

MODELITZACIÓ DE L'ESTACIÓ DEPURADORA D'AIGÜES RESIDUALS DE GRANOLLERS

Projecte de final de carrera de Ciències Ambientals (2014)

Autor: Guillermo Iriando Frias

Director: Lluís Corominas Tabares (Institut Català de Recerca de
l'Aigua)

Tutor: Ernest Marco Urrea (UAB)



Agraïments

El meu sincer agraïment a les persones que amb el seu suport, orientació i coneixements han fet possible la realització d'aquest projecte:

- Lluís Corominas, investigador de l'Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA)
- Albert Solà, gerent de CCB Serveis Mediambientals S.A.
- Ernest Marco, professor de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB)
- Nicolas Zamora, responsable de producció CCB Serveis Mediambientals S.A.
- Ignasi Aymerich, investigador de l'ICRA
- Adrián Rodríguez, investigador de l'ICRA
- Andreu Calvet, responsable de sistemes de l'EDAR de Granollers
- Montserrat Marco, responsable de laboratori de l'EDAR de Granollers
- Antonio Alonso, responsable de planta de l'EDAR de Granollers

Donar les gracies al personal de l'EDAR de Granollers que han facilitat les dades sol·licitades pel seu posterior anàlisi.

Finalment, agrair als meus pares la seva paciència i ajuda en els moments d'incertesa.

ÍNDEX

Capítol 1:

1. Introducció	11
2. Justificació	13
3. Antecedents	14
3.1. Sistema de fangs actius	14
3.1.1. Eliminació de matèria orgànica	14
3.1.2. Eliminació de nitrogen	15
3.2. Modelització del procés de fangs actius	16
3.2.1. Introducció a la modelització	16
3.2.2. Activated Sludge Model 1 (ASM1)	17
3.2.2.1. Variables d'estat	17
3.2.2.2. Processos biològics	20
4. Definició de l'àmbit d'estudi	22

Capítol 2:

5. Objectius.....	27
6. Metodologia	28
6.1. Protocol de modelització.....	28
6.1.1. Good Modelling Practice – Unified Protocol	28
6.2. Simulador	35
6.3. Mètodes analítics	41

Capítol 3:

7. Definició de l'estudi de modelització	43
8. Recopilació de dades.....	44
8.1. Dades de disseny	44
8.2. Dades Online de SCADA i diàries	45
8.3. Dades del test de traçadors.....	46
9. Configuració del model de planta	48
9.1. Test de traçadors.....	48
9.1.1. Corbes experimentals de resposta del traçador	48

9.1.2. Càlcul del Temps de Retenció Cel·lular (TRC) i Hidràulic (TRH) experimental.....	49
9.2. Caracterització del influent	51
10. Calibració.....	55
10.1. Calibració del model bioquímic de l'EDAR de Granollers.....	55
Capítol 4:	
11. Conclusions.....	60
Capítol 5:	
12. Referències bibliogràfiques.....	62
13. Programació	64
14. Pressupost.....	65
15. Annexos.....	66

Índex de taules, equacions i figures

Taules

Taula 3.1: visió general dels models de fangs actius	17
Taula 6.1: fórmules de les variables d'estat d'ASM1	31
Taula 6.2: fórmules dels paràmetres del fraccionament d'ASM1	31
Taula 8.1: característiques del reactor biològic d'estudi.....	44
Taula 8.2: característiques de la zona anòxica	44
Taula 8.3: característiques de la zona aeròbica 1.....	44
Taula 8.4: característiques de la zona facultativa.....	45
Taula 8.5: característiques de la zona aeròbica 2.....	45
Taula 8.6: volums de les zones del reactor	45
Taula 8.7: característiques dels decantadors secundaris	45
Taula 8.8: cabals de disseny.....	45
Taula 8.9: codificació de les zones d'estudi	46
Taula 9.1: exemple de càlculs per obtenir el TRH de la zona anòxica	50
Taula 9.2: temps de retenció hidràulic (TRH) per a cada zona	50
Taula 9.3: dades analítiques	52
Taula 9.4: variables d'estat	52
Taula 9.5: paràmetres del fraccionament.....	52
Taula 9.6: mitjanes de juny	52
Taula 9.7: cabals mitjans de juny	52
Taula 9.8: cabals d'aireació de la línia 1.....	53
Taula 9.9: cabals d'aireació de la línia 2.....	53
Taula 10.1: resultats de la simulació.....	57
Taula 10.2: paràmetres cinètics d'ASM1 modificats	57

Equacions

Equació 3.1: oxidació de la matèria orgànica	14
Equació 3.2: oxidació de la biomassa cel·lular.....	15
Equació 3.3: oxidació de l'amoni	15
Equació 3.4: oxidació del nitrit.....	15
Equació 6.1: balanç de cabals	29
Equació 6.2: balanç de massa	30
Equació 6.3: temps de retenció cel·lular (TRC).....	30
Equació 6.4: temps de retenció cel·lular (TRC) simplificat	30
Equació 6.5: temps de retenció hidràulic experimental.....	30
Equació 9.1: temps de retenció hidràulic experimental.....	49

Figures

Figura 1.1: sistema d'aigües urbanes.....	12
Figura 3.1: relacions entre el món real i el model de la planta	16
Figura 3.2: aplicacions dels models.....	16
Figura 3.3: fraccionament de la matèria orgànica	19
Figura 3.4: fraccionament dels compostos nitrogenats	20
Figura 3.5: relacions entre variables d'estat i processos d'ASM1	20
Figura 4.1: vista aèria de l'EDAR de Granollers.....	23
Figura 4.2: configuració BARDENPHO.....	24
Figura 4.3: descripció de la purga	24
Figura 4.4: diagrama de la depuradora.....	25
Figura 6.1: calibració dels sòlids en suspensió en el reactor	32
Figura 6.2: calibració de la nitrificació	33
Figura 6.3: calibració de la desnitrificació.....	33
Figura 6.4: Protocol Unificat	34
Figura 6.5: biblioteca SIMBA.....	35
Figura 6.6: generador d'influent	35
Figura 6.7: generador d'influent en estat estacionari	36
Figura 6.8: generador d'influent en estat dinàmic	36
Figura 6.9: bloc de fraccionament ASM1.....	37
Figura 6.10: fraccionament d'ASM1	37
Figura 6.11: editor del fraccionament	38

Figura 6.12: bombeig	38
Figura 6.13: reactor anòxic	38
Figura 6.14: paràmetres del bloc anòxic.....	39
Figura 6.15: reactor aeròbic.....	39
Figura 6.16: paràmetres del bloc aeròbic	39
Figura 6.17: decantador	40
Figura 6.18: paràmetres del decantador	40
Figura 6.19: injecció de bromur	40
Figura 6.20: punt de recollida de resultats	41
Figura 6.21: valor constant	41
Figura 8.1: vista aèria del reactor	47
Figura 8.2: configuració del reactor	47
Figura 9.1: concentració de Br^- en funció del temps en els diferents punts de mostreig	48
Figura 9.2: concentració simulada de Br^- en funció del temps	51
Figura 9.3: model de les dos línies del reactor	54
Figura 10.1: procediment de calibració	55
Figura 10.2: model calibrat en estat estacionari	58

Capítol 1:

1. Introducció
2. Justificació
3. Antecedents
4. Definició de l'àmbit d'estudi

1.- Introducció

La intervenció humana en el medi ambient i, especialment, l'explotació no sostenible dels recursos naturals ha provocat el trencament de l'equilibri dels diferents ecosistemes naturals, generant greus impactes en el sòl, l'aigua i l'atmosfera¹.

Si ens centrem en el recurs hídric, només el 3% del volum total d'aigua del planeta és aigua dolça. D'aquest percentatge, un 2% es troba en estat sòlid, de manera que el 1% restant és aigua dolça en estat líquid. Tot i que l'aigua és un recurs renovable, les activitats humanes han alterat directa i indirectament la qualitat i quantitat d'aquest recurs².

Actualment la humanitat s'enfronta a una crisi hídrica a nivell mundial que pot empitjorar degut al canvi climàtic. Les pressions ambientals produïdes pel creixement demogràfic, la urbanització, la industrialització i el canvi climàtic s'han convertit en un tema de vital importància i preocupació internacional. Per tant es requereixen mesures per assegurar la qualitat i quantitat d'aigua.

Un dels principals problemes que hi ha en el tractament d'aigües urbanes és l'antiguitat de les instal·lacions encarregades del tractament. La majoria van ser construïdes en la dècada dels 70 i s'estan quedant obsoletes³. Per fer front a la crisi hídrica cal avaluar les possibles opcions que permetin l'actualització d'aquestes instal·lacions.

En primer lloc, s'ha de realitzar un anàlisi adequat de la infraestructura existent per tal de conèixer els punts crítics dels sistemes d'aigües urbanes. En segon lloc, es pot millorar la qualitat de l'aigua al mateix temps que es redueixen els costos mitjançant nova instrumentació i automatitzant el tractament d'aigües i els sistemes de recollida i distribució. En conseqüència es requereix l'ús i desenvolupament de noves eines per facilitar la gestió dels sistemes d'aigües urbanes.

Els sistemes d'aigües urbanes són infraestructures de vital importància per assegurar la provisió d'aigua potable i la recollida i tractaments d'aigües residuals. Els sistemes d'aigües urbanes es poden dividir en dos infraestructures principals: sistemes de potabilització i distribució i sistemes de sanejament d'aigua (Figura 1.1)³.

Els Sistemes de Distribució d'Aigua (SDA) inclouen totes les infraestructures que s'encarreguen del subministrament d'aigua, des dels punts de recollida en els medis aquàtics (rius, aqüífers, mar) fins als punts de consum, passant per les plantes de potabilització i la xarxa de distribució. Per altre banda, els sistemes de sanejament (xarxa de clavegueram i Estació Depuradora d'Aigües Residuals, EDAR) són les infraestructures responsables de la recollida i tractament de

les aigües residuals de les zones urbanes i industrials, que tenen un alt contingut de matèria orgànica i nutrients.

