and economic results (based on the selected criteria in Table 3) were then aggregated for the three plants and compared to that of the scenario for the one large plant.

As for the **case study 2** (Table 2), it is focused on a retrofit case in the USA. Several strategies were evaluated in order to increase 35% the plant capacity and to meet stringent forthcoming regulatory nutrient limits. The plant performs conventional plug flow activated sludge and consists of two main aeration basins arranged to operate in parallel. Although space limitations were the main constraint, economic criteria were also essential in the selection of the most convenient treatment (Table 3).

There are two options in the EDSS to perform a facility when it consists of two treatment lines (as in case study 2): 1) to generate two different scenarios with half flow rate, then different treatments can be recommended for each of them, depending on the criteria considered; 2) to create only one scenario, which means to apply the same treatment in both lines. In case study 2, both methods were applied in order to determine the best treatment strategy.

2.3.2. New WWTP

The aim in case studies 3, 4 and 5 (Table 4) is to select the most properly treatment to build a new facility. These case studies were applied in the EDSS to validate its capability to create suitable PFD alternatives for new WWTP.

In order to consider a wider range of possibilities, the three case studies selected present different location, size and effluent requirements. The criteria applied to score the feasible treatment alternatives depend on the user needs (Table 5).

Case study 3 is based on the project of Steichecn et al. (2009), the same influent wastewater characteristics and effluent requirements were input into Novedar_EDSS. In this case, a new facility was required to treat domestic wastewater obtaining a high quality effluent for irrigation. Non-economic criteria were considered in the treatment alternative evaluation, such as operational

Table 3

Selected criteria in the real project and in the EDSS for case studies 1 and 2.

Category of criteria	Criteria	Case 1	Case 2
Environmental	Space requirements	x	x
	LCA	x	
Operational	Operation simplicity Control over the process Capital expenditure (CAPEX)	x	
	Operational expenditure (OPEX)	x	x

reliability, flexibility, simplicity, environmental impacts and space requirements.

Case study 4 corresponds to a new facility which will be located in South America. A high flowrate needs to be treated before being discharged in a river, considered as a sensitive area, therefore some nutrient removal is required. Regarding the criteria applied for the alternative selection, reliability as well as need of specialized staff and economical parameters were prioritized as the most important criteria.

In **case study 5**, the aim was to build a new WWTP, located in Europe, to treat the wastewater from a medium size town. Several treatment alternatives were considered to achieve the effluent requirements to discharge in a river. Environmental, operational and economic criteria were prioritized in the alternative selection process, being space requirements the main constraint.

3. Results and discussion

In this section, results obtained in the EDSS are analyzed and evaluated taking into account the results in the real projects as well as references.

3.1. Retrofit WWTP

3.1.1. Case study 1- retrofitting (Italy)

In this case, Novedar_EDSS is applied to identify the best alternative when three WWTP upgrades were required in the same area. The assigned technicians for the upgrade considered two main options: (i) to retrofit the three WWTPs and (ii) to build a bigger one. Table 6 provides a summary of the results offered by the EDSS when comparing the retrofitting scenario versus the construction of one large centralized plant. In this case, two analysis are performed, the first one based on the economic data for the whole plant level and the second one considering the scores obtained for the secondary treatments. The current version of the EDSS is limited to the scores in the secondary treatment. Therefore, while the scores are exclusively considered when comparing secondary treatment strategies, economic parameters (i.e. total equivalent cost) will be considered during assessment and analysis of the whole plant.

Table 2

Values for the influent and effluent requirements for case studies 1 and 2.

Parameter	Units	Case 1 ^a	Case 2 ^b
Flowrate (Q)	m ³ /d	12,000	33,700
Biochemical Oxygen Demand (BOD ₅)	mg/l	245	204
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/l	410	340
Total Suspended Solids (TSS)	mg/l	250	250
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	mg/l	45	34
Total Phosphorus (TP)	mg/l	5	25
Effluent requirements	Sensitive area ^c	Sensitive area ^d	Sensitive area ^d

^a Personal Communication.

^b Howard, 2012.

^c Sensitive area (when population equivalent (p.e.) <100,000): maximum concentration BOD = 25 mg/l; COD = 125 mg/l; TSS = 35 mg/l; TKN = 15 mg/l; TP = 2 mg/l.

^d Sensitive area (when p.e. >100,000): maximum concentration BOD = 25 mg/l; COD = 125 mg/l; TSS = 35 mg/l; TKN = 10 mg/l; TP = 1 mg/l.

Table 4

Values for the influent and effluent requirements for case studies 3, 4 and 5.

Parameter	Units	Case 3 ^b	Case 4 ^c	Case 5 ^d
Q	m ³ /d	45,000	86,400	7776
BOD ₅	mg/l	131	208	225
COD	mg/l	218 ^a	447	450
TSS	mg/l	129	148	270
TKN	mg/l	32	45	45
TP	mg/l	4	10	8
Effluent requirements		Reclaimed water for irrigation ^e	Sensitive area ^f	River ^g

^a Assuming ratio BOD/COD = 0.6 to calculate COD concentration in Case 3.^b Steichec et al., 2009.^c Personal Communication, 2015.^d Personal Communication, 2011.^e Reclaimed water for irrigation: maximum concentration BOD = 25 mg/l; COD = 125 mg/l; TSS = 20 mg/l; TKN = 100 mg/l; Nitrate = 100 mg/l; TP = 2 mg/l; Nematodes = 1 egg/10L; Escherichia = 100 egg/10L; Legionella spp = 1000 CFU (colony forming units)/L; Taenia Saginata = 10,000 egg/10L; Taenia Solium = 10,000 egg/10L;

Turbidity = 10 NTU (nephelometric turbidity units).

^f Sensitive area (when p.e.>100,000): maximum concentration BOD = 25 mg/l; COD = 125 mg/l; TSS = 35 mg/l; TKN = 10 mg/l; TP = 1 mg/l.^g River: maximum concentration BOD = 25 mg/l; COD = 125 mg/l; TSS = 35 mg/l.

When looking at the whole plant level (i.e. “all line”), retrofitting the existing plants is more economical, as seen in Table 6 (Retrofitted: 81.19 Meur; new: 152.88 Meur). This is due to in retrofitted plants some parts can be utilized in the new process, while a new plant requires large capital expenditures for new infrastructure and equipment (Rubino, 1996). However, total OPEX is higher in the three plants than in the bigger one, since personnel costs, as well as energy consumption, can easily optimize when all the influent is treated in one bigger facility. Therefore, if CAPEX was the prioritized criteria, the retrofitting strategy would be selected. However, if decision-makers consider OPEX as the most important, they would prefer to build a new bigger plant.

On the other hand, when looking at the **secondary treatment line**, which is what the EDSS tool scores, the new centralized plant has significant advantages (total score retrofit WWTPs: 4.45; new centralized WWTP: 6.74) in terms of technical, environmental and economic criteria because there is the freedom to select the best theoretical technology, whereas, for the existing plants, you are limited to select the configuration that is the best practical retrofit (Tejero and Larrea, 2008).

Therefore, in this case, the EDSS provides key information to choose between the two options by comparing different strategies. The most properly alternative will depend on the user preferences, which can be easily implemented in the EDSS considering different criteria and weighting them according to their needs.

3.1.2. Case study 2- retrofitting (USA)

The plant under study performed a Biological Nutrient Removal (BNR) treatment with a plug flow configuration and works in two

parallel lines. Several alternatives were evaluated as strategies to meet both stringent forthcoming regulatory nutrient limits (resulting from a recent legislative approval of the Jordan Lake Nutrient Reduction Rules) and flowrate increase due to the deployment of new complex of industrial warehouses that would be connected at the sewage system. The parallel lines can be isolated from each other allowing to evaluate combinations of two different treatments.

As part of this evaluation, one of the main alternatives being considered was the implementation of an integrated fixed film activated sludge (IFAS), as it could help to increase the influent flowrate but avoiding the construction of a new reactor tank. The evaluation considered the following alternatives: (i) two lines (100%) with IFAS process (Alternative 1); (ii) one line (50%) with IFAS + one line (50%) with BNR (Alternative 2); (iii) two lines (100%) BNR (Alternative 3) and (iv) one line (50%) with BNR + one line (50%) with Step Feed (SF) (Alternative 4). Every alternative was evaluated embracing economic criteria (capital and operation costs) and physical constraints (*space requirements*). The four alternatives considered were also evaluated using the Novedar_EDSS. Results and comparison between real case estimations and EDSS projections obtained for each alternative treatment are presented in Table 7.

Table 7 shows the option BNR (100%) (Alternative 3) as the best-positioned alternative in the real project for this specific scenario. BNR presents one of the lowest CAPEX (11.6 M\$) as it can be seen in Fig. 2, this alternative would be scored as the best candidate if space constraints criteria had a criteria weight prioritization of only 33%. However, if *space constraints* criteria is considered as an exclusive parameter (i.e. weigh prioritization of 100%), BNR and BNR+SF would be discarded, as they could no longer absorb the increase in influent flowrate without any treatment extension.

Although space requirements projections carried out by the real case were not available, the EDSS estimated that in the case BNR (100%) was chosen the current plant layout (1280 m²) would require an approximate increase in treatment surface of 28% (up to 350 m²) to assimilate the new influent flowrate, while close to 15% (up to 190 m²) in the case of the BNR+SF option. Hence, when space requirements is the prioritized criteria, the isolation of the treatment lines in two different processes IFAS 50%-BNR 50% (Alternative 2) or a whole new process maximizing the treatment capacity IFAS 100% (Alternative 1) could provide a more convenient solution.

IFAS has been proven to be a suitable technology for retrofitting as a venue to increase tank capacity (Rosso et al., 2011), and in some cases, it even permits to use existing secondary settlers as reactors (Zalakain et al., 2008). The required modifications will focus on the

Table 5

Selected criteria in the real project and in the EDSS for case studies 3, 4 and 5.

Category of criteria	Criteria	Case 3	Case 4	Case 5
Environmental	Visual Impacts	x		
	Odor potential	x		
	Noise potential	x		
	Space requirements	x		x
Operational	Operation simplicity	x		
	Flexibility	x		
	Reliability	x	x	
	Control over the process			x
Economic	Performance			x ^a
	Need of specialized staff		x	
	CAPEX		x	x
	OPEX		x	x

^a Performance is one of the criteria considered in the real project although it is not yet available in Novedar_EDSS.

Table 6

Results case study 1 - Score in the EDSS considering to retrofit 3 WWTP and to build a new WWTP.

Parameter	Criteria	Units	Retrofit WWTPs 1-3		New unified plant	
			All line	Secondary	All line	Secondary
Costs	OPEX	Meur/year	5.15	0.66	2.96	0.47
	CAPEX	Meur	28.69	17.99	58.59	13.39
	Total equivalent costs	Meur	81.19	29.41	152.88	22.01
Scores	Reactants	Meur/year	4.93	0	2.79	0
	Total		N/A	4.45	N/A	6.74
	Economic		N/A	1.43	N/A	1.53
	Environmental		N/A	1.27	N/A	2.58
Cost Benefit Analysis	Operational		N/A	1.75	N/A	2.62
	Total equivalent cost	Meur	81.19	N/A	152.88	N/A
	Accumulate benefit	Meur	0.97	N/A	22.70	N/A
	Net Profit Value	Meur	-83.27		-130.18	

Table 7

Results case study 2 - Score real project versus Novedar_EDSS. The final simplified score for every criteria in the left corresponds to the real project and in the right to the Novedar_EDSS (in bold).

Criteria	Weight (%)	Alternative1 ^a	Alternative2 ^b	Alternative3 ^c	Alternative4 ^d
		Project/EDSS	Project/EDSS	Project/EDSS	Project/EDSS
Total score	100	4.9/ 3.3	5.9/ 4.5	7.5/ 6.6	6.6/ 6.6
Space requirements	33	10.0/ 10.0	7.5/ 5.2	5.0/ 0.0	2.5/ 0.0
CAPEX	33	2.5/ 0.0	5.0/ 4.5	10.0/ 10.0	7.5/ 10.0
OPEX	33	2.5/ 0.0	5.0/ 4.0	7.5/ 10.0	10.0/ 10.0

^a IFAS (100%).^b IFAS (50%)+BNR (50%).^c BNR (100%).^d BNR (50%)+SF (50%).

implementation of three different compartments: the aerobic zone filled with biofilm carrier media (30–40%) for nitrification, an anoxic zone (40%) for denitrification, and the anaerobic (15–25%) for phosphorous removal (Rutt et al., 2006; Albizuri et al., 2010). Therefore, both IFAS alternatives (50% and 100%) would avoid associated investment costs due to the construction or expansion of existing tanks. However, the hydraulic load and the oxygen demand applied to the IFAS process will be approximately twice that of an extension of the current BNR process, with almost also twice the OPEX (aprox. 35–45%) (Fig. 3). Note that IFAS is characterized by elevated air flux due to mixing requirements specified by the process manufacturer, with associated lower oxygen transfer efficiency, due to the use of coarse bubble instead of fine-pore diffusers (Rosso et al., 2011). However, although the deployment of the IFAS-

related alternatives for both the EDSS and real projections pointed out in the increase of CAPEX close to 70% and 35% due to carrier installation and reconfiguration (Real: 15.8 M\$ and 12.0 M\$; EDSS: 14.6 M\$ and 12.4 M\$, respectively) (Fig. 2), and OPEX increase of 25% and 40% due to the new air requirements (Real: 1.5 M\$/year and 0.9 M\$/year; EDSS: 1.1 M\$/year, 0.7 M\$/year, respectively) (Fig. 3), the total cost-benefit analysis over the period favored these retrofitting

options. Similarly, in the real case the total projections costs for these expansions were estimated to exceed the theoretical CAPEX and OPEX costs of the IFAS-related alternatives, which have not construction costs implied.

It can be seen as both, the approach followed by the decision-makers and the EDSS, conclude that in this scenario the most

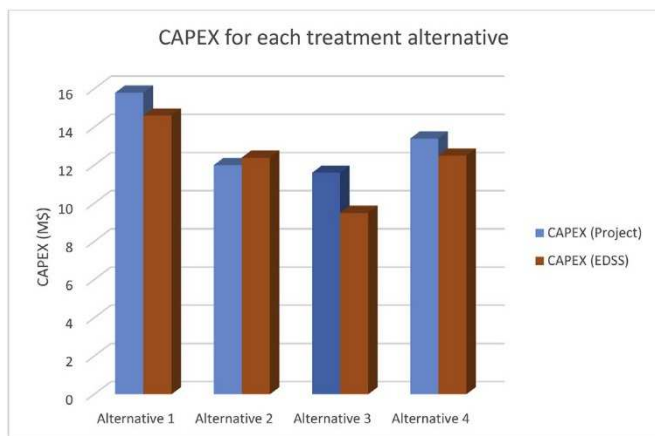


Fig. 2. CAPEX for each treatment alternative in the real project and in the EDSS. Alternative 1 corresponds to IFAS (100%), Alternative 2 to IFAS (50%)+BNR (50%), Alternative 3 to BNR (100%) and Alternative 4 to BNR (50%)+SF (50%).

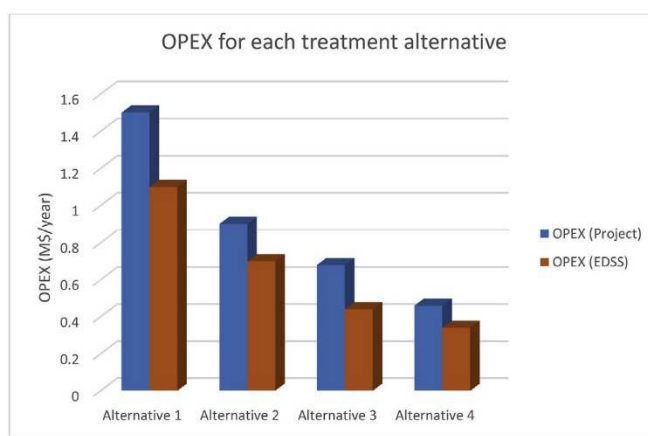


Fig. 3. OPEX for each treatment alternative in the real project and in the EDSS. Alternative 1 corresponds to IFAS (100%), Alternative 2 to IFAS (50%)+BNR (50%), Alternative 3 to BNR (100%) and Alternative 4 to BNR (50%)+SF (50%).

Table 8

Results case study 3 - Score state-of-the Art approach versus Novedar_EDSS. The score for every criteria in the left corresponds to the real project and in the right to the Novedar_EDSS (in bold).

Criteria	Weight (%)	MBR	MBBR	MLE
		Project/EDSS	Project/EDSS	Project/EDSS
Total score	100	5.9/ 6.3	5.8/ 5.9	5.5/ 5.5
Impacts	75	3.5/ 5.0	3.0/ 4.4	2.0/ 3.6
Operation simplicity	12.5	1.3/ 0.3	1.5/ 0.6	1.7/ 0.6
Reliability	12.5	1.1/ 0.9	1.3/ 0.9	1.8/ 1.3

BNR+SF (Alternative 4) with their corresponding CAPEX (Real: 11.6 M\$ and 13.4 M\$; EDSS: 9.5 M\$ and 12.5 M\$, respectively) (Fig. 2) and OPEX (Real: 0.68 M\$/year and 0.46 M\$/year; EDSS: 0.44 M\$/year and 0.34 M\$/year) (Fig. 3), are hindered as the *space constraints* are key factors in the decision making.

3.2. New WWTP

3.2.1. Case study 3 - new WWTP (USA)

In case study 3 a study of alternatives is performed in order to select a treatment for a new WWTP. In that sense, a broad range of alternatives were considered and subsequently discussed in this section. Taking into account user needs, non-economic factors (i.e. *impacts*, *operation simplicity* and *reliability*) were considered to evaluate the feasible treatment technologies.

Table 8 shows the results of the treatment technology evaluations conducted. Novedar_EDSS includes the same technologies as those in the shortlist of technologies developed by Steichecn et al. (2009): Membrane Bioreactor (MBR), Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) and Modified Ludzack-Ettinger (MLE). It can be seen as these alternatives are ranked essentially in the same order in the EDSS and through the state-of-the-art approach, based upon the criteria and weights established for the project.

As it can be seen in Table 8, when a multi-criteria analysis is applied (i.e. impacts, operation simplicity and reliability), MBR is the best scored treatment alternative (score SOA: 5.9; score EDSS: 6.3), followed by MBBR (score SOA: 5.8; score EDSS: 5.9).

The score obtained when prioritizing each criteria can be analyzed individually, to obtain a more detailed evaluation. As for

impacts, MBR seems to be the technology producing less impact (score Real: 3.5; score EDSS: 5.0) because it consists in a compact technology (Yang et al., 2006) with a small footprint (Chen et al., 2012). On the other hand, MLE obtains the lowest score in both, the real approach (score: 2.0) and the EDSS results (score: 3.6), because it requires bigger reactor volumes and secondary settler. MBBR is in between both (score Real: 3.0; score EDSS: 4.4) because, compared to MLE, it requires lower reactor volumes, since it includes both suspended and fixed-filmed sludge, which allows high biomass concentrations. The EDSS, similarly to the state-of-the-art approach, would recommend MLE and MBBR if *operation simplicity* was the main criteria considered, since MBR is a more complex system where additional parameters as membrane cleaning and fouling should be considered.

Finally, both methodologies (state of the art and the EDSS) consider MLE as the most *reliable* alternative in this case, compared to MBBR and MBR systems. This could be due to the fact that MLE is a well-established technology which has been successfully world-wide applied.

Therefore, it can be stated that the EDSS recommends and score the alternatives for this case study similarly than the state-of-the-art approach. This means that results obtained when applying one integrated platform (i.e. EDSS) are comparable to those from a conventional approach. Thus, similar results while decreasing effort and time requirements.

3.2.2. Case study 4- new WWTP (South America)

In this case, four treatment alternatives were considered by the engineers in order to treat the influent before being discharged in a river: MLE, Extended aeration (EA) Trickling Filters (TF) and Sequential Batch Reactor (SBR).

TF involves a three-phase based system with fixed biofilm. In this case, this technology allows to achieve the required effluent quality with less energy consumption than activated sludge (Daigger and Boltz, 2011).

MLE, EA and SBR consist on different activated sludge configurations with higher effluent quality than TF (Jing et al., 2015), although they imply higher energy consumption. In fact, EA achieves not only the properly effluent quality but also generates stabilized sludge, avoiding the need to install a digester in the sludge

Table 9

Results case study 4 - Score state-of-the Art approach versus Novedar_EDSS. The score for every criteria in the left corresponds to the real project and in the right to the Novedar_EDSS (in bold).

Criteria	Weight (%)	MLE Project/EDSS	EA Project/EDSS	TF Project/EDSS	SBR Project/EDSS
		Total score	100	8.3/ 8.7	7.5/ 5.5
Reliability	50	5.0/ 5.0	5.0/ 2.5	1.7/N/A	4.8/ 1.3
Need of skilled staff	25	1.7/ 1.9	1.7/ 1.9	2.5/N/A	1.3/ 1.9
CAPEX	12.5	0.8/ 1.1	0.4/ 1.1	1.25/N/A	1.0/ 1.3
OPEX	12.5	0.8/ 0.7	0.4/ 0.0	1.25/N/A	0.6/ 1.3

^a N/A: Not Available.

Table 10

Results case study 5 - Score state-of-the Art approach versus Novedar_EDSS. The score for every criteria in the left corresponds to the real project and in the right to the Novedar_EDSS (in bold).

Criteria	Weight (%)	MBR Project/EDSS	MBBR Project/EDSS	BF Project/EDSS
		Total score	100	6.6/ 7.1
Space requirements	50	3.3/ 4.8	1.7/ 3.8	3.3/ 4.3
Performance	N/A	1.25/N/A	0.4/N/A	0.8/N/A
Control over the process	25	0.8/ 1.3	0.9/ 1.3	0.8/ 1.3
CAPEX	12.5	0.4/ 0.0	0.8/ 1.0	0.4/ 0.7
OPEX	12.5	0.8/ 1.0	0.8/ 0.0	0.8/ 1.3

line. However, it requires more energy than the other considered alternatives (Leslie et al., 1999).

When this case study was defined in the EDSS, the short-list of treatments generated included: MLE, EA and SBR. However, TF was not in the list, since the EDSS considers it performs better in smaller facilities (according to CEDEX, 2013). This is consistent with the main reason for the engineers to finally discard trickling filters in the real project, since their effectiveness has not been demonstrated in large WWTP.

In this case, *reliability* of the treatment was the most important criteria to meet. Since the reliability of activated sludge treatments has been demonstrated by many applications around the world (Guo et al., 2013; Wei et al., 2003), decision makers decided to finally focus on this kind of treatment (i. e. MLE, EA or SBR) instead of on a fixed biofilm (i.e. TF).

Table 9 presents the score obtained in each case when applying both approaches: the project and the EDSS.

Results in the project shows that when *economic criteria* (i.e. CAPEX and OPEX) were prioritized, TF obtained the best score. Followed by SBR (TF score: 1.25; SBR score: 1.0), in agreement with Singh and Srivastava, 2010. Since TF was not considered as a feasible treatment alternative in the EDSS, SBR is the best ranked alternative when both CAPEX and OPEX were prioritized.

Regarding *reliability*, which was the prioritized criteria in this project, the most promising alternatives in the EDSS were MLE followed by EA (MLE score: 5.0; EA score: 2.5), which are the best ranked alternatives by decision-makers when prioritizing this criteria (MLE score: 5.0; EA score: 5.0).

TF is the less *skilled staff* demanding, based on the project approach, being SBR the treatment which need more specialized staff. However, in the EDSS a similar level of knowledge seems to be required in all the treatment alternatives considered.

Lastly, a *multi-criteria analysis* was performed, in order to rank the different treatment alternatives considering different weights for the different criteria, based on the customer's needs (i.e. reliability: 50% weight; need of skilled staff: 25%; CAPEX: 12.5%; OPEX: 12.5%). Since reliability was the most important criteria considered in this case, MLE was benefited, being the best scored treatment alternative in both, the EDSS and the project (score in EDSS: 8.7; score in project: 8.3).

Therefore, although some slightly differences have been identified when ranking the alternatives (i.e. skilled staff), most criteria as well as the overall analysis obtains a really similar response in both approaches (i.e. the real project and the EDSS). Thus, it can be seen as the EDSS allows to tackle the complex process of wastewater treatment selection considering both quantitative (e.g. CAPEX) and qualitative criteria (e.g. reliability).

3.2.3. Case study 5- new WWTP (Europe)

Three treatment alternatives were considered in the study of alternatives of the project to be applied in the new WWTP under study: MBR, MBBR and Biofiltration (BF).

When this case study was defined in the EDSS, these treatment alternatives were in the list generated with the feasible alternatives. The same criteria were applied to rank these alternatives in the study of alternatives and in the EDSS. Based on that, a comparison between the punctuation obtained in the real project and in the EDSS is performed as well as a reasoning process to validate the selection of these alternatives in the selection process. Results in the scores for every criteria obtained in the EDSS and in the study of alternatives in the project are presented in Table 10.

Although *space requirements* is the main constraint, a *multi-criteria analysis* has been also applied in order to analyze an integrated approach. When all criteria are considered (Table 10) (taking into account the weight in brackets), MBR is the best scored

alternative in the real project (score: 6.6). However, the EDSS scores Biofiltration (score: 7.6) as the best alternative, followed by MBR (score: 7.1). This difference between the project and the EDSS is due to the fact that performance is not included as a criteria in the EDSS, since it is considered as a requirement (based on the effluent quality defined in the legislative framework). However, MBR presents higher performance than other secondary treatments while BF performs worse than conventional activated sludge (Jing et al., 2015). Therefore, if performance was considered as a criteria in the EDSS, MBR would obtain higher score than BF, similarly as in the real project.

When *economic criteria* are prioritized, the best scored treatment is MBBR (CAPEX project: 8.6 Meur; EDSS: 7.5 Meur) followed by BF. As for *OPEX*, MBBR obtains the lowest score because oxygen consumption is doubled in this case (Rosso et al., 2011), which implies higher operational costs.

The evaluation of the *criteria control over the process* gives similar results for all the treatment alternatives considered when using both approaches: the conventional study of alternatives in the real project and the EDSS, being MBBR the best scored treatment alternative.

As for *space requirements*, the alternative treatments considered are ranked similarly in both the real project and the EDSS. MBR (score project: 3.3; score EDSS: 4.8) and BF (score project: 3.3; score EDSS: 4.3) are better scored than MBBR (score project: 1.7; score EDSS: 3.8), this can be explained because they need less area since no secondary settler is required (Mohammadi et al., 2012; Gabarron et al., 2014).

Hence, it can be seen as the EDSS recommends the same treatment alternatives as those considered in the real project and ranks them similarly, which allows to use this tool to support decision-makers when selecting wastewater treatment. These results allow also to identify new features to improve the EDSS applications (i.e. performance as a criteria in the multi-criteria analysis).

3.3. Future perspectives

Future work will consider to adapt the multi-criteria analysis to the decision-makers' needs. In that sense, some new criteria (as treatment performance) will be included in the multi-criteria analysis. Hence, it will be possible to rank the treatments based on this criteria, giving higher score to those treatment alternatives which achieve better effluent quality, thus it will allow to approximate the analysis to the technicians' considerations.

As for the features to face retrofitting utilities, the applicability of the EDSS tool will be increased by including in the methodology some functionalities required to fix the current facility treatment train. Based on that, the new requirements will be defined (e.g. higher flow rate, higher quality in the effluent) and the EDSS will recommend to combine the existing treatment with other technologies or even to change the whole treatment, depending on the criteria prioritized.

Therefore, the tool is expected to increase the help provided to decision-makers in both situations: the pre-design of a new WWTP and the retrofitting of an existing plant.

4. Conclusions

In this study, the capabilities of Novedar_EDSS have been evaluated and illustrated. For that propose, 4 real case studies (1 for plant retrofitting and 3 for new plants) have been implemented in the EDSS in order to compare the tool's response with the results obtained when applying the state-of-the art approach (i.e. the study of alternatives performed in each real project). A multi-

criteria analysis was performed to score the different treatment alternatives in the EDSS, based on the criteria applied by the decision makers in the real projects.

Based on the results from this evaluation, it can be stated that considering the same input (i.e. influent and effluent data and criteria), Novedar_EDSS recommends similar treatments as those applied in the real projects, ranking them in the same order. Therefore, this tool can be used in the study of alternatives to support decision-makers to select properly treatment alternatives to be applied in wastewater facilities.

On the other hand, a conceptual case study was applied to support the selection of the most properly strategy for plant retrofitting. Results have demonstrated that the EDSS provides key aspects when deciding the retrofitting process to apply.

Future work will be focussed on increasing the range of scenarios where the EDSS can be applied to support decision-makers. This will be achieved by adapting functionalities to the user's needs as well as by including a new methodology in the EDSS to perform retrofitting scenarios.

Acknowledgement

This work was partially supported by Doctorat Industrial 2013-DI-038 (AGAUR and SUEZ) and by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (CTQ2014-53718-R). The authors would like to thank EU-Cost Action Water2020 (ECOST-STSMES1202-110614-044095). LEQUIA and ICRA were recognized as consolidated research groups by the Catalan Government with codes 2014-SGR-1168 and 2014-SGR-291, respectively.

References

- Albizuri, J., Santamaria, A., Larrea, L., 2010. IFAS process for nitrogen removal with an HRT of 4 hours. In: *Proceedings WEF/IWA Biofilm Reactor Technology Conference*. Portland (Oregon, USA).
- Bozkurt, H., Quaglia, A., Gernaey, K.V., Sin, G., 2015. A mathematical programming framework for early stage design of wastewater treatment plants. *Environ. Model. Softw.* 64, 164e176.
- Castillo, a., Cheali, P., Gomez, V., Comas, J., Poch, M., Sin, G., 2016. An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environ. Model. Softw.* 84, 177e192.
- CEDEX, 2013. XXX Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotacion de estaciones depuradoras. Madrid.
- Chen, W., Liu, J., Xie, F., 2012. Identification of the moderate SRT for reliable operation in MBR. *Desalination* 286, 263e267.
- City Mayors Foundation, 2013. The World's Fastest Growing Cities and Urban Areas from 2006 to 2020. http://www.citymayors.com/statistics/urban_growth1.html (last accessed August 2015).
- Daigger, G.T., Boltz, J.P., 2011. Trickling filter and trickling filter suspended growth process design and operation: a state-of-the-art review. *Water Environ. Res.* 83, 388e404.
- EDSS-PSARU, 2002. Development and Implementation of a Decision Support System for the Selection of Wastewater Treatment Systems for Communities with Less than 2000 Equivalent People in Catalonia. Universities involved: UdG, CSIC, UB, UAB and UPC.
- Gabarron, S., Ferrero, G., Dalmau, M., Comas, J., Rodriguez-Roda, I., 2014. Assessment of energy-saving strategies and operational costs in full-scale membrane bioreactors. *J. Environ. Manag.* 134, 8e14.
- Garrido-Baserba, M., Reif, R., Rodríguez-Roda, I., Poch, M., 2012a. A knowledge management methodology for the integrated assessment of WWTP configurations during conceptual design. *Water Sci. Technol.* 66 (1), 165e172.
- Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernandez, F., Poch, M., 2012b. Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams. *J. Environ. Manag.* 112, 384e391.
- Garrido-Baserba, M., 2013. Development of an Environmental Decision Support System for the Selection and Integrated Assessment of Process Flow Diagrams in Wastewater Treatment (Ph.D. thesis). University of Girona.
- Garrido-Baserba, M., Hospido, a., Reif, R., Molinos-Senante, M., Comas, J., Poch, M., 2014. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. *Environ. Model. Softw.* 56, 74e82.
- Gomez-Lopez, M.D., Bayo, J., Garcia-Cascales, M.S., Angosto, J.M., 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *J. Clean. Prod.* 17, 1504e1511.
- Guimares Pereira, Angela, Corral Quintana, S., Funtowicz, S., 2005. GOUVERNE: new trends in decision support for groundwater governance issues. *Environ. Model. Softw.* 20, 111e118. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.12.015>.
- Guo, W.Q., Yang, S.S., Xiang, W.S., Wang, X.J., Ren, N.Q., 2013. Minimization of excess sludge production by in-situ activated sludge treatment processes - a comprehensive review. *Biotechnol. Adv.* 31, 1386e1396.
- Howard, D., 2012. Aeration technology decisions using off gas testing information-sustainable aeration practice. In: *Weftec Conference*, 2012eW102.
- Huang, Y., Dong, X., Zeng, S., Chen, J., 2015. An integrated model for structure optimization and technology screening of urban wastewater systems. *Front. Environ. Sci. Eng.* 9, 1036e1048.
- Jing, Z., He, R., Hu, Y., Niu, Q., Cao, S., Li, Y.Y., 2015. Practice of integrated system of biofilter and constructed wetland in highly polluted surface water treatment. *Ecol. Eng.* 75, 462e469.
- Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2012. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: a scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *J. Environ. Manag.* 113, 158e169.
- Karimi, A.R., Mehrdadi, N., Hashemian, S.J., Nabi Bidhendi, G.R., Tavakkoli Moghaddam, R., 2011. Archive of SID Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 8, 267e280.
- Kilic, K., Hamarat, C., 2010. A decision support system framework for innovation management. *Components* 2007, 765e770.
- Leslie, C.P., Grady, J., Daigger, G.T., Lim, H.C., 1999. *Biological Wastewater Treatment*, 2nd. Marcel Dekker, Inc, pp. 381e382.
- Mohammadi, H., Sabzali, A., Gholami, M., Dehghanifard, E., Mirzaei, R., 2012. Comparative study of SBR and extended aeration activated sludge processes in the treatment of high-strength wastewaters. *Desalination* 287, 109e115.
- Moore, G.T., 2010. *Nutrient Control Design Manual*. Environmental Protection Agency (EPA), Ohio.
- Personal Communication, 2011.
- Personal Communication, 2015.
- Poch, M., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Sanchez-Marre, M., Cortes, U., 2004. Designing and building real environmental decision support systems. *Environ. Model. Softw.* 19, 857e873.
- Rosso, D., Lothman, S.E., Jeung, M.K., Pitt, P., Gellner, W.J., Stone, A.L., Howard, D., 2011. Oxygen transfer and uptake, nutrient removal, and energy footprint of parallel full-scale IFAS and activated sludge processes. *Water Res.* 45 (18), 5987e5996.
- Rubino, V., 1996. Caught in the crossfire: wastewater plant retrofit. *Pollut. Eng.* 28, 6.
- Rutt, K., Seda, J., Johnson, C.H., 2006. Two year case study of integrated fixed film activated sludge (IFAS) at Broomfield. In: *CO WWTP Proc. Weftec Conference*, 2006.
- Shim, J.P., Warkentin, M., Courtney, J.F., Power, D.J., Sharda, R., Carlsson, C., 2002. Past, present, and future of decision support technology. *Decis. Support Syst.* 33, 111e126.
- Singh, M., Srivastava, R.K., 2010. Sequencing batch reactor technology for biological wastewater treatment: a review. *Asia-Pacific J. Chem. Eng.* 1e11.
- Steichele, M., Kadava, A., Shaw, A., Martin, M., Kazemi, S., October 2009. A new paradigm: carbon footprint and sustainability assessment for process selection. In: *Proceedings: WEFTEC09, Orland, FL, USA*, pp. 10e14.
- Tejero, I., Larrea, L., 2008. *Biological Treatment. Tecnologías y estrategias para el rediseño de EDAR*. NOVEDAR_Consolider, pp. 12e51.
- Wei, Y., Van Houten, R.T., Borger, A.R., Eikelboom, D.H., Fan, Y., 2003. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment. *Water Res.* 37, 4453e4467.
- Yang, W., Cicek, N., Ilg, J., 2006. State-of-the-art of membrane bioreactors: world-wide research and commercial applications in North America. *J. Memb. Sci.* 270, 201e211.
- Zalakain, G., de la Sota, A., Larrea, A., Malfeito, J.J., Albizuri, J., Larrea, L., 2008. Proceso híbrido aplicado a la remodelación de EDAR para la eliminación de nitrógeno y fósforo. *Tecnol. Agua* 295, 60e69.
- Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M., Li, J., 2007. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *J. Environ. Manag.* 82, 250e259.
- Zhang, S., Li, Y., Zhang, T., Peng, Y., 2015. An integrated environmental decision support system for water pollution control based on TMDL e a case study in the Beivun River watershed. *J. Environ. Manag.* 156, 31e40.

