

DISSENY CONCEPTUAL D'ESTACIONS DEPURADORES D'AIGÜES RESIDUALS FENT SERVIR UNA METODOLOGIA MULTICRITERI

(CONCEPTUAL DESIGN OF WASTEWATER TREATMENT PLANTS USING A MULTICRITERIA METHODOLOGY)

Núria Vidal,¹ Ignasi Rodríguez-Roda,¹ Manel Poch,¹ René Bañares-Alcántara,² Àngel Freixó³

¹ Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental, Universitat de Girona, campus de Montilivi, s/n, 17071 Girona, Catalunya.

² Departament d'Enginyeria Química, ETSEQ, Universitat Rovira i Virgili, carretera de Salou, s/n, 43006 Tarragona, Catalunya.

³ Consorci per a la Defensa de la Conca del Riu Besòs, av. Sant Julià, 241, Polígon Industrial Congost, 08400 Granollers, Catalunya.

RESUM

En aquest estudi es proposa una nova metodologia per al disseny d'estacions depuradores d'aigües residuals (EDAR). La metodologia es fonamenta en el disseny conceptual, combinant el procés de disseny jeràrquic amb l'anàlisi multicriteri. Aquesta combinació facilita la consistència i sistematització del disseny, alhora que permet incloure aspectes ambientals, socials, econòmics i tècnics des de l'inici del projecte.

La metodologia de disseny proposada es fonamenta en diverses fonts per a la presa de decisions, com ara la simulació matemàtica del procés, l'estimació econòmica dels costos, l'experiència dels experts en el camp d'aplicació o els manuals de disseny. L'enregistrament informàtic de tot el procés de disseny permet potenciar els avantatges de la metodologia.

L'article detalla la metodologia de disseny proposada, alhora que mostra un exemple d'aplicació del disseny hipotètic d'una EDAR amb els mateixos requeriments –és a dir, localització, característiques de l'aigua residual que s'ha de tractar i medi receptor– que l'EDAR de Granollers.

RESUMEN

En este estudio se propone una nueva metodología de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. La metodología se basa en el diseño conceptual, combinando el proceso de diseño jerárquico y el análisis multicriterio. Esta combinación facilita la consistencia y sistematización del diseño como también permite incluir aspectos ambientales, sociales, económicos y técnicos des del inicio del proyecto.

La metodología de diseño propuesta utiliza diversas fuentes de información para la toma de decisiones como la simulación matemática del proceso, la estimación económica de costes, la experiencia de los expertos en el campo de aplicación o los manuales de diseño. El registro informático de todo el proceso de diseño permite potenciar las ventajas de la metodología.

El artículo detalla la metodología propuesta como también muestra un ejemplo de aplicación del diseño hipotético de una planta de tratamiento de aguas residuales con los mismos requerimientos –es decir, localización, características del agua residual y medio receptor– que la planta de Granollers.

ABSTRACT

The aim of this study is to present a systematic conceptual design methodology for urban wastewater treatment plants (WWTP) which combines the hierarchical design process with the multicriteria analysis. The design methodology brings with it three sets of advantages: the systematic evaluation of the design alternatives, the evaluation of alternatives taking into account environmental, social, economical and technical aspects and the maintenance of a record of the design process.

This design methodology uses different sources of information such as mathematical modelling, cost estimates, expert knowledge and design manuals. This article is organised as follows: first, a description of the design methodology, and then we show how the methodology was applied to a wastewater treatment plant with the same requirements as that of Granollers.

Keywords: Conceptual design, wastewater treatment plant (WWTP), hierarchical decision process, multicriteria analysis.

INTRODUCCIÓ

El ràpid desenvolupament urbanístic portat a terme aquests darrers anys ha provocat que la generació d'aigües residuals urbanes hagi superat la capacitat d'autodepuració del medi i, en conseqüència, ha creat problemes ambientals com la contaminació d'aigües superficials i subterrànies. Aquest fet ha impulsat la construcció d'estacions depuradores d'aigües residuals (EDAR) que complementin la capacitat natural de depuració, restablint les condicions ambientals originals. Diverses operacions unitàries, físiques, químiques i/o biològiques conformen el diagrama de flux d'aquestes EDAR. Una bona gestió de les EDAR hauria de garantir un grau de depuració suficient, abocant l'aigua tractada per sota dels límits legals marcats per la legislació, amb uns mínims costos econòmics, però minimitzant alhora l'impacte ambiental que suposa tota activitat (Vidal et al. 2000a). L'optimització de la gestió de les EDAR s'està atacant des de diferents camps, com ara la instrumentació (ICA 2001), el control (Olsson i Newell 1999), la modelització (Dochain i Vanrolleghem 2001) o la supervisió automàtica del procés basada en coneixement (R.-Roda et al. 2001).

Ara bé, s'ha de tenir en compte que l'etapa de disseny de tot procés és tan o més important que la de gestió, ja que moltes vegades existeixen problemes d'operació causats directament per un disseny inadequat. El disseny de processos és una activitat complexa que està formada per la síntesi, anàlisi i avaluació del diagrama de flux del procés i que a la vegada porta associada al darrere tot un procés de decisió. Tradicionalment, el disseny d'EDAR ha estat més centrat en l'anàlisi i avaluació del diagrama de flux que en la seva síntesi, tot i que aquesta activitat és la que presenta més oportunitats d'incloure aspectes socials, tècnics i ambientals en el procés de decisió (Yang 2000).