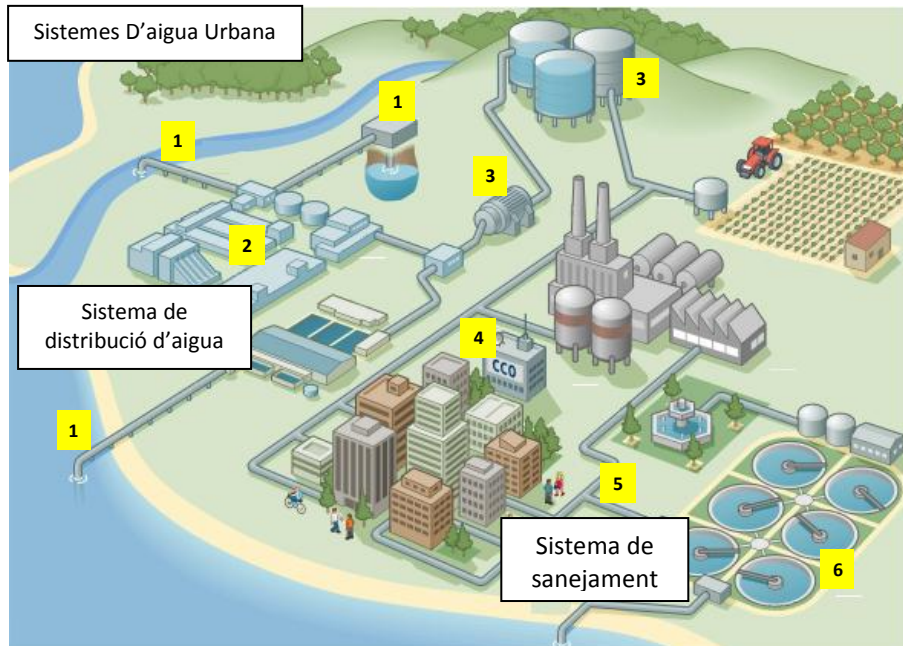


Figura 1.1. Sistema d'Aigües Urbanes. 1) Ecosistemes aquàtics, 2) Planta potabilitzadora, 3) SDA, 4) Consumidors, 5) Xarxa de clavegueram, 6) EDAR.

Font: Decision support tools for the improvement in the management of urban waster systems. Ignasi Aymerich (2013). Universitat de Girona

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 la 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, seguint els passos proposats pel Good Modelling Practice (GMP) Task Group de la IWA.

2. Justificació

L'actual interès i preocupació en la conservació del medi ambient, han fet de les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDARs) unes de les infraestructures més necessàries per mantenir l'equilibri i qualitat dels medis aquàtics. Degut al desenvolupament de noves tècniques de tractament d'aigües i a l'augment de la complexitat dels processos de depuració en els últims anys, és necessari l'ús de noves eines que permetin automatitzar aquests processos i facilitar el disseny de noves depuradores.

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)⁴ 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 altra 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 operadors⁵.

La modelització dels processos bioquímics presenta les següents avantatges⁶:

- Permet predir la qualitat de l'efluent i la producció de fangs en resposta a la carga i cabal de l'influent.
- Un vegada realitzada la calibració de la planta, el model dissenyat es pot utilitzar per avaluar nous escenaris d'operació (per exemple, realitzar canvis d'operació, aplicar noves pràctiques, optimització de processos i costos, etc.) sense pertorbar el funcionament de la planta.

Per aquests motius, es proposa utilitzar els models de fangs actius i el simulador SIMBA amb la principal finalitat de modelitzar en estat estacionari el tractament biològic de l'EDAR de Granollers.

3.- Antecedents

En el primer apartat d'aquesta secció es descriu el sistema de fangs actius i els processos d'eliminació de matèria orgànica i nitrogen. En el següent apartat s'exposa una breu introducció sobre la modelització i posteriorment es descriu més extensament el model que s'utilitzarà en aquest projecte.

3.1. Sistema de fangs actius

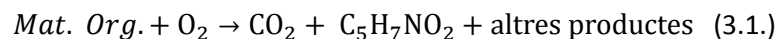
Aquest procés de tractament biològic d'aigües residuals va ser desenvolupat per Ardern i Lockett a Anglaterra l'any 1914⁷. S'ha convertit en el sistema més utilitzat per a la depuració d'aigües residuals urbanes. Actualment s'utilitzen moltes versions del procés original (flux pistó, tanc de mescla completa, canals d'oxidació, etc.).

El procés de fangs actius consisteix en un procés biològic en el qual els microorganismes degraden la matèria orgànica i els nutrients de l'aigua residual. Aquest procés es produeix en el reactor on les bactèries utilitzen l'energia que obtenen de l'oxidació de la matèria orgànica per generar noves cèl·lules (biomassa). Posteriorment, el contingut del reactor (licor de mescla) es condueix als decantadors on la biomassa generada (fangs) se separa de l'aigua neta. Es tracta d'un procés idèntic al que es produeix en la naturalesa però com es realitza en un tanc de volum limitat amb una elevada carga de microorganismes s'accelera el procés. La comunitat d'espècies de microorganismes està formada per un 95% de bactèries i un 5% de protozous, metazous, fongs, algues i virus⁸.

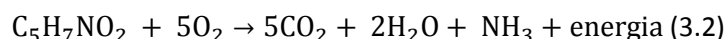
Segons la regulació i control de diferents paràmetres ambientals, com per exemple la concentració d'oxigen (acceptor d'electrons), es poden establir condicions aeròbiques, anaeròbiques o anòxiques. Combinant aquestes condicions es poden desenvolupar comunitats bacterianes capaces d'eliminar matèria orgànica, nitrogen i fòsfor.

3.1.1. Eliminació de matèria orgànica

Els microorganismes heteròtrofs consumeixen la matèria orgànica present en l'aigua residual en condicions aeròbiques. Per tant utilitzen la matèria orgànica com a font de carboni per a la síntesi cel·lular (generació de nova biomassa). La reacció d'oxidació és la següent:



on, $C_5H_7NO_2$ representa la nova matèria cel·lular formada. Quan la matèria orgànica del medi disminueix degut al seu consum, els microorganismes es veuen obligats a obtenir energia de la matèria assimilada ($C_5H_7NO_2$).

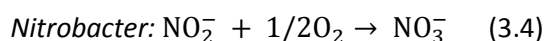
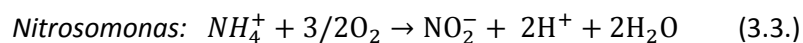


Aquest procés es coneix com a respiració endògena i en el cas de falta extrema de substrat pot provocar el decreixement dels microorganismes (mort cel·lular).

3.1.2. Eliminació de nitrogen

L'eliminació de nitrogen es basa en dos etapes:

1. Nitrificació. És l'oxidació biològica de l'amoni a nitrat. Els microorganismes nitrificants són aeròbics obligats, concretament quimiolitotrofs⁹, és a dir utilitzen el CO_2 com a font de carboni i l'amoni o els nitrits com a font d'energia. La nitrificació consta de dos etapes: primer l'oxidació de l'amoni a nitrit que realitzen un grup de bacteries del gènere *Nitrosomonas* i en segon lloc l'oxidació del nitrit a nitrat realitzada per un altre grup de bacteries del gènere *Nitrobacter*. Les reaccions que formen part de la nitrificació són les següents:



2. Desnitrificació. És el procés de reducció del nitrat a nitrogen gas. Durant aquest procés, el nitrat es transforma inicialment a nitrit i després a òxid nítric, òxid nítrós i finalment a nitrogen gas. Aquesta etapa només es pot produir en condicions anòxiques ja que el nitrat i el nitrit han d'actuar com acceptor d'electrons⁹. Els microorganismes responsables d'aquestes reaccions són heteròtrofs aeròbics facultatius i per tant es poden adaptar a les condicions anòxiques i utilitzar els nitrats i els nitrits com acceptor d'electrons en lloc de l'oxigen dissolt. Per portar a terme la desnitrificació, els bacteris requereixen una font de carboni orgànic per poder oxidar. Aquesta pot ser la matèria orgànica present en l'aigua residual o un substrat extern afegit en el reactor (metanol, etanol o àcid acètic).

3.2. Modelització del procés de fangs actius

3.2.1. Introducció a la modelització

Un model és una representació simplificada dels processos que es produeixen en un sistema i s'utilitzen amb l'objectiu d'entendre i predir certs aspectes de la realitat. Un model numèric és una representació d'una situació de la vida real utilitzant equacions matemàtiques agrupades en un software o simulador⁵.

En la figura 3.1 es presenta un esquema de com les observacions del món real es traslladen a un model.

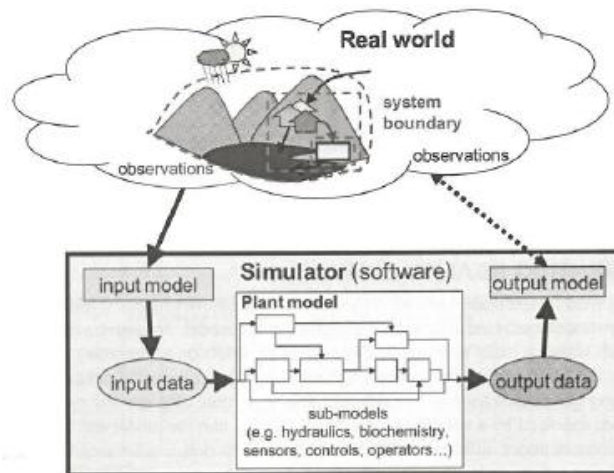
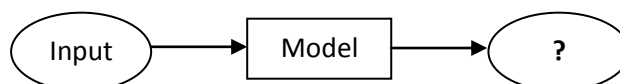


Figura 3.1. Relacions entre el món real i el model de la planta.