Nomenclature

- BF: Biofiltration
 BNR: Biological Nutrient Removal
 BOD: Biochemical Oxygen Demand
 CAPEX: Capital expenditure
 CBA: Cost-Benefit Analysis
 CFU: Colony forming units
 Ckb-units: Compatibility knowledge
 base CML: Center of Environmental Science
 COD: Chemical Oxygen Demand
 EA: Extended aeration
 EDSS: Environmental decision support system
 IFAS: integrated fixed film activated sludge
 LCA: Life cycle analysis

MBBR: Moving Bed Biofilm Reactor
MBR: Membrane Bioreactor
MLE: Modified Ludzack-Ettinger
NPV: Net Profit Value
NTU: Nephelometric turbidity units
OPEX: Operational expenditure
p.e.: Population equivalent
PFD: Process flow diagrams
Q: Flowrate

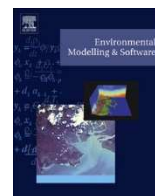
SBR: Sequential Batch Reactor
SF: Step Feed
Skb-units: Specific knowledge base
TF: Trickling Filters
TKN: Total Kjeldahl Nitrogen
TP: Total Phosphorus
TSS: Total Suspended Solids
WWTP: Wastewater treatment plant

-
- 3.2 Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., Sin, G., 2016b. An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environ. Model. Softw.* 84, 177–192. doi:10.1016/j.envsoft.2016.06.019



Contents lists available at ScienceDirect

Environmental Modelling & Software

journal homepage: www.elsevier.com/locate/envsoft

An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts

A. Castillo^{a, c, *}, P. Cheali^b, V. Gomez^c, J. Comas^a, M. Poch^a, G. Sin^b^a Laboratory of Chemical and Environmental Engineering (LEQUIA), University of Girona, Science Faculty, Montilivi Campus, 17071 Girona, Spain^b CAPEC-PROCESS, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Technical University of Denmark, Building 229, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark^c AQUALOGY (SUEZ), Passeig de Zona Franca 48, 08038 Barcelona, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 October 2015

Received in revised form

1 June 2016

Accepted 23 June 2016

Keywords:

IEDSS

Optimization

Integration

WWTP process selection

Uncertainty

ABSTRACT

The increasing demand on wastewater treatment plants (WWTPs) has involved an interest in improving the alternative treatment selection process. In this study, an integrated framework including an intelligent knowledge-based system and superstructure-based optimization has been developed and applied to a real case study. Hence, a multi-criteria analysis together with mathematical models is applied to generate a ranked short-list of feasible treatments for three different scenarios. Finally, the uncertainty analysis performed allows for increasing the quality and robustness of the decisions considering variation in influent concentrations. For the case study application, the expert system identifies 5 potential process technologies and, using this input, the superstructure identifies membrane bioreactors as the optimal and robust solution under influent uncertainties and tighter effluent limits. A mutual benefit and synergy is achieved when both tools are integrated because expert knowledge and expertise are considered together with mathematical models to select the most appropriate treatment alternative.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

In the last few decades, public awareness regarding water scarcity and pollution, together with the current water legislative framework, has involved an increase in the number of wastewater treatment facilities. In this context, the selection of the WWTP configuration or process flow diagram is a considerable challenge; hence, knowledge from experts, including wastewater researchers as well as practitioners (i.e., wastewater engineers and operators), is required.

Quaglia (2013) illustrates the process of selection and design of a WWTP configuration as a funnel approach composed of four steps (Fig. 1). In phase I, knowledge-based systems, including intelligent environmental decision support systems (IEDSS), can be applied to select the most feasible alternatives from the market technologies based on technical, economic, environmental and social criteria. In phase II, optimization tools, based on mathematical methods, allow

selecting short-listed candidates among those previously considered. In phase III, the alternatives from the previous phase are evaluated using rigorous and dynamic models to obtain the optimal process parameters. In the last step (phase IV), detailed engineering design is performed for the selected alternative.

The first two steps of Fig. 1 can be addressed considering two approaches; in the first, experts select the “best” alternative, taking into account their expertise and knowledge and therefore relying on intuitive methods (Kalbar et al., 2013), which could lead to subjective and biased decisions. The second method is to apply mathematical-based optimization to solve the problem such that objective decision-making is achieved using more quantitative analysis (Bozkurt et al., 2015). In a mathematical optimization-based approach, however, expert knowledge is needed, particularly to define the design space for the alternatives to be included in the optimization as an off-line expert intervention, but a systematic reasoning procedure is not followed. Therefore, an integrated approach that combines the knowledge from different experts and the quantitative nature of optimization will allow obtaining a more comprehensive analysis and solution of the optimal WWTP process selection problem. However, experts commonly select traditional solutions because it is difficult to develop an integrated analysis without the proper tools (Chamberlain et al., 2014).

* Corresponding author. Laboratory of Chemical and Environmental Engineering (LEQUIA), University of Girona, Science Faculty, Montilivi Campus, 17071 Girona, Spain.

E-mail addresses: acastillo@aqualogy.net (A. Castillo), pche@kt.dtu.dk (P. Cheali), vgomez@aqualogy.net (V. Gomez), joaquim.comas@udg.edu (J. Comas), manel@lequia.udg.edu (M. Poch), gsi@kt.dtu.dk (G. Sin).

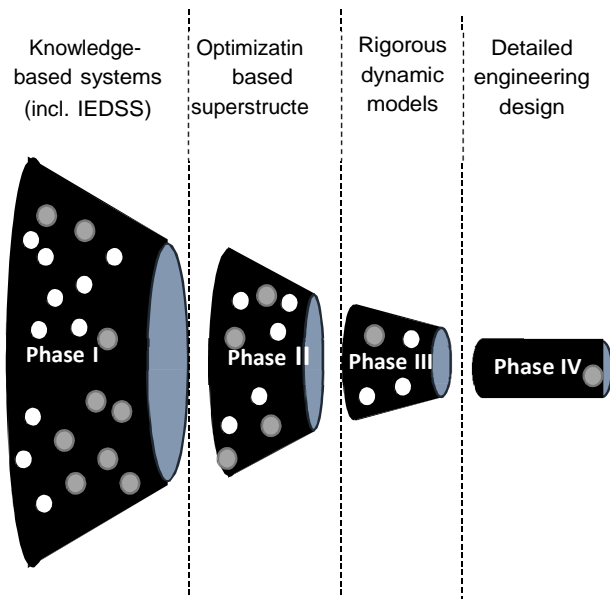


Fig. 1. Funnel approach where different steps in the selection and design of an alternative WWTP configuration process (Quaglia, 2013), together with the tools applied in each step, are represented.

Different methodologies have been developed to improve treatment selection, but most of them do not consider the entire wastewater treatment process (Gomez-Lopez et al., 2009; Huang et al., 2015), or they lack an integrated assessment because they do not consider the set of economic, environmental and technical criteria (Kilic and Hamarat, 2010). Other studies include a very limited number of wastewater treatment alternatives, which restricts the range of technologies considered (Zeng et al., 2007; Makropoulos et al., 2008; Huang et al., 2015).

Moreover, most of the studies mentioned previously have been performed focusing on one of the different steps of the decision concerning WWTP concept selection and design (Bozkurt et al., 2015). Thus, none of them address more than one of the steps involved in Fig. 1. Therefore, there is a research need to integrate different types of expertise with mathematical models and optimization to improve the quality of the results. In addition, research is also needed to properly handle the multi-objective and uncertain characteristics involved in the decision-making of selecting an optimal alternative for wastewater treatment plant configuration (Zeng et al., 2007; Garrido-Baserba et al., 2012).

As regards phase I, knowledge-based techniques have been used for the conceptual WWTP design under a multi-criteria analysis by the application of an IEDSS. NOVEDAR_EDSS (Garrido-Baserba, 2013) consists of a knowledge-based system that applies a hierarchical approach, a structural network model, decision trees, a recursive evaluation and a multi-criteria analysis to complete this step. This tool efficiently explores different alternatives based on several technical, economic and environmental criteria by means of parameters (e.g., removal efficiency, costs and emissions) and indicators (e.g., life cycle analysis (LCA) and shadow prices), which should contribute to the development of more efficient and environmentally friendly urban wastewater treatment plants.

Concerning phase II, the superstructure-based optimization methodology is applied to identify the optimal WWTP network configuration from the list generated in the previous step (Bozkurt et al., 2015). This is a novel framework to help with effective formulation and management of the complexity of an early-stage design of a WWTP. This tool applies a superstructure-based

optimization method to generate the design space as a process network, i.e., a so-called superstructure. Because this method focuses on designing processes at the early stage (where the availability and accuracy of data are limited), it can also be used to short-list a number of the most promising processing alternative (e.g., the first three solutions as shown in Bozkurt et al., 2015), which can be used in the next phase for detailed analysis.

As phases III and IV (outside the scope of this work) comprise the final steps in the WWTP design process, they address the application of rigorous dynamic models and detailed engineering design, correspondingly.

NOVEDAR_EDSS and the optimization tool are two tools that have been demonstrated to properly perform the selection of the best treatment alternative in steps I and II of Fig. 1, correspondingly. The aim of this study is therefore to develop a comprehensive framework that effectively addresses the steps of conceptual design (phase I) and optimization (phase II) in the technology selection process by integrating knowledge-based systems with mathematical models. The new framework introduces the following novelties: 1) multi-criteria sustainability screening of the promising treatment concepts using IEDSS; 2) superstructure formulation based on the promising treatment concepts obtained in (1) and detailed dimensioning, optimization and analysis; and 3) sensitivity analysis to test the robustness of the selected concepts.

The proposed comprehensive framework will utilize the advantages of both NOVEDAR_EDSS and the optimization tool, and it will then be applied to an actual wastewater treatment problem as a case study for verification and demonstration purposes. The paper is structured as follows: first, the integration methodology, together with the IEDSS and the optimization tool, is presented. Then, the selected case study to be solved by applying the integrated approach is explained. Finally, the results obtained are discussed to identify the benefits of the integration.

2. Integrated methodology

Because the aim of this study is to consider the potential benefits of integrating NOVEDAR_EDSS and the superstructure-based optimization, in this section, the integrated methodology applied for selection of the WWTP configuration, comprising phase I and phase II, is described. This methodology includes the workflow for the integrated framework consisting of three different steps (Step 1 to Step 3, Fig. 2), which are interconnected to perform the alternative selection considering static models. **Step 1**, which corresponds to phase I (Fig. 1), addresses the NOVEDAR_EDSS application to explore a wide range of feasible technologies based on the characteristics of the case study selected and considering a knowledge-based multi-criteria approach. Among the treatments recommended by the IEDSS, a short-list is selected to perform the next Step. **Step 2** (corresponding to phase II in Fig. 1) involves applying the optimization tool, which should first be upgraded to obtain the proper superstructure for the specific case study. Then, based on mathematical programming, the optimization tool identifies the optimal network. Finally, **Step 3** (which is part of phase II in Fig. 1) consists of a sensitivity analysis, which is developed by the optimization tool to ensure the robustness of the decisions.

Step 1: Intelligent/expert screening of process technologies in NOVEDAR_EDSS.

NOVEDAR_EDSS integrates different knowledge-based techniques to perform the pre-selection of the process flow diagram in a WWTP. This tool was developed following the five steps proposed by Poch et al., 2004: analysis of the problem, data and knowledge acquisition, cognitive analysis, model selection and integration. The software was verified and validated by different experts from academia and from companies participating in the Consolider and

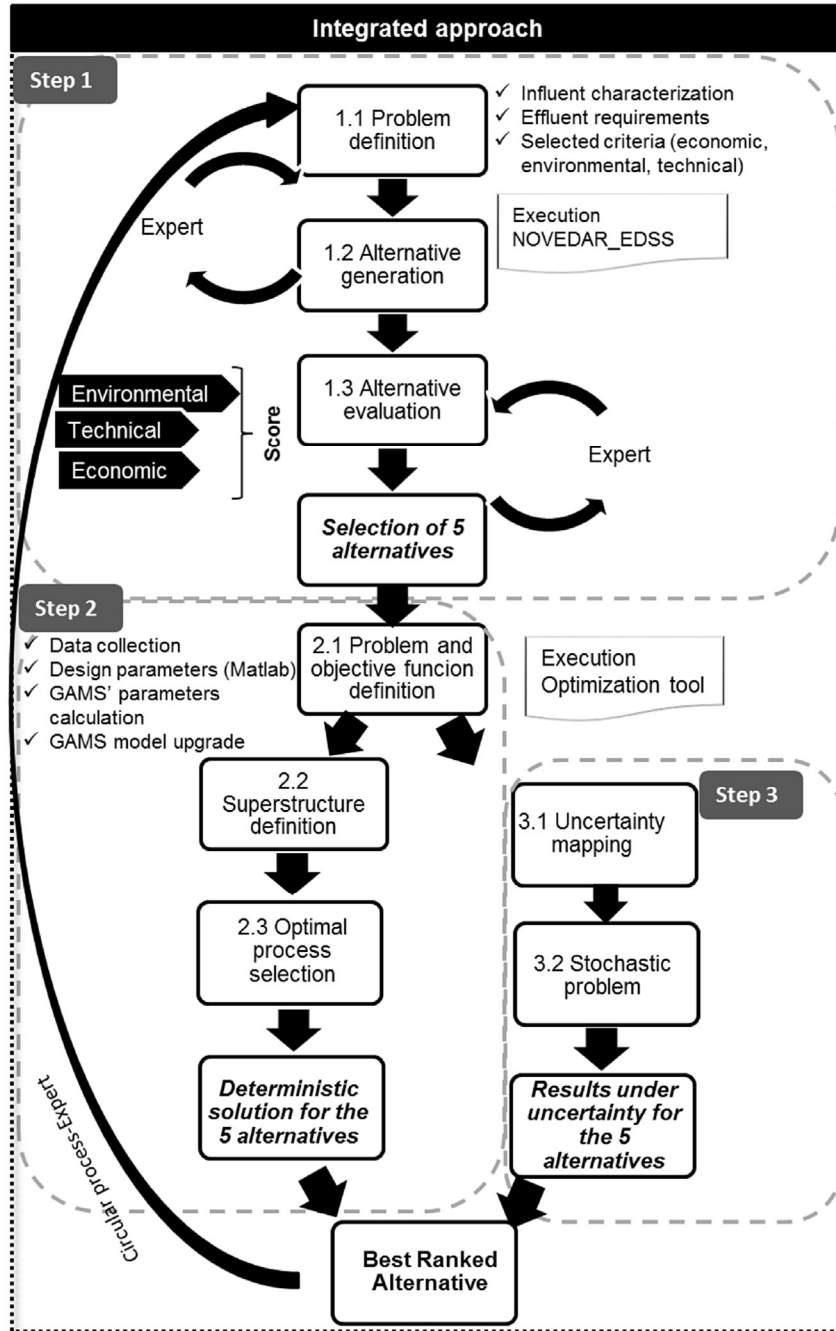


Fig. 2. Integrated framework for selection of the optimal WWTP configuration.

Water_2020 COST Action projects. The results were considered satisfactory after an exhaustive qualitative model evaluation, when simulated data was compared with real WWTPs (Bennett et al., 2013).

The generation of WWTP network configurations is carried out by means of the interaction of two knowledge bases. The first one, specification knowledge base (Skb-units) (information represented in Table 1), summarizes the main features of the different treatments (primary, secondary, and tertiary) and sludge line technologies, while the second one contains information regarding the degree of compatibility amongst the different technologies; both are linked to another database with additional information about legislation. The combination of these databases results in the

generation of a network of possible alternative process flow diagrams, including different treatment schemes. These process flow diagrams will be analyzed from an environmental, economic and technical point of view (Garrido-Baserba et al., 2012).

The selection process of an alternative WWTP configuration followed by NOVEDAR_EDSS is illustrated in Fig. 3.

2.1. Problem definition

First of all, the problem is defined. For that purpose, users introduce influent data for the specific scenario as well as effluent requirements. Finally, based on user preferences, the criteria to be prioritized are selected to allow the consideration of different

Table 1
Formula, data and qualitative information applied to calculate values for every criterion in the knowledge base Skb-units.

Parameter	Data/Formula/Qualitative information
Influent:	
Flow rate ^a range (m ³ /d)	500–80,000
Population equivalent ^a range (p.e.)	2,500–500,000
Effluent:	
COD removal ^b (%)	86
Phosphorus removal ^b (%)	25–70
Costs	
Investment costs^a (for SBR)	$y = 8258.9x - 0.407$ (1)
O&M costs^b (for SBR)	$y = 372.44x - 0.457$ (2)
(x is p.e.; y is the total cost expressed as eur/p.e.) LCA	Categories considered: -Eutrophication -Global warming
Emission factors from Ecoinvent database.	
Cost-Benefit Analysis (CBA) based on the Net Profit Value (NPV)	$NPV = \sum_{i=0}^t \frac{B_i - C_i}{(1+r)^i}$ (3)
Bi are benefits; Ci are costs; t is time (30 years) and r is discount tax (4%).	
Impacts	
Visual Impact ^a (based on the integration in the landscape)	Low
Odor potential ^a (based on the treatment process)	High
Biogas production^a (m3/day)	
Volatile Solids Removed; based on Sludge (SLD) Production ^c ; Price Biogas = 0.69 eur/m ³	$SLD_{Production} = 0.65 \cdot (1.06 \cdot SRT) \cdot Influent \cdot (0.7 \cdot \frac{COD_{Influent}}{1000})$ (4)
	Biogas Production = VSR · 1.03 (5)
Technical	
Flexibility ^a	Very high
Simplicity ^c	Low

Parameters in the CBA can be easily modified by the user.

^a CEDEX, 2013.

^b Yu et al., 1997.

^c Metcalf and Eddy, 2003.

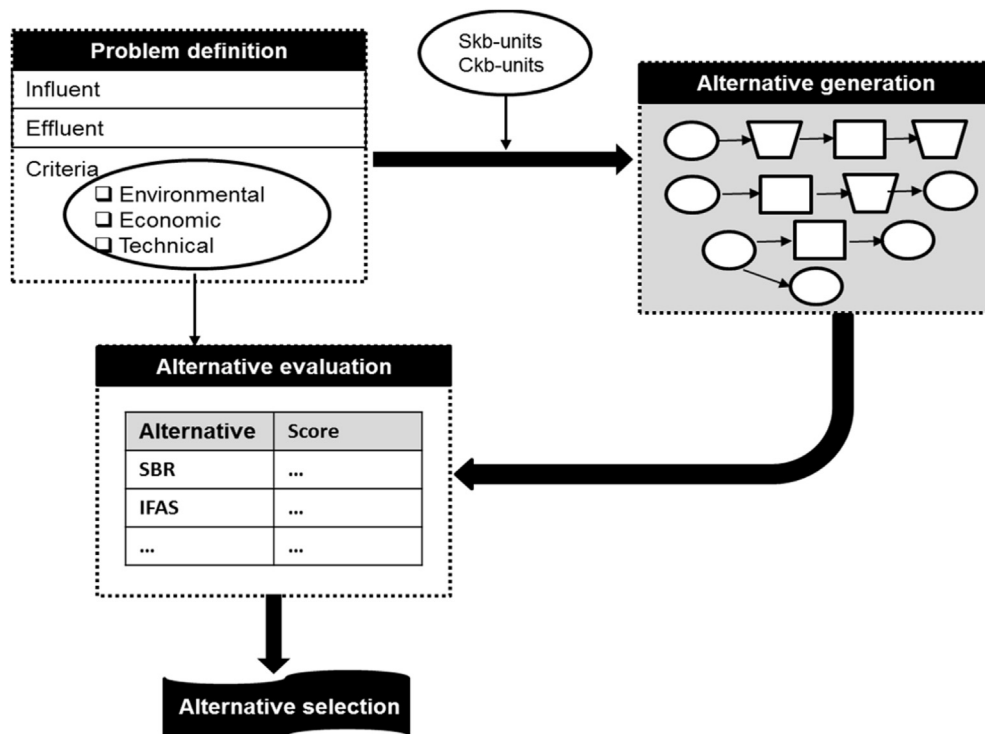


Fig. 3. Scheme for the NOVEDAR_EDSS alternative process selection.

economic, environmental and technical aspects when comparing alternatives.

2.2. Alternative generation

Once the scenario has been defined, NOVEDAR_EDSS is executed to obtain the feasible alternatives for each specific case study. In the first phase, a complete response surface of suitable WWTP network configurations is generated. Based on their capabilities, an influent range is defined for every technology. Hence, technologies are selected only when the influent data for the scenario defined is within their influent range. After that, only those process flow diagrams (PFDs) that satisfy the user's requirements are selected (Garrido-Baserba et al., 2012). Table 1 presents the information included in the Skb-units for the different technologies.

Values for influent (Table 1) refer to the range of values for which every treatment alternative included in the database is appropriate. Taking into account these values, only those technologies able to treat the influent (defined in every scenario) are selected. As for effluent data, the range of values for every parameter corresponds to the treatment alternative removal efficiency.

In the LCA, the emission factors correspond to the Ecoinvent database, and the method applied to calculate them was developed by the Center of Environmental Science (CML) (detailed information can be found in the supplementary material).

Visual impact refers to the integration of a treatment alternative in the landscape, while odor potential considers its potential to release odors. Both, visual impact and odor potential corresponds to qualitative impacts and the evaluation range is from very low to very high, compared to the other treatment alternatives considered, based on expert criteria.

Finally, evaluation for qualitative criteria (i.e. impacts and technical) ranges from very low to very high, compared to the other treatment alternatives included in the database, based on expert criteria.

2.3. Alternative evaluation

Subsequently, a multi-criteria decision analysis is applied to rank the treatment process alternatives to maximize the degree of satisfaction of the different objectives (i.e., lower environmental impact and lower investment and operational costs while obtaining proper effluent concentrations) through valuing multiple selected environmental, economic and technical criteria. Both quantitative (e.g., costs, space requirements) and qualitative (e.g., flexibility, impacts) criteria are considered. Moreover, some criteria are positive (e.g., reliability), whereas others are negative (e.g., impacts); this makes a difference in the way they are considered because higher reliability implies a higher score when prioritizing this criteria, while an alternative with higher impacts obtains a lower score for this criteria. To calculate the score for every quantitative criterion, the best score (i.e., 10) is given to the most appropriate alternative (e.g., the cheapest one), and the worst score (i.e., 0) is given to the least appropriate (e.g., the most expensive one). After that, a normalization process is applied to rank the alternatives according to their values (e.g., cost in euros) for this specific criteria between the scores 0 and 10. As for qualitative criteria, they are qualified from “very low” to “very high,” and to calculate the score, they take values of 0 (very low) to 4 (very high) (therefore they take quantitative values) and the way to calculate the scores is the same as that applied for quantitative criteria.

Finally, users can select the weight for every considered criterion depending on their preferences. To obtain the total score (Equation (6)) for each alternative in a single combined criterion, each criteria is multiplied by its appropriate criteria weight,

followed by summing the weighted scores for all criteria:

$$V(X) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot V_i(X_i) \quad (6)$$

where “V” is the score, “W” is the weight for each criterion, “i” is the criterion, “n” is the total number of criterion and “X” corresponds to the considered treatment alternative.

Cost-benefit analysis takes into account costs (i.e. operational expenditure (OPEX) and capital expenditure (CAPEX)) as well as benefits (i.e. biogas production and reused water) for an economic assessment of different treatment process alternatives. Alternately, the cost-benefit analysis can be performed by also taking into account the *environmental externalities*, which are equivalent to the value of the positive externalities associated with avoiding the discharge of pollution into the environment (Molinós-Senante et al., 2012). LCA is an extended environmental indicator used to quantify the environmental impacts associated with a product or process throughout its entire lifecycle (ISO, 2006a; ISO, 2006b), and it considers a holistic perspective of the process system. In NOVEDAR_EDSS, both eutrophication and global warming impact categories are considered to evaluate the LCA for each alternative (Garrido-Baserba et al., 2014) (detailed information can be found in the supplementary material). Moreover, three different technical criteria are considered to rank the alternatives: reliability, simplicity and flexibility. The operation reliability is related to the process robustness in the face of flow variations and disturbances, while operation simplicity is related with the need of specialized staff. Finally, operation flexibility takes into account how the process can perform through different operational conditions.

Therefore, among the alternatives of the process flow diagrams obtained, a ranked list for the secondary treatment process technologies is generated based on the criteria selected. Finally, the top 5 best solutions are selected for introduction into the optimization tool (Step 2).

Step 2: Optimal process selection with the superstructure-based optimization tool.

The optimization method employed in this study is a superstructure-based optimization framework based on mathematical programming to generate/identify novel and optimal process selection and interconnection to create a process flow diagram for design of WWTPs (Bozkurt, 2015).

The representation of different treatment process alternatives is mathematically described as a generic process model block. The generic process model block uses generic models with actual data collected from plants and experimental studies or estimated data from rigorous models. Moreover, this also allows the generation of a large design space of the processing network for comparison of different treatment process alternatives and identification of the optimal WWTP network configuration that meets the design criteria (i.e., minimum investment cost, minimum impurities in treated water, minimum utilities/chemical consumption, or maximum efficiencies). Using the generic process model block allows for the collection and management of the data in an efficient and consistent way and for storing them in the compact structure.

The resulting optimal processing paths are the set of optimal solutions that are ranked. Because this method focuses on designing processes at the early stage (where the availability and accuracy of data are limited), the objective or goal of using this method, is to reduce the number of processing alternatives to reduce the effort and time in the next design stages, as opposed to selecting or making the decision on only an optimal concept, which has high risks. Therefore, this method also includes uncertainty analysis to ensure highly robust solutions.

To manage the complexity of formulating and solving the optimization problem, the database needed for model parameters is separated from mixed integer non-linear programming (MI(N)LP) formulation and solution in general algebraic modeling software (GAMS). The data collected are stored as matrices in an MS Excel-based structure. After that, these matrices are sent to GAMS by using GDG (GAMS Data Exchange) utilities (see the [supplementary material](#)).

The process steps are described below:

2.4. Problem and objective function definition

First of all, the problem is defined (wastewater characterization, effluent limit definitions, etc.), together with the objective function (Equation (7)), based on the total annualized cost (TAC), which results from the summation of OPEX and CAPEX. Therefore, a WWTP network will be designed taking into account the minimization of this objective function:

$$\text{TAC} = \text{OPEX} + \text{CAPEX}/t \quad (7)$$

where “t” refers to the amortization period.

The adapted MI(N)LP formulation for the specific case of a WWTP design study is described below (Equation (8)), and it can also be found elsewhere ([Bozkurt et al., 2015](#)):

$$\text{Min OBJ} = \sum_{kk} \text{OPEX}_{kk} + \frac{\text{CAPEX}_{kk}}{t} \quad (8)$$

where “kk” corresponds to the treatment alternative.

Subject to:

Process model (parameter descriptions can be found in [Table 2](#))

$$h(\alpha_{i,kk}, \mu_{i,ii,kk}, \gamma_{i,kk,rr}, \theta_{\text{react},kk,rr}, W_{i,kk}, \text{split}_{i,kk}, SW_{kk}, \text{rec}_{kk})$$

Process constraints

$$g(S_{k,kk}) \leq 0$$

$$\text{Structural constraints } \sum_{kk} Y_{kk} \leq 1 \quad \text{where } y \in \{0,1\}^n$$

2.5. Superstructure definition

The next step is the superstructure definition, where the different process treatment alternatives in every operational unit (from Step 1) are represented and defined.

After that, a systematic data collection and verification step to update both the matrices in an MS Excel-based structure (used by GAMS) and the GAMS model is required prior to performing the optimization. The data collection consists of (i) obtaining the design

parameters with MATLAB for every process interval, e.g., primary treatment, secondary treatment and for the stabilization treatment (including sludge thickeners and digesters) using the commonly accepted design procedures ([ATV design standards \(2000\)](#), [Metcalf and Eddy \(2003\)](#), [WEF manuals \(2010\)](#) and [Henze et al. \(2008\)](#)). The algorithms for the design, based on the design parameters SRT and HRT, are implemented in a MATLAB script ([Bozkurt et al., 2015](#)) (detailed information can be found in the [supplementary material](#)); (ii) validating the estimated parameters against the rigorous model, i.e., Activated Sludge Model 1 (ASM1). In that sense, the differences between the estimated removal efficiencies for COD, TN and TSS by the rigorous model (ASM1) and the steady-state design model used in that study were quite small, i.e., the average relative error is less than 1.5%, 5% and 1.5%, respectively ([Bozkurt et al., 2015](#)) ([Bennett et al., 2013](#)); (iii) the introduction of the results obtained in an MS Excel template, where the parameters needed for the model developed in GAMS ([Table 2](#)) are calculated based on the methodology developed by [Bozkurt et al., 2015](#) (detailed information is provided in the [supplementary material](#)).

The data collection process allows for filling in the database needed in GAMS, which contains the needed information to calculate the objective function based on TAC: (i) investment and utility costs (in terms of aeration, chemical addition and electricity use, landfill cost together with mixing and pumping cost, and income from biogas use) from information available in the open literature ([Bozkurt et al., 2015](#)), (ii) effluent requirements and (iii) parameters required in the GAMS model ([Table 2](#), with values in the [supplementary material](#)).

Every process interval is composed by: the mixing of all the flows entering the interval and the utilities added, reaction, flow separation for internal recycling and sludge wastage, waste separation, and flow separation for external recycling and sending the flow to the process technologies of the next step. Detailed information regarding the mathematical equations defining the intervals can be found in [Bozkurt et al., 2015](#).

2.6. Optimal process selection

Finally, the MI(N)LP problem is formulated using General Algebraic Modeling System (GAMS) (GAMS Development Corporation, 2011) and solved via the CPLEX solver to obtain the optimal solution. After running GAMS, deterministic results are obtained. The solutions obtained are the optimal network, the concentration of the compounds (X_S , S_S , X_I , NH_4 , NO_3 , etc.) throughout the treatment plant and the value of the objective function defined (Equation (7)) ([Bozkurt et al., 2015](#)). The problem needs to be solved for the scenarios defined, and the selected process technologies are ranked based on its objective function (minimum total annualized cost), where the best ranked is the treatment process flow diagram with the lowest TAC that satisfies the effluent regulations specified

Table 2
Parameters required in the GAMS model.

Parameter in GAMS	Description
$\alpha_{i,kk}$	Fraction of a utility consumed
$\mu_{i,ii,kk}$	Specific consumption of a utility
$\gamma_{i,kk,rr}$	Matrix representing reaction stoichiometry
$\theta_{\text{react},kk,rr}$	Conversion efficiency of the key reactant
$W_{i,kk}$	Waste separation
$\text{split}_{i,kk}$	Flow split factor
SW_{kk}	Amount of wastage
rec_{kk}	External recycle ratio
$S_{k,kk}$	Connection of process treatment technologies (e.g. between primary settler and IFAS)
y_{kk}	Binary decision variable to indicate whether a process treatment alternative is selected (value “1” or “0”, correspondingly)
n	Total number of process treatment alternatives in the processing network

for every scenario.

Step 3: Sensitivity analysis. As a final stage, an uncertainty and a sensitivity analysis is performed to find the optimal results in more realistic scenarios. Latin Hypercube Sampling (LHS) is used to sample from the uncertainty domain. In this study, the flow rate is not considered in the sensitivity analysis, but the load of pollutants incoming to the plant is considered as such pollutants are more important for the design concepts. Flow rate changes (not load) will only impact HRT/volumes of the tanks (settlers, etc.), which can be better addressed with a dedicated and rigorous model (Ramin et al., 2014) that is more appropriate for phase III evaluation.

The uncertainty analysis is performed through two different steps: (i) the uncertainty mapping and (ii) the stochastic problem (Bozkurt et al., 2015).

2.7. Uncertainty mapping

The uncertainty mapping consists of the deterministic mathematical formulation of the optimization problem solved for the assessment of the future scenarios. Therefore, this step applies as input data to the deterministic optimization problem, the influent obtained in the sampling procedure mentioned before. The result is a distribution of outputs based on every future scenario considered. Therefore, this analysis allows for understanding the effect of uncertainty on the results because the outputs change through variations in the input conditions.