El disseny conceptual s'ocupa d'identificar el diagrama de flux que compleix les especificacions inicials de disseny, seleccionant-ne les unitats i totes les interconnexions existents. El procés és llarg i complex, per la gran diversitat d'alternatives generades, cadascuna de les quals s'ha d'avaluar enfront de criteris econòmics, restriccions ambientals, factors tècnics i de seguretat, aspectes socials, etc. S'ha estimat que hi ha de l'ordre d'entre 10^4 a 10^9 maneres alternatives d'aconseguir el mateix objectiu en un problema típic de disseny de processos químics (Douglas 1988). Per tal d'acotar el nombre d'alternatives generades, Douglas proposa un pro-

cés de decisió jeràrquic, fet que implica descompondre el disseny en un nombre de tasques molt més simples i fàcils d'analitzar, incloent successivament un nivell de detall més acurat.

D'altra banda, Smith (1995) mostra una representació diferent del procés de decisió jeràrquic anomenada *the onion model* (Smith and Linnhoff 1988). Aquest model proposa el següent ordre de disseny: primer de tot cal definir l'escenari, és a dir, la problemàtica de disseny juntament amb els objectius que es volen assolir. Tot seguit es comença el procés de disseny en la secció de reacció, ja que és la unitat on les matèries primeres es transformen en productes. El corrent de sortida del reactor inclou productes, subproductes i la resta de reactius que no han reaccionat, fet que implica el disseny d'una unitat de separació i dels possibles corrents de recirculació. Finalment, el conjunt de reactor, el sistema de separació i els corrents de recirculació determinen el disseny del sistema energètic.

A la bibliografia existeixen diversos estudis de disseny centrats en aquest vessant de síntesi de diagrames de flux aplicats a processos químics (Westberg 1989, Grossman i Daichendt 1996, Daichendt et al. 1997). Estudis similars aplicats al camp del tractament d'aigües residuals (R.-Roda et al. 2000, Rodríguez-Roda et al. 2000) mostren els avantatges potencials de treballar amb una eina de suport al disseny de les EDAR. Vidal et al. (2000b) complementen el procés de disseny conceptual amb el suport de la modelització matemàtica del procés.

El propòsit d'aquest estudi és presentar una metodologia per al disseny conceptual d'EDAR. La metodologia combina el procés de decisió jeràrquic amb l'anàlisi multicriteri, fet que facilita la consistència i sistematització del disseny, alhora que permet incloure els aspectes ambientals, socials, econòmics i tècnics des de l'inici del projecte. La jerarquia de decisió segueix l'ordre proposat per Smith. L'aplicació del procés de decisió jeràrquic a les EDAR és possible per les semblances estructurals existents entre aquest tipus de processos i els processos químics: tots dos porten a terme una transformació en el reactor per tal d'obtenir un producte, i d'altra banda les unitats de separació i recirculació també són necessàries.

No obstant això, les EDAR presenten algunes particularitats que impliquen la realització d'algunes modificacions en el procés de disseny proposat per als processos químics. La diferència més important és que la síntesi del diagrama de flux d'un procés químic qualsevol sol generar una gran varietat d'alternatives, ja que porta associat una gran varietat de productes i matèries primeres. En canvi, les EDAR sempre tenen la mateixa funció i per tant sempre presenten un diagrama de flux similar. Com a resultat d'això el disseny d'EDAR comença amb un diagrama de flux establert i és per aquesta raó que en aquest estudi el procés de decisió jeràrquic solament s'aplica per a la selecció de les diferents unitats que constitueixen el diagrama de flux conegut prèviament. Una altra diferència important és que el principal objectiu de tot procés químic és fonamentalment econòmic, encara que cada cop més cal considerar les càrregues associades a l'impacte ambiental. Per contra, el

principal objectiu d'una EDAR és de tipus ambiental, tot i que també cal incloure aspectes tècnics i minimitzar tant els costos econòmics com l'impacte social que pugui esdevenir-se. Finalment, una EDAR rep una matèria primera molt variable tant en qualitat com en quantitat, la qual cosa fa que en el seu disseny s'hagi de donar èmfasi especial als aspectes de control de procés i flexibilitat.

L'estructura de l'article és la següent: primer es presenta la metodologia proposada per a la síntesi de diagrames de flux d'EDAR, després es mostra un exemple d'aplicació del disseny hipotètic d'una EDAR amb els mateixos requeriments que l'EDAR de Granollers, i finalment es presenten les conclusions de l'estudi.

METODOLOGIA

Aquesta secció presenta els diferents passos que segueix la metodologia proposada per a la síntesi de diagrames de flux d'EDAR.

