

Modelització de l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals de Granollers

Guillermo Iriondo Frias

Resum

Aquest projecte s'emmarca dins els sistemes de sanejament i forma part del projecte GEISTAR finançat pel *Ministerio de Economía y Competitividad* (MINECO) (CTM2011-27163) liderat per la investigadora Maite Pijuan, el qual té l'objectiu d'estudiar la formació de gasos d'efecte hivernacle que es produeixen en Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDARs), concretament en el reactor biològic. Una tasca dins el projecte, liderada per l'investigador Lluís Corominas, és la modelització de processos biològics en l'EDAR de Granollers per ajudar a entendre els mecanismes de degradació de matèria orgànica i nitrogen. Aquest treball estableix les bases per poder realitzar aquesta modelització en estat estacionari, seguint els passos proposats pel Good Modelling Practice (GMP) Task Group de la IWA. Els objectius específics que es proposen són l'anàlisi i estudi dels resultats del test de traçadors realitzat per l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) i realitzar una bona recopilació de dades sobre l'EDAR de Granollers per facilitar els estudis posteriors a aquest projecte.

Introducció

L'augment de la preocupació en la conservació del medi ambient ha fet de les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDARs) unes de les infraestructures més necessàries per mantenir l'equilibri i qualitat dels medis aquàtics.

La creació de models que representen els processos biològics que es produeixen durant el tractament d'aigües residuals són una bona eina per resoldre els problemes als quals s'enfronten els enginyers. La modelització permet l'anàlisi dels processos bioquímics sense intervenir en la depuradora real. Per tant, utilitzant simuladors com SIMBA, WEST, BioWin, etc. que integren els models existents (ASM1, ASM2, ASM3, etc) es poden realitzar investigacions i crear nous escenaris d'estudi només utilitzant dades de disseny, analítiques i operacionals de la planta. A més, aquesta eina permet optimitzar les operacions de les depuradores i reduir els costos econòmics i l'esforç de treball. Per altre banda, la modelització també constitueix un instrument d'ajuda de decisió per als administradors de les depuradores i és un mitjà de formació de futurs enginyers i operadors.

El primer model de fangs actius es va desenvolupar l'any 1987. Aquest primer model es va anomenar ASM1 (Activated Sludge Model) i es basa en l'eliminació de carboni i nitrogen. Va demostrar ser una excel·lent eina per a la modelització i caracterització de les aigües residuals. Tot i que aquest model es continua utilitzant actualment, s'han desenvolupat nous models que inclouen altres processos a més de l'eliminació de carboni i nitrogen. L'ASM2 inclou l'eliminació de fòsfor i l'ASM2d es va crear en base a l'ASM2 però afegeix les reaccions de desnitrificació dels organismes acumuladors de fòsfor (PAO). L'ASM3 es basa en els mateixos processos que l'ASM1 però introdueix nous conceptes, com per exemple la introducció de la respiració endògena dels microorganismes.

També s'han desenvolupat altres models que inclouen el càlcul del pH o processos més complexos. La complexitat d'un model està associada als número de variables d'estat i reaccions que considera. En la taula I es presenten els model que existeixen actualment i els components i processos bioquímics que simulen.

Models	Nitrificació + desnitrificació	Eliminació biològica de fòsfor (BioP)	Variables d'estat (components)	Processos
ASM1	X		13	8
ASM2	X	X	19	19
ASM2d	X	X	19	21
ASM3	X		13	12
ASM3+BioP	X	X	17	23
B&D	X	X	19	36
TUDP	X	X	17	21
ASM2d+pH	X	X	23	23
ASM1+pH	X		16	10

Taula I: Visió general dels models de fangs actius
Font: Gernaey et al. 2004

Un model és una representació d'un sistema real mitjançant equacions matemàtiques que s'agrupen en un software degut a la seva complexitat.

Les dades analítiques o observacions del món real no es poden introduir directament en les equacions del model ja que aquest només reconeix un conjunt de variables d'estat. Per tant, es requereix un procés de conversió de les dades experimentals o reals a les variables d'estat que utilitza el model per fer la simulació (figura I).