2.8. Stochastic problem

The stochastic problem aims to find network and operation conditions that are feasible over the entire uncertain domain (defined through the sampling procedure). The expected value of the objective function is calculated by solving it using the sample average approximation (SAA) technique (Birge and Louveaux, 1997). For SAA formulation, the constraints are converted into a number of equations based on the number of uncertain scenarios defined previously with the LHS. Finally, the objective function value is calculated by averaging the sum of all the values obtained for different uncertain scenarios (Bozkurt et al., 2015, 2016).

3. Case study description

A real case study was selected to highlight the application of the integrated framework and analyze the results obtained. The facility is located in the north of Spain, and it aims to treat the wastewater from a medium-size town where influent presents common domestic wastewater characteristics (Table 3). This case study implies the selection of a pre-design of a facility to treat wastewater in a domestic area, and therefore the most appropriate treatment plant should be selected.

To demonstrate the capabilities of the tool's integration, different effluent characteristics were required, resulting in three

scenarios with different treatment process needs in each case. Scenario A requires discharge of the effluent in a sensitive zone. Quality standards are based on the European Urban Wastewater Treatment Directive (91/271/EEC), and therefore the total nitrogen maximum concentration will be 15 mg/l. In Scenario B, a more demanding effluent nitrogen concentration is required, 10 mg/l. Scenario C requires higher effluent quality for agricultural reuse (Royal Decree 1620/2007-Spanish legislation, i.e., meaning no pathogen pollution, turbidity (100 UNT), TSS (35 mg/l), BOD (25 mg/l), COD (125 mg/l), TKN (100 mg/l) and TP (20 mg/l)). However, effluent quality requirements can be adapted to other legislations because they can be modified through user interfaces.

The solution obtained when the integrated approach (described in Section 2 “Integrated Methodology”) is applied to solve this case study was further analyzed, taking into account the different effluent requirements and the uncertainties in the influent parameters' concentrations. In the following section, the details of the integrated approach application for this case study are presented.

4. RESULTS and DISCUSSION

In this section, the selected process flow diagrams recommended for this case study based on knowledge-based methods (NOVEDAR_EDSS) are first presented. Subsequently, the resulting optimal process flow diagrams, from those previously selected in the NOVEDAR_EDSS, are identified using superstructure-based optimization approaches. The optimal process flow diagrams are identified under a deterministic basis as well as under uncertainties in the composition of influent.

4.1. Step 1: preliminary alternative selection (NOVEDAR_EDSS)

4.1.1. Problem definition

The problem definition step requires some information related to the influent parameters' concentrations to define the case study in the IEDSS (Table 3).

The next step consists of selecting the effluent discharge options to consider different scenarios with different requirements (Table 4).

The criteria selection, applied to rank secondary treatment alternatives, should be performed among a wide range of available criteria. This multi-criteria analysis allows consideration of environmental, economic and technical aspects for every alternative to select the most appropriate treatment according to an integrated point of view. Within the environmental criteria, LCA values, space requirements and other impacts are considered, while the economic criteria allow taking into account CAPEX, OPEX and environmental externalities (EE), which are considered to prevent environmental damage when pollutants are removed from wastewater. Technical criteria apply characteristics such as technology reliability, flexibility and operation simplicity when selecting a treatment alternative.

The three scenarios were defined in the IEDSS, taking into account a multi-criteria analysis to rank the feasible technologies for every one of them.

4.1.2. Alternative generation

Once the problem is defined, the alternative generation is performed. Table 4 presents the different process flow diagrams recommended by NOVEDAR_EDSS for each scenario. Because different effluent characteristics are required, different WWTP network configurations will be generated for every scenario.

To achieve the effluent quality required for Scenario A, the IEDSS suggests applying a primary clarifier followed by a secondary treatment, which can be prioritized depending on the selected

Table 3

Values for the influent parameters for the case study selected.

Parameter	Value (g/m ³)
Biochemical Oxygen Demand (BOD)	225
Chemical Oxygen Demand (COD)	450
Total Suspended Solids (TSS)	270
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	45
Ammonia (NH ₄ eN)	34
Total Phosphorus (TP)	8
Flow rate (Q)	7776 m ³ /d

Data source: Aqualogy, Personal Communication, 2011.

Table 4

The WWTP network configuration recommended by the IEDSS for each scenario.

Scenarios	Effluent requirements	Recommended treatment
A	TN = 15 mg/l	Primary Clarifier (PC) – Secondary treatment – Thickener – Stabilization – Dewatering
B	TN = 10 mg/l	PC – Secondary treatment – Methanol addition – Thickener – Stabilization – Dewatering
C	Effluent re-use	PC – Secondary treatment – Tertiary treatment – Thickener – Stabilization – Dewatering

criteria. As for the sludge line, a thickener and stabilization step is recommended before the dewatering process.

When nitrogen restrictions are higher, as in Scenario B, the IEDSS recommends an additional treatment to remove nitrogen, such as methanol addition, to ensure denitrification.

In the third case (Scenario C), a tertiary treatment is required after the secondary stage to obtain higher effluent quality that is suitable for reuse. In most cases, it consists of a filter treatment followed by a disinfection technology.

These recommendations are based on the influent characteristics as well as effluent requirements. The IEDSS takes into account the characteristics for every technology (included in the Skb-units) and the compatibility among them (through the compatibility matrix (Ckb-units)). These are the best solutions recommended by NOVEDAR_EDSS in terms of the flow diagram of treatment process technologies. The feasible treatments for primary and tertiary treatment, as well as the sludge line, depend on their compatibility with the secondary treatment selected. The IEDSS generates a list of 14 feasible secondary treatment alternatives (including Bardenpho, University of Cape Town (UCT), Modified Ludzack-Ettinger (MLE), Oxidation ditch (OxD), Sequential Batch Reactor (SBR), Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) and Membrane Bioreactor (MBR)...). Depending on the criteria selected (based on the user's preferences), these feasible secondary treatments will obtain different punctuation. And only the 5 best score alternatives will be considered in the next step (Step 2), hence the alternative evaluation section is focused on these 5 treatment alternatives (Table 5).

4.1.3. Alternative evaluation

The last step in the alternative process selection involves the alternative evaluation. As mentioned before, the selected criteria include economic, environmental and technical aspects, with a weight default value of 33.33% for every category of criteria. Equal weighting has been chosen to consider a single combined criterion approach where all of them are equally important (although this can be customized through a user-friendly interface). In this case study, although the EDSS recommends different WWTP network configurations for each scenario (Table 4), the corresponding secondary treatment recommended is the same for the three scenarios. Therefore because secondary treatments is the treatment step scored in the IEDSS, the results presented in Table 5 are

applicable to rank the process treatment alternative for the three scenarios considered.

As indicated in Table 5, a different score is obtained for each treatment alternative based on its characteristics. Moreover, to break down the total score obtained, an in-depth criteria exploration has been performed for every treatment alternative to determine the score corresponding to every selected criterion which are classified in 3 categories: economic (i.e., investment and operation and maintenance (O&M) costs and cost-benefit analysis (considering the environmental externalities)), environmental (i.e., LCA) and technical (i.e., reliability, operational simplicity and flexibility). The results are presented below (Table 5) as well as the score based on single combined criterion considering all criterion (weighting 33.33% for every category of criteria: economic, environmental and technical), within each category of criteria, the weight is equally distributed to the different indicators used (i.e., for economic criteria, costs and CBA (including externalities) will each have a weight of 50%).

As shown in Table 5, SBR and OxD are the most promising technologies when considering the criteria based on costs. The main reason is that SBR requires less space and investment, even considering the application of a buffer tank for the flow rate regulation, as the secondary settler is not needed. Oxygen consumption is higher in OxD than in SBR due to its higher Sludge Retention Time (SRT) requirements, although the former allows lower investment costs when considering the entire plant because the sludge is stabilized during this process technology and does not require stabilization treatment in the sludge line. As for MLE, it entails more pumping costs than OxD because of the internal recirculation applied. The investment cost in IFAS is higher because of the carriers needed for this process, and its O&M costs are higher than those for other treatments because the oxygen consumption is almost doubled (Rosso et al., 2011). When MBR is selected, membrane operation and maintenance increase the costs compared to other alternatives.

When environmental externalities are considered together with costs aspects (Table 5), the SBR technology ranks as the best alternative, followed by MLE and OxD, while the IFAS is the lowest ranking alternative. This is because IFAS is one of the most expensive alternatives considered, and its performance is lower than the MBR, which results in lower pollution removal, hence a

Table 5

Process treatment alternatives ranked based on every selected criterion: (i.e. costs, cost-benefit analysis with externalities (CBAEE), life cycle analysis (LCA), reliability, simplicity and flexibility) as well as based on a single combined criterion (33.33% weight for every category of criteria, i.e. economic, environmental and technical).

	Score ^b						Single combined criterion
	Economic		Env	Technical			
Secondary treatment ^a	Costs	CBA EE	LCA	Reliability	Simplicity	Flexibility	Total
MLE	6.08	8.85	5.63	5.0	5.0	5.0	5.82
OxD	7.89	8.85	5.63	7.5	7.5	7.5	6.09
SBR	7.97	10.0	5.63	2.5	2.5	10.0	6.22
IFAS	5.0	1.11	4.82	7.5	5.0	7.5	5.44
MBR	4.22	7.09	1.88	5.0	2.5	7.5	3.98

^a Modified Ludzack-Ettinger (MLE), Oxidation ditch (OxD), Sequential Batch Reactor (SBR), Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) and Membrane Bioreactor (MBR).

^b Economic indicators are: costs and CBA environmental externalities (EE). Environmental criteria are considered through LCA and, among technical indicators, are those referred to as reliability, simplicity and flexibility.

lower score.

LCA is the prioritized environmental criterion applied in the IEDSS to rank the process treatment alternatives for this specific case study; most alternatives present a similar score, while MBR presents the highest impact because it requires more chemical and energy consumption to remove the pollutants from water.

Three different technical criteria are considered to rank the process treatment alternatives (Table 5). The operation reliability is related to the process robustness when faced with flow variations and disturbances as well as some other aspects which can endanger a properly process operation. A higher Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS) concentration allows for greater robustness (Metcalf and Eddy, 2003) for MBR, OxD and IFAS alternatives when flow variation occurs because a higher concentration of microorganisms ensures that at least some of them will be active to degrade influent compounds under unfavorable conditions. However, MBR obtains lower punctuation than OxD and IFAS because the operation of this process involves also some other strategies as membrane cleaning to avoid fouling and load loss, which implies a decrease in the operation reliability.

As for the operation simplicity, MBR and SBR need more specialized staff and more control; this is the reason for their low score when this parameter is selected. Due to the way SBR operates, in sequencing steps, this is the most flexible treatment, while the MLE is the least flexible among the considered alternatives.

Finally, when the single combined criterion analysis is applied (Table 5, column: Total) SBR is the best-ranked technology, followed by OxD, while MBR obtains the lowest punctuation. This can be explained due to the scores obtained on the different selected criteria for each technology. Although OxD and MBR present higher punctuation than SBR in some of the technical criteria (simplicity and reliability), SBR implies lower costs, better results in the cost-benefit analysis (including environmental externalities) and higher flexibility, which ends up improving the total score for SBR.

In Table 6, estimations obtained in the IEDSS for the best option in each scenario (SBR being the corresponding secondary treatment in all of them because it is the better ranked alternative) are presented based on the WWTP network configuration indicated in Table 4. These estimations (regarding effluent concentrations and economic parameters) correspond to the results obtained when applying the formula included in Table 1.

Because Scenario A is less demanding regarding effluent quality, it presents the lowest costs. These costs are higher when the effluent should be of high quality suitable for re-use (Scenario C), as an additional treatment is required.

Alternately, when the maximum total nitrogen in the effluent is 10 mg/l, water treatment results in the highest costs because an additional nitrogen removal technology is required, in this case methanol addition, which increases both the investment and operational costs.

The top 5 best secondary treatment process technologies (i.e., SBR, OxD, MLE, IFAS and MBR) will be introduced in the next step,

in the optimization tool superstructure, as input to construct the design space for optimization and uncertainty analysis.

4.2. Step 2: superstructure-based optimization approach for

The optimization tool is the second step in the integrated framework and requires the following input information from the user:

4.2.1. Problem and objective function definition

The process design parameters estimated for each secondary treatment technology are illustrated in Table 7, while detailed calculations of process design for each alternative technology are provided in the supplementary material.

The data collection and the calculation for all the treatment process technologies were performed in MATLAB following the validated methodology developed by Bozkurt, 2015 to develop the database for the superstructure for these five secondary treatment process technologies selected by the IEDSS. However, reactor volumes are calculated taking into account SRT and MLSS (instead of the Hydraulic Retention Time (HRT)).

For illustrative purposes, the detailed calculations for a selected process interval (OxD) are presented below, while the details for all other process technologies can be found in the supplementary material. The SRT and HRT of the system are selected as 28 days and 24 h, respectively (Metcalf and Eddy, 2003), and the anoxic-to-aerobic volume ratio is 0.25. All the temperature-dependent biokinetic constants needed in the design procedure are taken from Benchmark Simulation Model No. 1 (BSM1) (Copp, 2002) for 15 °C because this is the average temperature in the location, and they are given in the supplementary material. The external recycle ratio is fixed at 100% of the influent flow rate. The design is performed as follows (Metcalf and Eddy, 2003):

Table 7
Process design parameters estimated for the different secondary treatments included in the superstructure.

Properties	Treatment process technology				
	SBR	OxD	MLE	IFAS	MBR
Temperature (°C)	15	15	15	15	15
SRT (days)	30	28	14	20	25
Reactor volume (m ³)	2424	3106	1880	1769	1590
Settler volume (m ³)	–	1600	1597	1602	–
Anoxic/aerobic volume ratio	–	0.25	0.25	0.25	0.25
MLSS (g/m ³)	3000	3000	3000	4000	5000
Wastage flow rate (% influent flow)	1.04	1.14	1.38	0.91	0.72
Sludge recycle flow (% influent flow)	–	100	100	100	100
COD removal efficiency (%)	86	89	89	85	94
Total N removal efficiency (%)	88	85	85	85	85
NH ₄ removal efficiency (%)	90	97	97	93	97

Table 6
Estimated costs and effluent concentration obtained when SBR is applied as a secondary treatment technology for every scenario.

Unit	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Selected criteria	TAC & Total N limit of 15 mg/l	TAC & Total N limit of 10 mg/l	TAC & effluent re-use
O&M cost	876.7	1479.5	1369.9
Investment	1138.4	2145.2	1163.0
Biogas price	–22.1	–22.6	–22.1
Effluent COD	38–131	38–131	4–106
Effluent Total N	12	10	12
Effluent TP	1	1	1
Effluent TSS	11	12	11

-The volume of the tanks in the different secondary treatments is calculated by applying the following equations (Metcalf and Eddy, 2003):

$$\text{Because } X_T \cdot V = P_{X,TSS} \cdot \text{SRT} = \text{Mass}; \quad (9)$$

$$V = \text{Mass}/X_T; \quad (10)$$

where " X_T " is the solids concentration in the reaction tank in COD units, calculated taking into account the conversion factor from TSS to COD units (Equation (11)). Mass (g) is the microorganisms' mass in the reactor, and $P_{X,TSS}$ is the wastage loading (g/d). In this case $\text{MLSS} = 3000 \text{ mg/l}$ ($X_T = 5000 \text{ mg/l}$) (Metcalf and Eddy, 2003). Accordingly, aerobic volume in the reactor is calculated to be 2485 m^3 , and anoxic volume in the reactor is 621 m^3 .

$$\text{MLSS} = 0,6 \cdot \text{COD} \quad (11)$$

-The wastage flow rate sent to the sludge line is calculated taking into account Equation (12):

$$Q_W = \text{Mass}/\text{SRT} \cdot X_T \quad (12)$$

For OxD treatment, the result is: $89 \text{ m}^3/\text{d}$.

-Oxygen requirements for cell decay as well as oxygen consumed in the nitrification are considered and calculated as follows:

$$\text{Oxygen}_{\text{COD}} = ((1-Y_h) \cdot Q_{\text{in}} \cdot \text{COD}_{\text{oxid}}) + (1-f_p) \cdot b_h \cdot \text{MX}_{\text{bh}} \quad (13)$$

$$\text{Oxygen}_{\text{nit}} = 4.57 \cdot Q_{\text{in}} \cdot \text{CN} \quad (14)$$

$$\text{CN} = \text{NH}_{4\text{rem}} - \text{NS} \quad (15)$$

where MX_{bh} refers to the heterotrophic mass of microorganisms in the secondary tank, COD_{oxid} refer to the COD removal efficiency considered and Y_h , f_p and b_h are biokinetic parameters (detailed information is provided in the supplementary material). In equation (15), NS represents the $\text{NH}_4\text{-N}$ assimilated into the biomass.

The amount of oxygen consumed for cell decay is $\text{Oxygen}_{\text{COD}} = 1.42 \text{ kg/d}$ and for nitrification is $\text{Oxygen}_{\text{nit}} = 1.12 \text{ kg/d}$.

-The effluent COD, total nitrogen and ammonia concentrations are calculated based on the treatment removal efficiencies (89%, 85% and 97%, accordingly) (Comas et al., 2004), where $S = 73.3 \text{ g COD/m}^3$, $\text{TN} = 12.2 \text{ g-N/m}^3$ and $\text{NH} = 1.2 \text{ g NH}_4\text{-N/m}^3$.

-The clarifier is designed taking into account the thickening factor for the sedimentation region. For soluble components, this value is 48%; while 0.38% of the particulates by mass leave with the effluent water stream, the rest is assumed to settle in the sludge zone. The volume of the sedimentation tank is calculated by assuming the surface overflow rate (SOR), solids loading rate (SLR) and depth of the tank from a range given for circular clarifiers (WEF, 2010). The selected values for these parameters are 1.77 m/h and $128 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{d}$ for the SOR and SLR, respectively, and the depth was 4 m. The resulting volume of the clarifier tank is then 1600 m^3 .

The objective function is based on the TAC, which results from the summation of the OPEX and CAPEX. Therefore, a WWTP network will be designed taking into account the minimization of this objective function.

4.2.2. Superstructure formulation

In Fig. 4, the superstructure for this case study is presented. In the source column, there is the wastewater source interval (WW), and in the last column, the sinks for water, sludge and biogas are included. The different treatment process technologies are located in between the source and the sinks, which are primary, secondary, tertiary and sludge treatments.

The primary treatment task includes a primary sedimentation tank and also a by-pass (BP1). The secondary treatments recommended by the IEDSS are those included in the secondary task of the superstructure: SBR, OxD, MLE, IFAS, MBR and a by-pass (BP2). The next task consists of a disinfection treatment, including UV, O_3 , and chlorine, and the by-pass BP5. The process for the sludge treatment includes a thickener followed by sludge stabilization (AnD-Anaerobic digester, AeD-Aerobic digester and the by-pass BP3.) and dewatering.

Taking into account the different treatment process technologies considered in every process stage (Fig. 4), 288 potential WWTP network configurations have been formulated (considering full factorial combinations of the primary clarifier, secondary treatment and sludge treatment).

4.2.3. Optimal process selection

In scenario A, no effluent reuse is required; therefore, a primary and secondary treatment is selected as optimal in the water stream, while the disinfection treatment is by-passed. As for the sludge line, the stabilization with anaerobic digestion is selected in most cases, except when OxD is the secondary treatment applied, because in this case, the sludge is already stabilized after the secondary process. The process path alternatives selected by the optimization tool for this scenario are presented in Table 8 together with its corresponding TAC:

When the formulation of the objective function is scenario B, the flow diagram proposed by the optimization tool is the same as in scenario A, although in this case, MBR is the only secondary treatment able to achieve the nitrogen limit of 10 mg/l (Fig. 5), and its corresponding TAC (eur/d) is 1682.2.

Under the conditions of scenario C, the disinfection technologies are also selected in the process flow diagrams (networks from "f" to "j"). The different options for the path flow are ranked in the same order as in scenario A but adding in this case a disinfection treatment, which is necessary to achieve the effluent requirements needed for water reuse. Thus, secondary treatments in each case are: SBR (network "f"), OxD (network "g"), MLE (network "h"), IFAS (network "i") and MBR (network "j"). In Table 9, cost results and performance are presented for the different scenarios:

When nitrogen requirements in the effluent are higher, the only technology able to meet these constraints is MBR. However, for the other scenarios, the optimizer selects SBR as a secondary treatment technology because it has lower capital and operational costs while still being able to meet the effluent limit concentrations.

4.3. Step 3: sensitivity analysis

4.3.1. Uncertainty in influent wastewater characterization

Uncertainty in influent wastewater composition is analyzed in this step to assess the robustness of optimal process selections. This analysis is performed because the composition of the wastewater is highly variable over time and the consideration of uncertainty results in a more robust solution (Bozkurt et al., 2015, 2016). LHS was applied to sample from the input uncertainty domain. Results of this uncertainty analysis are presented in Table 10. The input uncertainty here is based on expert review, which assumed 20% deviation from the mean influent load to calculate the lower and upper bounds of the uniform distribution parameters. Note that the

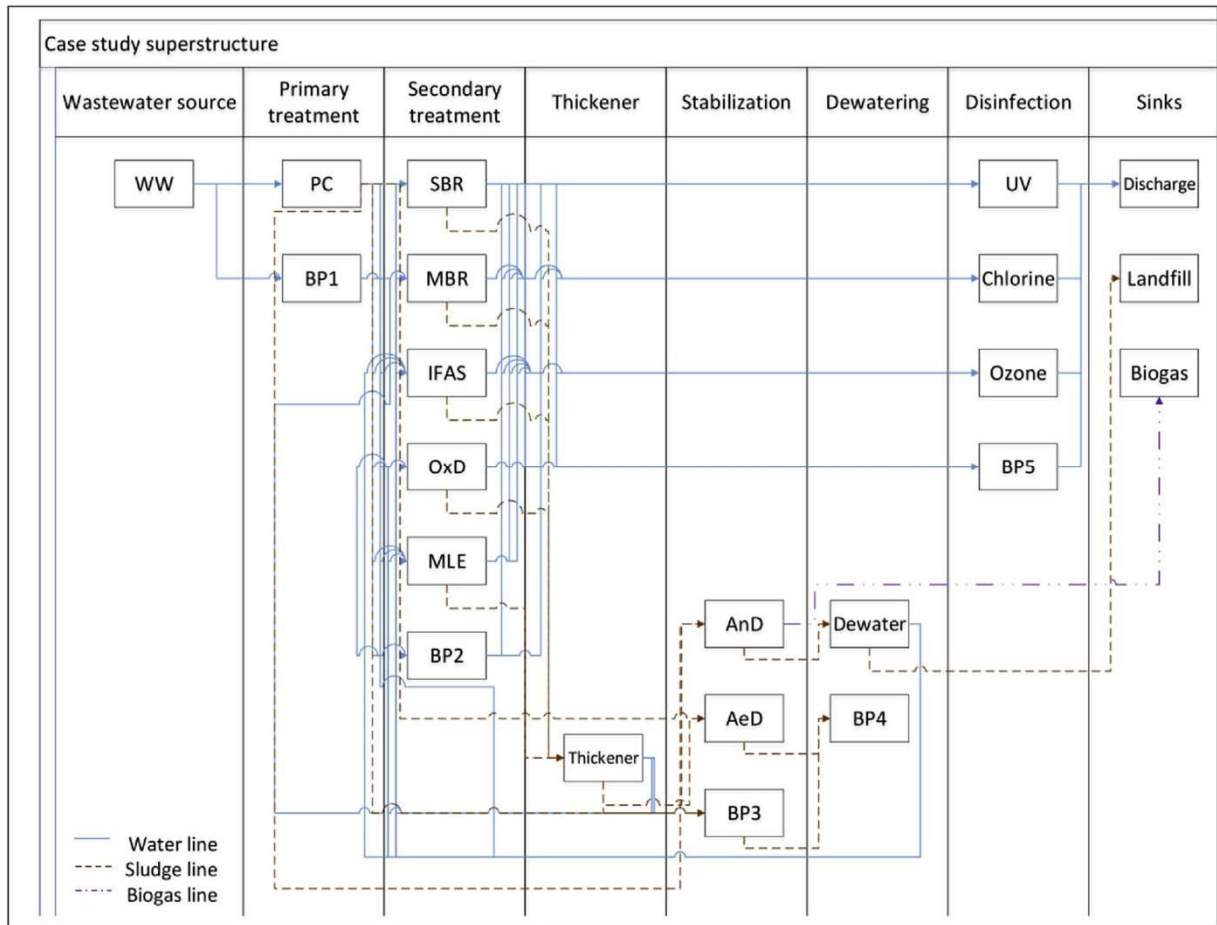


Fig. 4. Superstructure representation of the design/alternative space.

Table 8

Alternatives for WWTP network configurations and its corresponding TAC calculated by the optimization tool – Scenario A.

Rank no.	Network	Scenario A (TN = 15 mg/)	Selected intervals	CAPEX (eur/d)	OPEX (eur/d)	TAC (eur/d)
1	a	PC-SBR-Thickener-AnD-Dewatering		663.8	68.7	732.5
2	b	PC-OxD-Thickener-Dewatering		530.4	274.5	804.9
3	c	PC-MLE-Thickener-AnD-Dewatering		734.1	112.5	846.6
4	d	PC-IFAS-Thickener-AnD-Dewatering		872.9	210.1	1083.4
5	e	PC-MBR-Thickener-AnD-Dewatering		1371.0	311.2	1682.2

sensitivity analysis of other design, operational or model parameters (e.g., temperature, efficiency or amount/price of utilities or chemicals) is out of the scope of this study due to space restrictions. Alternately, although shock loads and toxicity are out of the scope of this study, they could be considered by including typical inhibition values within the range of kinetic parameters evaluated during the optimization step.

Because the influent wastewater composition is usually variable, the parameters considered as uncertain are the COD fractions and the nitrogen fractions, especially NH_4-N , S_{NH} . A 20% variation is considered around the deterministic value for S_S , S_I and X_I fractions of COD, and the resulting X_S concentration is calculated from the total COD balance. Additionally, a 20% variation around the deterministic value was assumed in the influent S_{NH} concentration. In Table 10, a summary of the uncertainty characterization is presented. More detailed information about the process developed for the uncertainty characterization methodology can be found in Bozkurt, 2015.

Sensitivity analysis was performed to identify the objective function variation when influent characteristics change under uncertainty conditions. It was developed for the best scored option for scenario A (PC-SBR-Thickener-AnD-Dewatering); because the variation tendency should follow the same behavior for the other scenarios studied, Figures A.2 through A.6 are presented in the supplementary material. The sensitivity analysis results demonstrate how the S_S variation does not seem to have a significant effect on the objective function. However, the objective function value grows when the X_I parameter increases. This could be because an increment in X_I is directly correlated with higher landfill costs (landfill costs). In addition, as the total COD remains constant and X_S is calculated based on the other fractions of COD, increasing X_I is related with decreasing X_S , which implies less biogas generation.

Alternately, the objective function value decreases when the X_S concentration in the influent is increased because more COD is then converted to biogas, which is an input, instead of a cost. Finally, S_{NH}

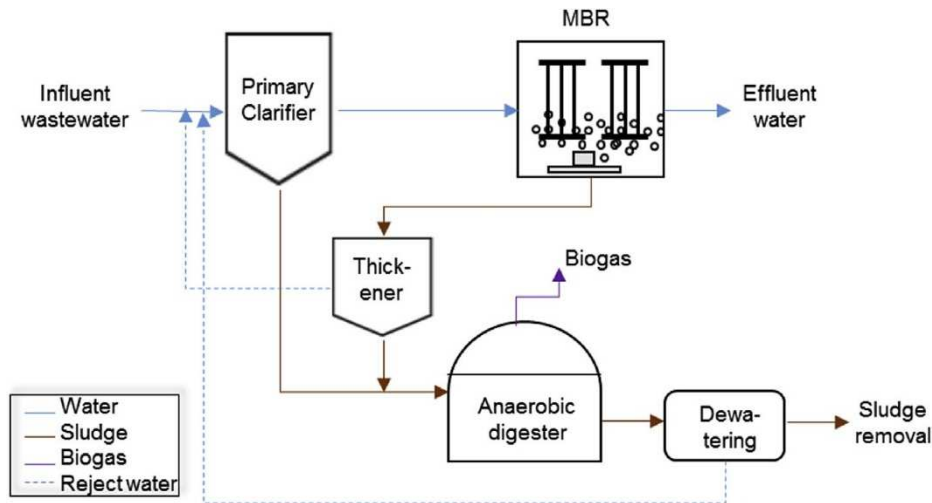


Fig. 5. Process flow diagram selected by the optimization tool when scenario B is performed.

Table 9

Costs and effluent parameter concentration for the different scenarios considering the best ranked alternative.

	Unit	Scenario A	Scenario B	Scenario C
Objective function	-	TAC & Total N limit of 15 mg/l	TAC & Total N limit of 10 mg/l	TAC & effluent re-use
Network		a (SBR)	e (MBR)	f (SBR)
Utilities cost	eur/d	131.4	329.0	143.4
Landfill cost	eur/d	103.9	120.4	103.9
Biogas price	eur/d	-184.8	-184.8	-184.8
Pumping cost	eur/d	16.5	45.6	16.5
Mixing cost	eur/d	1.8	1.02	1.8
Capital cost	eur/d	663.8	1371.0	678.7
TAC	eur/d	732.5	1682.2	759.5
Effluent COD	mgCOD/l	73.3	37.9	73.3
Effluent Total N	mgN/l	13.1	9.0	13.1
Effluent NH ₄	mgN/l	4.0	1.45	4.0
Effluent TP	mgP/l	0.4	0.4	0.4

Utility costs include: aeration, electricity and reactant costs.

Table 10

Influent wastewater uncertainty characterization: mean, minimum and maximum range of influent wastewater fractions (Bozkurt, 2015).

Parameter	Unit	Mean	Minimum	Maximum
S _S	g/m ³	108	86	130
S _I	g/m ³	34	27	41
X _I	g/m ³	56	45	67
S _{NH}	g/m ³	33	26	40

and S_I variations have slightly affected the values of the objective function and, therefore, also the identification of optimal solutions.

a. Decision-making under uncertainty: uncertainty mapping

The deterministic optimization problem has been solved for the three different scenarios by taking into account 50 (LHS) samples representing uncertainties in influent composition.

Fig. 6 represents the cumulative distribution of the objective function obtained by solving the optimization problem for every sample of influent composition (50 solutions in total). In this Figure, the x-axis shows the objective function value, which represents TAC, and the y-axis represents the probability that the resulting objective values are lower than the stated value on the x-axis. This figure shows how the uncertainty in the influent composition (COD and nitrogen fractions) propagates as uncertainty in the calculated

economic objective function of the plant design. In particular, the magnitude of the x-axis shows how high the uncertainty is. In scenarios A and C, the range of uncertainty is [580 850], while in scenario B, the range of uncertainty is [500 1700].

The uncertainty mapping and analysis is represented in Table 11, where the frequency of selection of the best plant configuration is presented. In Table 11, we see that, for scenario A, the plant configuration (network “a”) is selected as the best in 25 out of 50 solutions, while in the remaining samples, network “c” is selected as the best alternative. In scenario B, network “e” is selected for 43 cases out of 50, while network “c” is recommended in only 7 Monte Carlo samples. The plant configuration in scenario C (networks “f” and “h”) considers applying one more stage (UV) to the networks selected in scenario A.

For scenario A, it can be seen that, compared with the deterministic solution (Table 8), 40% of the Monte Carlo samples have a higher objective function value (Fig. 6). Taking into account the objective function value for the optimal process treatment in each scenario, it is possible to see where the objective function “cuts” the cumulative distribution curve, and the percentage corresponding to those alternatives that present a higher value for the objective function can be found on the “y-axis.” In 50% of the Monte Carlo samples, the selected network is different from the path selected in the deterministic solution. In this case, there are two different possible networks selected with the same probability of realization under the specified uncertainties in the influent composition

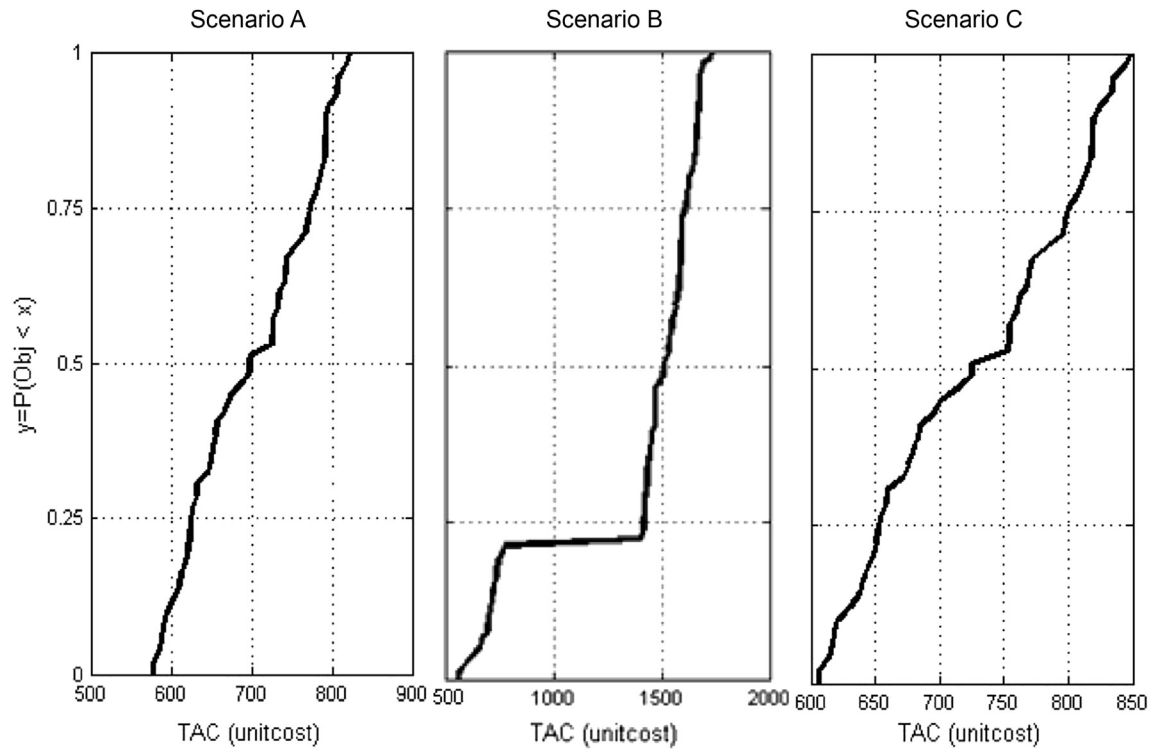


Fig. 6. Cumulative distribution of the objective function for scenarios A, B and C.