- La primera etapa d'aquesta metodologia consisteix a recollir la informació de partida, és a dir, la futura localització de la planta, l'aigua residual que s'ha de tractar i el medi receptor. D'altra banda, es defineixen els objectius de disseny, considerant tant els límits marcats per la legislació com el cost social, econòmic i ambiental provocat per la construcció i operació de la planta. Aquests objectius inicials se solen anar refinant a mesura que el procés de disseny avança.
- D'acord amb aquests objectius sorgeixen les qüestions que cal decidir. Com ja s'ha justificat en la introducció, aquestes qüestions sempre són respecte del tipus d'unitat que constituirà el diagrama de flux i mai sobre l'estructura del diagrama de flux en si mateix. L'ordre d'aquestes qüestions segueix una lògica basada en el procés jeràrquic que Smith i Linnhoff van desenvolupar per portar a terme el procés de disseny conceptual. El procés de disseny proposat per a les EDAR s'aplica per separat a la línia d'aigües i a la línia de fangs, tot i que es tenen en compte les interconnexions existents. Per al cas de la línia d'aigües s'inicia amb la selecció del reactor biològic juntament amb totes les unitats que en formen part. Tot seguit se seleccionen les seccions de separació, és a dir, el pretractament, decantador primari i secundari situats abans i després del reactor biològic, respectivament. Finalment se selecciona la purga del fang biològic en excés i la recirculació d'aquest en el reactor biològic. L'ordre de les qüestions per a la línia de fangs és el mateix, el disseny comença amb la selecció del reactor, en aquest cas l'estabilització dels fangs en excés. Tot seguit se seleccionen les seccions de separació, és a dir, l'espesseïment i la deshidratació del fang, situades respectivament abans i després de l'estabilització. Finalment se selecciona la recirculació del sobrenedant generat i l'abocament del fang tractat.
- Per a cada qüestió es generen diferents alternatives, proposades com a solucions possibles. Per tal de resoldre cada qüestió, s'ha de seleccionar una de les alternati-

ves proposades i d'aquesta decisió dependran les noves qüestions plantejades. Tot el procés de disseny, és a dir, el conjunt de qüestions i alternatives, es representa en forma d'una xarxa de decisió (vegeu figura 1).

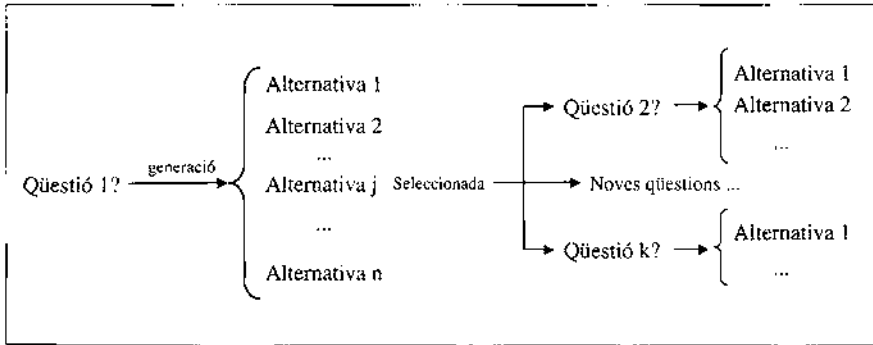


Figura 1: Esquema general d'una xarxa de decisió.

- L'avaluació i selecció de les alternatives es fa en funció d'un conjunt de criteris. Tots els criteris triats per avaluar cadascuna de les qüestions han d'estar relacionats amb els objectius de disseny proposats. Tenint en compte la naturalesa dels objectius de disseny d'una EDAR, els criteris han de ser de tipus econòmic, social, tècnic i ambiental.
- El mètode proposat per tal d'avaluar les alternatives de disseny s'anomena SMART (*simple multiattribute rating technique*) i s'engloba en la teoria d'anàlisi multicriteri basada en les funcions de valor (Edwards 1977). Aquest mètode primer quantifica l'efecte dels criteris enfront de les alternatives mitjançant les funcions de valor. Aquestes funcions representen matemàticament les preferències d'un grup d'experts i tenen l'objectiu de convertir els valors que les alternatives avaluades obtenen d'un criteri determinat en un efecte normalitzat entre 0 i 1, associat amb la pitjor i millor situació respectivament. Els valors dels criteris s'han obtingut utilitzant diferents fonts, com ara la modelització matemàtica del procés, estimacions econòmiques, manuals de disseny i reunions amb experts en el camp d'aplicació. Les funcions de valor poden tenir diverses formes i per tal de representar-les matemàticament existeixen diversos mètodes (Von Winterfeldt D. and W. Edwards 1986). La figura 2 mostra un exemple de la forma que podria tenir una funció de valor on es representa l'efecte en funció dels valors presos del criteri 1.
- Alhora, la metodologia proposada dona diferents graus d'importància als criteris mitjançant l'assignació de pesos. Els pesos poden ser assignats directament per un grup d'experts.

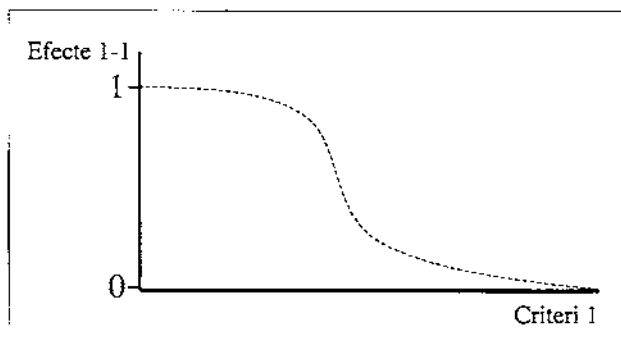


Figura 2: Funció de valor referent al criteri 1.

– Per tal d'obtenir una puntuació per cada alternativa, es realitza una suma ponderada, és a dir, se suma el producte de cada valor obtingut mitjançant les funcions de valor pel pes del criteri enfront del que s'ha avaluat. Les alternatives s'ordenen d'acord amb la puntuació obtinguda a partir de l'avaluació. L'alternativa amb una puntuació més elevada és la decisió recomanada per tal de solucionar la qüestió plantejada en el procés de disseny. La taula 1 mostra un quadre resum amb tots els factors que intervenen en cada decisió.