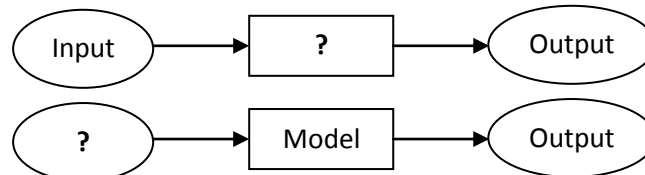
Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Task Group (2013).

Les aplicacions dels models s'il·lustren en la figura 3.2.

- Pronosticar (predicció del futur)



- Diagnosticar (entendre els processos i mecanismes actuals)



- Educatiu (ensenyar als futurs enginyers)

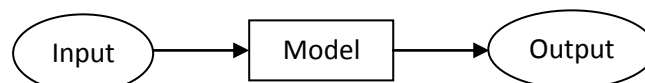


Figura 3.2. Aplicacions dels models.

Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Task Group (2013).

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. L'ASM1 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 al 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 (taula 3.1). La complexitat d'un model està associada als número de variables d'estat i reaccions que considera¹.

Models	Nitrificació + desnitrificació	Eliminació biològica de fòsfor (BioP)	Variabls d'estat (components)	Processos	Referència
ASM1	X		13	8	Henze et al. (1987)
ASM2	X	X	19	19	Henze et al. (1995)
ASM2d	X	X	19	21	Henze et al. (1999)
ASM3	X		13	12	Gujer et al. (1999)
ASM3+BioP	X	X	17	23	Rieger et al. (2001)
B&D	X	X	19	36	Barker and Dold (1997)
TUDP	X	X	17	21	Brdjanovic et al. (2000)
ASM2d+pH	X	X	23	23	Serralta et al. (2004)
ASM1+pH	X		16	10	Magrí et al. (2005)

Taula 3.1. Visió general dels models de fangs actius (Gernaey et al. 2004)

3.2.2. Activated Sludge Model 1 (ASM1)

El model seleccionat per realitzar els objectius d'aquest projecte és l'ASM1 ja que és el model més senzill que permet la simulació dels processos que es produeixen en l'eliminació biològica de matèria orgànica i nitrogen. Aquest model inclou:

- 13 variables d'estat: 7 solubles (S) i 6 particulades (X)
- 8 processos: 3 de creixement, 2 de decreixement, 2 d'hidròlisi i 1 d'amonificació.

3.2.2.1 Variables d'estat¹

Components orgànics

S₅: Substrat fàcilment biodegradable. Són molècules de petit tamany que són metabolitzades ràpidament pels microorganismes.

X₅: Substrat lentament biodegradable. Aquesta fracció està composta de partícules amb un elevat pes molecular, col·loides i matèria orgànica complexa. Aquestes partícules no poden ser

assimilades directament pels microorganismes degut a la seva complexitat. En conseqüència s'han d'hidrolitzar externament abans de ser adsorbides (transformació de X_s a S_s)

S_i : Matèria orgànica soluble inerta. Es tracta de tota la matèria orgànica soluble que no es pot degradar durant el tractament de l'aigua i per tant es pot assumir que sortirà per l'efluent de la planta tal i com ha entrat.

X_i : Matèria orgànica particulada inerta. És la matèria particulada que no pot ser degradada. Aquesta fracció queda retinguda en els fangs.

X_p : Productes orgànics particulats derivats del decreixement de la biomassa (X_{BA} i X_{BH}). Es tracta dels productes que es generen durant la mort cel·lular.

X_{BA} : Organismes nitrificants. Es tracta de bacteris aeròbics obligats, quimiolitotrofs. Són els responsables de la nitrificació. Durant aquest procés oxiden l'amoni (S_{NH}) a nitrats (S_{NO}).

X_{BH} : Organismes heterotròfic. Són els responsables d'oxidar la matèria orgànica fàcilment biodegradable (S_s). Aquests bacteris poden créixer en condicions aeròbiques (oxigen com acceptor d'electrons) o anòxiques (altres acceptors d'electrons, com per exemple els nitrats).

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 (figures 3.3 i 3.4).

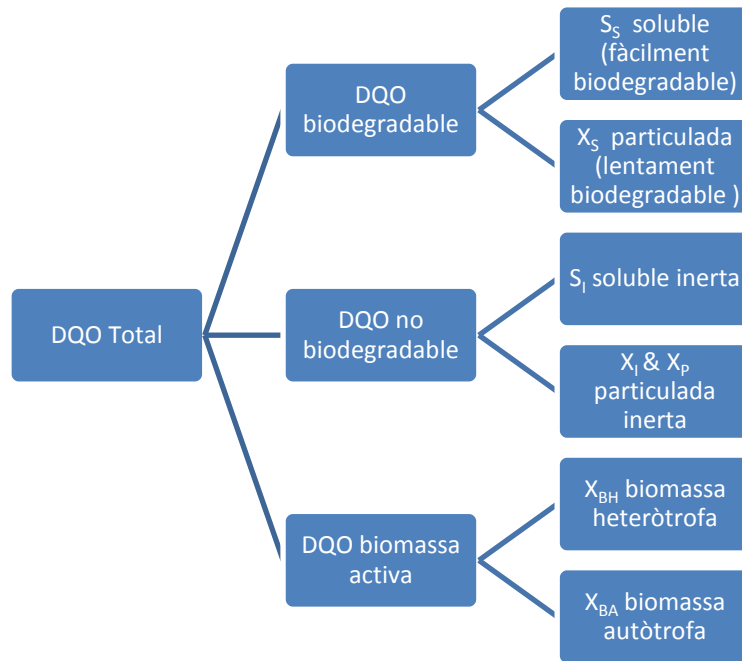


Figura 3.3. Fraccionament de la matèria orgànica

Font: comunicació personal amb Lluís Corominas (investigador de l'ICRA)

Components nitrogenats

X_{ND} : Nitrogen orgànic biodegradable particulat. Aquesta fracció es genera durant el decreixement de la biomassa heteròtrofa (X_{BH}) i autòtrofa (X_{BA}) i pot ser eliminat pel procés d'amonificació.

S_{ND} : Nitrogen orgànic soluble. Es forma a partir de la hidròlisi del nitrogen orgànic particulat (X_{ND}) i posteriorment es converteix en nitrogen amoniacal (S_{NH}).

S_{NH} : Amoni i nitrogen amoniacal. Tota aquesta fracció es considera com NH_4^+ .

S_{NO} : Nitrats i nitrits (NO_3^- i NO_2^-). S'uneixen en una mateixa variable per simplificar el model. Tota aquesta fracció es considera com NO_3^- .

El fraccionament dels compostos nitrogenats es presenta a continuació.

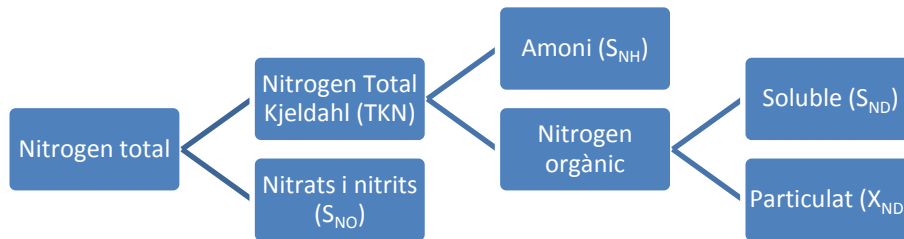


Figura 3.4. Fraccionament dels compostos nitrogenats

Font: comunicació personal amb Lluís Corominas (investigador de l'ICRA)

Altres components

S_{O_2} : Oxigen dissolt. Aquesta fracció intervé en el intercanvi de gasos entre l'aigua i l'aire.

S_{ALK} : Alcalinitat de l'aigua residual. És un paràmetre important ja que en condicions àcides es poden inhibir alguns processos biològics.

3.2.2.2 Processos biològics

Els 8 processos que simula ASM1 es poden agrupar en 4 processos principals: creixement de la biomassa, decreixement de la biomassa, amonificació del nitrogen orgànic i hidròlisi. Les relacions que es donen entre les variables d'estat i els processos biològics es presenten en la figura 3.5.

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

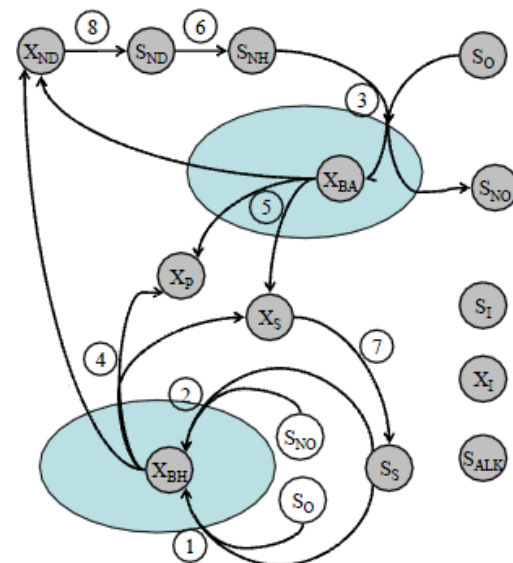


Figura 3.5. Relacions entre les variables d'estat i processos de ASM1.

Font: comunicació personal amb Lluís Corominas (investigador de l'ICRA)

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).

Decreixement del microorganismes

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.

Amonificació

És el procés de 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 forma les proteïnes que necessiten, alliberant l'excés de nitrogen amb forma d'amoníac (NH_3) o amoni (NH_4^+).

Hidròlisi

S'inclouen els processos de degradació (7 i 8) de la matèria orgànica particulada (X_s) i dels compostos nitrogenats particulats (X_{ND}) a compostos més senzills (S_s i S_{ND}) i disponibles per els microorganismes.