Table 11

Frequency of selection of the optimal processing paths for 50 Monte Carlo samples.

Network	Selected process configuration: the intervals	Frequency of selection
Scenario A		
a	PC-SBR-Thickener-AnD-Dewatering	25/50
c	PC-MLE-Thickener-AnD-Dewatering	25/50
Scenario B		
e	PC-MBR-Thickener-AnD-Dewatering	43/50
c	PC-MLE-Thickener-AnD-Dewatering	7/50
Scenario C		
f	PC-SBR-UV-Thickener-AnD-Dewatering	25/50
h	PC-MLE-UV-Thickener-AnD-Dewatering	25/50

(Table 10). This clearly indicates that uncertainty in the influent composition impacts the decision of optimal process selection.

In scenario B, 10% of the Monte Carlo samples have higher objective function values (Fig. 6) than the deterministic solution for this scenario. Alternately, there are two different networks identified as optimal; the most promising one, selected in 86% of the cases, is the same as that selected in the deterministic solution, while a different network is recommended in 14% of the Monte Carlo samples.

Results in scenario C are similar to those in scenario A, although a disinfection step is included because reutilization of the effluent is required, which results in higher TAC. The two possible network proposed by the optimization are the same as in scenario A but consider UV as a disinfection technology.

b. Decision-making under uncertainty: stochastic problem

In the previous section, the decision-making is based on the complete realization of the data (in other words, for each sample, one optimization problem is solved, and a solution is obtained; this results in a number of optimal solutions that are analyzed by

frequency plot). In this step, the model is reformulated considering all future uncertainties (all samples), and one optimal solution is obtained. Thus, the deterministic formulation used in previous steps is reformulated as a two-stage stochastic programming problem and solved in this step by following a sample average approximation (SAA) approach (Birge and Louveaux, 1997; Cheali et al., 2014). The differences between the results in this step and the previous one provide important information to support decision-making (i.e., robustness of the optimal solutions and the possibility of reducing the risks from uncertain parameters). In Table 12, optimal alternative treatment results are presented for every scenario:

The recommended treatments for scenarios A and C are different from those selected in the deterministic solution. However, it should be noted that the selected path in SAA is the same as that the networks proposed in the uncertainty map analysis, with the same probability of being selected as the network selected in the deterministic solution. Because SAA results in a more robust selection, MLE is the secondary treatment selected as it is able to obtain the required effluent results even for the most unfavorable cases (read as corresponding to larger influent composition

Table 12
Optimal alternative flow process selected in the optimization tool for each

Scenarios	Effluent requirements	Network	Recommended
A	TN = 15 mg/l	c	PC-MLE-Thickener-AnD-Dewatering
B	TN = 10 mg/l	e	
C	Effluent re-use	h	PC-MBR-Thickener-AnD-Dewatering

changes) in scenarios A and C.

However, the SAA solution when the TN effluent limit is 10 mg/l (scenario B) is the same as in the deterministic solution, and it coincides with the most probable treatment path when the uncertainty map analysis is performed. Therefore, MBR will be the selected option when the effluent requirements are more stringent because it allows for the achievement of higher quality effluent.

This analysis highlights the importance of considering uncertainty analysis in a decision-making process because the optimal solution can change depending on the uncertainty parameters taken into account. This allows for robust decisions that can handle effluent requirements in all cases when influent characteristics change.

When comparing results between deterministic and SAA solutions (Table 13) in scenario A, TAC is slightly higher for the SAA solution, as MLE results in higher costs than SBR (because MLE has higher investment costs and lower SRT, i.e., more sludge to be managed per day). Note that the optimal solutions under uncertainties are compared among ones that achieve effluent requirements in every case (based on the uncertainty ranges considered). The results in scenario C are more expensive in all cases because a disinfection treatment is required.

As for scenario B, although the cost for utilities is slightly larger in the SAA solution, TAC is lower due to the higher amount of biogas generated in the SAA solution because some samples contain higher COD (up to 20% due to the influent composition changes) than those considered in the deterministic solution.

4.4. Analysis of the integrated methodology for early-stage process screening and selection

In this section, results are validated with process engineering knowledge and practice, and the synergy obtained through the integrated approach is described.

The integrated framework presented in this work represents a step forward in the selection process of alternative process flow diagrams because it can be applied at the same time in both wastewater and sludge lines, involves a multi-criteria assessment and enables consideration of more than 150 technologies.

In scenario A, SBR and OxD are the best scored systems when economic criteria are selected in both NOVEDAR_EDSS and the superstructure optimization tool. This result agrees with good expert knowledge and practices because SBR can achieve effluent

Table 13

Comparison between results of the deterministic solution and SAA in scenarios A (TN = 15 mg/l), B (TN = 10 mg/l) and C (with a tertiary treatment).

	Scenario A		Scenario B		Scenario C	
	Det. ^a	SAA	Det. ^a	SAA	Det. ^a	SAA
Network	a	c	e	e	f	h
Cost for utilities (eur/d)	131.4	139.8	329.0	338.6	143.4	150.9
Cost for landfill (eur/d)						
Capital cost (eur/d)	103.9	138.4	120.4	120.4	103.9	138.4
Biogas price (eur/d)						
Pumping cost (eur/d)	663.8	735.0	1371.0	1371.0	678.7	735.0

^a Deterministic.

quality as high as the other conventional treatments but requires less space and less investment costs, although sometimes its operational costs can be higher than those for other treatments (CEDEX, 2013). In contrast, OxD is one of the most widespread wastewater treatment processes in the world (Xie et al., 2014) because it is competitive with other activated-sludge processes for controlling eutrophication (Chang-Zi et al., 2013), while a simpler sludge treatment line is required because its high SRT allows sludge stabilization during the secondary stage.

Alternately, under uncertainty, SBR and MLE are recommended as optimal solutions. When uncertainty in influent nitrogen is considered, the selection of MLE in half of the cases ensures a lower nitrogen concentration in the effluent, between 10 and 15 mg/l (CEDEX, 2013), which allows easy achievement of the effluent quality requirements.

As for scenario B, the IEDSS recommends applying a specific nitrogen removal technology to ensure an effluent nitrogen concentration below 10 mg/l. In this case, methanol addition seems to be the best option under the economic point of view. Methanol could be applied when a very low nitrate concentration in the effluent is required (CEDEX, 2013). However, the optimizer selects the MBR as the optimal secondary treatment amongst the considered alternative in the design space to achieve the required effluent quality because it is feasible for application in environmentally sensitive locations (Sanchez and Garrido, 2009). Under uncertainty, both deterministic and stochastic solutions recommend MBR as the optimal secondary treatment.

Regarding scenario C, the selected process treatment alternatives are the same as in scenario A, but a disinfection technology is included. There is need for an additional treatment to achieve the quality necessary to minimize health and environmental risks by removing pathogens and chemical contaminants for when the treated wastewater is reused (Alcalde Sanz and Manfred Gawlik, 2014). Among possible disinfection technologies, ultraviolet, chlorine dioxide and ozone methods have been included in the superstructure.

When the IEDSS is applied without the optimization tool step, there is a risk that, in some cases, the effluent results will not achieve the requirements for the selected treatment because no accurate values are calculated. However, the optimization tool will give more accurate estimates of the effluent concentrations.

Alternately, when the alternative process selection is performed only with the optimization tool, without the previous step (IEDSS), the technologies to be evaluated could not have been the most feasible ones because a multi-criteria analysis and a wide source of expert knowledge would not have been applied to select them.

The uncertainty and sensitivity analysis allows for selection of a more robust decision-making process because the most appropriate alternative to be applied, achieving the required objectives for the different possible scenarios, will be selected even with uncertain information of the influent.

5. Verification of the results using state of the art PROCESS SIMULATOR

In order to verify the approach applied in this project, the 5 alternatives of Table 8 (filtered in Phase I to be included in Phase II)

Table 14

Design data, effluent concentration and comparison of the results obtained from the integrated tool versus Biowin (that employs a rigorous mechanistic model of WWTP processes).

Parameter	MLE		MBR		SBR		IFAS		OxD	
	Int. T	Bio	Int. T	Bio	Int. T	Bio	Int. T	Bio	Int. T	Bio
SRT	14	14	28	28	30	30	20	20	28	28
MLSS _{aer}	5000	5864	8333	10957	5000	4288	6667	7371	5000	5825
MLSS _{anox}	5000	4440	8333	8251	5000	4288	6667	5066	5000	4410
Q _w	107	107	56	49	81	87	71	82	89	83
Volume _{ae}	1410	1410	1193	1193	2424	2328	1327	1327	2330	2329
Volume _{anox}	470	470	398	398	2424*	2328*	442	442	777	777
COD _{effluent}	60	45	38	33	73	52	66	55	73	47
Total Nitrogen _{effluent}	11	14	9	14	13	15	14	15	10	14
OPEX (eur/d)	112	N/A	311	N/A	69	N/A	210	N/A	274	N/A
Air flowrate (m ³ /hr)	N/A	2929	N/A	4392	N/A	2855	N/A	3487	N/A	3356
Rank no.	2	2	5	5	1	1	3	4	4	3

Int T stands for integrated tool while Bio stands for Biowin*the cycle phase lengths considered in the SBR were: fill (1 h), aerobic (1.4 h), anoxic (0.6 h) and settling (1 h).

have been implemented in a state-of-the-art process simulator (Biowin), which employs a rigorous mechanistic modeling of the WWTP processes. The aim of these simulations is to verify if results from simulators (in terms of alternative ranking) are comparable to those obtained in our integrated framework.

The parameters considered to rank the different treatment alternatives are those related with the OPEX, since the CAPEX (namely volumes of the tanks) are fixed in both approaches. As regards OPEX, Biowin doesn't calculate OPEX so instead the alternatives are ranked based on the air flowrate (m³/d) calculations.

The same configurations applied in the integrated framework have been considered in the process simulator. Table 14 presents the design data applied to develop the different configurations as well as the effluent concentrations obtained in each case. Moreover, the comparison between the alternative's ranking considering the results obtained in Biowin and those in the integrated framework has been included.

As it can be seen, the best ranked treatment alternative is SBR in both cases, followed by the MLE. IFAS and OxD are ranked very close to each other (the relative difference in the calculated air flowrates between the two configurations is 3.9%). Finally, MBR obtains the lowest rank taking into account both approaches.

Therefore, it is concluded that, with the same design values selected (i.e. SRT, HRT and temperature), the alternative ranking are in agreement with each other. It is remarked that quantitative comparison between the Biowin and the integrated tool is not the aim here since they are expected indeed to be different. That is because the integrated tool uses simplified design models, whereas Biowin applies a much more detailed/kinetics-based mechanistic models to estimate the effluent concentrations and air flowrate requirements for different configurations. Hence, within the context of process selection, which is the aim here, both tools produces very similar ranking results but the integrated knowledge-based and optimization tool hence supports the selection of similar concepts for the specified problem allows an exhaustive search of all possible configurations to ensure finding the optimal ones.

6. Conclusions

In this study, knowledge-based systems together with an optimization-based approach are integrated for the first time to perform the optimal network selection of a WWTP configuration.

The application of knowledge-based techniques (such as IEDSS) in the first step of the process synthesis allows for determining the technologies to be considered for evaluation in the optimization step, providing a holistic approach to the alternative selection

process. After that, the implementation of the optimization tool allows for obtaining more accurate results for operational costs and for the prediction of effluent limit accomplishment because mathematical models are applied. Therefore, there is a mutual benefit and synergy achieved when both tools are integrated. Finally, the uncertainty analysis increases the quality and robustness of the decision by proposing a solution able to achieve effluent requirements for a wide range of influent concentrations.

The selected case study implies the pre-design of a real facility to treat the wastewater from a medium-size town. The knowledge-based system identifies 5 potential process flow diagrams, out of 150 alternatives, after screening for environmental, economic and technical criteria, including MLE, SBR, MBR, IFAS and OxD. These treatment alternatives are validated against a process simulator to verify the results (in terms of alternative ranking). After that, using this input from the IEDSS, the superstructure optimization generates 288 potential WWTP network configurations (considering full factorial combinations of the primary clarifier, secondary treatment and sludge treatment); therefore, the generation of the short-list of treatment process alternatives in the IEDSS is essential to avoid an unmanageable number of network configurations. Finally, the process flow diagram PC-MBR-Thickener-AnD-Dewatering (Fig. 5) is identified as the optimal and more robust solution under influent uncertainties and tighter effluent limits.

Acknowledgment

This work is partially supported by Doctorat Industrial 2013-DI-038 (AGAUR and AQUALOGY). This work also received partial support from the EU-Cost Action Water2020 (ECOST384 STSM-ES1202-110614-044095). LEQUIA and ICRA are recognized as consolidated research groups by the 370 Catalan Government with codes 2014-SGR-1168 and 2014-SGR-291, respectively.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.06.019>.

References

- Alcalde Sanz, L., Manfred Gawlik, B., 2014. Water Reuse in Europe. In: Relevant Guidelines, Needs for and Barriers to Innovation. European Commission.
- ATV-DVWK Standard-A131E Dimensioning of single-stage activated sludge plants (2000).
- Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D., Andreassian, V., 2013. Characterising performance of environmental models. Environ. Model. Softw.

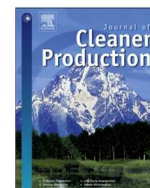
- 20.
- Birge, J.K., Louveaux, F., 1997. *Introduction to Stochastic Programming*. Springer, New York, USA.
- Bozkurt, H., Quaglia, A., Gernaey, K.V., Sin, G., 2015. A mathematical programming framework for early stage design of wastewater treatment plants. *Environ. Model. Softw.* 64, 164e176.
- Bozkurt, H., 2015. *Computer-aided Framework for Synthesis, Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants*. PhD thesis. Technical University of Denmark.
- Bozkurt, H., van Loosdrecht, M.C.M., Gernaey, K.V., Sin, G., 2016. Optimal WWTP process selection for treatment of domestic wastewater e a realistic full-scale retrofitting study. *Chem. Eng. J.* 286, 447e458.
- CEDEX, 2013. *XXX Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotacion de estaciones depuradoras*. Madrid.
- Chamberlain, B.C., Carenini, G., Oberg, G., Poole, D., Taheri, H., 2014. A decision support system for the design and evaluation of sustainable wastewater solutions. *IEEE Trans. Comput.* 63, 129e141.
- Chang-Zi, G., Wei, F., Xue-Mei, C., Dang-Cong, P., Peng-Kang, J., 2013. Nitrogen-removal performance and community structure of nitrifying bacteria under different aeration models in an oxidation ditch. *Water Res.* 47 (11), 3845e3853.
- Cheali, P., Quaglia, A., Gernaey, K.V., 2014. *Effect of Market Price Uncertainties on the Design of Optimal Biorefinery Systems-a Systematic Approach*.
- Comas, J., Alemany, J., Poch, M., Torrens, A., Salgot, M., Bou, J., 2004. Development of a knowledge-based decision support system for identifying adequate wastewater treatment for small communities. *Water Sci. Technol.* 48, 393e400.
- Copp, J.B., 2002. *The COST Simulation Benchmark: Description and Simulator Manual*. Office for Official Publications for the European Communities, Luxembourg.
- EEC, 1991. Council directive of 21 May 1991 concerning urban waste water treatment (91/271/EEC). *Off. J. L* 135, 40e52.
- Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernandez, F., Poch, M., 2012. Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams. *J. Environ. Manag.* 112, 384e391.
- Garrido-Baserba, M., 2013. *Development of an Environmental Decision Support System for the Selection and Integrated Assessment of Process Flow Diagrams in Wastewater Treatment*. PhD thesis. University of Girona.
- Garrido-Baserba, M., Hospido, A., Reif, R., Molinos-Senante, M., Comas, J., Poch, M., 2014. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. *Environ. Model. Softw.* 56, 74e82.
- Gomez-Lopez, M.D., Bayo, J., Garcia-Cascales, M.S., Angosto, J.M., 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *J. Clean. Prod.* 17, 1504e1511.
- Henze, M., van Loosdrecht, M.C.M., Ekama, G., Brdjanovic, D., 2008. *Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design*. IWA Publishing, Glasgow.
- Huang, Y., Dong, X., Zeng, S., Chen, J., 2015. An integrated model for structure optimization and technology screening of urban wastewater systems. *Front. Environ. Sci. Eng.* 9, 1036e1048.
- ISO, 2006a. International Organization for Standardization (ISO) 14040: Environmental Management-life Cycle Assessment - Principles and Framework. Geneva.
- ISO, 2006b. International Organization for Standardization (ISO) 14040: Environmental Management-life Cycle Assessment e Requirements and Guidelines. Geneva.
- Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2013. The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: a group decision-making approach. *J. Environ. Manag.* 128, 844e851.
- Kilic, K., Hamarat, C., 2010. *A Decision Support System Framework for Innovation Management*, pp. 765e770. Components 2007.
- Makropoulos, C.K., Natsis, K., Liu, S., Mittas, K., Butler, D., 2008. Decision support for sustainable option selection in integrated urban water management. *Environ. Model. Softw.* 23, 1448e1460.
- Metcalf, Eddy, 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, fourth ed. McGraw-Hill, New York.
- Molinos-Senante, M., Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernandez-Sancho, F., Poch, M., 2012. Assessment of wastewater treatment plant design for small communities: environmental and economic aspects. *Sci. Total Environ.* 427e428.
- Poch, M., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Sanchez-Marre, M., Cortes, U., 2004. Designing and building real environmental decision support systems. *Environ. Model. Softw.* 19, 857e873.
- Quaglia, A., 2013. *An Integrated Business and Engineering Framework for Synthesis and Design of Processing Networks*. PhD thesis. Technical University of Denmark, p. 220.
- Ramin, E., Sin, G., Mikkelsen, P.S., Plosz, B.G., 2014. Significance of settling model structures and parameter subsets in modelling WWTPs under wet-weather flow and filamentous bulking conditions. *Water Res.* 63, 209e221.
- Rosso, D., Lothman, S.E., Jeung, M.K., Pitt, P., Gellner, W.J., Stone, A.L., Howard, D., 2011. Oxygen transfer and uptake, nutrient removal, and energy footprint of parallel full-scale IFAS and activated sludge processes. *Water Res.* 45, 5987e5996.
- Sanchez, A., Garrido, J.M., 2009. *Advanced Wastewater Treatments. Membrane Bioreactors*, Chapter 10. NOVEDAR_Consolider. In: Vol. II.WEF and ASCE/EWRI, 2010. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. WEF Press, Virginia.
- Xie, H., Yang, J., Hu, Y., Zhang, H., Yang, Y., Zhang, K., Zhu, X., Li, Y., Yang, C., 2014. Simulation of flow field and sludge settling in a full-scale oxidation ditch by using a two-phase flow CFD model. *Chem. Eng. Sci.* 109, 296e305.
- Yu, R.F., Liaw, S.L., Chang, C.N., Lu, H.J., Cheng, W.Y., 1997. Monitoring and control using on-line orp on the continuous-flow activated sludge batch reactor system. *Water Sci. Tech.* 1997 (35), 57e66.
- WEF, ASCE/EWRI, 2010. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*. WEF Press, Virginia.
- Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M., Li, J., 2007. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *J. Environ. Manag.* 82, 250e259.

-
- 3.3 Castillo, A., Vall, P., Garrido-Baserba, M., Comas, J., Poch, M., 2017. Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: a multi-criteria assessment. *J. Clean. Prod.*, 143, 180–190. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.132



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: A multi-criteria assessment



A. Castillo^{a, b}, P. Vall^a, M. Garrido-Baserba^{c, *}, J. Comas^{b, d}, M. Poch^b

^a AQUALOGY, SUEZ, Passeig de Zona Franca 48, 08038, Barcelona, Spain

^b Laboratory of Chemical and Environmental Engineering (LEQUILA), Universitat de Girona, Science Faculty, Montilivi Campus, 17071, Girona, Spain

^c Department of Civil and Environmental Engineering, University of California, Irvine, CA 92697-2175, USA

^d ICRA, Catalan Institute for Water Research, Scientific and Technological Park of the Universitat de Girona, Emili Grahit, 101, E-17003, Girona, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 20 October 2016

Received in revised form

20 December 2016

Accepted 23 December 2016

Available online 26 December 2016

Keywords:

Decision support system

Industrial wastewater

FDM sector

ABSTRACT

Nowadays, most industries are required by law to treat their wastewater, but the selection of the most appropriate wastewater treatment technologies involves a complex decision making process. Environmental decision support systems can be useful to reduce the time needed to make decisions, to improve the consistency and quality of the decisions and to provide direct access to experience, expertise and human-kind reasoning. This study aims to obtain an environmental decision support system to select the most suitable alternative for industrial wastewater treatment in the food, drink and milk sector. The process developed is described, and a set of case studies showing the capabilities of the tool is presented in order to validate the system procedure.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Products of agriculture are transformed into foods and drinks in the food, drink and milk (FDM) sector, one of the most important industrial sectors in the world. Indeed, the total worldwide production in the milk sector in 2013 was 1282 billion US dollars (Cook, 2015), while the sales for the drink sector in 2014 amounted to 1079 billion US dollars (Statista, 2015) and the total food sales internationally was 4 trillion US dollars in 2008 (Sidwell, 2008). FDM sector includes such industries as breweries, wineries and soft drink facilities, as well as dairy and fruit and vegetable processing, among others.

Industrial production processes entail significant consumption of relevant constrained resources (i.e. water and land) to obtain the raw materials for this industrial sector (e.g., fruits, vegetables and grains) and for the manufacturing process itself (e.g. as a primary ingredient, to clean raw materials and equipment). Most of the water which is not used as an ingredient ultimately appears in the wastewater stream. Although industrial wastewater characteristics differ among subsectors, rich organic content in the form of sugars,

proteins, and oils and fats are the predominant industrial sub-products (Drogui et al., 2008).

It is estimated that 5–20% of total water is used by industry (UNESCO, 2009). If unregulated, industrial wastewater has the potential to be a highly toxic source of pollution (Corcoran et al., 2010). In some countries (e.g. United States) pre-treatment standards apply to all industrial users wishing to discharge to the sewerage system (UNESCO, 2009). In the UK industrial effluents discharged to public sewers, by agreement, are subject to a financial charge according to a formula that estimates the cost of collection and treatment (UN Water, 2015). At the European level, the current framework of water legislation requires industries to treat their wastewater to preserve natural water resources in good condition (Directive 2010/75).

Since industries should integrate the environmental vector into the selection of their wastewater treatment solutions, the demand for environmentally friendly wastewater alternatives is growing (Chung et al., 2013). Industrial effluents are often variable in volume and composition, hindering simple future projections due to the different manufacturing processes characteristics (Sueviriyapan et al., 2014). An important number of unit operations have been developed to deal with this problem, mainly based on physical, chemical and biological processes (Fig. 1). To attain the goal of efficient treatment to meet water quality standards, an optimal combination of these unit operations must be established.

* Corresponding author.

E-mail addresses: acastillo@aquatec.es (A. Castillo), pvall@aquatec.es (P. Vall), manelg@uci.edu (M. Garrido-Baserba), joaquin.comas@udg.edu (J. Comas), manel@lequia.udg.edu (M. Poch).

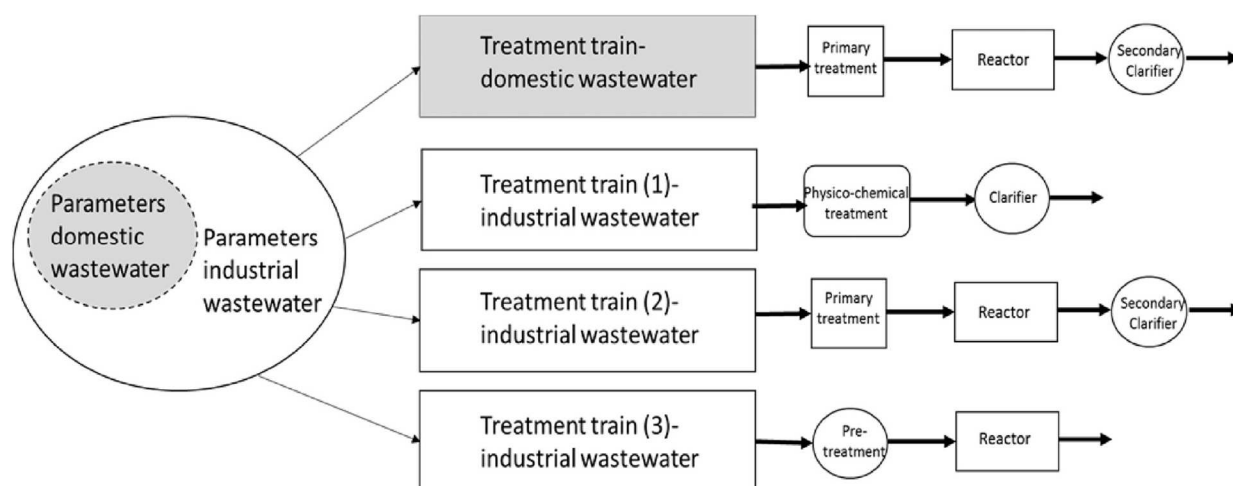


Fig. 1. Scheme to highlight the numerous parameters to consider, and some possible treatment trains, among the wide range available, to treat industrial wastewater.

However, this is not an easy task for three principal reasons: (i) the high number of possible alternatives; (ii) the need to consider multiple criteria in evaluating the suitability of a proposal (water quality and technological aspects are not the only criteria, but also additional aspects like operational safety, costs or environmental impact should be carefully considered); and (iii) current lack of knowledge sharing or collaboration among the different agents involved, whose collaboration in case to exists could trigger symbiotic effects (i.e., researchers developing new processes together with engineering specialists with extensive experience in plant design) obtaining improved cost-effective solutions.

Traditionally, integration of all these elements has been considered very difficult, if not impossible, to systematize (Hamouda et al., 2009). However, the need to cope with this complexity in the industry has promoted an important effort to develop tools and approaches. For instance, Pinter et al. (1995) developed a tool for assisting industrial wastewater management. More focused on the wastewater treatment, Collado et al. (2012) worked in a methodology where decision diagrams were applied to the selection of wet oxidation or conventional biological treatments, taking into account non-conventional aspects such as biodegradability. While Parghi and Fox (1994) developed a model to help decision makers to select biological treatment or incineration for high strength wastewater treatment. Gomez-Lopez et al. (2009) presented a methodology aimed at selecting feasible disinfection treatments. Some hierarchical-based techniques to improve the selection of industrial wastewater primary treatments have also been developed (Freitas and Costa, 2000), as well as knowledge-based systems considering heuristics and cost minimization methods (Wukovits and Harasck, 2003). Similarly, Statyukha et al. (2008) developed a method based on wastewater pinch techniques and mathematical programming. However, none of them took into account the whole treatment train or process flow diagram, which makes almost impossible an integrated and comprehensive assessment of the selected alternative. Moreover, all of them fail to consider a multi-criteria analysis based on economic, environmental and technical criteria. In this study, an Environmental Decision Support System (EDSS) has been developed to support wastewater treatment plant (WWTP) design specialists in the selection of wastewater treatment alternatives in the FDM industry. This EDSS considers the whole treatment train diagram and provides a multi-criteria analysis (including environmental, technical and economic aspects) in order to apply an

integrated approach when selecting wastewater treatment alternatives.

Environmental Decision Support Systems have proved to be an efficient approach to integrate data and experience, embracing knowledge from different fields and experts (Poch et al., 2004; McIntosh et al., 2011). While the state-of-the-art practice requires different tools as: WWTP model, cost estimator, LCA software and multi-criteria analysis tools, which imply different experts or at least for sure higher time for analysis, going from one software to another, in this case, an EDSS can integrate all the functionalities of these different tools used in current practices. Therefore, time reduction and consistency improvement of the decision making process by the EDSS should support industries to develop cleaner production systems by selecting the most appropriate and environmentally friendly wastewater treatment alternatives.

The aim of this work is to obtain an EDSS able to cope with the inherent complexity involved in the design of feasible treatment configurations for industrial effluents (Fig. 1).

An EDSS has been developed to tackle the selection of feasible industrial wastewater treatment alternatives, including a consistent and logical reasoning procedure. Moreover, sector-specific parameters and treatment technologies are included in the tool. A set of case studies are presented in this work in order to validate the feasibility of the EDSS developed.

2. Materials and methods

2.1. Wastewater in the food, drink and milk sector

Water consumption is a key aspect in the FDM sector, which generates effluents characterized by high (biodegradable) organic loadings, with Chemical Oxygen Demand (COD) and Biochemical Oxygen Demand (BOD) values 10–100 times higher than urban wastewater. While variations in Total Suspended Solids (TSS) concentration can be highly variable depending on the subsector, ranging from 10 to 120,000 mg/l (Olsson, 2015), insufficient nutrients can also often hinder implementation of a conventional aerobic process (Camarillo and Rincon, 2012).

The characteristics and constraints described limit the potential solutions to be implemented, forcing the design of site-specific process flow diagrams to satisfy the requirements of each specific scenario. Biological treatments are still the most applied treatment to FDM effluents. Although conventional urban facilities often

apply biological treatments to oxidize FDM high-organic loads, using a very energy-intensive process as the aerobic process, the rich chemical energy contained in FDM effluents (more than three or four times the energy required to treat it) should be harvested by anaerobic processes. Reduction of the organic load while recovering energy in the form of biogas (Rodríguez Fernández-Alba et al., 2006) is gaining wider implementation within the FDM sector (CEDEX, 2013).

2.2. An EDSS for industrial wastewater

Two basic steps need to be considered for the selection of appropriate technologies to treat industrial effluents. The first one corresponds to the wastewater characteristics in the industrial sector, in order to know the main parameters that should be considered in the treatment process (e.g. biodegradability). The second step refers to the effluent quality requirements, which will determine the treatment required to satisfy these quality limits. Based on these fundamental aspects, the tool's reasoning process is defined.

Therefore, once the complexity and related variables of the FDM industrial sector has been identified, two knowledge bases (including specific technologies for industrial effluents) were built. The first knowledge base (Skb-units) embrace all technical information regarding each technology, while the second knowledge base (Ckb-units) defines the compatibility between treatments in the flow diagram. The methodology is based on the Novedar_EDSS which was developed for urban wastewater treatment plants (Garrido-Baserba et al., 2012). It consists of a knowledge-based system that applies a hierarchical approach, a structural network model, decision trees, a recursive evaluation and a multi-criteria analysis. To cope with industrial treatment complexity, a whole new set of treatment technologies, usually applied in the FDM, have been included in the EDSS knowledge base. Most of the options incorporated are aligned to European Commission recommendations guidelines (2006): i.e., Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Internal Circulation reactor (IC), Expanded Granular Sludge Bed (EGSB), Anaerobic filter (AF), Expanded Bed (EB) and Fluidized Bed (FB). Dissolved Air Flotation (DAF) technology has also been considered for the primary treatment, since it is highly spread in the FDM sector. In addition, as homogenization tanks are usually required, the new approach allows their consideration in the plant layout.

Fig. 2 shows the EDSS with features and processes to tackle the FDM sector.

The first step is the problem definition, consisting of a short data entry process by the user, to ensure that all relevant influent characterization parameters have been included (e.g., biodegradability, addition of nitrogen and/or phosphorus (Camarillo and Rincon, 2012), etc.). In order to take into account possible incomes derived from selling the anaerobic sludge, or expenses for nutrient addition, some of these parameters are also used for the cost-benefit analysis.

The EDSS includes different options regarding the effluent limit requirements. The selection of a specific effluent discharge or reuse option will retrieve (from internal libraries) the required quality requirements for such an option, and only those alternatives fulfilling such effluent limits will be further evaluated. For example, discharge to a sewer pipe has been included as a discharge option, where the industrial effluent is discharged for further treatment in an urban wastewater treatment plant. Thus, as the treatment required would be less intensive compared to those meant to directly discharge in sensitive or regular discharge areas, the EDSS may suggest a wider array of less energy-intensive alternatives. On the other hand, if the effluent is expected to discharge in a sensitive

area, a likely energy-demanding process flow diagram will be suggested, such as, for example an anaerobic treatment followed by an aerobic, together with some chemicals and higher quality controls, as a two-stage biological treatment system achieves an effluent quality suitable for water sensitive areas (European Commission, 2006).

The last part in the problem definition is the prioritization of the selected criteria based on user preferences to evaluate feasible solutions. Applying a multi-criteria analysis allows the scoring of alternatives in order to facilitate the user's final decision-making process.

Once the EDSS has been executed, the alternative generation process selects all suitable secondary treatments for the defined specific scenario, based on parameters as flowrate and BOD concentration (Table 1), with the structural network model. In the next step, based on the compatibility knowledge base, suitable and complete process flow diagrams are generated by means of the hierarchical approach and the decision trees. Finally those feasible solutions satisfying the effluent requirements will be selected and further evaluated by the recursive evaluation. The final output is then incorporated in the multi-criteria function with the user-oriented weighting criteria system that was customized during selections in the problem definition (Garrido-Baserba, 2014).

Sometimes not all the aforementioned steps need to be included to generate specific process flow diagrams. As it can be seen in Fig. 2, there are user options to decide whether or not to include particular technologies or functional processes (e.g., sludge stabilization). In a similar way, the EDSS allows the user to choose among different options for the secondary treatment (i.e., one-stage aerobic treatment, one-stage anaerobic treatment, two-stage anaerobic þ aerobic treatment).

In the multi-criteria analysis, each secondary treatment alternative is ranked based on the criteria selected by the user. The score for each criteria (e.g. space requirements, Table 1) is calculated by giving a "10" to the best alternative (i.e. smallest facility) and a "0" to the worst (i.e. biggest facility). After that, a normalization process is applied to calculate the score for alternatives in between the best and worst one. Finally, by applying Equation (1), the score obtained for each criteria is multiplied by its corresponding weight (defined by the user) and summed up to obtain the total score for each secondary treatment alternative.

$$V(X) = \sum_{i=1}^n W_i \cdot V_i(X_i) \quad (1)$$

where "V" is the score, "W" is the weight for each criterion, "i" is the criterion, "n" is the total number of criterion and "X" corresponds to the considered treatment alternative.