QÜESTIÓ 1	Alternativa 1	Alternativa 2	...	Alternativa n	Pes
Criteri 1	Efecte 1-1	Efecte 1-1	...	Efecte 1-1	Pes 1
Criteri 2	Efecte 2-1	Efecte 2-1	...	Efecte 2-1	Pes 2
...
Criteri m	Efecte m-1	Efecte m-1	...	Efecte m-1	Pes m
Puntuació
Decisió	Descartada	Seleccionada	...	Descartada	...

Taula 1. Resolució de cada qüestió en funció de les alternatives generades, els criteris seleccionats, els seus efectes i el pes assignats.

– Tot aquest procés de decisió es realitza uniformement per a cada qüestió fins a arribar a completar tota l'estructura del diagrama de flux de cadascuna de les línies de tractament de l'EDAR.

Per tal de donar suport a aquesta metodologia es proposa la utilització d'una eina de suport informàtic que faciliti la sistematització del procés de disseny, permetent enregistrar els objectius que guien el disseny, les alternatives proposades per resoldre les qüestions i el grau amb què aquestes alternatives compleixen els objectius, com també la quantificació dels efectes i els pesos que permeten resoldre cadascun dels nodes de la xarxa global que constitueix tot el procés de disseny.

CAS D'ESTUDI

Per tal de presentar la metodologia de disseny proposada es mostra l'exemple de com aplicar-la al disseny d'una EDAR amb els mateixos requeriments que la planta existent al municipi de Granollers. Aquests requeriments solament es refereixen a la informació de partida que s'ha de definir en començar el procés de disseny, és a dir, la localització de la planta, l'aigua residual que s'ha de tractar i el medi receptor.

La localització de l'EDAR és el polígon industrial de Granollers i aboca les aigües tractades al riu Congost, a la conca del Besòs. D'altra banda, en aquesta primera etapa de la metodologia de disseny també cal definir els objectius. El principal objectiu de disseny proposat és assolir els límits marcats per la Directiva europea 91/271 de la CEE referent a l'abocament d'aigua tractada i fang, mentre es minimitzen els problemes tècnics, els costos de construcció i operació, i també es redueixen els impactes ambientals i socials. La xarxa d'objectius concrets plantejats per al cas d'estudi es mostra a la taula 2.

OBJ1	Complir els límits marcats per la Directiva europea 91/271 de la CEE per a l'aigua tractada:				
	<table> <tbody> <tr> <td>1. $DBO_5 < 25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$</td> <td>3. $SS < 35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$</td> </tr> <tr> <td>2. $DQO < 125 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	1. $DBO_5 < 25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$	3. $SS < 35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$	2. $DQO < 125 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$	
1. $DBO_5 < 25 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$	3. $SS < 35 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$				
2. $DQO < 125 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$					
OBJ2	Minimitzar problemes tècnics:				
	<table> <tbody> <tr> <td>1. Flexibilitat</td> <td>3. Control</td> </tr> <tr> <td>2. Robustesa</td> <td>4. Compatibilitat entre unitats</td> </tr> </tbody> </table>	1. Flexibilitat	3. Control	2. Robustesa	4. Compatibilitat entre unitats
1. Flexibilitat	3. Control				
2. Robustesa	4. Compatibilitat entre unitats				
OBJ3	Minimitzar els costos de construcció i operació.				
OBJ4	Minimitzar l'impacte ambiental:				
	<table> <tbody> <tr> <td>1. Consum energètic i matèries primeres</td> </tr> <tr> <td>2. Emissions a l'atmosfera</td> </tr> <tr> <td>3. Producció de fangs</td> </tr> </tbody> </table>	1. Consum energètic i matèries primeres	2. Emissions a l'atmosfera	3. Producció de fangs	
1. Consum energètic i matèries primeres					
2. Emissions a l'atmosfera					
3. Producció de fangs					
OBJ5	Minimitzar l'impacte social:				
	<table> <tbody> <tr> <td>1. Ocupació del sòl</td> <td>3. Soroll</td> </tr> <tr> <td>2. Impacte visual</td> <td>4. Olors</td> </tr> </tbody> </table>	1. Ocupació del sòl	3. Soroll	2. Impacte visual	4. Olors
1. Ocupació del sòl	3. Soroll				
2. Impacte visual	4. Olors				
OBJ6	Complir els límits fixats per la Directiva europea 91/271 de la CEE per a l'abocament de fang:				
	<table> <tbody> <tr> <td>1. Deshidratar i estabilitzar el fang</td> </tr> <tr> <td>2. Sequedat del fang $> 75 \%$</td> </tr> <tr> <td>3. $SSV < 40 \%$</td> </tr> </tbody> </table>	1. Deshidratar i estabilitzar el fang	2. Sequedat del fang $> 75 \%$	3. $SSV < 40 \%$	
1. Deshidratar i estabilitzar el fang					
2. Sequedat del fang $> 75 \%$					
3. $SSV < 40 \%$					

Taula 2. Xarxa dels objectius de disseny.

A partir d'aquests objectius sorgeixen les qüestions que cal decidir. Ja s'ha explicat amb anterioritat que el disseny s'ha subdividit d'acord amb les dues línies de tractament existents, la d'aigües i la de fangs. Per cada línia s'ha seguit el procés de decisió jeràrquic esmentat amb anterioritat, amb l'ordre següent: primer la secció de reacció, després la de separació i finalment la de recirculació i purga. Per resoldre cadascuna d'aquestes qüestions es generen dues o més alternatives que s'han d'avaluar per tal d'escollir-ne una i passar a la següent qüestió. La taula 3 recull les 25 qüestions plantejades, així com el conjunt d'alternatives generades per tal de completar tot el diagrama de flux de l'EDAR de l'estudi.