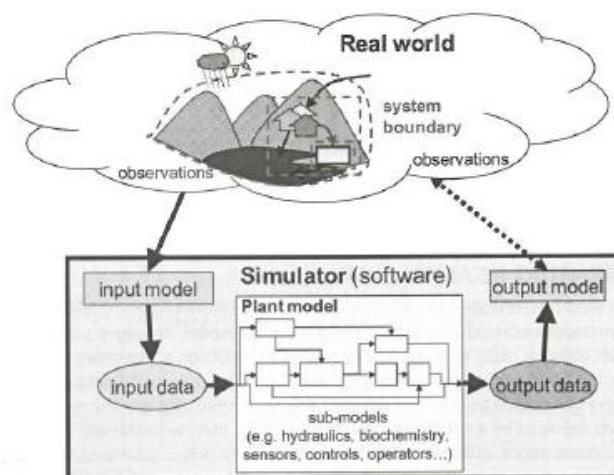


Figura I: Relacions entre el món real i el model
Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models

El model més senzill i utilitzat en aquest estudi és Activated Sludge Models 1 (ASM1). Aquest model simula els processos que intervenen en l'eliminació de matèria orgànica i nitrogen. Les variables que utilitza ASM1 per simular els processos bioquímics es presenten en la taula II. Aquestes variables d'estat no poden ser mesurades amb les tècniques analítiques actuals i per tant, es realitza un fraccionament per passar dels valors analítics (per exemple DQO i compostos nitrogenats) als valors de les variables d'estat proposades.

Components	Solubilitat	Variable d'estat	Concepte
Orgànics	Solubles	S_S	Substrat fàcilment biodegradable
		S_I	Matèria orgànica soluble inerta
		X_S	Substrat lentament biodegradable
	Particulats	X_I	Matèria orgànica particulada inerta
		X_P	Productes orgànics particulats
		X_{BA}	Organismes nitrificants
Nitrogenats	Solubles	X_{BH}	Organismes heterotròfics
		S_{ND}	Nitrogen orgànic soluble
		S_{NH}	Amoni i nitrogen amoniacal
	Particulats	S_{NO}	Nitrats i Nitrits
		X_{ND}	Nitrogen orgànic biodegradable particulat
		S_O	Oxigen dissolt
Altres	Solubles	S_{ALK}	Alcalinitat

Taula II: variables d'estat d'ASM1
Font: elaboració pròpia

En la figura II s'exposen els processos que simula ASM1 amb les anteriors variable. Es poden agrupar en 4 processos principals: creixement dels microorganismes, decreixement dels microorganismes, amonificació i hidròlisis.

Durant el creixement dels microorganismes, els bacteris heteròtrofs poden créixer en condicions aeròbiques, utilitzant l'oxigen com acceptor d'electrons (1) o en condicions anòxiques, utilitzant els nitrats com acceptors d'electrons (2). Durant el seu desenvolupament

consumeixen la matèria orgànica fàcilment biodegradable (S_s), que pot provenir de l'aigua residual o originar-se durant la hidròlisi (7) de la matèria orgànica lentament biodegradable (X_s). Els microorganismes autòtrofs només poden créixer en condicions aeròbiques (aeròbics obligats) consumint l'amoni (3) procedent de l'aigua residual o originat durant els processos consecutius d'hidròlisi del nitrogen orgànic (8) i amonificació (6).

Quan hi ha escassetat de substrat la població de microorganismes comença a disminuir. Durant la mort cel·lular es produeix el trencament de les membranes cel·lulars (lisi) alliberant (4 i 5) matèria orgànica particulada (X_p , X_s , X_{ND}) a l'aigua. Per una banda la fracció de X_p és eliminada durant la purga dels fangs, però X_s i X_{ND} són fraccions que mitjançant les reaccions corresponents (6, 7 i 8) es transformaran en substrat per les cèl·lules, permetent la regeneració cel·lular.

El procés d'amonificació és la conversió (6) dels compostos orgànics nitrogenat solubles (S_{ND}) a amoni (S_{NH}). Aquests compostos són degradats per microorganismes que utilitzen les proteïnes i aminoàcids de l'aigua per formar les proteïnes que necessiten, alliberant l'excés de nitrogen amb forma d'amoniac (NH_3) o amoni (NH_4^+).