4.- Definició de l'àmbit d'estudi

L'estudi es desenvolupa a l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR) de Granollers. S'ha escollit aquesta depuradora degut als coneixements previs sobre el funcionament de la planta adquirits durant les pràctiques amb empresa realitzades entre juliol i setembre de l'any 2013 en el marc de la carrera de Ciències Ambientals. També va ser decisiva la proposta per part del Institut Català de Recerca de l'Aigua (ICRA) de formar part del treball d'investigació ja iniciat amb ells. Un cop escollida l'estació depuradora, el projecte es centra en la modelització de la mateixa.

Aquesta depuradora es troba situada dins del terme municipal de Granollers, a la comarca del Vallès Oriental i forma part del conjunt de sistemes que integren el sanejament de la conca del Besòs. Es localitza al marge esquerra del riu Congost, aigües avall del casc urbà de Granollers. Es va posar en marxa l'any 1992 amb l'objectiu de tractar les aigües residuals urbanes dels municipis de Granollers, Les Franqueses (Bellavista, Corró d'Avall, Llerona i Marata) i Canovelles¹⁰.

Tot i que l'administració que dirigeix la planta és el Consorci per a la Defensa de la Conca del Besòs, l'empresa explotadora d'aquesta és OHL Medio Ambiente INIMA S.A. La planta va ser dissenyada per tractar un cabal de 30.000 m³/d i assistir a una població equivalent a 121.500 habitants¹¹. Consta d'un reactor de flux pistó on es realitza el tractament biològic i l'eliminació de nitrogen. Fins als anys 60 l'activitat agrícola predominava en la zona, però amb el pas dels anys les indústries han ocupat gran part del sòl agrícola. Actualment hi ha una gran quantitat d'indústries, el que ha provocat un augment de la contaminació de la conca i la necessitat d'aplicar noves tecnologies de tractament d'aigües residuals. En la figura 4.1 es presenta la vista aèria de l'EDAR de Granollers.



Figura 4.1. Vista aèria de la depuradora de Granollers
 Font: <https://maps.google.es/>

La depuració de l'aigua residual en l'EDAR de Granollers consisteix en quatre etapes: pretractament, tractament primari, tractament secundari i tractament de fangs.

La fase de pretractament es realitza per preparar l'aigua residual d'entrada i facilitar el seu posterior tractament. Aquest procés és necessari per eliminar sòlids i substàncies que poden fer malbé els equips de la depuradora (bombes, vàlvules, centrífugues, etc.). Consisteix en una primera etapa d'eliminació de sòlids de gran tamany (reixes), un procés de tamisat i un última etapa d'eliminació de sorres i greixos (dessorrador/desgreixador). Tots els residus que es generen en aquesta fase són tractats en una empresa externa. A continuació hi ha un by-pass al riu Congost per no sobrepassar la capacitat de la planta en el cas de tenir un cabal d'entrada molt elevat.

Després del pretractament, l'aigua residual arriba al tractament primari. Inicialment estava format per la cambra de mescla i els decantadors primaris. Actualment no s'afegeix cap floculant i només estan en funcionament els decantadors. En aquesta fase s'elimina la fracció

de sòlids en suspensió que sedimenten ràpidament. Per tant es generen fangs que són tractats en la mateixa depuradora. Després dels decantadors hi ha un altre by-pass al riu amb la mateixa funció que l'anterior.

A continuació l'aigua es bombeja cap al tractament secundari. Està format per dos reactors biològics i quatre decantadors secundaris.

El reactor biològic que s'utilitza actualment es va contruir l'any 2007 per tal de complir amb les demandes legals i millorar l'eficiència de depuració de l'aigua. Aquest nou reactor consta de dues línies de funcionament, i està basat en la configuració BARDENPHO exposada en la figura 4.2.

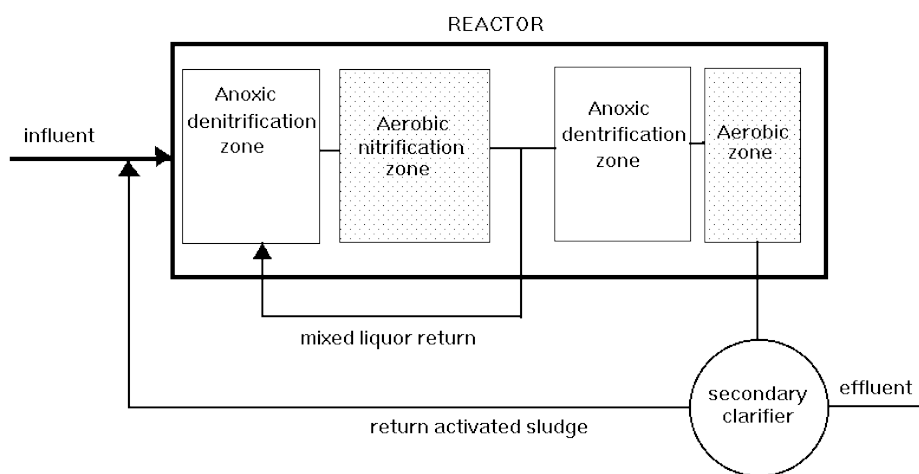


Figura 4.2. Configuració BARDENPHO.

Font: <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/Environmental/DENITE/bardenpho.htm>

Dins del reactor, mitjançant l'activitat dels microorganismes, s'aconsegueix l'eliminació de matèria orgànica i nitrogen. En aquesta etapa hi ha una recirculació interna per tal de millorar l'eliminació de nitrogen i una recirculació externa que va des dels decantadors cap a l'entrada del reactor. La purga (figura 4.3) es realitza per eliminar els fangs en excés, els quals són tractats en la planta. Les aigües de sortida de les dos línies s'uneixen just abans de sortir definitivament dels reactors i en aquesta zona és on es produeix la purga.

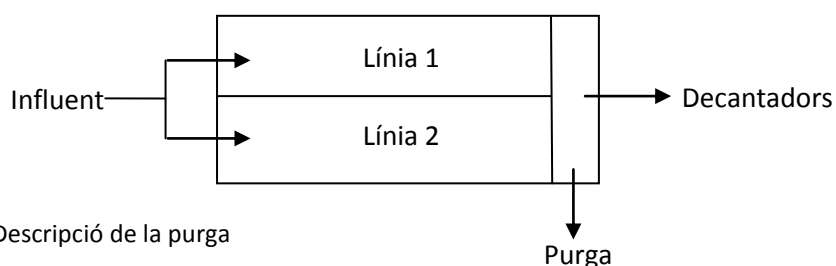


Figura 4.3. Descripció de la purga

Font: elaboració pròpia

Quan l'aigua surt del reactor flueix cap als decantadors secundaris. En aquesta fase la biomassa sedimenta i es generen els fangs secundaris i els flotants. Els fangs es recirculen cap a l'entrada del reactor i els flotants passen directament al pou de buidats, on s'acumulen les aigües brutes que es recirculen cap a l'entrada de la planta. La depuradora de Granollers consta de quatre decantadors. Durant l'estiu només hi ha dos en funcionament, en canvi durant l'hivern funcionen els quatre.

A partir de l'estudi de la depuradora, s'obté l'esquema presentat en la figura 4.4.

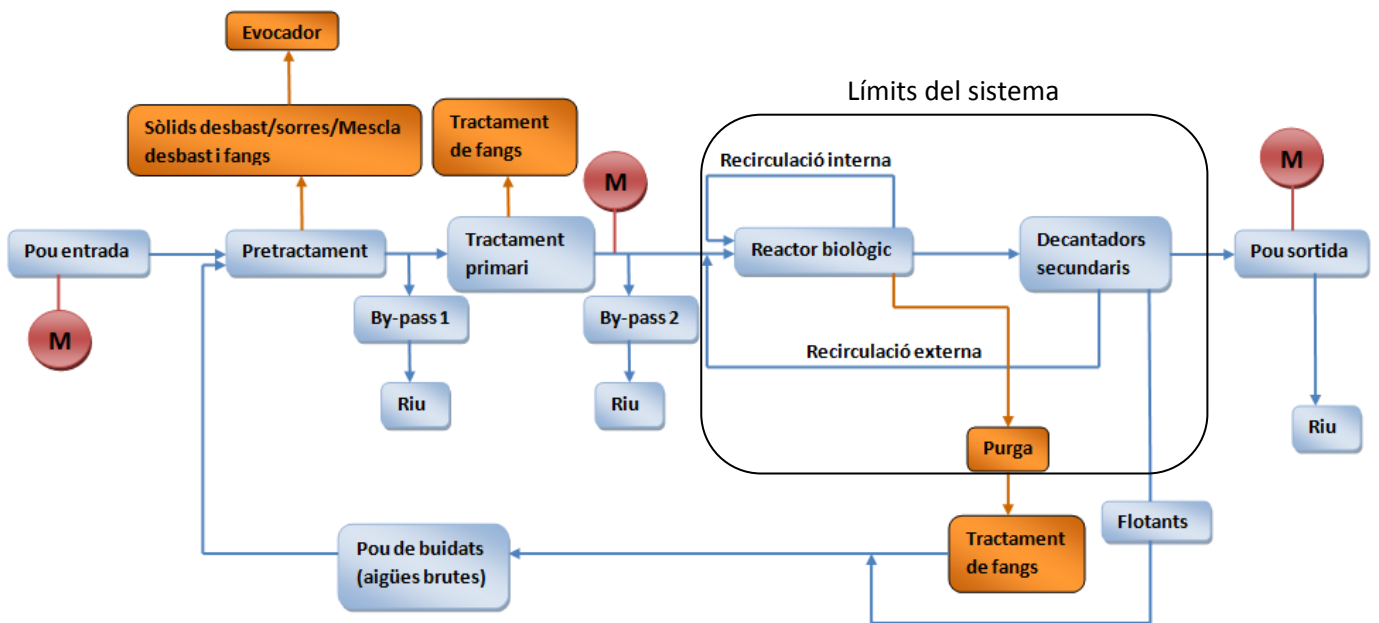


Figura 4.4. Diagrama de la planta i límits del sistema d'estudi. M=punts de mostreig automàtic.