2.3. Specific case studies

Three case studies were selected corresponding to three real facilities under construction in the FDM sector. The introduction of these scenarios in the EDSS will allow a direct comparison between the actual solution from decision makers and the corresponding EDSS output.

The BOD₅ content of the main FDM constituents and some products is shown in Table 2. Dairy effluent in case study 2 presents the lowest flowrate compared to the other two case studies. However, it can be seen that wastewater from dairy contain high concentrations of edible fats and oils and organic loading as well as TSS is even higher than in the other case studies selected.

While oils and fats are among the most important characteristic of dairy effluents, these parameters don't seem to have a relevant

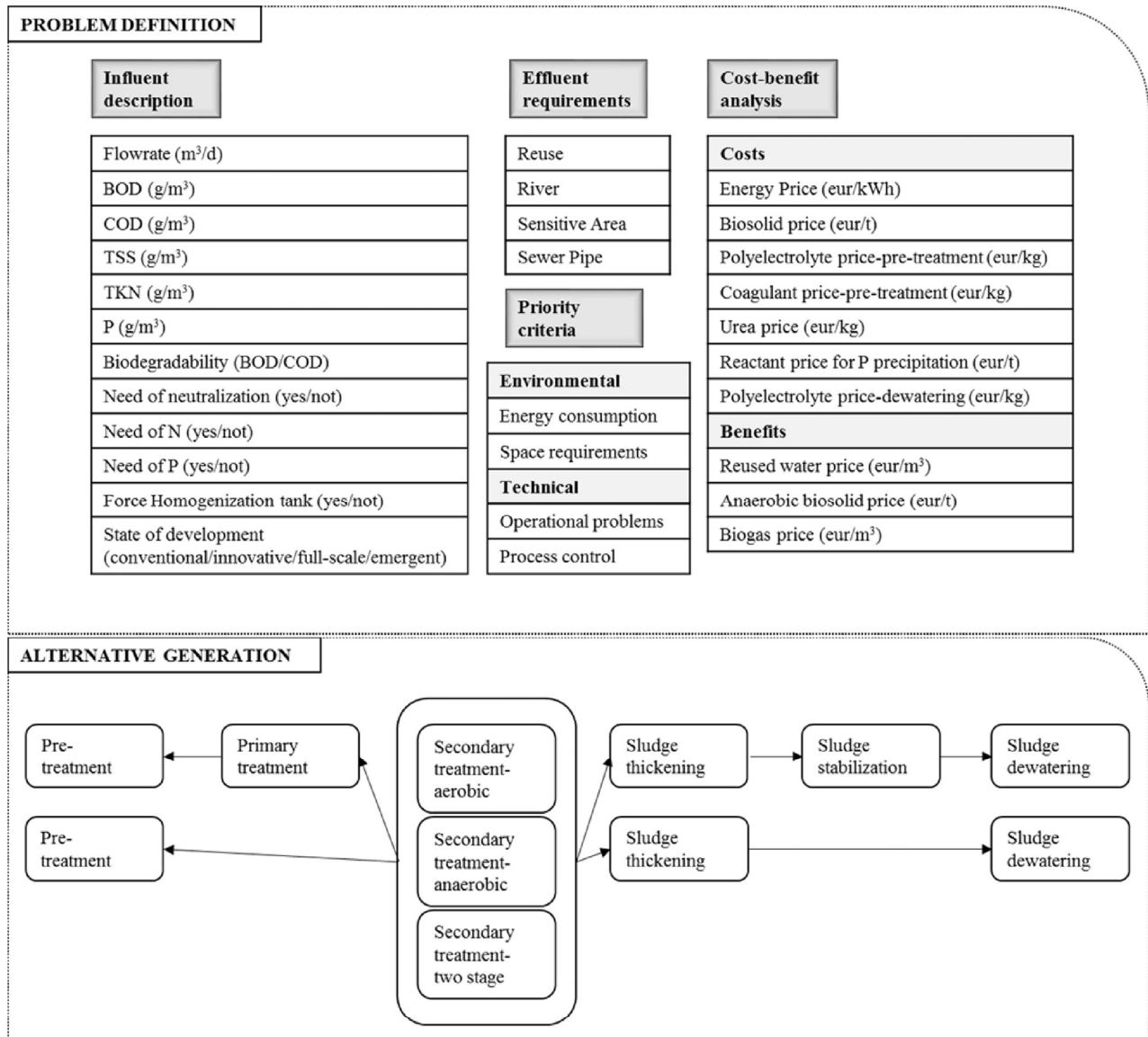


Table 2
Specific case studies selected to evaluate the EDSS developed.

Parameter	Case 1 (soft drinks) ^b	Case 2 (dairy) ⁱ	Case 3 (brewing) ^j
Flow rate (Q) (m ³ /d)	2000	170	6000
BOD ₅ (mg/l)	1750	4.000	1100
COD (mg/l)	3500	7.000	3300
TSS (mg/l)	201	1.300	1000
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) (mg/l)	12	40	80
Total Phosphorus (TP) (mg/l)	7.7	8	20
Oils and Fats (mg/l)	–	950	–
Effluent requirements	Sensitive area	Sewer pipe	River

Sources: ^bAqualogy, Personal Communication (2006), ⁱMaster Profesional en Ingenieria y Gestion Medio Ambiental (2008), ^jVeolia website (2000).

impact in effluents from the brewery and soft drinks facility. Also note that each case study requires different effluent quality, being the effluent from the soft drink facility the most demanding one.

For each case study, it was introduced in the EDSS the required input data for the scenario definition. In the multi-criteria assessment it is possible to consider 20 different criteria, including environmental, technical and economic categories. Among the environmental criteria it is possible to select two of the most popular LCA categories, i.e. eutrophication and global warming (Corominas et al., 2013). These two categories are also the most impacted by the WWTP operation (Rodriguez-Garcia et al., 2011). However, in order to focus only on the criteria considered by the decision-makers in the selected case studies design, the multi-criteria assessment in the validation process of the EDSS developed are energy consumption, space requirements, operation problem frequency and control over the process (Table 3), since LCA impact categories were not yet state-of-the-art criteria to be used for industrial WWTP design in the years 2000s.

The first analysis considers the same weight for all the criteria (in this case, since four criteria were considered, 25% weight each one) (Table 3).

However, usually decision-makers prioritized one criteria over the other criteria considered (Table 4). The EDSS was then executed four times for each case study using different criteria weights.

2.4. Sensitivity analysis

A sensitivity analysis was performed to verify if changes in the weights in the multi-criteria analysis affect the ranking of alternatives. In that sense: first of all (1), the weight for the prioritized criteria in each scenario (i.e. scenarios from A' to D') was increased in 25% (i.e. weight for the prioritized criteria: 87.5%; weight for the other criteria: 4.2% each) (Table 5). After, the weight for the prioritized criteria was decreased in 25% (i.e. weight for the prioritized criteria: 52.5%; weight for the other criteria: 15.8% each) (2) for each scenario (i.e. scenarios from A'' to D'') (Table 5).

3. Results and discussion

The EDSS recommended different treatment trains for each case to achieve the required objectives, since every scenario presented different influent compositions as well as different effluent requirements (Table 2). For each case study, criteria related to both

Table 3
Criteria and corresponding weight in the first analysis.

Criteria	Weight (%)
Energy consumption	25
Space requirements	25
Operational problem frequency	25
Control over the process	25

Table 4
Criteria selected to rank the secondary treatment technologies in the EDSS.

Criteria	Scenarios			
	A	B	C	D
Energy consumption	70	10	10	10
Space requirements	10	70	10	10
Operational problem frequency	10	10	70	10
Control over the process	10	10	10	70

Numbers represent the weight percentage for every criteria in the selection.

operational and environmental restrictions, were used to rank the secondary treatments selected (Tables 3 and 4).

The results obtained were subjected to two differentiated analysis. The first one was meant to analyse the results obtained in the EDSS, taking into account some bibliographic references. In that sense both, treatment configurations as well as the score obtained in the multi-criteria, are discussed for each treatment alternative. In the second analysis, the comparison between the suggested treatment alternatives by the EDSS and the actual treatments implemented is given in each of the real case studies.

3.1. EDSS alternatives generation, multi-criteria analysis

The multi-criteria analysis applied allowed to score the different secondary treatment alternatives recommended by the EDSS, based on different possible scenarios.

3.1.1. Equal weight for each criteria

In the first analysis the same weight was considered for every criteria, therefore, any of the criteria was prioritized over the others (Table 3), results are presented in Table 6.

It can be seen as when all criteria are equally weighted, the EDSS scores similarly the secondary treatment alternatives for the three case studies (Fig. 3). Being IC the best ranked, followed by EGSB, while AF obtains the lower score. However, the treatment train recommended is different in case study 2 from case studies 1 and 3. Since in case study 2, the most feasible primary treatment is DAF, while in the other case studies it is recommended to apply Primary Clarifier. Moreover, in case study 2, the EDSS considers it would be enough by applying a one-stage (anaerobic) treatment, while in case studies 1 and 3 a two-stage (anaerobic + aerobic) treatment is recommended.

3.1.2. Criteria prioritization

In this case, in every scenario one of the selected criteria is prioritized (Table 4).

The score in Table 7 is referring to the total score for the alternatives based on the multi-criteria analysis, where every scenario (A, B, C and D) is prioritizing (with 70% weight) one different criteria, as described in Table 4.

Table 5

Criteria selected to rank the treatment alternatives in the sensitivity analysis applied to the multi-criteria analysis performed in the EDSS.

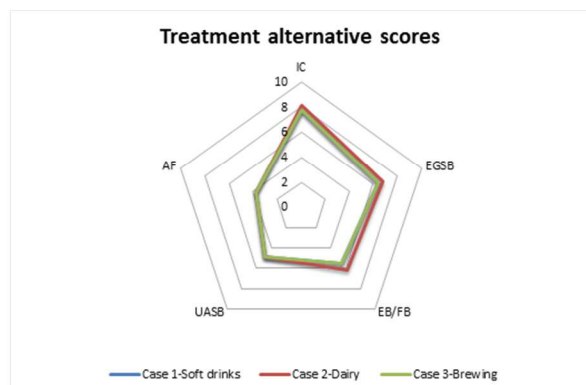
Criteria	Scenarios (+25%)				Scenarios (-25%)			
	A'	B'	C'	D'	A''	B''	C''	D''
Energy consumption	87.5	4.2	4.2	4.2	52.5	15.8	15.8	15.8
Space requirements	4.2	87.5	4.2	4.2	15.8	52.5	15.8	15.8
Operational problem frequency	4.2	4.2	87.5	4.2	15.8	15.8	52.5	15.8
Control over the process	4.2	4.2	4.2	87.5	15.8	15.8	15.8	52.5

Table 6

Scores obtained in the multi-criteria analysis performed in the EDSS for each case study (i.e. from 1 to 3) considering the same weight (i.e. 25%) for each criteria. Where: Pre-treatment (Pre-T); Primary Clarifier (PC); Dissolved Air Flotation (DAF); Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Internal Circulation reactor (IC), Expanded Granular Sludge Bed (EGSB), Anaerobic filter (AF), Expanded Bed (EB), Fluidized Bed (FB) and Complete Mix (CM); Secondary Treatment (ST).

Case study	Treatment train (water line)	Score- Secondary Treat.
1: soft drinks	Pre-T+ PC+ (IC+CM)	7.8
	Pre-T+ PC+ (EGSB+CM)	6.5
	Pre-T+ PC+ (EB/FB +CM)	5.5
	Pre-T+ PC+ (UASB+CM)	4.8
	Pre-T+ PC+ (AF+CM)	3.8
2: dairy	Pre-T+ DAF+IC	8.1
	Pre-T+ DAF+EGSB	6.8
	Pre-T+ DAF+EB/FB	6.2
	Pre-T+ DAF+UASB	4.8
3: brewing	Pre-T+ DAF+AF	3.8
	Pre-T+ PC+ (IC+CM)	7.8
	Pre-T+ PC+ (EGSB+CM)	6.5
	Pre-T+ PC+ (EB/FB +CM)	5.5
	Pre-T+ PC+ (UASB+CM)	4.8
	Pre-T+ PC+ (AF+CM)	3.8

Scores highlighted in bold correspond to the best and scores in red correspond to the worst ranked treatment alternative.

**Fig. 3.** Scores obtained in the multi-criteria analysis performed in the EDSS when the weight was equally shared among the criteria considered (i.e. 25% weigh each criteria).

In accordance with many authors in the FDM sector (De Mes and Stams, 2003; Van Lier, 2008; Camarillo and Rinco n, 2012), in all

cases the EDSS recommended anaerobic treatments followed, depending on the effluent restrictions, by an aerobic treatment (Chan et al., 2009). Note that the same pre-treatment was applied in all cases, consisting of coarse and fine screens before an aerated grit chamber and a homogenization tank.

In order to simplify the comparison in case studies 1 and 3, the aerobic treatment taken as a generic is Complete Mix. However, note that the EDSS can consider all aerobic-based treatments included in the database (around 20 different configurations) compatible with the anaerobic technologies.

In the next sections the results for each case study in the EDSS are presented and compared with relevant references. Moreover, since every case study corresponds to an actual treatment facility within the FDM sector, a comparison between the EDSS recommendations and the real facilities is also presented.

3.2. Case study 1- soft drinks

In this case, the effluent is expected to be discharged in a sensitive area, which implies the selection of a comprehensive treatment to satisfy the more stringent regulations. Due to the high strength of the influent, the EDSS suggested an anaerobic-based treatment followed by an aerobic-based one. Moreover, in order to achieve the required effluent phosphorus concentration, a chemical phosphorus removal is needed (ferric chloride or hydrate aluminium sulphate). When energy consumption is prioritized

Table 7

Scores obtained in the multi-criteria analysis performed in the EDSS for each case study (i.e. from 1 to 3) considering different scenarios (i.e. from A to D). Where: Pre-treatment (Pre-T); Primary Clarifier (PC); Dissolved Air Flotation (DAF); Up-flow Anaerobic Sludge Blanket (UASB), Internal Circulation reactor (IC), Expanded Granular Sludge Bed (EGSB), Anaerobic filter (AF), Expanded Bed (EB), Fluidized Bed (FB) and Complete Mix (CM); Secondary Treatment (ST).

Case study	Treatment train (water line)	Scenario			
		A	B	C	D
1: soft drinks	Pre-T+ PC+(IC+CM)	9.1	9.1	6.1	6.9
	Pre-T+ PC+(EGSB+CM)	5.6	8.3	5.6	6.3
	Pre-T+ PC+(UASB+CM)	4.9	4.6	4.9	4.9
	Pre-T+ PC+(AF+CM)	4.5	1.5	4.5	4.5
	Pre-T+ PC+(EB/FB+CM)	2.2	8.0	6.7	5.2
2: dairy	Pre-T+ DAF+IC	9.3	9.3	6.3	7.8
	Pre-T+ DAF+EGSB	5.7	8.4	5.7	7.2
	Pre-T+ DAF+UASB	4.9	4.6	4.9	4.9
	Pre-T+ DAF+AF	4.5	1.5	4.5	4.5
	Pre-T+ DAF+EB/FB	2.5	8.2	8.5	5.5
3: brewing	Pre-T+ PC+(IC+CM)	9.1	9.1	6.1	6.9
	Pre-T+ PC+(EGSB+CM)	5.6	8.3	5.6	6.3
	Pre-T+ PC+(UASB+CM)	4.9	4.6	4.9	4.9
	Pre-T+ PC+(AF+CM)	4.5	1.5	4.5	4.5
	Pre-T+ PC+(EB/FB+CM)	2.2	8.0	6.7	5.2

Scenario A: Energy consumption (70% weight); Scenario B: Space requirements (70% weight); Scenario C: Operational problem frequency (70% weight); Scenario D: Control over the process (70% weight). Scores highlighted in bold correspond to the best and scores in red correspond to the worst ranked treatment alternative.

(Scenario 1A), the best ranked alternative is IC (Table 7, Fig. 4), since

it allows lower energy demand because of its internal recirculation system (no extra pumps are required (Gavrilescu, 2002). However, EB/FB has a limitation due to its high energy requirements to maintain a high and uniform flow upward (CEDEX, 2013).

On the one hand, scenario 1B implies space limitations, which is why the IC reactor is the best ranked, because its configuration allows a minimization of the space (Carceller, 2008), although other treatment alternatives such as EGSB and EB/FB require little space, obtaining a high score. On the other hand, if operational problem frequency is the prioritized criteria (Scenario 1C), EB/FB is the treatment recommended by the EDSS since, according to CEDEX (2013), EB/FB are the treatments with less obstruction risk and which accept higher suspended solids concentration in the influent (España-Gamboa et al., 2011). Moreover EB/FB and AF are the most suitable alternatives when hydraulic overloading occurs. Finally, the treatments that enable the best control over the process (Scenario 1D) are EGSB and IC, followed by EB/FB, obtaining the best score when this restriction is selected (Fig. 4).

In the real facility, the treatment train for this specific industrial wastewater consists of an IC and a complete mix treatment (Personal Communication, 2006). The configuration recommended by the EDSS presents the same scheme. The IC followed by complete mix is the best-scored alternative in the EDSS when energy

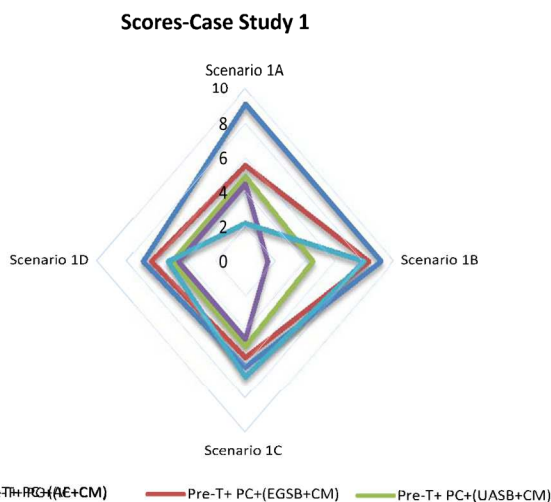


Fig. 4. Scores obtained in the multi-criteria analysis performed in the EDSS for case study 1 considering different scenarios (i.e. from A to D).

consumption, space requirements and control over the process are the prioritized criteria. Therefore, it can be stated that the EDSS suggested the same treatment as that applied in the real case facility. Moreover, the EDSS enabled consideration of an integrated approach through different criteria, while reducing the time needed for the decision-making process.

3.3. Case study 2 – dairy

As for case study 2, dairy effluents are characterized by high FOG loads, thus a DAF is recommended before the secondary treatment. In this case, the effluent is discharged into a sewer pipe, which means that effluent limits are less demanding than in the other two case studies, and could be met by applying an anaerobic treatment alone. A two-stage treatment could be applied, but the high-energy demand of the aerobic treatment would make it less feasible (Karadag et al., 2015). Fig. 5 presents a screenshot from the EDSS with the list and data for secondary treatment recommended in this case study.

Based on the results obtained in the multi-criteria analysis (Table 7, Fig. 6), it can be seen that IC is the best-scoring treatment when energy consumption (Scenario 2A) is the most important criteria, since this anaerobic technology can achieve effluent requirements at lower energy consumption rates. On the other hand, IC is a compacted treatment, and can therefore be applied in

Scores-Case Study 2

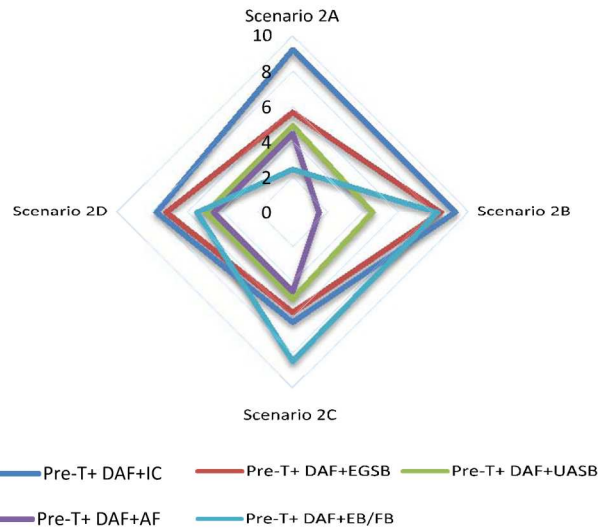


Fig. 6. Scores obtained in the multi-criteria analysis performed in the EDSS for case study 2 considering different scenarios (i.e. from A to D).

Secondary

List of Technologies

- IC
- EGSB
- UASB
- AF
- EB_FB

Parameters After Secondary

	Inflow	Outflow
T. Nitrogen (mg/L)	40.0	40.0
T. Phosphorus (mg/L)	8.0	8.0
BOD (mg/L)	2800.0	345.0
COD (mg/L)	4550.0	857.5
TSS (mg/L)	487.5	487.5
Sludge Production (Kg/day)		9.86
Sludge Total Production (Kg/day)		168.98
Sludge TS (Kg/day)		9.85
Sludge VS (Kg/day)		6.75
Parasitic Nematodes (egg/10L)	2.5	0.2
Taenia Aginata (egg/10L)	0.25	0.02
Taenia Solium (egg/10L)	1.5	0.12
Escherichia coli (UFC/100mL)	0.25	0.0375

Economical Parameters

O & M (M€/year)	0.001
Investment (M€)	0.071
Reactant Costs (€)	0.0
Total Equivalent Costs (M€)	0.089
Total Annual Equivalent Costs (M€/year)	0.003
Tangible Benefits (M€)	0.0
Intangible Benefits (Annual) (M€)	4.731
Benefits N (M€)	0.0
Benefits P (M€)	0.0
Benefits SS (M€)	0.0
Benefits BOD (M€)	1.033
Benefits COD (M€)	3.698

Design Parameters

Hydraulic Retention Time (hours)	7 - 6
Solids Retention Time (days)	5 - 15
Mixed Liquor Suspended Solids (g/L)	10.0 - 35.0
Space Requirements (m ²)	≈42.5

Priorization Score of the Secondary Technologies

Total Criteria Score	9.25
Economical Criteria	0.0
Environmental Criteria	8.0
Operational & Technology Criteria	1.25

Fig. 5. Screenshot from the EDSS with the list and data for the secondary treatment recommended for case study 2 scenario A.

facilities with space constraints, being the best-ranked alternative in this case (Scenario 2B). Moreover, IC allows better control over the process, compared to the other alternatives, obtaining the highest score when this criteria is selected (Scenario 2D).

However, EB/FB is the recommended treatment when the user prioritizes the need to apply a technology with low problem frequency (Scenario 2C) (Fig. 6).

In the real facility, the configuration chosen involves a DAF before the secondary treatment, consisting of a UASB followed by a trickling filter (Master Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental, 2008). Similarly, the EDSS suggested a UASB as one of the recommended treatment alternatives. The only difference between the EDSS and the real case is that UASB doesn't obtain the best score when the selected criteria are those prioritized in the multi-criteria analysis performed in this study. This is explained by the fact that the EDSS considers a wider range of appropriate treatment alternatives, increasing opportunities to apply more environmentally friendly strategies (i.e., IC and EGSB).

3.4. Case study 3 - brewery

In case study 3 (brewery) a primary treatment is required because of the high influent solids concentration, followed by a two-stage biological treatment (i.e. anaerobic + aerobic treatment) (Rodriguez et al., 2001) in order to achieve the demanding effluent requirements for discharge in a river. In Scenario 3A, EB/FB treatment obtains the worst score, because of its high energy consumption, while IC presents lower energy requirements (Fig. 7). On the other hand, IC reactor requires less space requirements than the other technologies under study, therefore it obtains the best score when space requirements is the most important criteria (Scenario 3B) (Table 7, Fig. 7). As in the other case studies, when the prioritized criterion is problem frequency (Scenario 3C), the EDSS recommends the EB/FB as a secondary treatment in the facility. Finally, when the most important criterion is control over the process (Scenario 3D), IC and EGSB are the most suitable options, according to the EDSS.

The treatment train applied in the real facility considers an EGSB and a complete mix treatment in the secondary treatment unit (Veolia website, 2000). In this case, the EDSS results considered the same treatment train as in the real case. And the secondary treatment selected, EGSB followed by complete mix, is among the best-scored alternatives when the prioritized criteria are: space

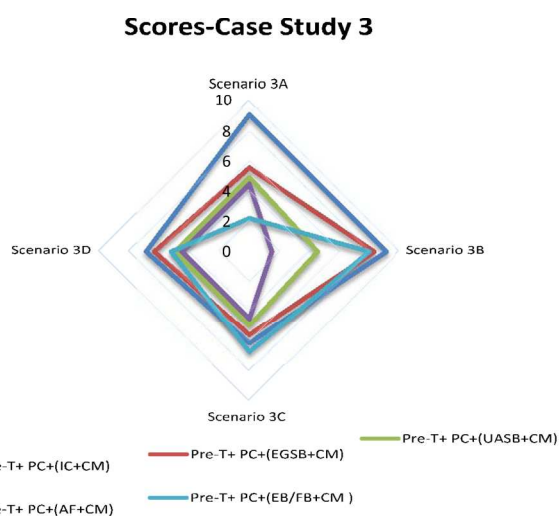


Fig. 7. Scores obtained in the multi-criteria analysis performed in the EDSS for case study 3 considering different scenarios (i.e. from A to D).

requirements, control over the process and operational problem frequency. The rapid response facilitated by the EDSS through a user-friendly interface matches the alternative selected by the designers.

It can be seen that in Case Studies 1 and 3 the score is usually lower than in Case 2, because two-stage treatment alternatives are applied including aerobic technologies, which normally imply more problem frequency and higher energy consumption (Yu et al., 1999; Erdirencelebi, 2011) than anaerobic treatment.

Therefore, according to the results obtained, it can be stated that the treatment trains recommended by the EDSS concur with those applied in the real facilities, although in case 2, the EDSS recommends applying a one-stage anaerobic treatment instead of a two-stage treatment, because the effluent requirements would allow it. Moreover, specific secondary treatments in the real facilities are among those recommended by the EDSS in all case studies.

However, the tool presents some limitations in those cases where the influent composition is quite different from the typical one in the FDM sector. This is because typical values were considered to build the tool (e.g. COD: 1000–20,000 ppm), in order to cover a higher number of circumstances. Therefore, in those cases where the wastewater to treat is not common in the FDM sector, the results obtained in the EDSS need to be verified by an expert. On the other hand, this EDSS has been developed to tackle decision-making in the FDM sector and a re-thinking process should be applied to develop EDSS to support decisions in other industrial sectors, since each industrial sector implies different requirements.

3.5. Sensitivity analysis

In this section, the results obtained in the sensitivity analysis are presented. The same pattern is followed by the different case studies, hence results in case study 1 are presented and discussed here, while results for case studies 2 and 3 are presented in the Supplementary Material. The scores obtained in the sensitivity analysis (i.e. scenarios A' to D' and A'' to D'') are significantly different from those in the original approach (i.e. scenarios A to D), since the weight for each criteria has been changed. However, the treatment alternatives are ranked nearly in the same order as in the original approach.

In Scenarios A', B', C' and D' (Fig. 8), when increasing 25% the weight for the prioritized criteria (Table 5), the EDSS ranks the treatment alternatives in the same order as in the original analysis

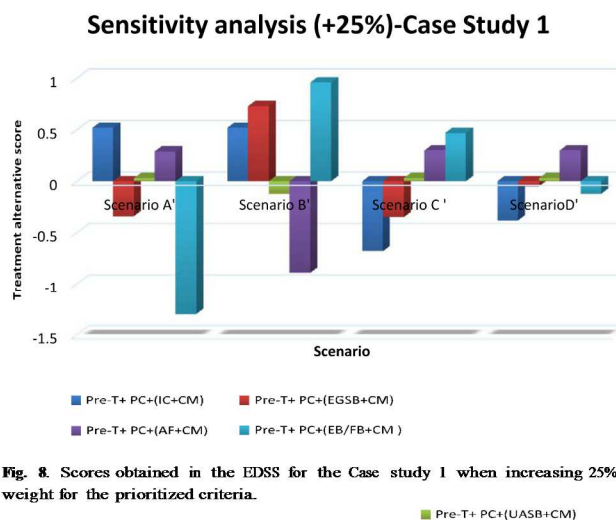


Fig. 8. Scores obtained in the EDSS for the Case study 1 when increasing 25% the weight for the prioritized criteria.

(Table 7), although as expected, the score for each treatment alternative is different (based on Equation (1)).

However, when decreasing 25% the weight for the prioritized criteria (Fig. 9), different patterns are observed, depending on the scenario. On the one hand, in Scenario B" (i.e. space requirements) and in Scenario D" (i.e. control over the process), the treatment alternatives are scored in the same order as in the original work.

However, in Scenario C", when decreasing 25% the weight for the main criteria (i.e. operational problem frequency), IC overtakes EB_FB, being the best ranked. This is because EB_FB is the best ranked alternative when high priority is given to the criteria "operational problem frequency". However, when more priority is given to the other criteria (which benefit IC), IC is better ranked than EB_FB.

Therefore, when increasing the weight for the prioritized criteria, the treatment alternatives are ranked in the same order as in the original approach. This means that the ranking of alternatives is very stable when the main criteria has higher priority. However, when decreasing the priority for the main criteria, the treatment alternatives are ranked differently, since the prioritization is shared among the selected criteria. Therefore, it is necessary to considerably reduce the influence of the prioritized criteria to modify the position of the alternatives.

4. Conclusions

The selection of the best combination of technologies to treat industrial effluents is a complex process in which multiple factors must be taken into account. This paper presents an EDSS with the aim of meeting wastewater industry demand in the FDM sector.

The developed EDSS proved to be a useful tool in the decision making process required to select appropriate wastewater treatment technologies in the FDM sector. After studying different cases, we found that the treatment trains recommended by the EDSS matched those applied in the real facilities. When selecting feasible combinations, this tool takes into account not only effluent requirements but also a wide range of criteria, providing information about different alternatives through different criteria to help in the decision-making process. The multi-criteria analysis allows the user to consider different factors to score feasible treatment alternatives, based on their preferences. Finally, the sensitivity analysis performed demonstrates that decreasing the weight (i.e. significance) for the main criteria may involve some changes in the treatment alternative ranking. However, when increasing the

importance for the main criteria, the treatment alternatives are scored as in the original approach.

Acknowledgments

This work was partially supported by Doctorat Industrial 2013-DI-038 (AGAUR and SUEZ) and by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness (CTQ2014-53718-R). LEQUIA and ICRA are recognized as consolidated research groups by the 370 Catalan Government with codes 2014-SGR-1168 and 2014-SGR-291, respectively.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data related to this article can be found at <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.132>.

References

- Bau, W., 2001. Anaerobic Treatment of Municipal Wastewater in UASB- Reactors. http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/TBW%202001b%20Anaerobic%20treatment%20of%20municipal%20wastewater%20in%20UASB%20reactors.pdf (Accessed 27 September 2016).
- Camarillo, R., Rincon, J., 2012. Effect of inhibitory compounds on the two-phase anaerobic digestion performance of diluted wastewaters from the alimentary industry. *Chem. Eng. J.* 193e194, 68e76.
- Carceller, J.M., 2008. La depuración anaerobia de aguas residuales. Grupo DAMM. <http://aca-web.gencat.cat/aca/documents/ca/jornadatecnica002/pomencies/carceller.pdf> (Accessed 06 May 2015).
- CEDEX, 2013. XXX Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Madrid (In Spanish).
- Chan, Y.J., Chong, M.F., Law, C.L., Hassell, D.G., 2009. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chem. Eng. J.* 155, 1e18.
- Chung, J., Kim, J., Kim, Y., Hwang, Y., 2013. Assessment and selection of best available technology (BAT) for wastewater facilities in the leather tanning and finishing industry. *Resour. Conserv. Recycl.* 70, 32e37.
- Collado, S., Laca, A., Diaz, M., 2012. Decision criteria for the selection of wet oxidation and conventional biological treatment. *J. Environ. Manag.* 102, 65e70.
- Cook, J., 2015. The growing global milk market e online exclusive. *Food Qual. Saf.* <http://www.foodqualityandsafety.com/article/the-growing-global-milk-market/> (Accessed 27 September 2016).
- Corcoran, E., Nellesmann, C., Baker, E., Bos, R., Osborn, D., Savelli, H., 2010. Sick Water? The Central Role of Wastewater Management in Sustainable Development. United Nations Environment Programme, Birkeland Trykkeri AS, Norway.
- Corominas, L., Foley, J., Guest, J.S., Hospido, A., Larsen, H.F., Morera, S., Shaw, A., 2013. Life cycle assessment applied to wastewater treatment: state of the art. *Water Res.* 47 (15), 5480e5492.
- De Mes, T.Z.D., Stams, A.J.M., Reith, J.H., Zecman, G., 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid. *Bio-methane Bio-hydrogen. Status Perspect. Biol. Methane Hydrog. Prod.* 58e102.
- Drogui, P., Asselin, M., Brar, S.K., Benmoussa, H., Blais, J.-F., 2008. Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Sep. Purif. Technol.* 61, 301e310.
- Erdirencelebi, D., 2011. Treatment of high-fat-containing dairy wastewater in a sequential UASBR system: influence of recycle. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 86, 525e533.
- Espana-Gamboa, E., Mijangos-Cortés, J., Barahona-Perez, L., Dominguez-Maldonado, J., Hernandez-Zarate, G., Alzate-Gaviria, L., 2011. Vinasses: characterization and treatments. *Waste Manag. Res.* 29, 1235e1250.
- European Commission, 2006. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries.
- Freitas, S.F., Costa, C.A.V., Boaventura, R.A.R., 2000. Conceptual design of industrial wastewater primary treatment processes: primary treatment. *Comput. Chem. Eng.* 24, 1725e1730.
- Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernandez, F., Poch, M., 2012. Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams. *J. Environ. Manag.* 112, 384e391.
- Garrido-Baserba, M., Hospido, A., Reif, R., Molinos-Senante, M., Comas, J., Poch, M., 2014. Including the environmental criteria when selecting a wastewater treatment plant. *Environ. Model. Softw.* 56, 74e82.
- Gavrilescu, M., 2002. Engineering concerns and new developments in anaerobic waste-water treatment. *Clean Technol. Environ. Policy* 3, 346e362.
- Gomez-Lopez, M.D., Bayo, J., Garcia-Cascales, M.S., Angosto, J.M., 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *J. Clean. Prod.* 17, 1504e1511.
- Hamouda, M.A., Anderson, W.B., Huck, P.M., 2009. Decision support systems in

Sensitivity analysis (-25%)-Case Study 1

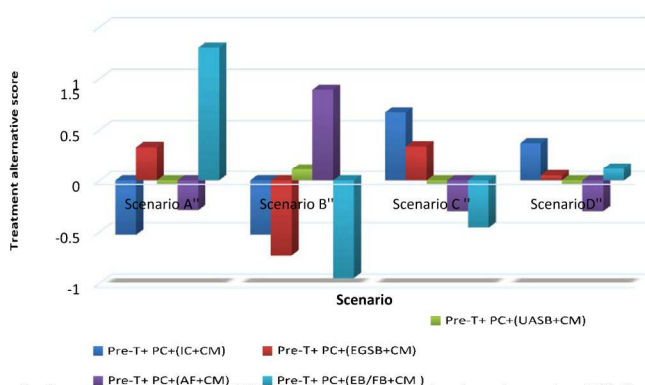


Fig. 9. Scores obtained in the EDSS for the Case study 1 when decreasing 25% the weight for the prioritized criteria.