QÜESTIONS	ALTERNATIVES
Línia d'aigües: reactor biològic	
Quin tipus de reactor?	Flux pistó Mescla completa Carousel
Quin tipus d'aportació d'aire?	Difusors Turbines
Quin tipus de difusor?	Membrana Ceràmic
Incloure control d'oxigen?	Sí No
Quin tipus de consignació d'oxigen?	Fixa al llarg del reactor Esglaonada al llarg del reactor
Incloure selector?	Sí No
Quin tipus de selector?	Aerobi Anòxic Anaerobi
Línia d'aigües: secció de separació prèvia al reactor	
Incloure pretractament?	Sí No
Incloure desbast de gruixuts?	Sí No
Incloure dessorrador?	Sí No
Quin tipus?	Vòrtex Dessorrador airejat
Incloure homogeneïtzador?	Sí No

Incloure tractament primari?	Sí No
Forma del decantador primari?	Circular Rectangular
Línia d'aigües: secció de separació posterior al reactor	
Geometria del decantador secundari?	Circular Rectangular
Tipus de decantador secundari?	Succió Rasquetes
Línia d'aigües: secció de recirculació i purga	
Incloure recirculació externa?	Sí No
Incloure recirculació interna?	Sí No
Tipus de bombes?	Centrífugues Cavitat progressiva
Línia de fangs: secció de reacció	
Tipus d'estabilització del fang?	Aeròbia Anaeròbia Estabilització química
Línia de fangs: secció de separació prèvia al reactor	
Tipus d'espesseïdor per als fangs primaris?	Gravetat Flotació
Tipus d'espesseïdor per als fangs secundaris?	Gravetat Flotació
Línia de fangs: secció de separació posterior al reactor	
Tipus de deshidratació?	Filtres banda Filtres al buit Filtres premsa Centrífugues
Línia de fangs: recirculació i purga	
Recircular el sobrenedant?	Sí No
Abocament dels fangs?	Agricultura Abocador Restauració

Taula 3. Llista de qüestions i alternatives generades per al disseny de la línia d'aigües i la línia de fangs de l'EDAR.

Seguidament cal seleccionar els criteris a partir dels quals s'avaluarà el conjunt d'alternatives generades. Els criteris triats per al disseny de l'EDAR del cas d'estudi s'han classificat en quatre grans tipus: econòmics, socials, tècnics i ambientals. A la taula 4 es presenta aquesta classificació.

CRITERIS AMBIENTALS

Consum energètic
Consum de recursos naturals
Producció de fang
Qualitat del sobrenedant
Qualitat de l'efluent
Qualitat del fang

CRITERIS TÈCNICS

Sensibilitat al xoc de càrrega
Creixement de bacteris filamentosos
Eficiència d'eliminació de matèria orgànica
Compatibilitat entre diferents unitats del procés
Flexibilitat
Eliminació de patògens al fang
Eliminació de sòlids volàtils al fang
Control del procés

CRITERIS ECONÒMICS

Cost d'inversió
Cost de manteniment
Cost d'operació
Cost d'abocament del fang

CRITERIS SOCIALS

Ocupació del sòl
Olores
Soroll
Impacte visual

Taula 4. Conjunt de criteris triats per al disseny de l'EDAR, classificats en ambientals, tècnics, econòmics i socials.

Per obtenir els valors dels criteris per cadascuna de les alternatives s'han fet servir diverses fonts. La informació relacionada amb l'operació de l'EDAR s'ha obtingut d'un programa simulador d'EDAR. Concretament, per modelitzar les reaccions biològiques s'ha utilitzat el model núm. 1 de fangs actius IAWPRC (Henze et al. 1987) i un model unidimensional de deu capes per modelitzar els processos de sedimentació (Takács et al. 1991). Generalment, la informació de l'operació de la planta ha estat utilitzada per obtenir valors de criteris de tipus ambientals i tècnics.

Per tal d'obtenir valors de criteris de tipus econòmic s'han realitzat estimacions econòmiques amb l'ajut del programa CapdetWorks 1.01 desenvolupat per Hydromantis, Inc. CapdetWorks és una eina de suport que permet realitzar estimacions econòmiques per al disseny d'EDAR en una fase preliminar mitjançant diferents algorismes (Harris R.W. 1982). CapdetWorks també permet obtenir informació de disseny, ja siguin volums, paràmetres de disseny, nombre d'equips necessaris, etc. D'aquesta manera també es poden obtenir valors del criteri d'ocupació del sòl, considerat en aquest estudi com a criteri social.

Amb l'ajut de manuals de disseny (WEF 1992) i diverses reunions amb experts, s'han aconseguit valors de criteris de tipus ambientals, tècnics, econòmics i socials no obtinguts amb les eines descrites anteriorment.

Un cop s'han aconseguit els valors dels criteris per a cada alternativa, s'aplica el mètode SMART descrit a la metodologia. Primer s'han construït les funcions de valor per tal de convertir el valor de cada criteri en un efecte normalitzat entre 0 i 1. Es construeix una funció de valor per a cadascun dels criteris seleccionats per tal d'avaluar les alternatives a una qüestió determinada. El primer pas per construir una funció de valor ha estat seleccionar un rang de valors d'un criteri determinat que vagi des de la pitjor situació en la qual es poden trobar les alternatives fins a la millor. Com a segon pas es realitza una aproximació qualitativa de la forma de la funció. Tot seguit s'assignen valors entre 0 i 1 als valors del criteri escollits com a rang.