Font: comunicació personal amb operaris de l'EDAR de Granollers

Capítol 2:

5. Objectius

6. Metodologia

5. Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és la modelització dels processos d'eliminació de matèria orgànica i nitrogen a l'EDAR de Granollers i la calibració (en estat estacionari) del model amb dades experimentals.

Els objectius específics són els següents:

- Recopilar les dades de la depuradora d'estudi necessàries per fer-ne la modelització.
- Realitzar un test de traçadors amb bromur amb la finalitat d'entendre el comportament hidràulic del reactor biològic i determinar el Temps de Retenció Hidràulic (TRH)
- Modelització i calibració del reactor biològic de l'EDAR de Granollers seguint el protocol de l'IWA Task Group on Good Modelling Practice.

6.- Metodologia

En aquest apartat s'explica la metodologia utilitzada per a la realització del projecte. A continuació es presenta el protocol que s'ha utilitzat en aquest projecte, s'explica el simulador utilitzat per la modelització i calibració i finalment s'exposa una breu descripció dels mètodes analítics.

6.1. Protocol de modelització

Per tal de realitzar la modelització d'una EDAR es requereix un protocol que estableixi les pautes a seguir per aconseguir un model adequat als objectius requerits. El protocol utilitzat en aquest projecte és el proposat per l'IWA Task Group on Good Modelling Practice. En una primera etapa proposa que es defineixen els objectius de la modelització. Seguidament es realitza la fase de recollida de dades i s'avalua la seva qualitat. Després d'aquesta etapa, es selecciona el model hidràulic i biològic i es realitza la calibració del model (utilitzant dades experimentals) en estat estacionari i posteriorment en estat dinàmic. Finalment s'analitzen els resultats obtinguts.

6.1.1. Good Modelling Practice – Unified Protocol⁵

El protocol proposat pel Good Modelling Practice és l'utilitzat en aquest projecte i es presenta en forma d'esquema en la figura 6.4. i està format per les següents etapes:

Step 1: definir el projecte

En aquest apartat es defineixen els objectius del projecte i es descriuen els següents punts:

- Límits del sistema d'estudi
- Nivell de complexitat (estat estacionari vs estat dinàmic)
- Variables que s'utilitzaran per calibrar i validar el model
- Eines utilitzades (software)

Step 2: Recopilació i anàlisi de dades

L'objectiu principal d'aquesta fase és recollir, analitzar i avaluar les dades necessàries. Es dona molta importància a aquesta etapa ja que requereix un major esforç de treball degut a que els següents apartats del projecte es basaran en les dades recollides. Aquest apartat es divideix en:

- Visió general de la plant. Es descriu breument el funcionament de la depuradora d'estudi i es presenta el diagrama de flux d'aquesta.
- Recollida de dades (annexos 1, 3 i 4). Les dades analitzades en el present projecte s'han sol·licitat i obtingut de l'EDAR de Granollers i del ICRA. Per realitzar els objectius d'aquest projecte es van recopilar les següents dades i es va realitzar un estudi de traçadors amb bromur:
 - Dades de disseny del tractament biològic (volum de les zones del reactor, volum dels decantadors, etc.).
 - Test de traçadors del dia 11 de juny de l'any 2013 (concentració de bromur en funció del temps en diferents punts del reactor i en l'efluent).
 - Dades analítiques de les campanyes de mostreig de juny i juliol (DQO total, DQO soluble, concentracions d'amoni, sòlids en suspensió, etc.)
 - Dades online obtingudes de SCADA.
 - Dades diàries des de juny fins a setembre (cabals diaris, concentracions de nutrients diàries, etc.)

Step 3: Configuració del model de la planta

En aquest apartat es presenta la creació del model d'estudi. Aquest procés es divideix en:

- Balanç de matèria. El balanç de matèria es realitza per tal de verificar la qualitat de les dades de cabal i concentracions obtingudes del sistema. Majoritàriament, permet identificar errors que limitarien el bon funcionament del model. Un dels aspectes importants és la determinació del temps de residència cel·lular del reactor biològic en el sistema real. Així doncs, un dels objectius és verificar que el cabal de purga (un dels que té més incertesa) sigui el correcte. En les equacions 6.1, 6.2, 6.3 i 6.5 es presenta el balanç de cabals i de massa, el temps de retenció cel·lular i el temps de retenció hidràulic respectivament.

Balanç de cabals⁸

$$Q_e = Q_s + Q_p \quad (6.1)$$

Q_e = cabal d'entrada a reactor (m^3/d)

Q_s = cabal de sortida de planta (m^3/d)

Q_p = cabal de purga (m^3/d)

Balanç de massa⁸

$$Q_e \cdot C_e = Q_s \cdot C_s + Q_p \cdot C_p \quad (6.2)$$

C_e = concentració de sòlids a l'entrada de reactor (g/m^3)

C_s = concentració de sòlids a la sortida de planta (g/m^3)

C_p = concentració de sòlids a la purga (g/m^3)

La purga es realitza en la part final del reactor per tal de facilitar el càlcul del Temps de Retenció Cel·lular (TRC) presentat en l'equació 6.3.

$$TRC = \frac{V_r \cdot X_r}{Q_s \cdot X_s + Q_p \cdot X_p} \quad (6.3)$$

V_r = Volum del reactor

X_r = Biomassa (sòlids totals, TSS) en el reactor

X_s = Biomassa (sòlids totals, TSS) a la sortida

X_p = Biomassa (sòlids totals, TSS) a la purga

Degut a la configuració del reactor presentada en la figura 4.3 s'assumeix que els sòlids totals a la sortida són aproximadament zero ($X_s=0$) i que la purga es realitza dins del reactor ($X_p=X_r$), l'equació anterior es simplifica en la fórmula 6.4.

$$TRC = \frac{V_r}{Q_p} \quad (6.4)$$

- Determinació del model hidràulic de la planta mitjançant un test de traçadors. Un test de traçadors és un experiment que es realitza per determinar el comportament hidràulic d'un reactor. S'utilitza un compost químic inert (que no reaccioni i que no s'absorbeixi) que s'addiciona a l'entrada del sistema. Es realitza un mostreig en diferents punts del reactor al llarg del temps mitjançant el qual s'obtenen diferents corbes de concentració del compost inert. Posteriorment, utilitzant un simulador, es van provant diferents configuracions (número i volum de cadascun) de tancs en sèrie (amb les pertinents recirculacions en el sistema) fins que les corbes simulades coincideixen amb les experimentals. Això permet identificar volums morts, ajustar cabals de recirculació, localitzar correctament les recirculacions, etc. També permet calcular amb exactitud el temps de residència hidràulic. En aquest cas s'ha utilitzat bromur com a compost químic inert. L'equació utilitzada per calcular el TRH és⁸:

$$TRH = \frac{\sum C_i \cdot \Delta t_i \cdot t_i}{\sum C_i \cdot \Delta t_i} \quad (6.5)$$

C_i = Concentració de bromur (mg/L)

t_i = temps (minuts)

Δt_i = interval de temps entre les mostres (minuts)

Els càlculs corresponents per a cada punt de mostreig es presenten en l'annex 2.

- Selecció del model de fangs actius i del model de decantació. Tal i com s'ha esmentat als antecedents hi ha diferents models disponibles per descriure processos d'eliminació de matèria orgànica, nitrogen i fòsfor. Com a pauta general, s'ha d'escollir el model més senzill que és capaç de descriure el comportament del sistema estudiat. Pel que fa al model de decantació, el model més utilitzat és el que discretitza el decantador en 10 capes i considera decantació per gravetat¹².
- Caracterització de l'aigua residual d'entrada. En aquesta fase, les dades analítiques recollides sobre l'influent del reactor biològic es transformen en les variables d'estat del model utilitzat. En els models de fangs actius, aquesta conversió es basa en els balanços de DQO i es realitza aplicant les fórmules presentades en la taula 6.1

Variable d'estat	Fórmula
S_I	DQO soluble, efluent
S_S	DQO soluble, influent - S_I
X_I	DQO particulada, efluent
X_S	DQO total, influent - $S_I - S_S - X_I$
S_{NH}	NH_4^+ influent
S_{ND}	$(TKN - S_{NH}) \cdot f_S$
X_{ND}	$TKN - S_{NH} - S_{ND}$

Taula 6.1. Fórmules de les variables d'estat d'ASM1

Font: comunicació personal amb Ignasi Aymerich (investigador de l'ICRA)

Un cop obtinguts els valors de les variables d'estat es calculen els paràmetres del fraccionament del model en la taula 6.2.

Paràmetres	Fórmula
f_{S_I}	$S_I / DQO_{total, influent}$
f_{S_S}	$S_S / DQO_{total, influent}$
f_{X_I}	$X_I / DQO_{total, influent}$
f_{X_S}	$X_S / DQO_{total, influent}$
f_S	$S_S / (X_S + S_S)$

Taula 6.2. Fórmules dels paràmetres del fraccionament de ASM1

Font: comunicació personal amb Ignasi Aymerich (investigador de l'ICRA)

Introduint aquests paràmetres en el model, aquest calcula les variables d'estat en funció de la DQO total del influent i les dades de amoni i TKN sol·licitades a l'ICRA.

- Creació del model utilitzant les dades proporcionades per la depuradora i els blocs del simulador presentats en la secció 6.2 de la metodologia.

Step 4: Calibració y validació

El procés de calibració consisteix en la modificació dels paràmetres cinètics del model fins que els resultats simulats siguin el més semblant possible a les dades observades (experimentals). El procés acaba quan els resultats de la simulació estan dins del marge d'error acceptat. La validació es porta a terme per assegurar que el model compleix amb els objectius, simulant el comportament del sistema en front d'una situació diferent a la utilitzada per la calibració (per exemple, calibrar amb dades de l'estiu i validar amb dades de l'hivern).