- water and wastewater treatment process selection and desing: a review. *Water Sci. Technol.* 60, 1757e1770.
- Karadag, D., Kocoglu, O.E., Ozkaya, B., Cakmakci, M., 2015. A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochem.* 50, 262e271.
- Master Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental, 2008. Contaminacion de las aguas. Sector lacteo. Escuela Organizacion Industrial. Sevilla (In Spanish).
- McIntosh, B.S., Ascough, I.I., Twery, M., Chew, J., Elmahdi, A., Haase, D., Harou, J., Hepting, D., Cuddy, S., Jakeman, A.J., Chen, S., Kassahun, A., Lautenbach, S., Matthews, K., Merritt, W., Quinn, N.W.T., Rodriguez-Roda, I., Sieber, S., Stavenga, M., Sulis, A., Ticehurst, J., Volk, M., Wrobel, M., van Delden, H., El-Sawah, S., Rizzoli, A., Voinov, A., 2011. Environmental Decision Support Systems (EDSS) Development-Challenges and Best Practices. *Environmental Modelling and Software*, 2011.
- Olsson, G., 2015. *Water and Energy. Threats and Opportunities*, second ed. IWA Publishing, London.
- Paques website, 2016. UASB Technology. <http://en.paques.nl/products/featured/biopaq/biopaquasb> (Accessed 19 September 2016).
- Parghi, K.H., Fox, P., 1994. Data base analysis for treatment of industrial wastewaters by biotechnology and incineration. *Environ. Softw.* 9, 189e199.
- Pinter, J., Fels, M., Lycon, D.S., Meeuwig, J.W., Meeuwig, D.J., 1995. An intelligent decision support system for assisting industrial wastewater management. *Ann. Operations Res.* 58 (6), 455e477.
- Poch, M., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Sanchez-Marre, M., Cortes, U., 2004. Designing and building real environmental decision support systems. *Environ. Model. Softw.* 19 (9), 857e873.
- Rodrigues, A.C., Brito, A.G., Melo, L.F., 2001. Posttreatment of a brewery wastewater using a sequencing batch reactor. *Water Environ. Res.* 73 (1), 45e51.
- Rodríguez Fernandez-Alba, A., Leto n García, P., Rosal García, R., Dorado Valino, M., Villar Fernandez, S., Sanz García, J.M., 2006. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de Vigilancia Tecnológica*, Madrid.
- Rodríguez-García, G., Molinos-Senante, M., Hospido, A., Hernandez-Sancho, F., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2011. Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Res.* 45, 5997e6010.
- Sidwell, B., 2008. *The Boom beyond Commodities*. Rabobank International Food & Agribusiness Research and Advisory. http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0807_Rabobank_Boom_Beyond_Commodities_Sidwell.pdf (Accessed 27 September 2016).
- Statyukha, G., Kvitka, O., Dzhygyrey, I., Jezowski, J., 2008. A simple sequential approach for designing industrial wastewater treatment networks. *J. Clean. Prod.* 16, 215e224.
- Statista, 2015. *Statistics and Facts on Non-alcoholic Beverages and Soft Drinks*. The Statistics Portal. <https://www.statista.com/topics/1662/non-alcoholic-beverages-and-soft-drinks-in-the-us/> (Accessed 27 September 2016).
- Sueviriyapan, N., Siemanond, K., Quaglia, A., Gani, R., 2014. The optimization-based design and synthesis of water network for water management in an industrial process. *Refin. Effl. Treat. Plant* 39, 133e138.
- Tshilumba, D., 2003. *Internal Circulation Reactor: Pushing the Limits of Anaerobic Industrial Effluents Treatment Technologies*. Biwater, Johannesburg. <http://www.ewisa.co.za/literature/files/276.pdf> (Accessed 27 September 2016).
- UN Water (United Nations), 2015. *Wastewater Management, a UN-water Analytical Brief*. http://www.unwater.org/fileadmin/user_upload/unwater_new/docs/UN-Water_Analytical_Brief_Wastewater_Management.pdf (Accessed 28 September 2016).
- UNESCO, 2009. *Water in a Changing World. The United Nations World Water Development Report 3*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
- Van Lier, J.B., 2008. High-rate anaerobic wastewater treatment: diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. *Water Sci. Technol.* 57, 1137e1148.
- Veolia website, 2000. *Case Study 3-Brewery*. <http://veoliawatertechnologies.com/biobedegsb/en/?uid%41902> (Accessed 06 May 2016).
- Wukovits, W., Harasek, M., Friedl, A., 2003. A knowledge based system to support the process selection during waste water treatment. *Resour. Conserv. Recycl.* 37, 205e215.
- Yu, J., Ji, M., Yue, P.L., 1999. A three-phase fluidized bed reactor in the combined anaerobic/aerobic treatment of wastewater. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 626, 619-626.

4. DISCUSSIÓ GENERAL

La selecció del tractament més adequat per a les aigües residuals compren un procés de presa de decisió complex. Açò és així perquè en aquest procés intervé el coneixement de diferents agents (enginyers de les empreses, investigadors, etc.) i, a més, el nombre d'aspectes i variables a considerar és molt elevat. Amb aquesta tesi es contribueix a la sistematització d'aquest procés de presa de decisió, amb l'objectiu de facilitar-ne la tasca i d'ajudar a la millora dels resultats.

Un cop analitzades les característiques de les metodologies desenvolupades fins ara per a la sistematització de la presa de decisions, a la secció 1.9 s'han identificat els reptes a aconseguir amb aquesta tesi, relacionats amb augmentar l'aplicació d'un EDSS que ha suposat un pas endavant en aquestes tècniques, Novedar_EDSS.

A partir dels reptes identificats, es van definir els objectius, a la secció 2. En primer lloc, es requereix la validació de Novedar_EDSS mitjançant la comparació de la seva resposta amb el resultat dels estudis d'alternatives de diferents casos reals, per tal de comprovar la seva capacitat de tractar amb el "món real". A més, per tal d'assegurar la utilització del programa per part dels encarregats de la presa de decisió, es treballa en la definició de les funcionalitats necessàries per adaptar l'eina a l'usuari final.

Tot aquest treball amb els encarregats de la presa de decisió a l'empresa ha permès definir els altres objectius de la tesi: integrar l'eina amb models matemàtics i el desenvolupament de l'EDSS industrial, per tal de fer front a les seves necessitats.

Per tant, un cop validada l'eina i definides les funcionalitats per adaptar-la a l'usuari final, es tracta d'avançar en la sistematització del procés de presa de decisions, de manera que s'integra Novedar_EDSS amb un optimitzador. Finalment, per tal de millorar el procés de selecció de tractaments en el context industrial es desenvolupa un EDSS per al sector d'alimentació i beguda, basant-se en Novedar_EDSS.

A continuació, es discuteix la consecució d'aquests objectius, així com les contribucions d'aquesta investigació, les potencials aplicacions del EDSS i les seves limitacions. Al darrer apartat d'aquesta secció es proposa el treball per al futur, per tal de continuar amb la sistematització del procés de presa de decisions en la selecció d'alternatives per al tractament d'aigües residuals.

4.1 Adaptació del software al mercat

Novedar_EDSS es va desenvolupar a la Universitat de Girona i, posteriorment, es va negociar amb l'empresa AQUATEC, Proyectos para el sector del agua SAU (empresa del grup SUEZ), amb l'objectiu de comercialitzar-lo. Aquest procés, que inclou l'etapa d'investigació, seguida per l'estudi de la viabilitat tècnica i econòmica del producte, fins a l'etapa de comercialització, coincideix amb la seqüència d'innovació descrita per Ford et al. (2007) (Fig. 7).



Fig. 7. Seqüència d'innovació (Ford et al., 2007).

No obstant això, s'ha de tenir en compte que la seqüència d'innovació no és ben bé lineal, si no que entre la investigació bàsica i la comercialització d'un nou producte hi ha el que molts autors anomenen "Valley of Death" (Beard et al., 2009) (Fig. 8). Segons Frank et al. (1996): "Valley of Death": "és el fenomen en que una tecnologia falla en arribar al mercat degut a la incapacitat d'avançar des de la fase de demostració de la tecnologia fins a la fase de comercialització". Mentre que, Heller and Peterson (2006) defineixen el "Valley of Death" com "el lloc on els bons descobriments de laboratori moren perquè no disposen de la inversió necessària per convertir-se en productes comercials".

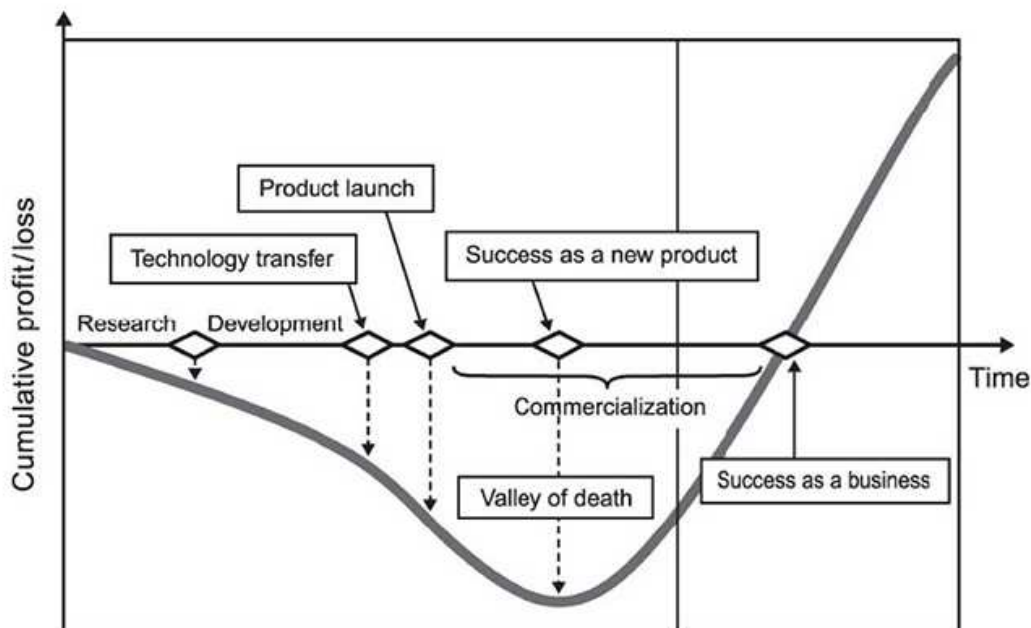


Fig. 8. Esquema del "Valley of Death" (Osawa i Miyazaki, 2006).

Per tant, tenint en compte el procés d'innovació i el concepte de "Valley of Death", aquestes son les etapes per a Novedar_EDSS en aquest projecte:

- Etapa d'investigació i desenvolupament del producte: compren la investigació i experiència de més de 10 anys del grup Lequia en el desenvolupament de EDSS i el desenvolupament del programa Novedar_EDSS en el marc d'una tesi doctoral (Garrido-Baserba, 2013).
- Etapa de transferència de tecnologia: comença amb l'acord de llicència de Novedar_EDSS entre les universitats involucrades al projecte Novedar i l'empresa AQUATEC. Amb el Doctorat Industrial es materialitza la transferència de coneixement de la tecnologia.
- Etapa prèvia al llançament del producte al mercat: compren, en primer lloc, la validació de l'eina amb casos reals i, de forma paral·lela, les proves amb l'usuari per tal d'adaptar l'eina a l'usuari final. El següent pas és l'aplicació a nivell informàtic de les noves funcionalitats definides.

A més a més, abans del llançament del producte al mercat s'ha de treballar en la definició del model de negoci. En aquest sentit, el treball conjunt a l'empresa ha permès adonar-nos-en de la importància d'una comunicació universitat-empresa des dels primers estadis de desenvolupament de l'eina. De fet, la manca de comunicació inicial respecte a les necessitats i la forma en que es treballa al mercat duu associada la dificultat d'haver d'adaptar *a posteriori* eines desenvolupades en un entorn acadèmic perquè siguin aplicables al mercat. Per la qual cosa, en els casos en que l'objectiu final de l'eina desenvolupada a la universitat sigui arribar al mercat, és essencial que la comunicació universitat-empresa es doni durant tot el procés, des de la seva concepció fins al final, basant-se en el model Canvas (Osterwalder et al., 2011), on es proposa una comunicació empresa-client durant tot el procés de desenvolupament d'un producte, per tal d'obtenir el *feedback* del client i generar un producte que cobreixi al màxim les seves necessitats. En aquest cas, la comunicació necessària seria universitat-empresa-client.

Com s'ha comentat abans, entre l'etapa de transferència de tecnologia i el llançament de producte, s'ha de fer la validació de l'eina amb casos reals, per tal d'assegurar-ne la viabilitat tècnica del producte. Aquesta validació s'ha de fer tenint en compte diferents tipus de casos d'estudi, per tal de cobrir un major rang d'aplicació. És per això que, el primer objectiu d'aquesta tesi és la validació de Novedar_EDSS, per tal de determinar la seva aplicabilitat a casos reals, corregir possibles errors i detectar les seves limitacions.

La validació del programa es va fer considerant cinc casos d'estudi diferents: un cas conceptual (Cas 1), un de re-disseny als Estats Units (EEUU) (Cas 2) i tres casos de plantes noves (a EEUU (Cas 3), Colòmbia (Cas 4) i Europa (Cas 5)). En aquesta secció, no es comentarà el cas conceptual, ja que en aquest cas l'objectiu no era tant validar l'eina com determinar si Novedar_EDSS pot donar suport en la presa de decisions en una situació en que s'estudia quina és la millor opció: (i) re-dissenyar les tres EDAR existents o (ii) construir una EDAR nova més gran per tractar totes les aigües. En canvi, en els casos d'estudi 2, 3, 4, i 5 (Taula 3), es tracta de generar un escenari a Novedar_EDSS amb les característiques de cada cas concret i comparar la resposta que dona el programa amb el resultat de l'estudi d'alternatives dels projectes reals.

Per a cada cas es va crear un escenari al programa, tenint en compte tant les característiques de l'aigua d'entrada com els requeriments d'efluent.

Taula 3. Característiques de l'influent i requeriments de l'efluent dels Casos 2, 3, 4 i 5.

Paràmetre	Cas 2 ^a	Cas 3 ^c	Cas 4 ^d	Cas 5 ^e
Cabal (Q) (m³/d)	33700	45000	86400	7776
DBO₅ (mg/l)	204	131	208	225
DQO (mg/l)	340	218 ^b	447	450
Sòlids Suspesos Totals (SST) (mg/l)	250	129	148	270
Nitrogen Kjeldahl Total (TKN) (mg/l)	34	32	45	45
TP (mg/l)	25	4	10	8
Requeriments d'efluent	Zona sensible	Reutilització per a regar	Zona sensible	Riu

Fonts: ^a Howard et al., 2012; ^b Assumint un rati DBO/DQO=0.6 per calcular la concentració de DQO en el Cas 3; ^c Steichen et al., 2009; ^d Comunicació Personal Aquatec, 2015; ^e Comunicació Personal Aquatec, 2011.

A més a més, es van tenir en compte els criteris considerats als projectes reals per tal de desenvolupar l'anàlisi multi-criteri al EDSS en cada cas (Taula 4).

Taula 4. Criteris i percentatge de pes corresponent seleccionats en cada cas d'estudi.

Tipus criteri	Criteri	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
Ambientals	Requeriments d'espai	33	18.8		50
	LCA				
	Impacte visual		18.8		
	Impacte per olors		18.8		
	Impacte per sorolls		18.8		
Tècnics	Simplicitat d'operació		12.5		
	Control del procés				25
	Flexibilitat				
	Fiabilitat		12.5	50	
	Personal especialitzat			25	
Econòmics	CAPEX	33		12.5	12.5
	OPEX	33		12.5	12.5

Els números corresponen al percentatge en pes assignat a cada criteri en cada cas.

Un cop generats tots els escenaris al EDSS, es va executar el programa i la resposta del EDSS es va comparar amb l'estudi d'alternatives de cada projecte analitzant per a cada cas:

- el diagrama de flux
- les alternatives de tractament proposades
- les puntuacions assignades a cada alternativa (basant-se en els criteris seleccionats)

Els resultats mostren com, tant els diagrames de flux com les alternatives proposades pel programa en cada cas, coincideixen amb el que es proposava als projectes. El diagrama de flux en tots els casos inclou: pre-tractament, tractament primari i tractament secundari per a la línia d'aigües. I espessiment, digestió i deshidratació per a la línia de fangs.

Quant a les puntuacions de cada alternativa de tractament secundari, els resultats de l'anàlisi multi-criteri del EDSS son molt similars als dels projectes.

A les Figures 9-12 es mostren tant les alternatives de tractament secundari proposades (als projectes i a l'EDSS) com la comparació entre la puntuació obtinguda per a cada tractament.

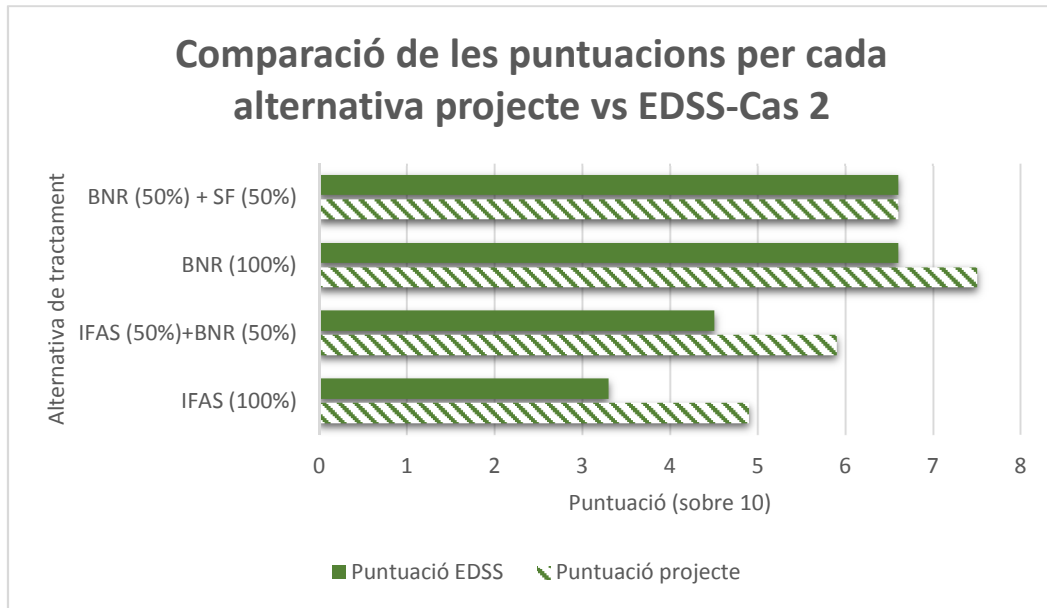


Fig. 9. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau). On BNR és "biological nutrient removal", SF és "step feed" i IFAS "integrated fixed film activated sludge".

En aquest cas (Cas d'estudi 2; Fig. 9), es veu com les puntuacions al EDSS segueixen la mateixa tendència que al projecte, essent les alternatives millor puntuades aquelles que inclouen "biological nutrient removal" (BNR), donada l'elevada importància dels criteris econòmics.

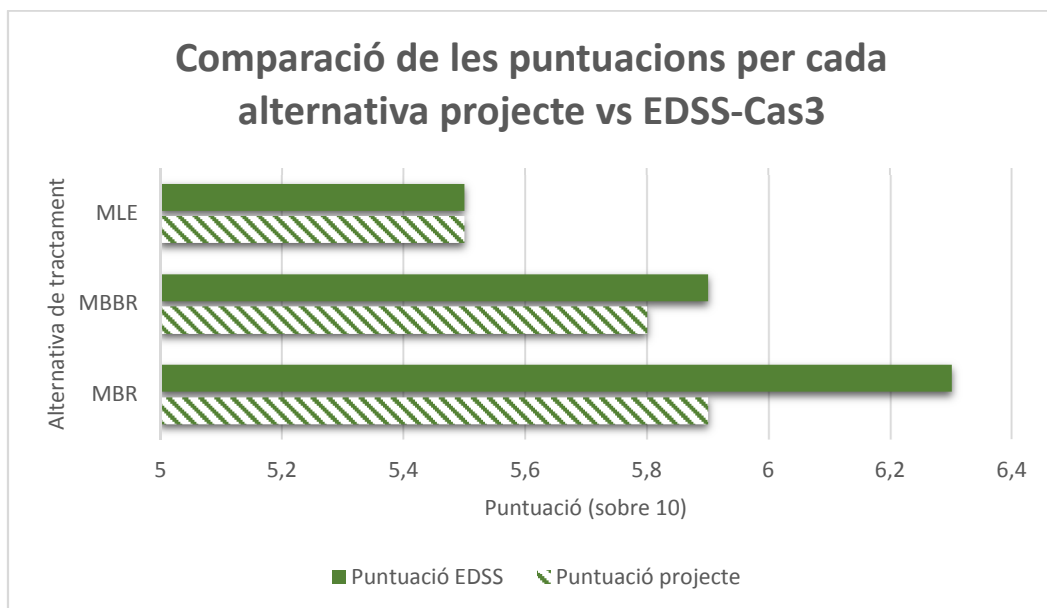


Fig. 10. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau). On MLE és "modified Ludzack-Ettinger", MBBR és "moving bed biofilm reactor" i MBR és "membrane bioreactor".

En el cas d'estudi 3 (Fig. 10), en que es prioritzen els criteris ambientals, es pot veure com l'alternativa millor puntuada és "membrane bioreactor" (MBR) tant a l'estudi d'alternatives del projecte com a l'anàlisi multi-criteri que aplica Novedar_EDSS.

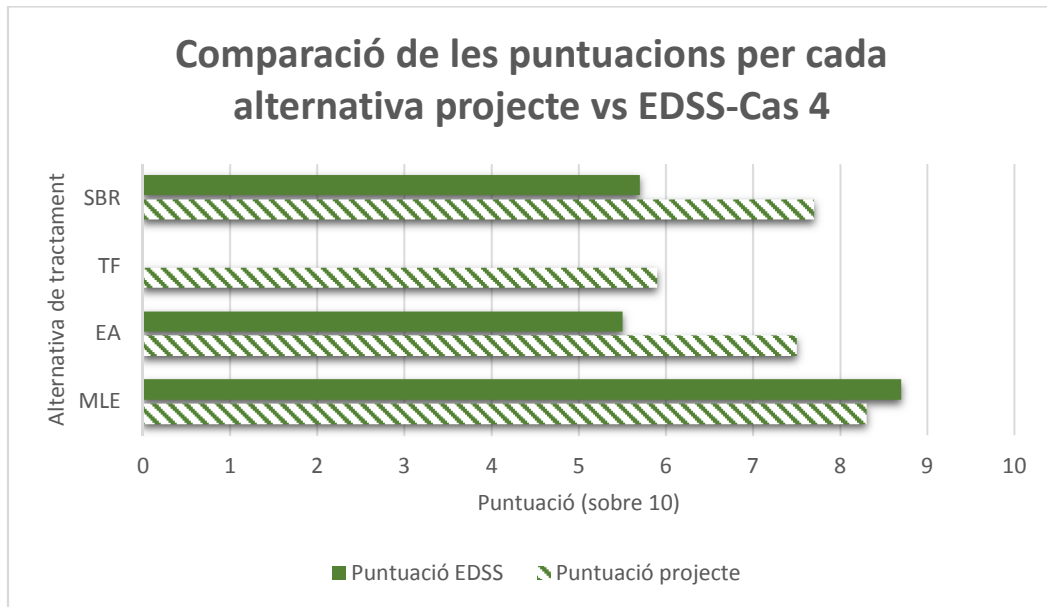


Fig. 11. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau). On SBR és un reactor seqüencial per càrregues, TF és "Trickling Filters", EA és "extended aeration" i MLE és "modified Ludzack-Ettinger".

Donada la prioritització dels criteris tècnics, en aquest cas (Cas d'estudi 4-Fig.11), "modified Ludzack-Ettinger" (MLE) és el tractament millor puntuat tant al projecte real com al EDSS. D'altra banda, s'observa com el EDSS no inclou els "Trickling Filters" (TF) al llistat d'alternatives recomanades, ja que considera que aquesta tecnologia és d'aplicació en EDAR més petites. De fet, açò coincideix amb el motiu pel qual finalment al projecte real es va descartar aquesta alternativa, que va ser perquè no hi havia referències d'èxit en l'aplicació de TF a EDAR grans.

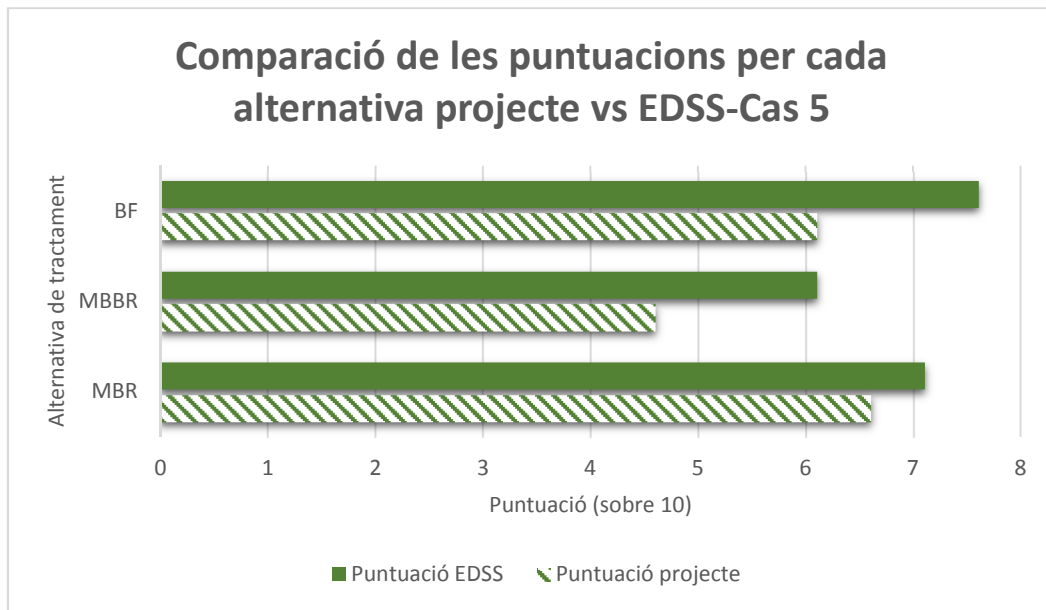


Fig. 12. Alternatives de tractament considerades i puntuacions per a cadascuna d'elles segons l'estudi d'alternatives del projecte (trama) i Novedar_EDSS (blau). On BF son biofiltres, MBBR és "moving bed biofilm reactor" i MBR és "membrane bioreactor".

En el Cas d'estudi 5 (Fig. 12), la diferència de prioritització del EDSS (que son els biofiltres (BF)) amb el projecte (que prioritza MBR) es deu a que al projecte es té en compte el rendiment com un criteri, mentre que al EDSS no està inclòs com a criteri sinó com a requeriment. D'altra banda, les necessitats d'una tecnologia compacta (segons els criteris seleccionats) fan que el MBR obtingui una elevada puntuació.

Per tant, es pot afirmar que Novedar_EDSS proporciona respostes molt similars als resultats dels estudis d'alternatives dels diferents projectes.

D'altra banda, cal destacar que el llistat d'alternatives aplicables proposat per l'EDSS inclou un ventall major d'alternatives a les considerades als projectes, encara que en la comparativa només s'inclou les que eren comuns als projectes reals. És per això que, la utilització d'aquesta eina esdevé, addicionalment, una ajuda per ampliar les possibles tècniques a aplicar i, per tant, millorar-ne els resultats, ja que fa possible la consideració d'alternatives menys conegudes pels encarregats de prendre la decisió, però que podrien resultar ser-ne les més adequades.

Per tant, la utilització d'aquest software obre un ventall de possibilitats, a l'hora que en facilita la seva anàlisi, mitjançant l'aplicació de diferents criteris i pesos i coneixent-ne la resposta en pocs minuts.

Amb els resultats obtinguts es demostra la viabilitat tècnica d'aquesta eina, ja que proporciona resultats molt similars als reals, on era l'expert qui feia tot el procés de decisió.

Per tant, es pot tenir la certesa de que utilitzant Novedar_EDSS es sistematitza part del procés de decisió. Açò implica una reducció del temps que s'ha d'invertir per realitzar aquest procés i, a més, proporciona la possibilitat de provar possibles modificacions dels escenaris i conèixer el resultat de forma quasi immediata.

D'altra banda, dintre de l'etapa prèvia al llançament del producte al mercat es va treballar en **l'adaptació de Novedar_EDSS a l'usuari final**.

Per tal de millorar la relació entre Novedar_EDSS i l'usuari, es va treballar amb els encarregats de la presa de decisió a l'empresa en dos aspectes principals: (i) la definició del protocol de selecció d'alternatives i (ii) la detecció de les noves funcionalitats de l'eina (Fig. 13).

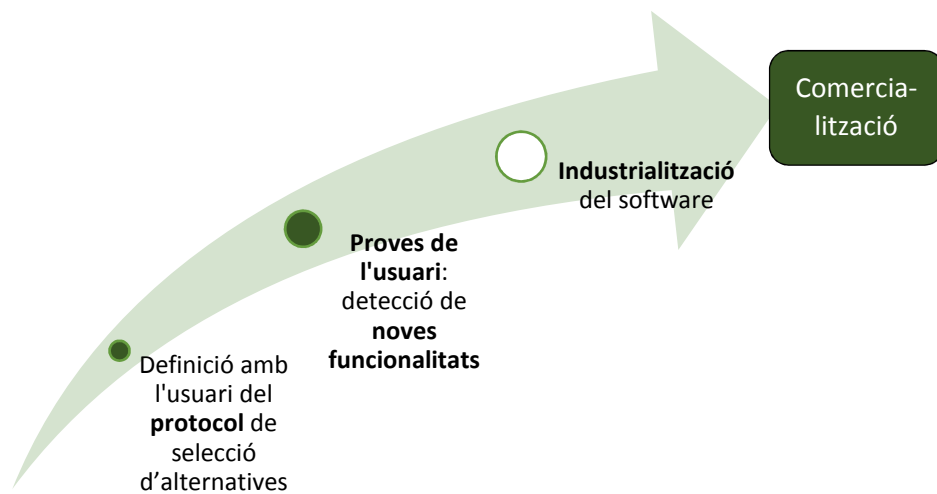


Fig. 13. Procés d'adaptació del software a l'usuari per la seva comercialització. Les etapes en marcades amb punts verds son en les que s'ha treballat amb els encarregats de la presa de decisió a l'empresa per a l'adaptació del software a l'usuari final.

En primer lloc, es va estudiar la forma en que s'elaboren els estudis d'alternatives a l'empresa i, amb aquesta informació, es va definir el **protocol** de selecció d'alternatives. En general, a partir de les característiques de l'aigua d'entrada i dels requeriments d'efluent es seleccionen les tecnologies a aplicar. Açò coincideix amb el funcionament de Novedar_EDSS.

Aquest protocol és diferent depenent de si es tracta d'una EDAR urbana o d'una EDAR industrial. Per començar, per a EDAR industrial es considera un nombre de paràmetres més elevat, que variarà en funció del sector industrial. Però la diferència més destacable és l'ordre en que es seleccionen els tractaments, de manera que:

- En EDAR urbana es selecciona en primer lloc el tractament secundari.

- EDAR industrial es segueix el diagrama de flux del tractament per seleccionar les diferents tecnologies a aplicar, és a dir, es selecciona en primer lloc el tractament físic-químic.

Al Novedar_EDSS es selecciona en primer lloc el tractament secundari, per tant, la base del protocol utilitzat a EDAR urbana coincideix amb l'aplicat a Novedar_EDSS.

El següent pas en l'adaptació de Novedar_EDSS a l'usuari consisteix en la utilització de l'eina per part dels encarregats de la presa de decisió a l'empresa. De manera que proven diferents casos d'estudi per detectar paràmetres i funcionalitats que ells normalment tenen en compte per fer els estudis d'alternatives, però que no estan inclosos a Novedar_EDSS. Amb tota aquesta informació es determinen les **noves funcionalitats** que el programa hauria d'incorporar, entre les que destaquen:

- La possibilitat de **fixar un tractament** no recomanat per Novedar_EDSS. En els casos en que el client vol aplicar un determinat tractament (independentment de si és recomanable o no). Es tracta de que hi hagi la possibilitat de seleccionar d'un desplegable qualsevol dels tractaments secundaris inclosos al programa. D'aquesta forma, quan es seleccioni un determinat tractament secundari, el programa, mitjançant la matriu de compatibilitat, pugui determinar amb quins tractaments primaris i terciaris és compatible i, a més, realitzi tots els càlculs corresponents de característiques de l'efluent, costos, impactes, etc. per a aquestes línies de tractament.
- Incloure la **línia de retorns**, ja que influeix en la composició de l'aigua a tractar. A més, en molts casos s'han de tractar aquests retorns, per la qual cosa és important poder tenir la possibilitat d'incloure aquests tractaments al programa.
- Incloure **nous paràmetres** que permetin una anàlisi més acurada de la relació cost-benefici. Per exemple, en el cas de re-disseny d'EDAR, incloure els metres cúbics a demolir.
- Incloure la informació dels **costos també per partides**. A un projecte d'EDAR urbana, els costos d'inversió es comptabilitzen per partides (obra civil, equips, personal, etc.), mentre que al Novedar_EDSS es fa per operacions unitàries, el que dificulta l'anàlisi d'aquests resultats per part dels tècnics.
- Aplicar **l'anàlisi multi-criteri per a totes les operacions unitàries** (no només per al tractament secundari) **així com per al conjunt de la planta**, per tal de poder fer una valoració de les línies de tractament completes.