Un cop construïdes les funcions de valor es dona importància als criteris mitjançant l'assignació de pesos. Seguint amb l'aplicació del mètode SMART, aquesta assignació de pesos es fa també mitjançant l'assignació directa, on primer de tot s'han ordenat els criteris de menys a més importants assignant un pes de 10 al criteri considerat com a menys important. Tot seguit s'han assignat pesos a la resta de criteris agafant com a referència el criteri escollit prèviament com a menys important. Finalment s'han sumat tots els pesos i s'ha dividit cadascun d'ells per aquesta suma multiplicant-los per 100. Tant l'assignació de valors per tal de representar les funcions com l'assignació dels pesos als diferents criteris també s'ha realitzat mitjançant reunions amb experts en el camp del tractament d'aigües residuals.

Finalment, a través de la suma ponderada s'obté un valor per cada alternativa i l'alternativa amb la puntuació més elevada és la recomanada per solucionar la qüestió plantejada. Aquest procés es repeteix sistemàticament per a totes les qüestions, fins a completar el disseny de l'EDAR.

Aquesta metodologia de disseny ha estat implementada amb el suport d'un programa informàtic anomenat DRAMA (*Design rationale management system*) (Brice et al. 1998). L'ús d'aquest sistema de suport permet enregistrar informàticament els objectius inicials de disseny com també el refinament d'aquests objectius en etapes més avançades del procés, l'ordre de les qüestions generades, les alternatives generades per tal de resoldre aquestes qüestions, els criteris seleccionats que cal tenir en compte en l'avaluació de les alternatives, la relació entre els criteris escollits per cada qüestió amb els objectius de disseny, la manera com s'ha realitzat l'avaluació de les alternatives en totes les qüestions que cal solucionar i les alternatives seleccionades en cada cas. També facilita l'avaluació de les alternatives, permetent d'una banda realitzar els càlculs necessaris per tal d'obtenir una puntuació per cada alternativa i de l'altra introduir paràmetres per tal d'avaluar les alternatives de disseny. Aquests paràmetres poden ser valors o bé funcions i poden ser assignats directament per la persona que avalua o ser importats d'altres softwares (per exemple bases de dades o programes de simulació). Una altra possibilitat que ofereix el sistema de suport informàtic és la d'associar paràmetres que permetin que una alternativa escollida com a solució d'una qüestió prèvia condicioni l'avaluació d'una qüestió posterior.

Encara que per raons d'espai no podem mostrar detalladament la informació associada a tot el procés de disseny, sí que volem mostrar un exemple del procediment seguit per resoldre la primera de les qüestions plantejades: tipus de reactor de la línia d'aigües (vegeu taula 3).

Primerament s'han generat les alternatives que cal avaluar, en aquest cas tres, i que preveuen la possibilitat de triar un reactor de flux pistó, de mescla completa o de carrousel. Per tal d'avaluar aquests tres tipus de reactor s'ha triat un conjunt de criteris de la llista de la taula 4. Els criteris escollits han estat de tipus ambiental, com és el consum energètic; de tipus tècnic, com la sensibilitat al xoc de càrrega, el creixement de bacteris filamentosos, l'eficiència d'eliminació de matèria orgànica i la flexibilitat; de tipus econòmic, com són el cost d'inversió, el cost de manteniment i el cost d'operació; i finalment de tipus social, com és l'ocupació del sòl.

A la figura 3 es pot observar la interfície del sistema de suport, on s'ha enregistat i avaluat la totalitat d'alternatives generades. En aquesta pantalla s'observa una matriu on les columnes representen les alternatives que cal avaluar i les files representen els criteris enfront dels quals s'han avaluat les alternatives. A l'última columna es troben representats els pesos o la importància de cadascun dels criteris.

Els valors dels criteris de consum energètic, xoc de càrrega i eficiència de matèria orgànica s'han obtingut a partir del programa simulador de plantes de tractament d'aigües residuals GPS-X. D'altra banda, els valors dels criteris de creixement de bacteris filamentosos i la flexibilitat s'han obtingut a partir de reunions amb experts en el camp de les aigües residuals. Finalment, els valors dels criteris de cost d'inversió, manteniment i operació, com també l'ocupació del sòl, s'han obtingut a partir del programa CapdetWorks. Cada criteri porta associada una funció de valor