En aquest projecte es realitza la calibració del model biològic en estat estacionari. No ha estat possible realitzar la calibració en estat dinàmic per la manca de dades experimentals exhaustives de l'EDAR. Es planificarà un campanya experimental en posterioritat a aquest treball per fer aquesta calibració dinàmica:

- Mes de juny: un cop obtinguda la configuració del model es realitza la calibració en estat estacionari utilitzant les dades mitjanes del mes de juny de la depuradora. El primer pas consisteix en calibrar els sòlids en suspensió totals (SST) en el reactor. Un cop calibrats els sòlids del reactor es realitza la calibració dels processos de nitrificació (amoni del efluent, S_{NH}) i desnitrificació (nitrat del efluent, S_{NO}). En les figures 6.1, 6.2 i 6.3 s'exposen els marges d'error i les modificacions que es poden realitzar per millorar els resultats simulats proposades pel Good Modelling Practice.

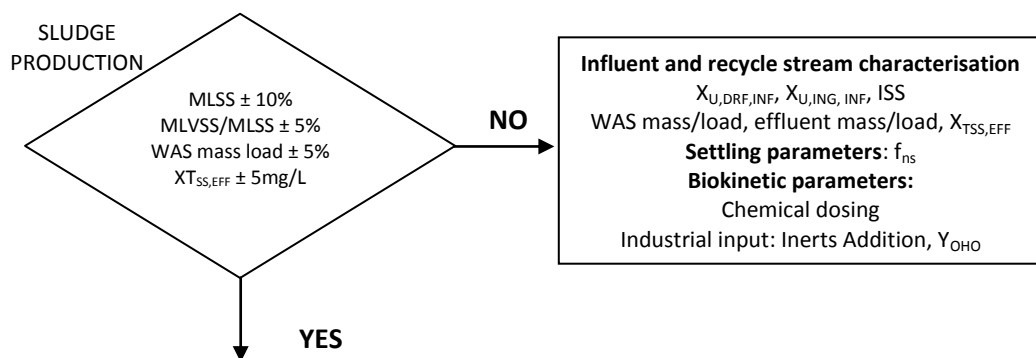


Figura 6.1. Calibració de sòlids en suspensió.

Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Task Group (2013).

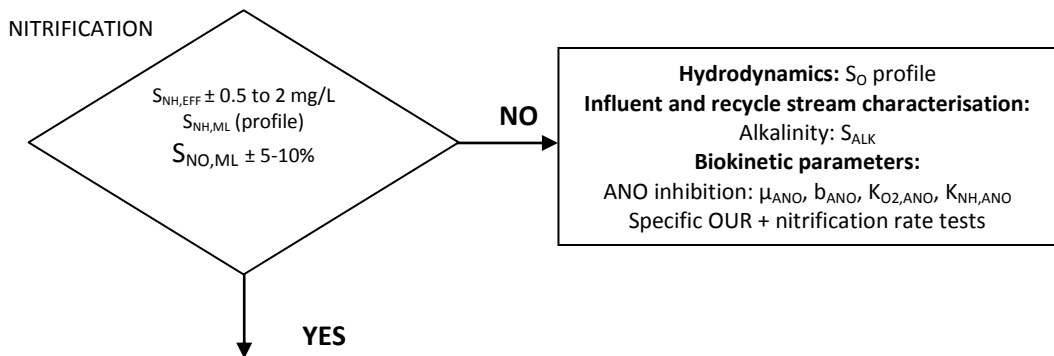


Figura 6.2. Calibració del procés de nitrificació.

Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Task Group (2013).

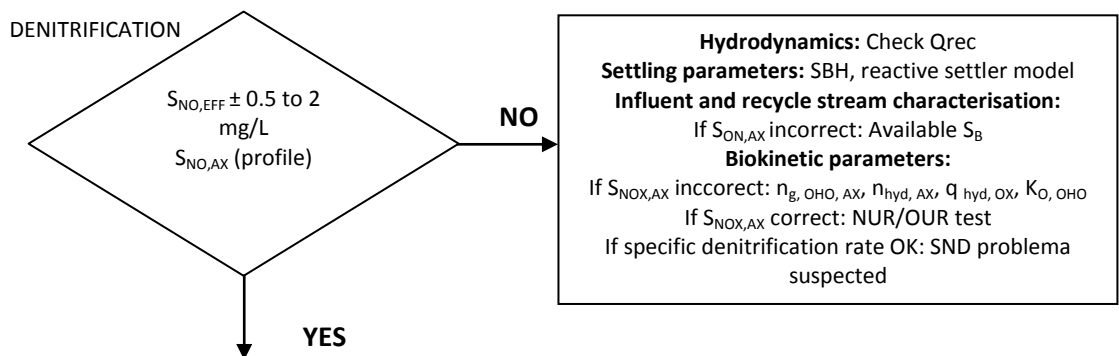


Figura 6.3. Calibració del procés de desnitrificació.

Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Task Group (2013).

Step 5: Simulació i interpretació dels resultats

Aquesta etapa inclou la definició dels escenaris d'estudi, l'adaptació del model per aquests escenaris, l'execució de la simulació i finalment la interpretació i presentació dels resultats. Aquesta fase es realitzarà posteriorment a aquest projecte, després de finalitzar la calibració en estat dinàmic.

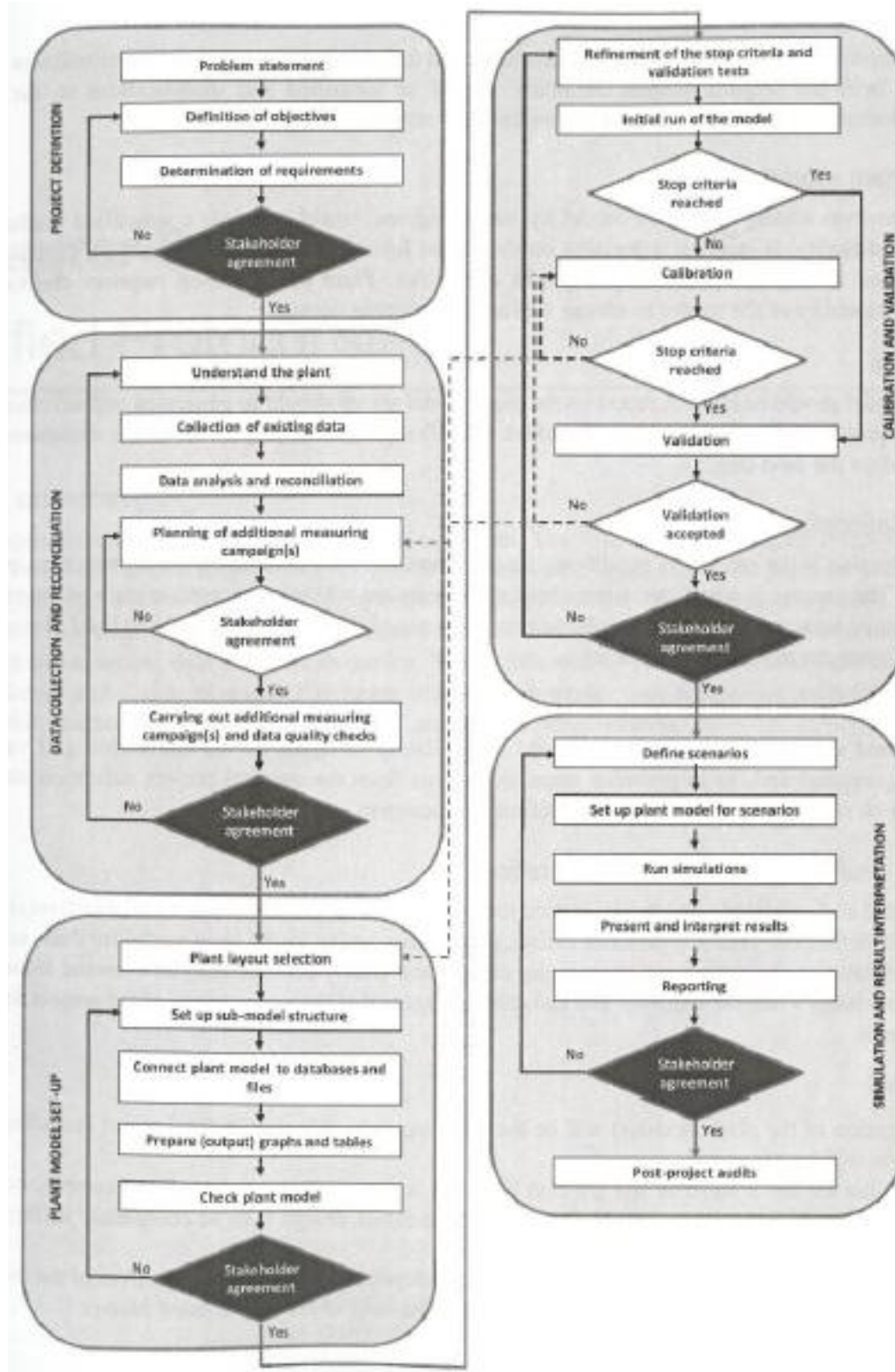


Figura 6.4. Protocol Unificat

Font: Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Task Group (2013).

6.2. Simulador¹³

El simulador utilitzat en aquest projecte és el SIMBA 0.6 (IFAK, Alemanya). Es tracta d'un software dedicat a la modelització i simulació dels processos que es produeixen en el tractament d'aigües residuals. Actualment, els processos de fangs actius són els més utilitzats. Els principals components que intervenen en aquests processos són representat en forma de blocs i estan disponibles en la biblioteca d'aquest software (figura 6.5).