Els compostos particulats (X_s i X_{ND}) són substrat que no pot ser assimilat pels microorganismes degut al seu tamany. Per això, aquestes fraccions són degradades mitjançant processos d'hidròlisi extracel·lular per obtenir compostos més senzills (S_s i S_{ND}) i disponibles pels microorganismes.

1. Creixement aeròbic dels heteròtrofs
2. Creixement anòxic dels heteròtrofs
3. Creixement aeròbic dels autòtrofs
4. Decreixement dels heteròtrofs
5. Decreixement del autòtrofs
6. Amonificació
7. Hidròlisi de la matèria orgànica particulada
8. Hidròlisi del nitrogen orgànic particulat

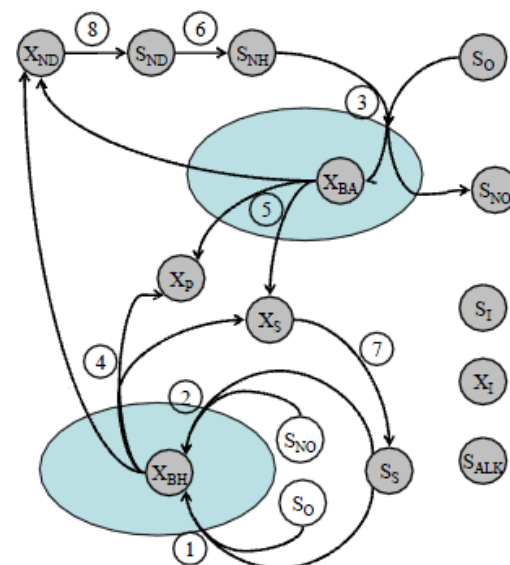


Figura II. Relacions entre les variables d'estat i processos de ASM1.
Font: comunicació personal amb Lluís Corominas (investigador de l'ICRA)

Metodologia

Per aconseguir l'objectiu principal d'aquest estudi es proposa seguir la metodologia exposada en el protocol unificat de Good Modelling Practice. En la primera etapa es defineix l'estudi de modelització que és crear un model calibrat en estat estacionari que descriu correctament les dinàmiques de matèria orgànica i nitrogen i la producció de fangs. En la següent etapa es recopilen dades de disseny de l'EDAR, dades diàries des de juny fins a setembre (cabals diaris, concentracions de nutrients, etc.), dades online de SCADA, test de traçadors i resultats analítics de les campanyes de mostreig de juny i juliol. Aquestes dades són proporcionades per la depuradora de Granollers i l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA). Seguidament, es determina el model hidràulic de la planta mitjançant els resultats del test de traçadors realitzat per l'ICRA i utilitzant el simulador SIMBA 0.6 (IFAK, Alemanya). Un cop obtinguda la configuració del model, es procedeix a calibrar els paràmetres cinètics del model en estat estacionari i posteriorment en estat dinàmic. En l'última etapa del protocol es defineixen els escenaris d'estudi, l'adaptació del model per aquests escenaris, l'execució de la simulació i finalment la interpretació i presentació dels resultats. La calibració en estat dinàmic i l'última etapa del protocol es realitzaran en estudis posteriors a aquest projecte.

Resultats i discussió

Durant la configuració del model s'aconsegueix obtenir un model que representa correctament la hidràulica del reactor biològic de la depuradora de Granollers. Aquesta configuració està formada per dos línies paral·leles amb 8 reactors en sèrie cadascuna d'elles (2 reactors anòxics, 4 reactors aeròbics, 1 d'anòxic i finalment un altre aeròbic). La recirculació interna surt de l'últim reactor anòxic i va fins el primer reactor anòxic. Un cop les dues línies s'ajunten, el cabal es dirigeix cap un decantador secundari, d'un volum igual al total dels 2 decantadors que s'utilitzen a l'estiu (1710 metres d'àrea).

Un cop ajustada l'hidràulica del reactor, s'introdueixen les dades mitjanes del mes de juny proporcionades per la depuradora en el simulador (cabals d'entrada, recirculacions, purga i aireació) i es calibren en una primera iteració els sòlids del reactor (SST) i en una segona iteració els processos de nitrificació (NH_4^+ efluent) i desnitrificació (NO_3^- efluent).