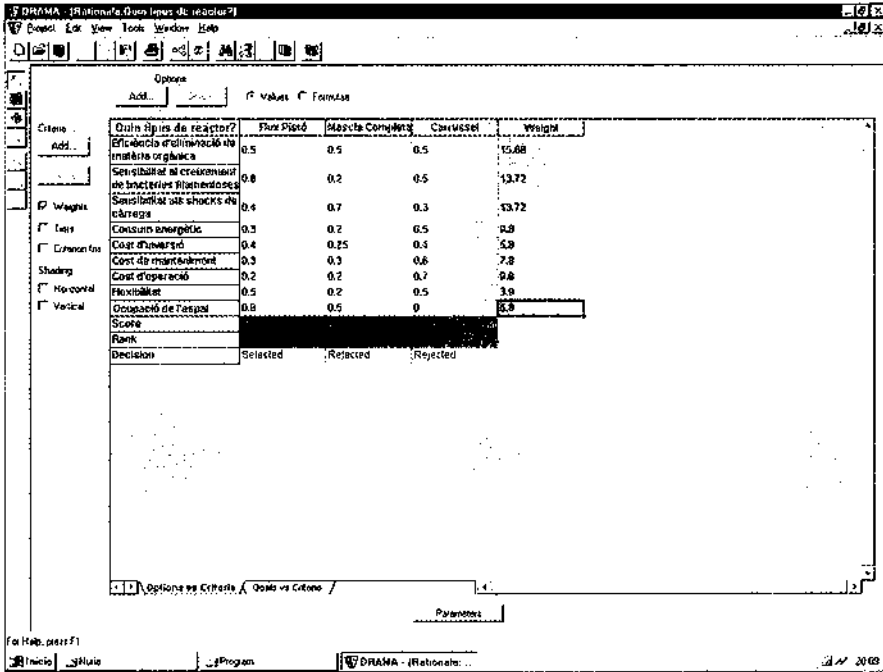


Figura 3: Avaluació d'alternatives amb l'ajut del sistema de suport utilitzat.

(similar a la de la figura 2) per tal de convertir els valors que les alternatives obtenen de cada criteri en un efecte normalitzat entre 0 i 1.

Els pesos han estat assignats per un grup d'experts en el camp del tractament d'aigües residuals seguint amb el mètode d'assignació directa explicat a la secció de la metodologia. Tal com s'observa a la figura 3, els criteris amb una major importància han estat el d'eliminació de matèria orgànica, seguit de la sensibilitat al creixement de filaments i la resistència al xoc de càrrega. Aquests criteris afecten directament el bon funcionament de l'EDAR. Tot seguit es considera el consum energètic i el cost de l'operació, criteris que afecten l'optimització del funcionament de l'EDAR. El cost de manteniment, el cost d'inversió i l'ocupació de l'espai prenen una menor importància i, finalment, hi ha la flexibilitat del procés. La flexibilitat és un criteri que també afecta el funcionament de l'EDAR però d'una manera menys immediata, ja que va lligat amb situacions futures davant les quals es pot trobar la instal·lació.

Amb tota aquesta informació el sistema de suport realitza la suma ponderada i recomana l'alternativa amb una puntuació més elevada per solucionar la qüestió plantejada. En aquest cas l'alternativa seleccionada ha estat la de flux pistó, per davant del tipus carrousel i de la configuració de mescla completa. Tal com s'observa a la figura 3, el reactor seleccionat ha estat el de tipus flux pistó. Per una mateixa eficiència

d'eliminació, el reactor de tipus flux pistó presenta una menor sensibilitat al creixement de filamentosos que el mescla completa i el carrousel. D'altra banda, el mescla completa presenta una major resistència al xoc de càrrega. Pel que fa al consum energètic, el cost d'operació i el cost de manteniment, el reactor tipus carrousel és el que presenta els millors resultats. Els reactors tipus flux pistó i carrousel presenten un cost d'inversió menor i una major flexibilitat que el mescla completa, però d'altra banda el reactor flux pistó és el que presenta una menor ocupació de l'espai.

Tal com s'ha mostrat en aquest exemple, s'ha resolt la totalitat de preguntes que han anat sorgint al llarg del procés de disseny, fins a completar l'estructura final del diagrama de flux de la planta de tractament d'aigües residuals. Tot seguit es presenta la llista de les unitats que conformen el diagrama de flux resultant:

– Pel que fa a la línia d'aigües:

1. S'ha seleccionat el reactor tipus flux pistó amb aportació d'aire mitjançant difusors de membrana i s'ha instal·lat el control d'oxigen amb punt de consignació esglaonat al llarg del reactor. Prèviament a l'entrada del reactor s'ha inclòs un selector de tipus anòxic.
2. Prèviament al reactor, s'ha seleccionat un pretractament amb desbast de gruixuts i dessorrador airejat, també s'ha inclòs homogeneïtzador. S'ha inclòs també tractament primari amb decantadors circulars.
3. Posterior al reactor, s'ha seleccionat un tipus de decantador secundari circular amb recollida del fang mitjançant succió.
4. Finalment s'ha seleccionat recirculació externa i interna. El tipus de bombes són centrífugues.

– Pel que fa a la línia de fangs:

1. S'ha seleccionat un tipus d'estabilització del fang anaeròbia.
2. Prèviament a l'estabilització s'ha seleccionat espesir els fangs primaris mitjançant espesidors per gravetat i els fangs secundaris mitjançant espesidors per flotació.
3. Posterior a l'estabilització del fang s'ha seleccionat realitzar una deshidratació mitjançant centrífugues.
4. S'ha escollit recircular el sobrenedant i abocar els fangs a l'agricultura.

CONCLUSIONS

El disseny i l'operació de les plantes de tractament d'aigües residuals estan fortament influïts per aspectes ambientals, econòmics, socials i tècnics. La metodologia de disseny presentada en aquest estudi ha permès tenir en compte tots aquests aspectes d'una manera sistemàtica.

El procés de decisió jeràrquic ens marca l'ordre lògic de tots els passos que cal seguir en el disseny i d'aquesta manera s'aconsegueix obtenir-ne tota una sistemàtica. A més a més, l'etapa de síntesi de processos o disseny conceptual és l'etapa de disseny que presenta més oportunitats d'incloure criteris de qualsevol tipus, ja que és en aquesta etapa on el disseny encara no està gaire avançat i per tant porta associada una gran flexibilitat.

Integrant diferents eines per tal d'obtenir l'efecte de les diferents alternatives de disseny com són la modelització matemàtica, les estimacions econòmiques, els manuals de disseny i les reunions amb experts, ens ha permès obtenir una bona informació per tal d'avaluar les alternatives de disseny.