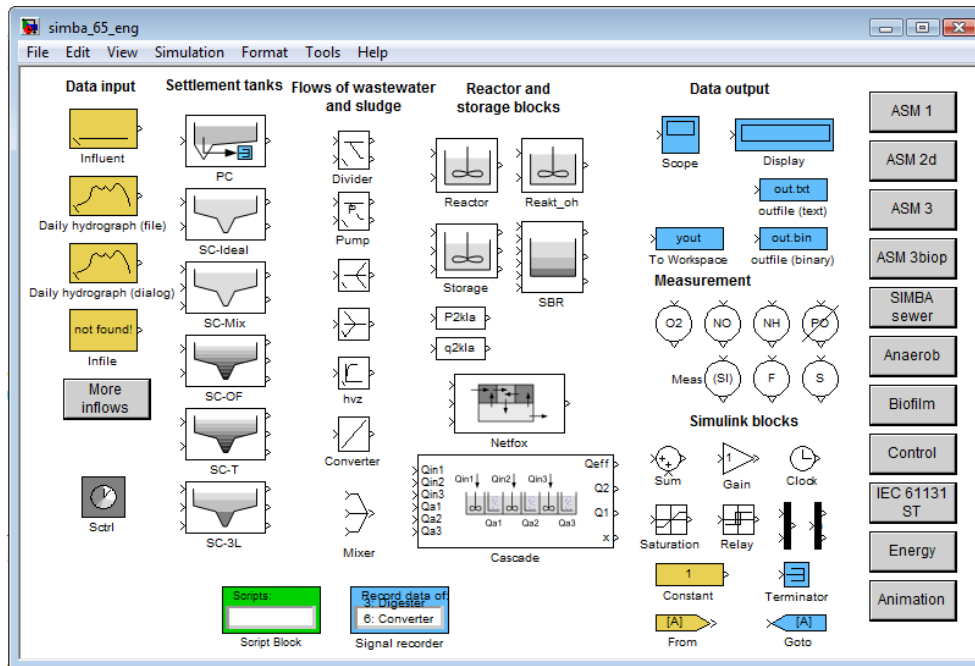


Figura 6.5. Biblioteca de SIMBA

Els blocs utilitzats per dissenyar el model que representarà el tractament biològic de la depurador de Granollers són:

- Generador d'influent (figura 6.6): en aquest bloc es realitza la caracterització del influent. S'introdueixen els valors de cabal d'entrada (m^3/d), DQO (g/m^3), TKN (g/m^3) i P (g/m^3). Es pot seleccionar la opció d'estat estacionari (figura 6.7), les variables són constants en el temps, o d'estat dinàmic (figura 6.8), el simulador genera automàticament les dinàmiques segons el valor promig introduït anteriorment.



Daily hydrograph (dialog)

Figura 6.6. Generador d'influent

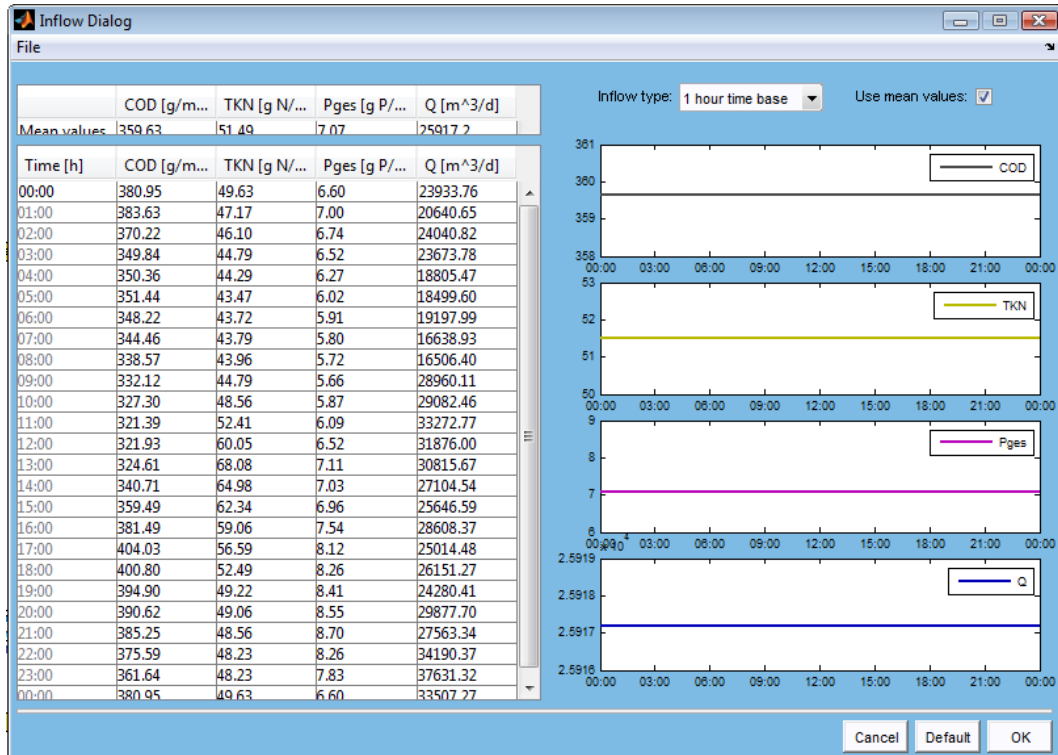


Figura 6.7. Generador d'influent en estat estacionari

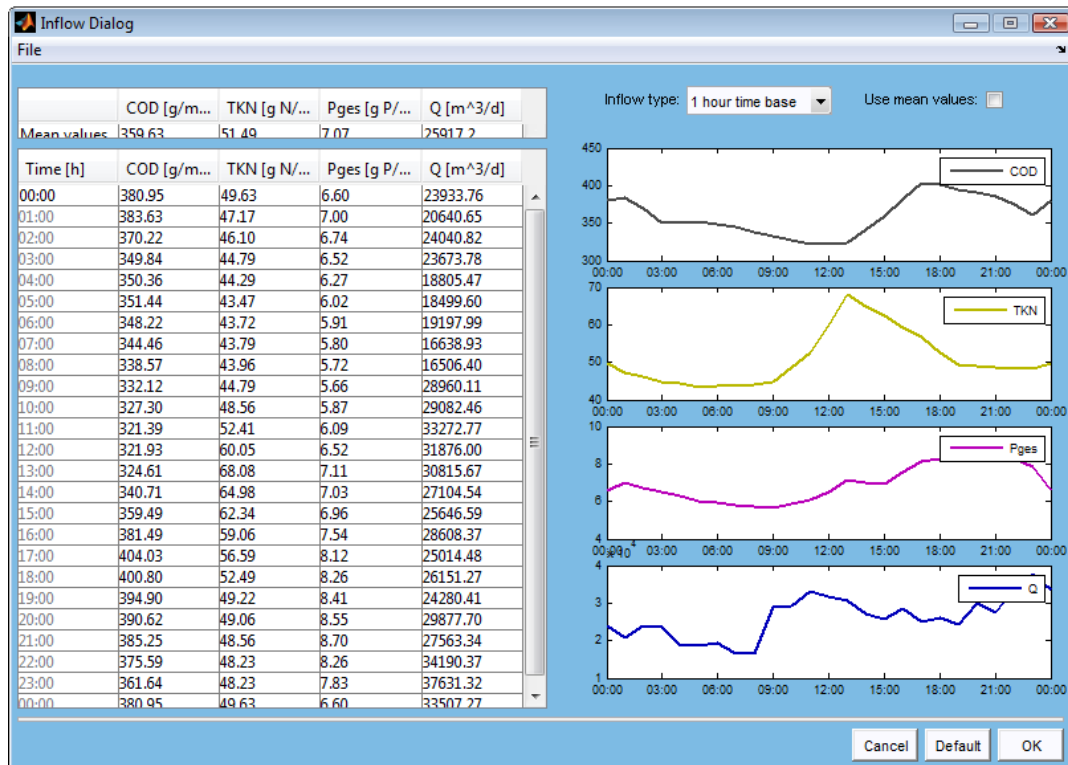


Figura 6.8. Generador d'influent en estat dinàmic

- Fraccionament ASM1 (figura 6.9): la funció d'aquest bloc és realitzar el fraccionament de la DQO i el TKN convertint les dades analítiques en les variables d'estat del model.

El fòsfor no s'inclou ja que el model ASM1 no simula l'eliminació de fòsfor. La taula de fraccionament i l'editor dels paràmetres es presenten en les figures 6.10 i 6.11 respectivament.

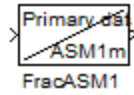


Figura 6.9. Bloc del Fraccionament ASM1

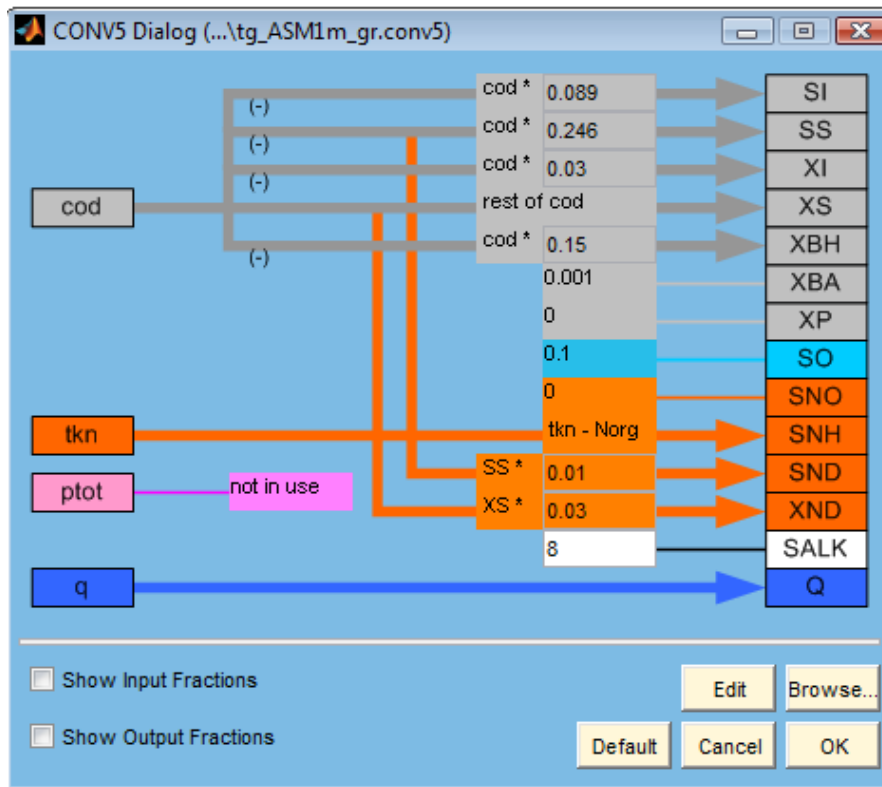


Figura 6.10. Fraccionament d'ASM1

En la opció editar es poden modificar les equacions i paràmetres del fraccionament.