- Incloure l'opció de que l'usuari determini la **qualitat de l'efluent** a aconseguir, ja que en molts casos els clients exigeixen una qualitat d'efluent superior a la marcada per la legislació. Açò pot implicar la necessitat d'aplicar tractaments diferents, que permetin obtenir efluentes de millor qualitat.
- Compatibilitat dels resultats del EDSS amb l'entrada a un **software de simulació**. Amb aquesta funcionalitat s'agilitzaria el procés de presa de decisió perquè es podrien simular de forma més ràpida les millors alternatives, obtenint-ne uns valors més acurats de qualitat d'efluent, consum d'oxigen, producció de fangs, etc.

Un cop descrit el protocol i definides les noves funcionalitats a incloure al Novedar_EDSS, es va elaborar un document (anomenat **document funcional**) on es descriu el protocol de funcionament del programa, els objectius, els casos d'ús, els diagrames de seqüència i totes aquestes noves funcionalitats que els usuaris consideren importants per facilitar la utilització del programa, adaptant-se a les necessitats del mercat. L'elaboració del document funcional té com a objectiu la industrialització dels software per part dels informàtics, per tal de finalitzar l'etapa prèvia al procés de comercialització. Aquest document no forma part de la tesi per raons de confidencialitat.

L'adaptació del programa a l'usuari final implica una millora de l'experiència de l'usuari al utilitzar Novedar_EDSS i, per tant, una major probabilitat d'èxit del programa. Si els usuaris estan més còmodes i hi troben els avantatges d'aplicar l'eina es facilita el canvi d'hàbits de treball necessari per incorporar una nova eina. És a dir, els encarregats de la presa de decisions en aquest context, utilitzaran l'eina si comproven que realment els facilita la feina i els permet obtenir un resultat iguals o millors que si no la fessin servir.

4.2 Avenços en la sistematització del procés de decisió per a la selecció d'alternatives de tractament

Sistematització del procés de decisió d'EDAR urbana

Un cop l'eina ha estat validada, és important determinar com continuar en la sistematització del procés de selecció d'alternatives de tractament. En aquest sentit, es treballa en la integració de Novedar_EDSS amb un software d'optimització. Aquesta integració permet facilitar la feina a l'agent encarregat de prendre les decisions, ja que es milloren les prestacions del resultat final perquè s'integra el coneixement expert amb els models matemàtics d'optimització.

A la DTU havien desenvolupat un optimitzador basat en programació matemàtica per tal d'identificar el procés de tractament òptim per a una EDAR (Bozkurt et al., 2015).

Aleshores, en el marc d'aquesta tesi doctoral es va treballar en integrar Novedar_EDSS amb aquest optimitzador, de forma que es cobriren les etapes de:

- Generació d'alternatives
- Pre-selecció d'alternatives (considerant una anàlisi integrada)
- Selecció de l'alternativa més adequada

Per tant, per tal d'integrar aquestes dues eines, els resultats de Novedar_EDSS s'havien d'incorporar d'alguna forma a l'entrada de l'optimitzador. Com que la base de dades de l'optimitzador és molt limitada, el procés d'entrada dels resultats del Novedar_EDSS a l'optimitzador implica l'actualització de la base de dades i dels models per al càlcul dels diferents paràmetres de l'optimitzador. Aquesta actualització s'ha de fer per tal d'incloure els tractaments proposats per l'EDSS que no estiguin disponibles a l'optimitzador.

Aquesta metodologia integrada es va validar mitjançant l'aplicació d'un cas d'estudi (Taula 5) on es consideren 3 escenaris amb diferents requeriments de qualitat d'efluent:

- L'escenari A precisa valors de sortida de DQO=125 mg/l; DBO=25 mg/l; PT=2 mg/l i NT=15 mg/l;
- L'escenari B difereix del A en la concentració de nitrogen total, que ha de ser de 10 mg/l.
- L'escenari C necessita la qualitat de l'efluent per poder ser reutilitzat, la qual cosa implica l'eliminació de microorganismes.

Taula 5. Característiques de l'influent del cas d'estudi aplicat per a la validació de la metodologia integrada.

Paràmetre	Valor (mg/l)
DBO	225
DQO	450
SST	270
TKN	45
Amoni (NH₄-N)	34
TP	8
Q	7776 m³/d

En primer lloc es defineix el cas d'estudi a l'EDSS i s'aplica una anàlisi multi-criteri, tenint en compte criteris ambientals, econòmics i tècnics, on el pes es reparteix per igual per als tres tipus de criteris considerats, és a dir un 33.3% per a cadascun.

El diagrama de flux de la línia d'aigües recomanat per l'EDSS per a l'escenari A inclou un tractament primari seguit d'un tractament secundari. A l'escenari B, el EDSS proposa un diagrama de flux com el de l'escenari A però amb addició de metanol per afavorir la desnitrificació. Finalment, el EDSS recomana l'aplicació d'un tractament de desinfecció per a l'escenari C (precedit per un tractament primari i un tractament secundari). El diagrama de flux proposat per l'EDSS per a la línia de fangs es el mateix per als tres escenaris, consisteix en l'espessiment dels fangs, seguit d'una digestió i d'una deshidratació.

La recomanació d'aplicar metanol a l'escenari B es deu a les exigències d'eliminació de nitrogen, ja que la matèria orgànica disponible per al procés de desnitrificació n'és el factor limitant (CEDEX, 2013). D'altra banda, a l'escenari C, la reutilització de l'efluent implica la necessitat d'aplicar algun tipus de tractament de desinfecció, per eliminar la presència d'organismes patògens (Alcalde et al., 2014).

Com que el que s'avalua a l'anàlisi multi-criteri del EDSS son els tractaments secundaris, per a les demés operacions unitàries es pren només una alternativa com a referència. De manera que, per al tractament primari es selecciona en tots els casos un decantador primari (PC), per al tractament terciari radiació ultraviolada (UV) i per a la línia de fangs un espessidor per gravetat, un digestor anaerobi i una centrífuga.

Les alternatives millor puntuades al EDSS son SBR, "Oxidation ditch" (OxD), MLE, "integrated fixed film activated sludge" (IFAS) i MBR. Aquestes alternatives pre-seleccionades per l'EDSS s'introdueixen a l'optimitzador, per tal de determinar l'opció de tractament que minimitza la funció objectiu. Aquesta funció objectiu és el cost per dia ("total annualized cost" (TAC)) que suposa l'alternativa de tractament seleccionada, tenint en compte el CAPEX i l'OPEX. A l'optimitzador, aquestes opcions de tractament inclouen la planta completa, és a dir, totes les operacions unitàries de la línia d'aigües i de la línia de fangs. De manera que per a la desinfecció d'aigües també s'inclouen altres possibilitats de tractament (cloració i ozó) i la digestió de fangs pot ser aeròbia o anaeròbia.

Es van aplicar dos mètodes diferents per calcular l'alternativa òptima tenint en compte: (i) les característiques de l'influent de la Taula 5 i (ii) variacions ($\pm 25\%$) en la concentració dels diferents paràmetres de l'influent. Aquest segon mètode s'utilitza per aplicar una anàlisi de sensibilitat,

que determina l'efecte de la variació de les concentracions dels paràmetres de l'aigua d'entrada en la selecció d'alternatives.

Els resultats obtinguts amb la metodologia integrada per al cas d'estudi considerat son (Taula 6):

Taula 6. Línies de tractament proposades per a cada escenari amb la metodologia integrada i cost total de cadascuna d'elles (inclou CAPEX i OPEX), tenint en compte les característiques de l'influent de la Taula 5 i les variacions ($\pm 25\%$) en la concentració dels diferents paràmetres de l'influent.

Resultats obtinguts aplicant directament l'optimitzador			
Escenaris	Requeriments d'efluent	Tractament recomanat	TAC (eur/d)
A	NT=15 mg/l	PC-SBR-Espessidor-AnD-Deshidratació	732.5
B	NT=10 mg/l	PC-MBR- Espessidor-AnD-Deshidratació	1682.2
C	Reutilització	PC-SBR-UV-Espessidor-AnD-Deshidratació	759.5
Resultats obtinguts aplicant l'anàlisi de sensibilitat			
Escenaris	Requeriments d'efluent	Tractament recomanat	TAC (eur/d)
A	NT=15 mg/l	PC-MLE-Espessidor-AnD-Deshidratació	756.9
B	NT=10 mg/l	PC-MBR-Espessidor-AnD-Deshidratació	1567.8
C	Reutilització	PC-MLE-UV-Espessidor-AnD-Deshidratació	769.0

En cas d'aplicar-se les dades de la Taula 5, el tractament secundari recomanat per als escenaris A i C es SBR. En canvi, quan s'aplica l'anàlisi de sensibilitat, l'alternativa més adequada és MLE. Açò és així perquè SBR implica un costos menors d'inversió que MLE (CEDEX, 2013) i, per tant un resultat menor a la funció objectiu però, en cas d'increment-se la concentració dels paràmetres contaminants es pot comprometre la qualitat de l'efluent, ja que presenta uns rendiments una mica més baixos que MLE.

A l'escenari B, que precisa d'una menor concentració de nitrogen a l'efluent, el tractament secundari més recomanat és MBR, tant si s'aplica com no l'anàlisi de sensibilitat, ja que és

l'alternativa de tractament que aconseguix la qualitat d'efluent més elevada (Sanchez et al., 2009).

Per tant, la integració de Novedar_EDSS amb models matemàtics d'optimització permet la selecció de l'alternativa de tractament òptima considerant criteris ambientals, tècnics i econòmics. A més, aquesta integració permet seleccionar l'alternativa òptima més robusta tenint en compte possibles variacions en la concentració dels diferents paràmetres de l'aigua d'entrada.

Sistematització en el procés de decisió d'EDAR industrial

Des de fa uns anys, les indústries estan obligades a tractar les seves aigües residuals (Directiva 2010/75), pel que hi ha una elevada demanda de construcció de noves EDAR industrials. A diferència de les aigües residuals urbanes, els efluent industrials presenten composicions molt variables, que depenen del procés de fabricació de cada indústria. Per fer front a aquesta casuística s'han desenvolupat un elevat nombre de tecnologies i configuracions, el que complica encara més la selecció del tractament més adequat en cada cas específic. És per això, que s'està treballant també en el desenvolupament de mètodes per a la sistematització del procés de decisió.

La selecció d'alternatives de tractament per a EDAR industrial presenta unes característiques i requeriments diferents dels aplicats per a EDAR urbana, per això, el tipus d'eines que es necessiten també és diferent, inclús pot variar en funció del sector industrial. En aquesta tesi es desenvolupa un EDSS per a ajudar a la selecció de tractaments a la indústria d'alimentació i begudes, prenent com a base Novedar_EDSS.

Per construir aquest EDSS industrial, en primer lloc s'analitza la realitat dels efluent del sector, que es caracteritzen per tenir (Camarillo et al., 2012; Olsson et al. 2015):

- elevades càrregues orgàniques, amb valors de DQO i DBO entre 10 i 100 vegades majors que per a aigües urbanes
- concentracions de sòlids suspesos totals molt variables, en funció del subsector, entre 10 i 120000 mg/l
- dèficit de nutrients

A més, s'identifiquen els tractaments més adequats per tractar aquests efluent, prenent com a base el "Best available techniques Reference document" (BREF) (2006) corresponent, on es recomana l'aplicació d'una primera etapa de tractament anaerobi seguida, quan sigui necessari, d'una etapa de refinament aeròbia. Els tractament anaerobis recomanats pel BREF son: UASB,

“Internal circulation reactor” (IC), “Expanded Granular Sludge Bed”(EGSB), “Anaerobic filter” (AF) i “Expanded Bed and Fluidized Bed” (EB_FB). A més a més, s’inclou també el tractament primari “Dissolved Air Flotation” (DAF) per als casos en que hi ha una elevada concentració d’olis i greixos o quan els sòlids son difícilment sedimentables.

Amb tota aquesta informació es treballa en repensar el funcionament de Novedar_EDSS per a la seva adaptació, que es representa de forma esquemàtica a la Fig. 14, per exemple incorporant la possibilitat d’aplicar dos tractaments biològics consecutius (anaerobi seguit d’aerobi) o no considerar algunes de les operacions unitàries (com el tractament primari o l’estabilització de fangs). A més a més, s’inclouen nous paràmetres, reactius, la possibilitat d’abocament a llera, així com els tractaments recomanats pel BREF i nous paràmetres per a l’anàlisi cost-benefici.

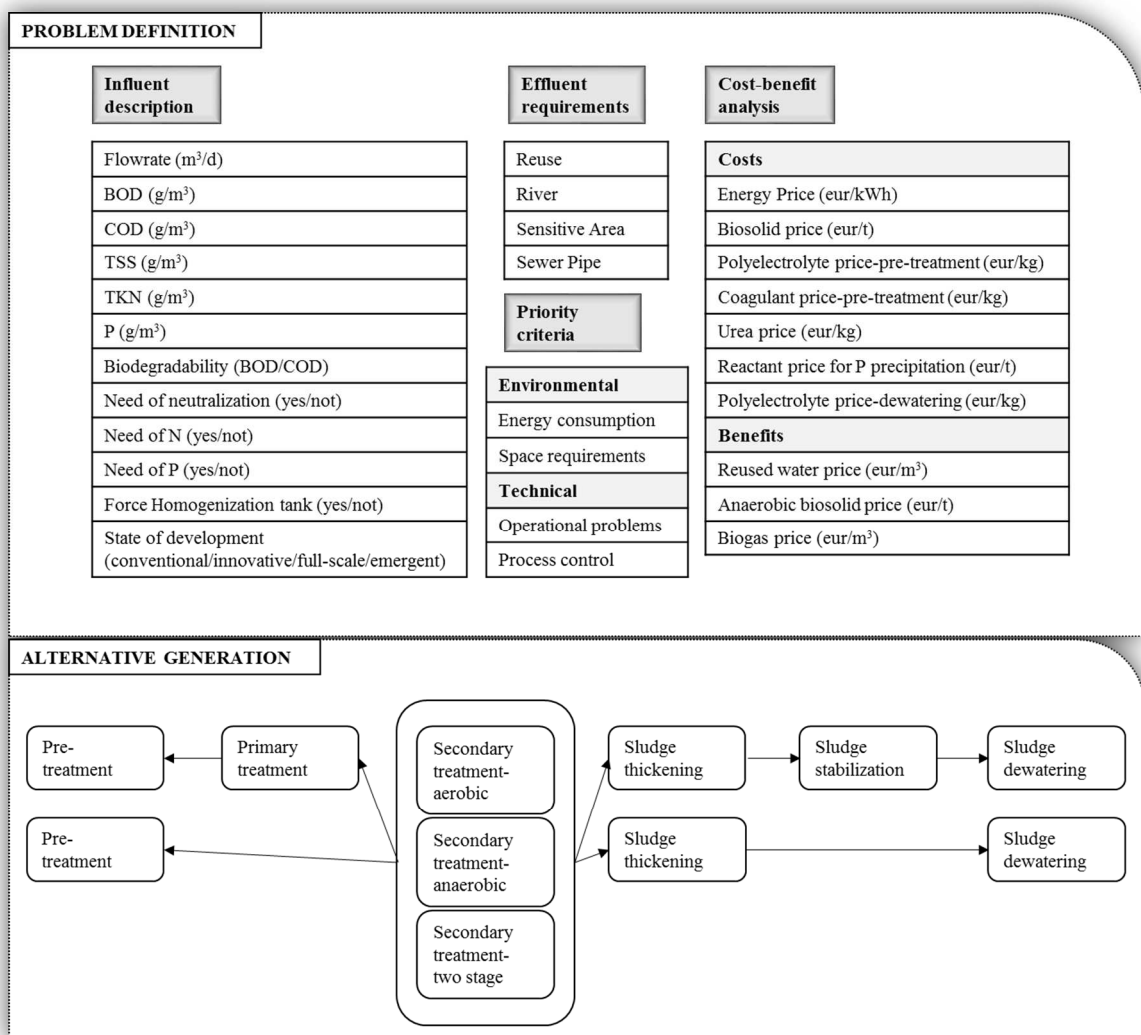


Fig. 14. Característiques i diagrama de procés del EDSS per a aigües residuals industrials del sector d’alimentació i begudes.

El EDSS industrial es valida mitjançant l'aplicació de tres casos d'estudi reals corresponents a diferents subsectors dintre del sector industrial d'alimentació i begudes (Taula 7).

Taula 7. Característiques de les aigües a tractar i dels requeriments d'efluent per a cadascun dels casos d'estudi seleccionats per a la validació del EDSS industrial.

Paràmetres	Cas 1 (refrescs) ^f	Cas 2 (productes lactis) ^g	Cas 3 (cervesa) ^h
Q (m ³ /d)	2000	170	6000
DBO (mg/l)	1750	4.000	1100
DQO (mg/l)	3500	7.000	3300
SST(mg/l)	201	1.300	1000
TKN (mg/l)	12	40	80
PT (mg/l)	7.7	8	20
Olis i greixos (mg/l)	-	950	-
Requeriments d'efluent	Zona sensible	Llera	Riu

Fonts: ^fComunicació Personal Aquatec, 2006; ^gMáster Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental, 2008; ^hweb de Veolia, 2000.

El diagrama de flux del tractament aplicat en cada cas d'estudi real a la línia d'aigües és:

- Cas d'estudi 1: desbast, tanc d'homogeneïtzació, decantador primari i IC seguit de fangs actius de mescla completa
- Cas d'estudi 2: desbast, tanc d'homogeneïtzació, DAF i UASB seguit de filtres percoladors
- Cas d'estudi 3: desbast, tanc d'homogeneïtzació, decantador primari i EGSB seguit de fangs actius de mescla completa

Encara que no es disposa dels criteris considerats als casos reals, s'ha tractat d'esbrinar quins van poder ser, per tal de desenvolupar l'anàlisi multi-criteri al EDSS. De manera que es generen 4 escenaris diferents al EDSS per a cada cas d'estudi on, a cada escenari es prioritza un criteri (Taula 8).

Taula 8. Criteris i pesos seleccionats per a la puntuació de les alternatives de tractament secundari al EDSS.

Criteri	Escenari			
	A	B	C	D
Consum energètic	70	10	10	10
Requeriments d'espai	10	70	10	10
Freqüència de problemes d'operació	10	10	70	10
Control del procés	10	10	10	70

Els números corresponen al percentatge en pes assignat a cada criteri en cada cas.

Tenint en compte les característiques de cada cas d'estudi (Taula 7), es generen els escenaris corresponents al EDSS i s'executa el programa per a cadascun d'ells.

Dels resultats obtinguts amb l'EDSS es compara amb els projectes reals tant el *diagrama de flux*, com les *alternatives de tractament*, a més es fa una valoració de la *puntuació* obtinguda per a cada alternativa en funció dels criteris seleccionats a l'anàlisi multi-criteri.

El diagrama de flux recomanat per l'EDSS per als casos 1 i 3 consisteix en una pre-tractament (que inclou desbast i tanc d'homogeneïtzació), seguit d'un decantador primari i un tractament secundari de doble etapa on s'aplica un tractament anaerobi seguit d'un aerobi. Per tant, aquest diagrama de flux coincideix amb l'aplicat als casos reals.

D'altra banda, per al cas d'estudi 2, el EDSS recomana aplicar un pre-tractament (consistent en desbast i tanc d'homogeneïtzació), un DAF i un tractament secundari anaerobi. De manera que, en aquest cas, la configuració recomanada per l'EDSS és una mica diferent al cas real, en que el tractament secundari inclou també un reactor aerobi. Açò és deu a que, com que l'efluent és abocat a llera i, per tant, la qualitat exigida és menor, l'EDSS considera que és suficient amb l'aplicació d'un tractament secundari d'una etapa (anaerobi), ja que aquestes aigües seran tractades posteriorment a una EDAR urbana.

Per tant, en tots els casos el EDSS recomana l'aplicació d'un tractament anaerobi, que es justifica per l'elevada concentració de matèria orgànica en els efluent procedents d'aquest sector industrial, d'acord amb molts autors (De Mes et al., 2003; Van Lier et al., 2008; Camarillo et al., 2012), i en els casos de majors exigències d'efluent es proposa aplicar un tractament aerobi després de l'anaerobi, tal com proposen Chan et al. (2009).

Per a cada cas d'estudi, el EDSS puntua les diferents alternatives que proposa de tractament secundari:

- En el cas d'estudi 1 (refrescs), l'alternativa de tractament que inclou un IC seguit d'uns fangs actius de mescla completa, és la millor puntuada quan es prioritzen els criteris de consum energètic, requeriments d'espai i control del procés.
- Per a la indústria de productes lactis (cas d'estudi 2), l'EDSS recomana, entre altres, l'aplicació de UASB, encara que aquest tractament no obté la màxima puntuació amb els criteris seleccionats.
- Al cas d'estudi 3 (cervesa), al projecte real s'aplica com a tractament secundari un EGSB seguit d'uns fangs actius de mescla completa, essent aquesta una de les alternatives millor puntuades a l'anàlisi multi-criteri aplicat amb el EDSS.

Per tant, en tots els casos, l'alternativa de tractament aplicada al projecte real forma part del llistat d'alternatives proposades per l'EDSS. Les diferències que es puguin trobar en la prioritjació de les alternatives al EDSS respecte als projectes reals es deuen a que no es disposava dels criteris seleccionats als casos reals, per la qual cosa aquestes puntuacions es basen en suposicions.

La utilització del EDSS desenvolupat en aquest context proporciona una resposta ràpida mitjançant una interfície intuïtiva per a ajudar en el procés de selecció d'alternatives de tractament. A més, permet l'avaluació de les diferents alternatives aplicables en cada cas en funció dels criteris que l'usuari prioritzi.

Aquest EDSS es d'aplicació per al sector industrial d'alimentació i beguda per la qual cosa, per poder-lo utilitzar en altres sectors industrials, es necessitaria repensar el seu funcionament i el coneixement inclòs. **Per tant, aquest treball permet avançar en la sistematització del procés de selecció d'alternatives per a EDAR industrial, prenent com a punt de partida el sector d'alimentació i begudes.**

4.3 Contribucions amb aquesta investigació

Amb aquesta tesi es contribueix a la millora del procés de selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals mitjançant les següents estratègies, que diferencien aquesta eina dels estudis previs:

- La validació amb casos reals de Novedar_EDSS permet determinar la viabilitat tècnica de l'eina abans de la seva comercialització. De manera que, amb aquest treball, es contribueix a analitzar les prestacions d'una eina desenvolupada abans del seu llançament al mercat. Aquest pas representa una gran diferència respecte a la majoria d'eines desenvolupades fins al moment, que presenten la limitació de no haver estat aplicades al "món real", per la qual cosa es desconeix la seva validesa real per aconseguir l'objectiu d'ajudar a la decisió quan s'han de prendre decisions per al disseny d'EDAR.
- Per tal d'adaptar Novedar_EDSS a l'usuari final, s'ha treballat en conjunt amb els potencials usuaris a l'empresa. D'aquesta manera, s'assegura que l'usuari final es trobarà còmode utilitzant l'eina i en trobarà la seva utilitat, ja que s'inclouen els diferents paràmetres i càlculs que ells normalment fan servir, així com una superfície intuïtiva. Açò representa un avantatge de la nova versió de Novedar_EDSS sobre la major part dels EDSS desenvolupats fins ara, que molts cops són complicats d'utilitzar, de manera que només els experts que els han desenvolupat són capaços de fer-los servir correctament.
- Amb aquesta tesi es contribueix a considerar de forma conjunta més d'una etapa en la sistematització del procés de presa de decisió, mitjançant la integració de Novedar_EDSS amb un optimitzador. No s'ha trobat cap referència anterior d'una eina que cobreixi les etapes de: generació d'alternatives, anàlisi multi-criteri i optimització en la selecció del tractament d'aigües residuals a aplicar. Per tant, per primer cop s'apliquen totes aquestes etapes de forma integrada, aplicant tant el coneixement expert com models matemàtics, facilitant i millorant el procés de presa de decisió.
- L'elevada demanda d'EDAR industrials fa necessari el desenvolupament d'eines que ajuden a la selecció del tractament dels diferents efluents industrials. Aquests efluents presenten diferents casuístiques en funció del sector industrial, essent molt diferents a

les aigües residuals urbanes. És per això que, en els darrers anys, s'ha estat treballant en el desenvolupament d'algunes eines de suport a la decisió. No obstant això, cap d'elles considera tot el conjunt del tractament (línia d'aigües i línia de fangs), el que dificulta l'aplicació d'un punt de vista integrat. A més a més, no s'ha trobat cap cas en que s'apliqui una anàlisi multi-criteria (que pugui considerar paràmetres econòmics com ambientals i tècnics). En canvi, el EDSS desenvolupat en aquesta tesi, basat en Novedar_EDSS, considera tot el diagrama de flux d'una EDAR per a la selecció del tractament a aplicar i permet l'aplicació d'una anàlisi multi-criteria per tal d'avaluar les diferents alternatives de tractament. Per la qual cosa representa un pas endavant respecte a les eines desenvolupades fins ara.

- El canvi de paradigma en les EDAR, que passen de ser instal·lacions per al tractament d'aigües residuals a ser instal·lacions per a la recuperació de recursos, implica la necessitat de noves eines que puguin fer front als nous objectius. En aquest sentit, s'hi troben referències molt limitades de EDSS on es consideri el nou paradigma. Amb aquesta tesi es contribueix a avançar en la sistematització del procés de presa de decisió basant-se en les característiques del nou concepte d'EDAR. És per això que s'ha treballat en la definició de les característiques de Novedarplus_EDSS, que actualment es troba en les darreres fases de desenvolupament.

Per tant, amb el treball desenvolupat en aquesta tesi es fa front a les limitacions dels EDSS desenvolupats fins ara, prèviament descrites a l'apartat 1.7 d'aquesta tesi.

4.4 Aplicacions potencials del EDSS i possibles limitacions

Com a resultat d'aquesta tesi, s'avança en la sistematització del procés de presa de decisions en el tractament d'aigües residuals. Fins ara, la majoria de les eines desenvolupades cobrien només la part d'anàlisi multi-criteri d'un conjunt d'alternatives de tractament, prèviament seleccionades per experts (Hajkowicz i Collins, 2007) o bé només tenien en compte criteris econòmics o tècnics, (com a Rawal et al., 2016), sense considerar l'imprescindible vector ambiental. D'altra banda, les eines més evolucionades molts cops són complicades de fer servir per l'usuari (com és el cas de Chamberlain et al., 2014) i, en la majoria dels casos no han estat validades amb casos reals.

En canvi, Novedar_EDSS inclou una primera etapa de generació del conjunt d'alternatives de tractament adequades en cada cas i una segona etapa d'anàlisi multi-criteri d'aquestes,

incorporant criteris econòmics, tècnics i ambientals. En aquesta tesi es realitza la validació de Novedar_EDSS amb casos reals per tal d'assegurar-ne la seva viabilitat a l'hora d'ajudar als encarregats de la presa de decisions en la selecció de tractaments d'aigües residuals urbanes. A més, es defineixen les directrius per tal d'adaptar aquesta eina a l'usuari final, amb l'objectiu d'estendre'n la seva aplicació. **Per tant, es pot afirmar que Novedar_EDSS és una eina útil per a la selecció del tractament més adient en EDAR urbanes.** L'aplicació de Novedar_EDSS per a re-disseny d'EDAR està limitat als casos en que es necessiti una re-estructuració completa de l'EDAR, ja que aquest programa es va dissenyar pensant en EDAR urbanes noves.

D'altra banda, la integració de Novedar_EDSS amb una eina d'optimització matemàtica permet aplicar el coneixement d'experts i models matemàtics d'optimització al procés de selecció d'alternatives. De manera que, en la primera etapa de la metodologia, es generen les alternatives de tractament aplicables, a continuació es fa un primer cribratge d'aquestes mitjançant la seva prioritització amb una anàlisi multi-criteri i, finalment, es determina l'alternativa òptima que minimitza els costos. Actualment, la limitació d'aquesta metodologia esdevé per la quantitat de tecnologies incloses a l'optimitzador tant a la base de dades com als models de càlcul dels diferents paràmetres, de manera que, si les alternatives pre-seleccionades per Novedar_EDSS no estan incloses a l'optimitzador, s'alenteix el procés, perquè s'ha d'incloure tota la informació i càlculs referents a aquestes tecnologies.

Finalment, mitjançant el EDSS industrial desenvolupat en aquesta tesi, es contribueix a la millora del procés de presa de decisions en la selecció de tractaments d'aigües residuals del sector industrial d'alimentació i beguda. Les eines desenvolupades fins ara es centren en comparar dos tipus de tecnologies a aplicar (com son els casos de Parghi et al. (2014) i Collado et al. (2012)) o bé només cobreixen una part del tractament, com és el cas de Gómez-López et al., (2009), que considera els tractaments de desinfecció o Freitas et al. (2000) que s'enfoca en el tractament i primari i secundari. Per tant, el EDSS industrial desenvolupat en aquesta tesi cobreix un nínxol que no ho estava, permetent la generació de línies completes de tractament (tant d'aigües com de fangs) i la seva avaluació mitjançant una anàlisi multi-criteri (considerant aspectes tant ambientals com econòmics i tècnics). Les limitacions que presenta aquesta eina estan relacionades amb la gran variabilitat de composició dels efluent industrial, és per això que, per a cada sector s'hauria de repensar el funcionament del EDSS per considerar i adaptar-se a la casuística de cadascun d'ells.

4.5 Perspectives de futur

En aquest apartat es plantegen dues propostes per continuar amb la sistematització de la presa de decisió tenint en compte dos àmbits diferents: el paradigma 3R per a les EDAR i el re-disseny d'EDAR.

EDSS per al paradigma 3R de les EDAR

El concepte d'EDAR ha canviat de paradigma, de manera que les EDAR passen de ser instal·lacions on es tracten residus a instal·lacions on es recuperen recursos. En aquest sentit, a les EDAR es recupera, principalment, aigua (que pot ser reutilitzada o destinar-se al medi natural), energia (mitjançant la combustió del biogàs generat) i nutrients (amb la recuperació de fòsfor i nitrogen) (McCarty et al., 2011).

És per això que, les noves eines d'ajuda a la decisió han de fer front a aquest paradigma, com les desenvolupades per Wang et al. (2012), Lee et al. (2013) i Puchongkawarin et al. (2015). En aquest sentit, en el marc d'aquesta tesi doctoral s'ha treballat en la identificació dels requeriments d'un EDSS (anomenat Novedarplus_EDSS) per a fer front al paradigma de l'EDAR 3R (on s'apliquen els conceptes de reduir, recuperar i reciclar). De manera que Novedarplus_EDSS ajudi al procés de selecció d'estratègies per a recuperar recursos a una EDAR.

El coneixement necessari per al desenvolupament d'aquest EDSS s'ha obtingut a través d'experts en les tecnologies i configuracions innovadores i més eficients de la Water_2020 Cost Action. En concret, la informació relativa a paràmetres de disseny i d'operació, eficiències d'eliminació i de recuperació, etc. es va obtenir a través qüestionaris i entrevistes amb aquests experts que pertanyen als grups de treball 1 (tecnologies eficients) i 2 (tecnologies de recuperació de recursos) de la Water_2020 Cost Action (Taula 9).

Taula 9. Treballs i investigadors de la Water_2020 Cost Action entrevistats sobre les tecnologies corresponents.

Treballs d'Investigació	Investigador principal	Localització a l'EDAR
Energy efficient nutrient removal (SCENA)	F. Fatone	Línia de retorns
Energy efficient nutrient removal (ELAN)	A. Mosquera	Línia de retorns
Anammox	J. Colprim	Línia de retorns
Anaerobic treatment of wastewater	I. Sabbah	Línia d'aigües ⁱ
Micropollutants and recalcitrants	P. Castro	Línia d'aigües
Micropollutants and recalcitrants	E. Felis	Línia d'aigües
Sludge	M. Healy	Línia de fangs
Bioelectrochemical systems	S. Puig	Línia d'aigües
Biopolymers	M. Reis	Línia de fangs ^j
Bioplastics	M. Reis	Línia de fangs ^j
Biorefinery	A. Mosquera	Línia de fangs ^j
Struvite	J. Colprim	Línia de retorns ^{k,l}
Membrane bioreactors	H. Monclús	Línia d'aigües
Biofiltration	D. Gabriel	Sistema de desodorització
Biotrickling filters	R. Muñoz	Sistema de desodorització
AnoxAn	I. Tejero	Línia d'aigües
Energy efficient nutrient removal-RBC-MBBR	G. Cema	Línia d'aigües
AnAmmOx UASB+MBBR	E. Plaza	Línia d'aigües ⁱ
AnAmmOx UASB+IFAS	E. Plaza	Línia d'aigües ⁱ
Ion exchange for P recovery	A. Soares	Línia d'aigües ^l
Ion exchange for N recovery	A. Soares	Línia d'aigües ^k
Purple phototropic bacteria	T. Huelsen	Línia d'aigües
Via-nitrite SBR mainstream	L. Lytras	Línia d'aigües

Recursos recuperats: ⁱrecuperació d'energia; ^jrecuperació de carboni; ^krecuperació de fòsfor; ^lrecuperació de nitrogen.

A més a més, es va realitzar una estada de 7 setmanes al “Cranfield Water Science Institute” a la Universitat de Cranfield, on es van estudiar 3 tipus de tecnologies:

- Resines d’intercanvi iònic per a la recuperació de fòsfor i nitrogen.
- Microalgues per a l’eliminació de nutrients.
- “Steel Slag Reed Beds”, que son uns llits amb material d’enderrocament per a l’eliminació de fòsfor.

Amb tota la informació recopilada es defineix l’estructura i l’esquema de funcionament de Novedarplus_EDSS, basant-se en el concepte de la Fig. 15.