En la primera simulació realitzada s'obté una concentració de sòlids en suspensió totals (SST) en el reactor de 3100 mg/L. Comparant amb les dades, aquest valor està per sobre de la mitjana de juny que és de 2847 mg/L. S'ha fixat el cabal de purga al valor mitjà obtingut de les dades experimentals i per tal d'ajustar els sòlids es redueix el paràmetre fX_i ; aquest factor és la fracció de matèria orgànica particulada inerta que hi ha en l'influent. Per tant si es redueix, la

quantitat de sòlids que entren en el reactor serà menor. Això implica un procés iteratiu de simulacions en estat estacionari fins a trobar el valor del paràmetre fX_i que permet ajustar els SST (el valor inicial de fX_i és de 0.1 i el valor ajustat és 0.05; veure taula IV).

A partir d'aquest punt es continua amb la calibració de l'amoni i els nitrats a l'efluent de l'EDAR. En la segona iteració per calibrar la nitrificació i la desnitrificació s'obté una concentració de NH_4^+ i NO_3^- en l'efluent de 0,55 i 11,5 mgN/L respectivament. El valor d'amoni està per sota de la mitjana mensual (2.31 mg/L), en canvi els nitrats estan per sobre de la mitjana mensual (6.96 mg/L). Aquests dos components estan relacionats, ja que com més amoni es consumeix en el procés, més nitrats es generen. Per ajustar la concentració d'amoni a la sortida de la EDAR es decideix disminuir la taxa de creixement del microorganismes autòtrofs (μ_{max}) de 0.8 a 0.6 d^{-1} . Aquest paràmetre cinètic determina el ritme de creixement dels bacteris nitrificants (autòtrofs), per tant si es redueix l'activitat bacteriana autòtrofa disminuirà i la concentració d'amoni en l'efluent augmentarà, obtenint un bon ajust de la taxa de nitrificació. Posteriorment s'ha ajustat el perfil d'oxigen mitjançant l'ajust del coeficient α , que és la fracció dels coeficients de transferència de matèria del procés amb aigua bruta respecte el d'aigua neta. Incrementar aquest coeficient de 0.6 a 0.65 permet augmentar la transferència d'oxigen i per tant la concentració d'oxigen als reactors de 0,52 a 1,33 mg/L. Respecte a la concentració de nitrats, es decideix augmentar el coeficient de saturació mitjà d'oxigen pels microorganismes heteròtrofs (KOH). El procés de desnitrificació es veu desfavorit en presència d'oxigen. Augmentant la KOH, s'aconsegueix que els bacteris facultatius es vegin menys afectats per la presència d'oxigen, incrementant d'aquesta manera les taxes de desnitrificació. Aquest canvi permet reduir la concentració de nitrats a l'efluent fins al valor mitjà de juny.

En la taula III es presenten els valors mitjans de juny, els resultats obtinguts amb els paràmetres cinètics per defecte i els resultats finals amb els paràmetres ajustats. En la taula IV s'exposen les variables cinètiques del model que s'han modificat.

	Valors mitjà de juny (mg/L)	Valors 1ª simulació (mg/L)	Resultats finals (mg/L)	Error (%)
SSTreactor	2847	3100	2833	0,49
O₂reactor	1,48	0,52	1,33	10,14
NH₄⁺efluent	2,31	0,55	2,69	16,45
NO₃⁻efluent	6,96	11,5	6,95	0,14

Taula III. Resultats de la simulació
Font: elaboració pròpia

ASM1	Valors per defecte	Valors finals
fX_i	0,1	0,05
μ_{max}	0,8 d ⁻¹	0,6 d ⁻¹
α	0,6	0,65
KOH	0,2 gO ₂ /m ³	0,3 gO ₂ /m ³

Taula IV. Paràmetres cinètics d'ASM1 modificats

Font: elaboració pròpia

Conclusions

Analizant els resultats de l'estudi es conclou que els objectius proposats s'han complert satisfactòriament.

Respecte a l'objectiu principal, s'ha aconseguit desenvolupar un model de l'EDAR de Granollers que descriu adequadament les concentracions de sòlids, oxigen, amoni i nitrats en estat estacionari.