Gràcies a l'aplicació d'un mètode d'anàlisi multicriteri, hem pogut obtenir un mateix protocol per tal d'avaluar les alternatives de disseny en cadascuna de les qüestions generades i d'aquesta manera donar una major consistència i sistemàtica al procés de disseny.

Finalment, el fet d'implementar tota aquesta metodologia amb l'ajut d'una eina de suport al disseny ens ha permès enregistrar tot el procés millorant la possible comunicació i coordinació entre participants, com també futurs redissenys deguts a canvis en la legislació, tecnologia, capacitat de la planta, etc.

Agraïments:

A Gabriela Poch, Ricard Tomàs, Jordi Robusté i David Güell, components actius de les reunions d'experts celebrades a la Universitat de Girona amb motiu del present treball.

Nomenclatura:

DBO₅ Demanda bioquímica d'oxigen

DQO Demanda química d'oxigen

SS Sòlids en suspensió

SSV Sòlids en suspensió volàtils

Bibliografia:

- BRIECE, A., JOHNS, W., CASTELL, C., BAÑARES-ALCANTARA, R., LEBoulleoux, P. i SELLIN, L. 1998. Improving process design by improving the design process. AIChE Annual Meeting. Miami, EUA..
- DAICHENDT, M. i GROSSMAN, I. E. 1997. Integration of hierarchical decomposition and mathematical programming for the synthesis of process flowsheets. *Comput. Chem. Eng.* 22(1-2): 147-175.
- DOCHAIN D., VANROLLEGHEM P. 2001. Dynamical Modelling & Estimation in Wastewater Treatment Processes.

- DOUGLAS, J. 1988. *Conceptual design of chemical processes*. McGraw-Hill Book Company.
- EDWARDS, W. 1977. How to use multiattribute utility measurement for social decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-7, 326-40.
- GROSSMAN, J. E. i DAICHENDT, M. M. 1996. New trends in optimisation-based approaches to process synthesis. *Comput. Chem. Eng.* 20: 665.
- HARRIS, R.W., CULLINANE J., PAUL T. 1982. *Process Design and Cost Estimating Algorithms for the Computer Assisted Procedure for Design and Evaluation of Wastewater Treatment Systems (CAPDET Design Manual)*. U.S. Environmental Protection Agency.
- HENZE, M., C. P. L. Jr. GRADY, W., GUJER G. i R. MARAIS i T. MATSUO. 1987. *Activated Sludge Model No. 1*, IAWPRC Scientific and Technical Reports, 1, IAWPRC, Londres.
- IAWQ Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes. 1995. "Activated sludge Model No. 2". International Association on Water Quality. Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Biological Wastewater Treatment Processes.
- ICA 2001, Proceedings of the 1st IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, Malmö (Suècia).
- LEIN, J.K. 1997. *Environmental Decision Making. An Information Technology Approach*, Blackwell Science, Ltd, Malden (MA), EUA.
- Metcalf & Eddy, Inc. revised by George Tchobanoglous, 1991. *Wastewater engineering treatment, disposal, reuse*. 3rd ed. revised by George Tchobanoglous, Franklin L. Burton. McGraw-Hill. Nova York.
- OLSSON, G., NEWELL B. 1999. *Wastewater Treatment Systems Modelling, Diagnosis and Control*.
- R.-RODA, I., COMAS, J., COLPRIM, J., POCH, M., SANCHEZ-MARRE, M., CORTÉS, U., BAEZA, J. i LAFUENTE, J. 2001. A hybrid supervisory system to support wastewater treatment plant operation. *Wat. Sci. Tech* (en premsa).
- R.-RODA, I., POCH, M. i BAÑARES-ALCANTARA, R. 2000. Application of a support system to the design of wastewater treatment plants. *Artif. Intell. Eng.* 14: 45-61.
- RODRIGUEZ-RODA, I., POCH, M., i BAÑARES-ALCANTARA, R. 2000. Conceptual design of wastewater treatment plants using a design support system. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 75: 73-81.
- SMITH, R., i LINNHOFF, B., 1988. The design of separators in the context of overall processes, *Trans. IChemE, ChERD*, 66: 195.
- SMITH, R. 1995. *Chemical Process Design*. McGraw-Hill.
- TAKACS, I., PATRY, G. G. and NOLASCO, D. 1991. A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water Research*. 25 (10): 1263-1271.
- VON WINTERFELDT, D., W. EDWARDS, 1986. *Decision Analysis and Behavioral Research*, Cambridge University Press, Cambridge.
- WEF Manual or Practice N° 8. ASCE Manual and Report on Engineering Practice N° 76. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, 1992.

- VIDAL, N., POCH, M., MARTI, E., R.-RODA, I. 2000a. Evaluation of the environmental implications to include structural changes in a wastewater treatment plant. *Enviat al J. Chem. Tech. Biotechnol.*
- VIDAL, N., R.-RODA, I., BAÑARES-ALCANTARA, R., POCH, M. 2000b. Design of wastewater treatment plants using a conceptual design methodology. *Enviat a l'Industrial & Engineering Chemical Research.*
- WESTERBERG, A. W. 1989. Synthesis in engineering design. *Comput. Chem. Eng.* 13(3/4): 365.
- YANG, Y. 2000. Integrating environmental impact minimization into conceptual chemical process design-a process systems engineering review. *Comput. Chem. Eng.* 24: 1409-1410.