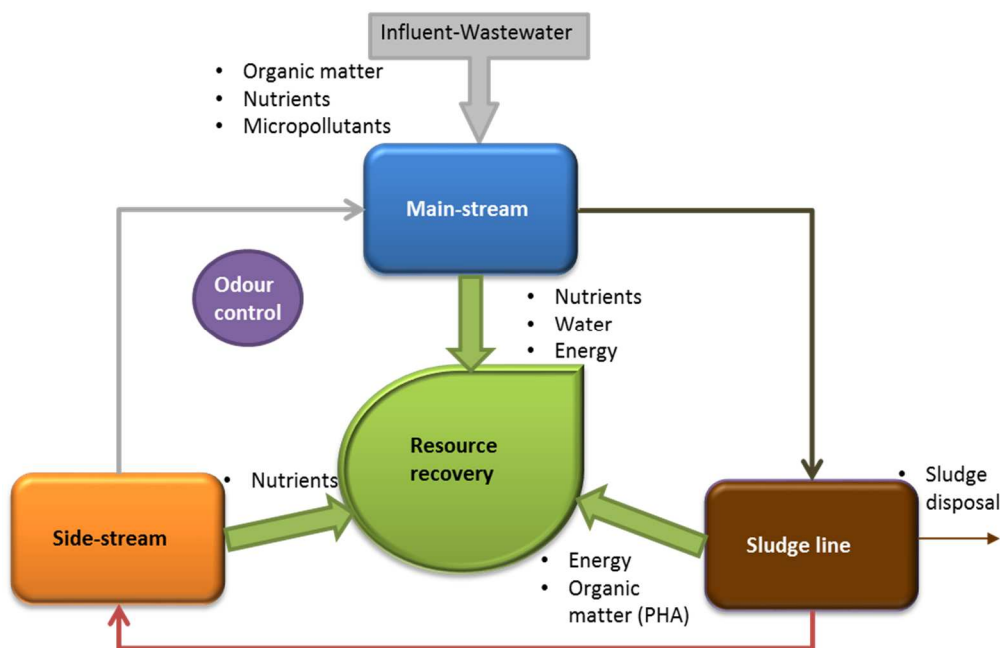


Fig. 15. Diagrama de flux considerat al Novedarplus_EDSS per a la concepció de 3R de les EDAR.

Les noves funcionalitats inclouen:

- ✓ Línia de retorns i tractaments d’aquests retorns, tant biològics com físic-químics
- ✓ Nous criteris d’avaluació (relacionats amb la recuperació de recursos).
- ✓ Puntuació de les línies de tractament completes i de cada operació unitària per separat.
- ✓ Tecnologies i configuracions més eficients per a l’eliminació de nutrients (com SCENA, ELAN i Anammox (Taula 9)).
- ✓ Tecnologies per a l’eliminació de contaminants emergents (com el tractament biològic combinat amb tractament fotoquímic (Taula 9)).

- ✓ Tecnologies i noves configuracions per a la recuperació de recursos, tant (i) a la línia d'aigües (com reactors anaerobis seguits de resines d'intercanvi iònic per a la recuperació de fòsfor o de nitrogen) com (ii) a la línia de fangs (recuperació de PHA per a biopolímers) i (iii) a la de retorns (precipitació d'estruvita) (Taula 9).

La **línia de retorns** s'inclou l'EDSS mitjançant un nou mòdul on es defineixen les característiques d'aquestes aigües, on hi ha la possibilitat de seleccionar les concentracions per defecte per a cada paràmetre, extretes de bibliografia. Aquesta nova línia inclourà dos blocs de tractaments, un d'ells corresponent als tractaments biològics i l'altre als físic-químics. Es plantegen diferents estratègies de treball: hi haurà la possibilitat de considerar els retorns o no fer-ho. A més, en cas que es tinguin en compte els retorns, es podrà seleccionar l'opció de tractar-los o no. En cas que s'opti per tractar-los, al executar el programa, es tindran en compte els diferents tractaments de retorns, mostrant-se en pantalla el llistat de tecnologies disponibles, tant per al tractament biològic como físic-químic d'aquests retorns.

A més a més, es defineixen els **nous criteris d'avaluació** per tal que el programa permeti fer una anàlisi multi-criteria, considerant criteris com la recuperació de fòsfor, de nitrogen i la producció de biogàs. Açò permetrà que, en els casos en que l'usuari vulgui aplicar una estratègia de recuperació de recursos, aquelles estratègies que impliquen una major recuperació de recursos obtindran una millor puntuació.

D'altra banda, per tal d'obtenir la **puntuació de tota la línia** de tractament completa, es consideren les característiques dels diferents tractaments de totes les operacions unitàries involucrades en el procés. De forma que, en funció dels criteris i pesos seleccionats per l'usuari, es puntuaran els diferents tractaments dintre de cada operació unitària. A més a més, l'usuari decidirà quina importància li dona a cada operació unitària, mitjançant la selecció d'un percentatge per a cada operació unitària, que es tindrà en compte per al càlcul de la puntuació total de la planta.

La informació necessària sobre els **nous tractaments** a incloure es recopila mitjançant un treball de recerca bibliogràfica així com amb entrevistes amb experts. D'aquesta forma s'obté tota la informació necessària sobre els diferents paràmetres, tant econòmics com ambientals i tècnics.

Finalment, per tal d'assegurar la compatibilitat dels resultats obtinguts al EDSS amb un software de simulació, en primer lloc es seleccionarà el software de simulació amb que es vulgui treballar. A continuació, s'han de determinar les dades d'entrada necessàries per a la definició d'un escenari al software de simulació seleccionat. D'aquesta forma es determinarà com adequar els

resultats del EDSS als paràmetres d'entrada necessaris per fer funcionar el software de simulació.

Quant al **funcionament del EDSS**, en primer lloc es defineix l'escenari, tenint en compte: (i) la descripció de l'aigua d'entrada, (ii) descripció dels sobrenedants, (iii) els criteris a considerar (inclouent estratègies de recuperació de recursos) per a puntuar cada operació unitària així com el conjunt de tota la planta, (iv) els paràmetres per a l'anàlisi cost-benefici (tenint en compte preu de venda de l'estruvita, etc.) i (v) els requeriments d'efluent.

A continuació, s'executa el programa, de manera que el primer que fa és recalculat l'influent en funció de les característiques dels sobrenedants. Després, basant-se en les característiques d'aquesta aigua i en els requeriments d'efluent, el EDSS proposa les línies de tractament a aplicar. I, mitjançant l'anàlisi multi-criteri es puntuen les diferents alternatives per cada operació unitària, així com pel conjunt de la planta. En cas que es prioritzi la recuperació de recursos, les alternatives de tractament millor puntuades seran aquelles que permeten aquesta recuperació.

Amb tot aquest treball es va fer una contribució al congrés EcoSTP16 ("3rd IWA specialized international conference: Ecotechnologies for wastewater treatment". Cambridge, Juny 2016) mitjançant un pòster.

A partir d'aquí es proposa com a nova línia d'actuació la construcció de Novedarplus_EDSS incorporant aquests aspectes. Com s'ha fet en aquesta tesi, un cop desenvolupat el nou software caldrà validar l'eina mitjançant la seva aplicació a diferents casos d'estudi, amb l'objectiu de proporcionar una eina per a ajudar en la selecció d'alternatives de tractament per a l'EDAR 3R. S'ha de dir que a diferència dels objectius d'aquesta tesi on la validació s'ha pogut fer amb plantes reals, la validació de Novedarplus_EDSS plantejarà més dificultats donat el nombre més reduït d'instal·lacions que actualment implementen aquestes tecnologies.

Re-disseny d'EDAR

Als països desenvolupats, moltes EDAR ja estan construïdes, d'aquí esdevé la importància i el creixent nombre d'EDAR a re-dissenyar. En aquest sentit, s'han definit algunes de les noves funcionalitats que hauria de tenir Novedar_EDSS per poder aplicar-se als diferents casos de re-disseny. En primer lloc, la definició de l'escenari ha d'incloure:

- La definició del tractament actual que hi ha a l'EDAR
- Les noves característiques (cabal, paràmetres, etc.)
- Els nous requeriments (efluent, eficiència, etc.)

A partir de totes les característiques de l'escenari definit, el EDSS recomanarà els tractaments a aplicar. Hi haurà tres possibilitats:

1. Combinar el tractament existent amb un de nou (per exemple incorporant suports a uns fangs actius, tipus "moving bed biofilm reactor" (MBBR))
2. Incloure una nova línia de tractament, on es pot aplicar un tractament com l'existent o un de diferent
3. O fer una re-estructuració completa, on s'apliqui un tractament diferent a l'existent

De manera que el tractament previ de l'EDAR es quedarà gravat i, sobre aquest es defineix un nou escenari amb els nous paràmetres d'entrada i de sortida, atenent les necessitats d'actualització de la planta. Quan s'executi de nou l'escenari, el EDSS recomanarà els tractaments a aplicar a la EDAR completa (tenint en compte l'EDAR actual i els nous requeriments a aconseguir).

Per tant, aquí es proposa una idea de la metodologia que es podria aplicar per començar amb el desenvolupament d'un EDSS per al re-disseny d'EDAR.

5. CONCLUSIONS

Les principals conclusions d'aquesta tesi son:

1. La presa de decisions en la selecció d'alternatives de tractament d'aigües residuals és un procés complex. En els darrers anys, s'estan desenvolupant eines per a la sistematització de les diferents etapes que comprenen aquest procés, per tal de facilitar-ne la tasca i millorar els resultats. Novedar_EDSS és una d'aquestes eines que, a més, fa un pas endavant en aquesta sistematització, és per això que es pren com a base en aquest treball.
2. La validació de les eines desenvolupades per a la sistematització del procés de selecció d'alternatives de tractament és imprescindible, per tal d'assegurar la seva viabilitat. S'ha validat Novedar_EDSS amb 4 casos reals i els resultats mostren com aquesta eina proporciona respostes molt semblants als estudis d'alternatives dels diferents projectes reals, recomanant tractaments molt similars i puntuant-los en el mateix ordre. Per tant, aquesta eina es pot utilitzar per tal d'ajudar a la presa de decisions per la selecció de les alternatives de tractament més adequades.
3. En el desenvolupament d'un programa, és molt important treballar conjuntament amb l'usuari final, per tal de fer front a les seves necessitats. En aquest sentit, el treball directe amb l'usuari final ha permès definir les funcionalitats per adaptar Novedar_EDSS, açò implica una millora de l'experiència de l'usuari a l'utilitzar el programa, augmentant-ne la probabilitat d'èxit d'aplicació.
4. La integració d'eines per a la sistematització de les diferents etapes del procés de selecció permet involucrar un major coneixement (de diferents grups de investigació) i diferents metodologies, optimitzant-ne els resultats obtinguts. Açò s'ha aconseguit mitjançant la integració de Novedar_EDSS amb l'optimitzador desenvolupat a DTU. La integració d'aquestes dues metodologies ha permès aplicar coneixement expert conjuntament amb models matemàtics d'optimització, obtenint-ne resultats satisfactoris en la selecció de l'alternativa de tractament més adequada en cada cas.

5. La casuística de les aigües residuals industrials implica la utilització d'eines diferents a les emprades per a aigües residuals urbanes. Tenint en compte les característiques dels sectors d'alimentació i begudes, s'ha desenvolupat un EDSS per a la selecció d'alternatives de tractament en aquest sector industrial. Aquest EDSS s'ha validat amb casos reals, demostrant-ne la seva viabilitat.

6. La sistematització del procés de selecció requerirà de diferents tipus d'eines en funció del context i del paradigma en cada moment. És per això que s'han definit les característiques i funcionalitats d'un EDSS per tal de fer front al paradigma 3R de les EDAR, mitjançant el coneixement de diferents experts de la Water_2020 Cost Action.

The main conclusions of this thesis are:

1. The selection of the most appropriate wastewater treatment involves a complex decision making process. A variety of tools to systematize this process have been developed in recent years in order to facilitate the task and to improve the results obtained. Novedar_EDSS overcomes some limitations from the previous approaches, for that reason it is taken as a basis in this thesis.
2. Validation of the tools developed for the systematization of the decision making process is a key step to ensure their feasibility. The capabilities of Novedar_EDSS have been evaluated considering 4 real case studies. The tool recommends similar treatments as those applied in the real projects, ranking them in the same order. Therefore, this tool can be used in the study of alternatives to assess decision makers to select properly treatment alternatives.
3. In the process to develop a software, it is very important to work together with the final user in order to fulfil their needs. In that sense, the work with the user has enabled to define the features needed to adapt Novedar_EDSS to the final user. This implies an improvement in the user's experience when using this software, increasing its chances of success.
4. The integration of different tools to systematize the decision making process allows to involve knowledge and methodologies developed in different research groups, optimizing the results obtained. This has been achieved by integrating Novedar_EDSS with the optimization tool developed in DTU. There is a mutual benefit and synergy when both tools are integrated since expert knowledge and mathematic optimization models are applied together to select the most properly treatment alternative.
5. Industrial effluents require to apply different tools from those used to select urban wastewater treatment alternatives. The casuistic in the food and beverage industrial sector has been identified to develop an EDSS to assist decision makers in the wastewater treatment selection in this industrial sector. A set of case studies are applied, validating the system procedure.

6. The systematization process will require different tools depending on the paradigm. The features and methodology to develop an EDSS to tackle the 3R paradigm in WWTP has been defined, based on the knowledge acquisition from the experts in the Water_2020 Cost Action.

6. BIBLIOGRAFIA

- Alcalde Sanz, L., Manfred Gawlik, B., 2014. Water Reuse in Europe. Relevant guidelines, needs for and barriers to innovation. European Commission.
- Aleman, J., Comas, J., Turon, C., Balaguer, M.D., Poch, M., Puig, M.A., Bou, J., 2005. Evaluating the application of a decision support system in identifying adequate wastewater treatment for small communities. A case study: The Fluvia River Basin. *Water Science and Technology*, 51 (10), 179-186.
- Ashley, R., Blackwood, D., Butler, D., Jowitt, P., Davies, J., Smith, H., Gilmour, D. & Olteanu-Dumbrava, C., 2008 Making asset investment decisions for wastewater systems that include sustainability. *J. Environ. Eng.* 134, 200.
- ATV-DVWK Standard-A131E Dimensioning of single-stage activated sludge plants, 2000.
- Aulinas, M., Turon, C. i Sánchez-Marrè, M., 2009. Agents as a Decision Support Tool in Environmental Processes: The State of the Art. *Advanced Agent-Based Environmental Management Systems. Whitestein Series in Software Agent Technologies and Autonomic Computing*, 5-35. Birkhäuser Verlag Basel (Switzerland).
- Aydiner, C., Sen, U., Koseoglu-Imer, D.Y., Can Dogan, E., 2016. Hierarchical prioritization of innovative treatment systems for sustainable dairy wastewater management. *J. Clean. Prod.*
- Balaguer, M. D., Puig, M. A., Salgot, M., Sánchez-Marrè, M., Turon, C., 2007. Gestió i tractament d'aigües residuals. Universitat de Girona. Generalitat de Catalunya. Edició electrònica. (http://www3.udg.edu/publicacions/vell/electroniques/gestio_aigues_residuals/presentacio.html)
- Bañares-Alcántara, R., Lababidi, H.M.S., 1995. Design support systems for process engineering II. KBDS: An experimental prototype. *Comput. Chem. Eng.* 19, 279–301.
- Baumann, H., Tillman, A.M., 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA: an Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Studentlitteratur, Lund.
- Beard, T.R., Ford, G.S., Koutsky, T.M. i Spiwak, L. J., 2009. A Valley of Death in the innovation sequence: an economic investigation. *Research Evaluation* 18 (5): 343-356.
- Bechmann, H., Nielsen, M.K., Madsen, H., Poulsen, N.K., 1998. Control of sewer systems and wastewater treatment plants using pollutant concentration profiles. *Water Sci. Technol.* 37 (12), 87–93.

- Bottero, M., Comino, E., Riggio, V., 2011. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. *Environ. Model. Softw.* 26, 1211–1224.
- Bozkurt, H., Quaglia, A., Gernaey, K. V., Sin, G., 2015. A mathematical programming framework for early stage design of wastewater treatment plants. *Environ. Model. Softw.* 64, 164–176.
- Camarillo, R., Rincón, J., 2012. Effect of inhibitory compounds on the two-phase anaerobic digestion performance of diluted wastewaters from the alimentary industry. *Chem. Eng. J.* 193-194, 68–76.
- Castillo, A., Porro, J., Garrido-Baserba, M., Rosso, D., Renzi, D., Fatone, F., Gómez, V., Comas, J. and Poch, M., 2016a. Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection 184, 1–10. *J. Environ. Manag.*
- Castillo, A., Cheali, P., Gómez, V., Comas, J., Poch, M., Sin, G., 2016b. An integrated knowledge-based and optimization tool for the sustainable selection of wastewater treatment process concepts. *Environ. Model. Softw.* 84, 177–192.
- CEDEX, 2013. XXX Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Madrid.
- Chamberlain, B.C., Carenini, G., Oberg, G., Poole, D., Taheri, H., 2014. A Decision Support System for the Design and Evaluation of Sustainable Wastewater Solutions. *IEEE Trans. Comput.* 63, 129–141.
- Chan, Y.J., Chong, M.F., Law, C.L., Hassell, D.G., 2009. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chem. Eng. J.* 155, 1–18.
- Collado, S., Laca, A., Diaz, M., 2012. Decision criteria for the selection of wet oxidation and conventional biological treatment. *J. Environ. Manage.* 102, 65–70.
- Comas, J., Alemany, J., Poch, M., Torrens, a., Salgot, M., Bou, J., 2004. Development of a knowledge-based decision support system for identifying adequate wastewater treatment for small communities. *Water Sci. Technol.* 48, 393–400.
- Copp, J., Jeppsson, U. and Rosen, C., 2003. Towards an ASM1-ADM1 state variable interface for plantwide wastewater treatment modelling. In: *Proceedings 76th Annual WEF Conference and Exposition, Los Angeles, USA, Oct. 11 – 15.*

- Cortes, U., Sanchez-Marre, M., Ceccaroni, L., R-Roda, I., Poch, M., 2000. Artificial Intelligence and Environmental Decision Support Systems. *Appl. Intel.* 13, 77–91.
- Crowley, T.J., Harrison, C.A., Doyle, F.J., 2001. Batch-to-batch optimization of PSD in emulsion polymerization using a hybrid model. In: *Proceedings of the American Control Conference*, June 25–27, Arlington, Virginia, vol. 2., pp. 981–986.
- Degrémont, Suez, 2014. *Manual técnico del agua*. Quinta ed. Degrémont, Bilbao.
- De Mes, T.Z.D., Stams, a. J.M., Reith, J.H., Zeeman, G., 2003. Methane production by anaerobic digestion of wastewater and solid. *Bio-methane Bio-hydrogen*, Status Perspect. *Biol. methane Hydrog. Prod.* 58 –102.
- Dubois, D., 2011. The role of fuzzy sets in decision sciences: Old techniques and new directions. *Fuzzy Sets Syst.* 184, 3–28.
- Dursun, M., 2016. *A Fuzzy Approach for the Assessment of Wastewater Treatment Alternatives*.
- EEC, 2010. Council directive of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).
- El-Din, A.G., Smith, D.W., 2002. A combined transfer-function noise model to predict the dynamic behaviour of a full-scale primary sedimentation tank model. *Water Res.* 36, 3747–3764.
- European Commission, 2006. *Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques in the Food, Drink and Milk Industries*.
- Evenson, E. J. and Baetz, B. W., 1994 Selection and sequencing of hazardous waste treatment processes: a knowledge-based systems approach. *Waste Manage.* 14(2), 161–16.
- Fenner, R. A., Guthrie, P.M., Piano, E., 2007. Process selection for sanitation systems and wastewater treatment in refugee camps during disaster-relief situations. *Water Environ. J.* 21, 252–264.
- Fernández-Arévalo, T., Lizarralde, I., Grau, P., Ayesa, E., 2014. New systematic methodology for incorporating dynamic heat transfer modelling in multi-phase biochemical reactors. *Water Res.* 60, 141–155.
- Finney, B. A. and Gerheart, R. A., 2004. *A User's Manual for WAWTTAR*. Environmental Resources Engineering, Humboldt State University, Arcata, CA.

- Flores, X., Bonmatí, A., Poch, M., Rodríguez-Roda, I., Bañares-Alcántara, R., 2005. Selection of the Activated Sludge Configuration during the Conceptual Design of Activated Sludge Plants Using Multicriteria Analysis. *Ind. Eng. Chem. Res.* 44, 3556–3566.
- Foley, J., de Haas, D., Hartley, K., Lant, P., 2010. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems. *Water Res.* 44, 1654–1666.
- Ford, G.S., Koutsky, T.M. i Spiwak, L. J., 2007. A Valley of Death in the innovation sequence: an economic investigation. Phoenix Center.
- Frank, C., Sink, C., Mynatt, L., Rogers, R., Rappazzo, A., 1996. Surviving the “Valley of Death”: A Comparative Analysis, 21 *Journal of Technology Transfer*.
- Freitas, S.F., Costa, C. a V, Boaventura, R. a R., 2000. Conceptual design of industrial wastewater primary treatment treatment processes: primary treatment. *Comput. Chem. Eng.* 24, 1725–1730.
- Garrido-Baserba, M., Reif, R., Hernández, F., Poch, M., 2012. Implementation of a knowledge-based methodology in a decision support system for the design of suitable wastewater treatment process flow diagrams. *J. Environ. Manage.* 112, 384–391.
- Garrido-Baserba, M., 2013. Development of an environmental decision support system for the selection and integrated assessment of process flow diagrams in wastewater treatment. PhD Thesis. University of Girona.
- Garrido-Baserba, M., Reif, R., Molinos-Senante, M., Larrea, L., Castillo, A., Verdaguer, M., Poch, M., 2016. Application of a multi-criteria decision model to select of design choices for WWTPs. *Clean Technol. Environ. Policy* 18, 1–13.
- Gernaey, K. V., Van Loosdrecht, M.C.M., Henze, M., Lind, M., Jørgensen, S.B., 2004. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art. *Environ. Model. Softw.* 19, 763–783.
- Grau, P., de Gracia, M., Vanrolleghem, P. a., Ayesa, E., 2007. A new plant-wide modelling methodology for WWTPs. *Water Res.* 41, 4357–4372.
- Gómez-López, M.D., Bayo, J., García-Cascales, M.S., Angosto, J.M., 2009. Decision support in disinfection technologies for treated wastewater reuse. *J. Clean. Prod.* 17, 1504–1511.
- Hajkowicz, S., Collins, K., 2007. A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resour. Manag.* 21, 1553–1566.

- Hamed, M.M., Khalafallah, M.G., Hassanien, E.A., 2004. Prediction of wastewater treatment plant performance using artificial neural networks. *Environ. Model. Softw.* 19, 919–928.
- Hamouda, M. a., Anderson, W.B., Huck, P.M., 2009. Decision support systems in water and wastewater treatment process selection and design: A review. *Water Sci. Technol.* 60, 1767–1770.
- J. Heller and C. Peterson, 2006 “Valley of Death” in *Nanotechnology Investing*, Foresight Nanotech Institute.
- Henze, M., Grady Jr, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.v.R., Matsuo, T., 1987. Activated sludge model no. 1. IAWQ Scientific and Technical Report No. 1. IAWQ, London.
- Hidalgo, D., Irusta, R., Martinez, L., Fatta, D. And Papadopoulos, A., 2007. Development of a multi-function software decision support tool for the promotion of the safe reuse of treated urban wastewater. *Desalination* 215(1), 90-103.
- Hospido, A., Sanchez, I., Rodriguez-Garcia, G., Iglesias, A., Buntner, D., Reif, R., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2012. Are all membrane reactors equal from an environmental point of view? *Desalination* 285, 263-270.
- Howard D., 2012. Aeration Technology Decisions Using Off Gas Testing Information- Sustainable Aeration Practice. *Weftec Conference*, 2012-W102.
- Huang, Y., Dong, X., Zeng, S., Chen, J., 2015. An integrated model for structure optimization and technology screening of urban wastewater systems. *Front. Environ. Sci. Eng.* 9, 1036–1048.
- Ilangkumaran, M., Sasirekha, V., Anojkumar, L., Sakthivel, G., Raja, M.B., Raj, T.R.S., Siddhartha, C.N.S., Nizamuddin, P., Kumar, S.P., 2013. Optimization of wastewater treatment technology selection using hybrid MCDM. *Manag. Environ. Qual.* 24, 619–641.
- Janssen R. A support system for environmental decisions. London: Pion Limited, 1990.
- Jeppsson, U., Rosen, C., Alex, J., Copp, J., Gernaey, K.V., Pons, M.-N. and Vanrolleghem, P.A., 2006. Towards a benchmark simulation model for plant-wide control strategy performance evaluation of WWTPs. *Water Sci. Technol.*, 53(1), 287–295.
- Joksimovic, D., Kubik, J., Hlavinek, P., Savic, D. and Walters, G., 2006. Development of an integrated simulation model for treatment and Distribution of reclaimed water. *Desalination* 188(1-3), 9-20.

- Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2012. Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *J. Environ. Manage.* 113, 158–169.
- Kalbar, P.P., Karmakar, S., Asolekar, S.R., 2016. Life cycle-based decision support tool for selection of wastewater treatment alternatives. *J. Clean. Prod.* 117, 64–72.
- Karimi, A.R., 2011. Archive of SID Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods 8, 267–280.
- Krovvidy, S., Wee, W. G., Summers, R. S. and Coleman, J. J., 1991. An AI approach for wastewater treatment systems. *Appl. Intell.* 1(3), 247–261.
- Lee, E.J., Criddle, C.S., Bobel, P., Freyberg, D.L., 2013. Assessing the scale of resource recovery for centralized and satellite wastewater treatment. *Environ. Sci. Technol.* 47, 10762–10770.
- Lizarralde, I., Fernández-Arévalo, T., Brouckaert, C., Vanrolleghem, P., Ikumi, D.S., Ekama, G. a., Ayesa, E., Grau, P., 2015. A new general methodology for incorporating physico-chemical transformations into multi-phase wastewater treatment process models. *Water Res.* 74, 239–256.
- Loetscher, T., Keller, J., 2002. A decision support system for selecting sanitation systems in developing countries. *Socioecon. Plann. Sci.* 36, 267–290.
- Mathworks, 2016 https://es.mathworks.com/help/fuzzy/what-is-fuzzy-logic.html?requestedDomain=www.mathworks.com#responsive_offcanvas (darrer accés 09/11/2016)
- Sánchez-Marrè, M.; Cortés, U, 2011. Artificial Intelligence tools applied to wastewater treatment. A: "Environmental decision support systems (EDSSs): a tool for wastewater management in the XXI century". Universitat de Girona (UdG). Servei de Publicacions, p. 9-81.
- Máster Profesional en Ingeniería y Gestión Medio Ambiental, 2008. Contaminación de las aguas. Sector lácteo. Escuela Organización Industrial. Sevilla.
- Maurer, M., Bufardi, A., Tilley, E., Zurbrügg, C., Truffer, B., 2012. A compatibility-based procedure designed to generate potential sanitation system alternatives. *J. Environ. Manage.* 104, 51–61.

- McCarty, P.L., Bae, J., Kim, J., 2011. Domestic wastewater treatment as a net energy producer—can this be achieved? *Environ. Sci. Technol.* 45, 7100–7106.
- McGuire, M. L., Jones, K. Maximizing the potential of process engineering databases. *Chem. Eng. Prog.* 1989, 85 (11), 78-83.
- Metcalf & Eddy, 2014. *Wastewater engineering: treatment and reuse*, fourth ed. McGraw-Hill, New York.
- Olsson, G., 2015. *Water and energy. Threats and opportunities*, second ed. IWA Publishing, London.
- Osawa Y i Miyazaki K., 2006. An empirical analysis of the valley of death: large-scale R&D project performance in a Japanese diversified company. *Asian Journal of Technology Innovation*. Volume 14, 2006. Issue 2. 93-116.
- Osterwalder, A. i Pigneur, Y., 2011. *Generación de modelos de negocio*. Ed. Deusto, Barcelona.
- Ouyang, X., Guo, F., Shan, D., Yu, H., Wang, J., 2015. Development of the integrated fuzzy analytical hierarchy process with multidimensional scaling in selection of natural wastewater treatment alternatives. *Ecol. Eng.* 74, 438–447.
- Parghi, K.H., Fox, P., 1994. Data base analysis for treatment of industrial wastewaters by biotechnology and incineration. *Environmental Software* 9, 189–199.
- Poch, M., Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Sànchez-Marrè, M., Cortés, U., 2004. Designing and building real environmental decision support systems. *Environ. Model. Softw.* 19, 857–873.
- Pophali, G.R., Chelani, A.B., Dhodapkar, R.S., 2011. Optimal selection of full scale tannery effluent treatment alternative using integrated AHP and GRA approach. *Expert Syst. Appl.* 38, 10889–10895.
- Prasad, A. D., Tembhurkar, A. R., 2013. Decision making software for effective selection of treatment train alternative for wastewater using analytical hierarchy process. *J. Environ. Sci. Eng* 55 (4): 397-408.
- Puchongkawarin, C., Gomez-Mont, C., Stuckey, D.C., Chachuat, B., 2015. Optimization-based methodology for the development of wastewater facilities for energy and nutrient recovery. *Chemosphere* 140, 150–158.

- Quaglia, A., Pennati, A., Bogataj, M., Kravanja, Z., Sin, G., Gani, R., 2014. Industrial Process Water Treatment and Reuse: A Framework for Synthesis and Design. *Ind. Eng. Chem. Res.* 53, 5160–5171.
- Rawal, N., Duggal, S.K., 2016. Life Cycle Costing Assessment-Based Approach for Selection of Wastewater Treatment Units. *Natl. Acad. Sci. Lett.* 39, 103–107.
- Rivas, a., Irizar, I., Ayesa, E., 2008. Model-based optimisation of Wastewater Treatment Plants design. *Environ. Model. Softw.* 23, 435–450.
- Rodriguez-Roda, I., Poch, M., Bañares-Alcántara, R., 2000. Conceptual design of wastewater treatment plants using a design support system. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 75, 73–81.
- Rodriguez-Roda, I., Sánchez-Marrè, M., Comas, J., Baeza, J., Colprim, J., Lafuente, J., Cortés, U., Poch, M., 2002. A hybrid supervisory system to support WWTP operation: implementation and validation. *Water Sci Technol* 45(4–5):289–297.
- Rodriguez-Garcia, G., Molinos-Senante, M., Hospido, a., Hernández-Sancho, F., Moreira, M.T., Feijoo, G., 2011. Environmental and economic profile of six typologies of wastewater treatment plants. *Water Res.* 45, 5997–6010.
- Saaty, T. L. and Vargas, L. G., 2001. *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Springer.
- Sanchez, A., Garrido, J.M., 2009. *Advanced Wastewater Treatments. Membrane Bioreactors*, Chapter 10. NOVEDAR_Consolider, Vol. II. WEF and ASCE/EWRI, 2010. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants*, WEF Press, Virginia.
- Sánchez-Marrè, M., Cortés, U., Lafuente, J., Rodríguez-Roda, I., i Poch, M., 1996. DAI-DEPUR: an integrated and distributed architecture for wastewater treatment plants supervisión, *Artificial Intelligence in Engineering* 10, no. 3, 275-285.
- Sánchez-Marrè, M., Cortés, U., Roda, I.R., Poch, M., 1999. Sustainable case learning for continuous domains. *Environ. Model. Softw.* 14, 349–357.
- Sánchez-Marrè, M., Martínez, M., Rodríguez-Roda, I., Alemany, J. i Cortés, U., 2004. Using CBR to improve intelligent supervisión and Management of wastewater treatment plants: the atI-EDAR system, In proceedings of 7th European Conference on Case-Based Reasoning (ECCBR'2004) (Industrial day), Madrid (2004), 79-91.

- Seco, A., Ribes, J., Serralta, J., Ferrer, J., 2004. Biological nutrient removal model N°1 (BNR1). *Water Sci. Technol.*, 50(6), 69–78.
- Simon, H.A., 1997. *The sciences of the artificial*, (third edition), Computers & Mathematics with Applications.
- Statyukha, G., Kvitka, O., Dzhygyrey, I., Jezowski, J., 2008. A simple sequential approach for designing industrial wastewater treatment networks. *J. Clean. Prod.* 16, 215–224.
- Steichecn, M., Kadava, A., Shaw, A., Martin, M., Kazemi, S. A new paradigm: carbon footprint and sustainability assessment for process selection. In *Proceedings: WEFTEC09*, Orland, FL, USA, 10-14 October 2009.
- Sueviriyapan, N., Suriyaphadilok, U., Siemanond, K., Quaglia, A., Gani, R., 2016. Industrial wastewater treatment network based on recycling and rerouting strategies for retrofit design schemes. *J. Clean. Prod.* 111, 231–252.
- Tang, S. L., Wong, C. L. & Ellis, K. V., 1997. An optimization model for the selection of wastewater and sludge treatment alternatives. *J. Chart. Inst. Water Environ. Manage.* 11(1), 14–23.
- Van Lier, J.B., 2008. High-rate anaerobic wastewater treatment: Diversifying from end-of-the-pipe treatment to resource-oriented conversion techniques. *Water Sci. Technol.* 57, 1137–1148.
- Veolia website, 2000. Case study 3 - Brewery <http://veoliawatertechnologies.com/biobedegsb/en/?uid=1902> (darrer accés 06/05/16).
- Vidal, N., Bañares-Alcántara, R., Rodríguez-Roda, I., Poch, M., 2002. Design of wastewater treatment plants using a conceptual design methodology. *Ind. Eng. Chem. Res.* 41, 4993–5005.
- Wang, X., Liu, J., Ren, N.Q., Yu, H.Q., Lee, D.J., Guo, X., 2012. Assessment of multiple sustainability demands for wastewater treatment alternatives: A refined evaluation scheme and case study. *Environ.Sci.Technol.* 46,5542–5549.
- Wibowo, S., 2015. Application of the Fuzzy Approach for the Selection of Wastewater Treatment Technologies 843–848.
- Wooldridge, M., 2001. *Introduction to Multiagent Systems*, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.

- Wukovits, W., Harasek, M., Friedl, A., 2003. A knowledge based system to support the process selection during waste water treatment. *Resour. Conserv. Recycl.* 37, 205–215.
- Zeng, G., Jiang, R., Huang, G., Xu, M., Li, J., 2007. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. *J. Environ. Manage.* 82, 250–259.