Pel que fa a la hidràulica del reactor i decantador l'estudi de traçadors ha permès determinar-ne la configuració adequada, verificant que el reactor biològic es comporta com un tanc de flux pistó. S'ha modelitzat com dues línees paral·leles de 8 tancs en sèrie cadascuna d'elles. També s'ha pogut ajustar el cabal de recirculació interna que a priori era desconegut pels operadors de la planta, i s'ha pogut confirmar que no hi ha zones mortes al reactor.

Pel que fa al model bioquímic, s'ha aconseguit una bona calibració del model modificant quatre paràmetres del model. Durant la calibració dels paràmetres cinètics del model ASM1 s'han realitzat les següents modificacions:

- Calibració dels sòlids en suspensió totals (SST) en el reactor: es redueix la fracció de matèria orgànica partícula inerta (fX_i) de 0,1 a 0,05.
- Calibració del procés de nitrificació: es redueix la taxa de creixement dels bacteris autòtrofs (μ_{max}) de 0,8 a 0,6 d⁻¹.
- Calibració de l'oxigen en el reactor: s'augmenta la taxa de transferència d'oxigen (α) de 0,6 a 0,65.
- Calibració del procés de desnitrificació: s'incrementa el coeficient de saturació d'oxigen per bacteris heteròtrofs (KOH) de 0,2 a 0,3 gO₂/m³.

Finalment, comentar que la recollida de dades s'ha realitzar correctament. Destacar l'esforç dedicat en aquesta part del treball ja que es considera un dels punts més importants en un projecte de modelització. Aquest esforç es compensa en les etapes següents del treball ja que una bona recollida de dades facilita la feina posterior.

La realització satisfactòria dels objectius de l'estudi en estat estacionari permetrà posteriorment continuar amb l'estudi en estat dinàmic per completar la modelització completa de l'EDAR de Granollers.

Referències

COROMINAS, LL. (2006). Control and optimization of an SBR for nitrogen removal: from model calibration to plant operation. Universitat de Girona.

AYMERICH, I. (2013). Decision support tools for the improvement in the management of urban wastewater systems. Universitat de Girona.

GARROTE, L., DE LAMA, B. I MARTÍN, F. El cambio climático en España y sus consecuencias en el Sector del Agua. 1ª edición. Universidad Rey Juan Carlos. Capítulo 1. Previsiones para España según los últimos estudios de cambio climático.

IWA Task Group (2013). Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Publishing, London and New York.

PROYECTO CYTED (Ciencia y Tecnología para El Desarrollo), Red Iberoamericana. Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamiento avanzados de aguas residuales domésticas. Capítulo 22. Modelación matemática de plantas de tratamiento de Lodos Activados.

ARDERN, E., LOCKETT, W.T. (1914). Experiments on the oxidation of sewage without the aid of filters. Journal of the society of chemical industry 33, 523-539.

METCALF & EDDY (1985). Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Edición revisada por George Tchobanoglous. Capítulo 9. Procesos biológicos unitarios.

RAMALHO, R. S. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Capítulo 8. Tratamiento terciario de las aguas residuales.

Projecte de construcció i ampliació de l'EDAR de Granollers. Generalitat de Catalunya.

TAKACS, I., PATRY GG., NOLASCO D. (1991). A dynamic model of the clarification-thickening process. Water Res.

ROSSO, D., LARSON, L.E. AND STENSTROM, M.K. (2008). Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. IWA Publishing.

HAUDUC, H., RIEGER, L., OEHMEN, A., VAN LOOSDRECHT, M.C.M., COMEAU, Y., HEDUIT, A., VANROLLEGHEM, P.A., GILLOT, S., (2013). Critical review of Activated Sludge Modeling: state of process knowledge, modeling concepts and limitations. Biotechnology and bioengineering.

HENZE, M., GUJER, W., MINOT, T. AND VAN LOOSDRECHT, M. (2000). Activated Sludge Models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report n°9. IWA Publishing, London, UK.

Manual Simulador SIMBA:

- Simulation of Sewer System Integrated in SIMBA (user's guide)
- Simulation of Wastewater Systems (user's guide)
- Simulation of Wastewater Systems (reference)

Agència Catalana de l'Aigua (ACA): <http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/>