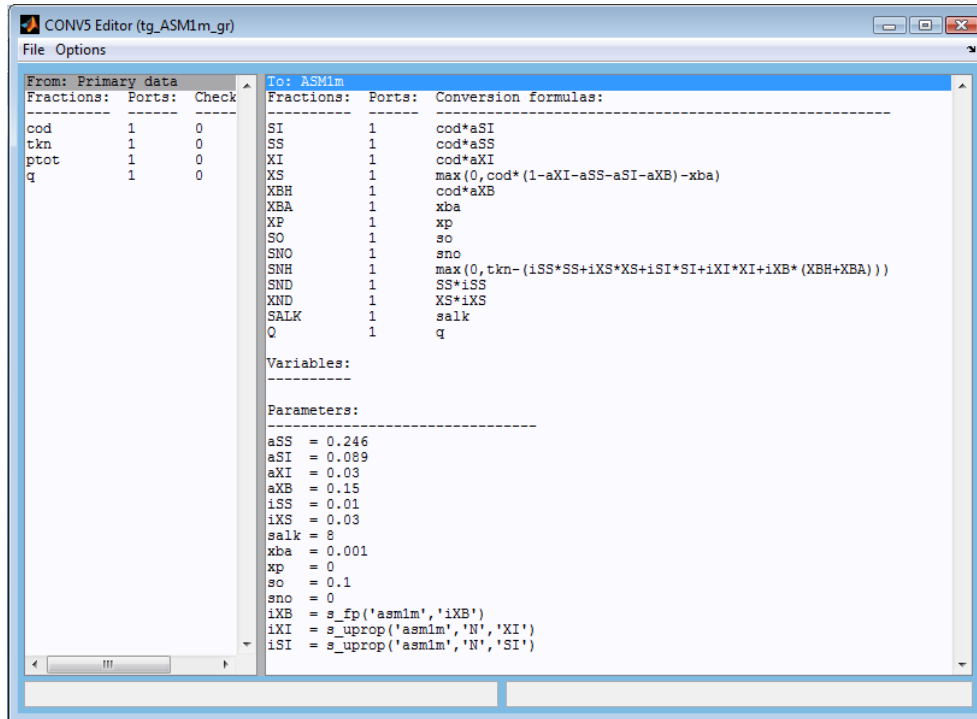


Figura 6.11. Editor del fraccionament

- Bombeig (figura 6.12): aquest bloc representa qualsevol sistema de bombeig.



Figura 6.12. Bombeig

- Reactor anòxic (figura 6.13): representa les zones anòxiques del reactor, on es produeix el procés de desnitrificació. L'únic paràmetre que es pot modificar és el volum del tanc.

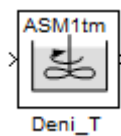


Figura 6.13. Reactor anòxic

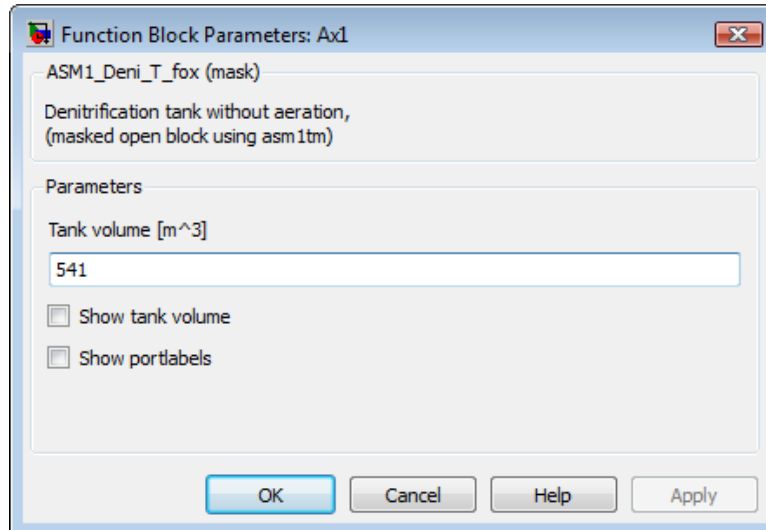


Figura 6.14. Paràmetres del bloc anòxic

- Reactor aeròbic (figura 6.15): representa les zones aeròbiques del reactor, on es produeix el procés d'eliminació de matèria orgànica i la nitrificació. En aquest bloc es poden modificar els paràmetres exposats en la figura 6.16.

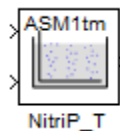


Figura 6.15. Reactor aeròbic

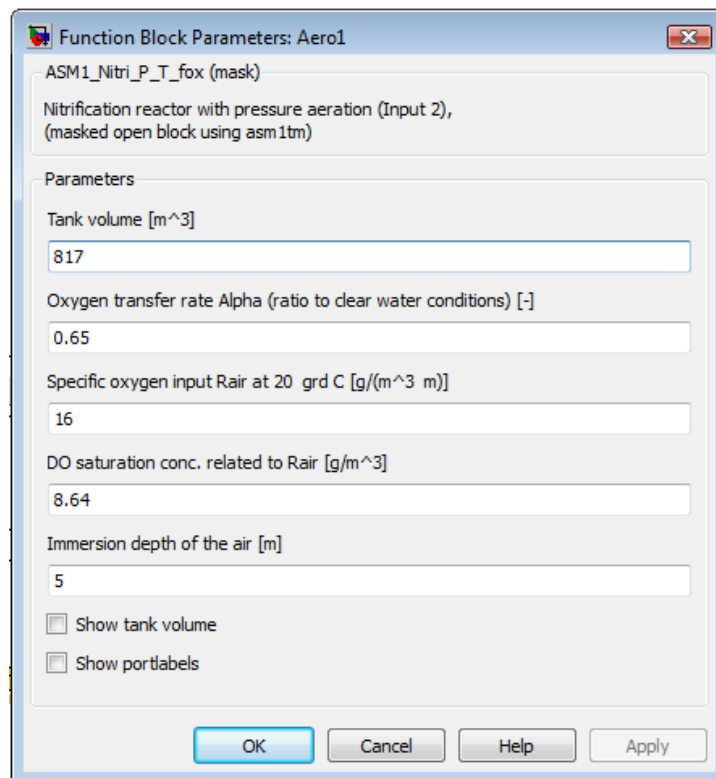


Figura 6.16. Paràmetres del bloc aeròbic

- Decantador (figura 6.17): representa els decantadors secundaris. Els paràmetres que es poden modificar es presenten en la figura 6.18.



Figura 6.17. Decantador

La finestra de paràmetres s'anomena 'Function Block Parameters: NK-3L'. Conté la següent informació:

- Titol: ASM1_SC_3L_T_fox (mask)
- Descripció: Secondary clarifier with 3 layers, biological processes in all layers and sludge settling (masked open block using asm1tm)
- Paràmetres:
 - Surface area of reactor A [m²]: 1711
 - Height of reactor h [m]: 4
 - Sludge volume index SVI [ml/g]: 100
 - Correction factor fTS = TSS used / TSS calculated: 1
 - Influent fraction into top layer (0..1), default =0: 0
 - Mixing flow ratios [fqm1; fqm2]: [0.15; 0.1]
 - Biological processes
 - Show tank volume
 - Show portlabels
- Botons: OK, Cancel, Help, Apply

Figura 6.18. Paràmetres del decantador

- Injecció de bromur (figura 6.19): aquest bloc serveix per introduir l'arxiu de bromur en el model. En aquest arxiu s'especifica la quantitat de bromur i el moment en que s'injecta. En aquest cas el simulador transforma les dades de bromur en la variable d'estat S_i (matèria orgànica inerta) ja que un traçador és un compost inert i que per tant no reacciona amb cap dels components del reactor i tampoc intervé en els processos que es produeixen.

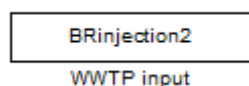


Figura 6.19. Injecció de bromur

- Punt de recollida de resultats (figura 6.20): aquest bloc s'utilitza per indicar en quins punts del model es volen obtenir resultats.

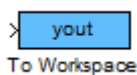


Figura 6.20. Punt de recollida de resultats

- Valor constant (figura 6.21): serveix per introduir un valor constant, com per exemple un cabal d'aire, cabal de purga, cabal de recirculació, etc.

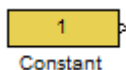


Figura 6.21. Valor constant

6.3. Mètodes analítics

Majoritàriament s'han utilitzat dades analítiques proporcionades per l'EDAR de Granollers. No obstant, s'han realitzat analítiques addicionals a l'ICRA per la caracterització de l'influent i per l'anàlisi de bromur en l'estudi de traçadors. L'influent i l'efluent de la planta s'han caracteritzat en base als termes de Demanda Química d'Oxigen (DQO) i nitrogen (TKN, amoni, nitrats i nitrats) analitzats d'acord amb els mètodes estàndards (APHA, 1998). La Demanda Biològica d'Oxigen (DBO) de l'influent s'ha calculat pel mètode manomètric. L'anàlisi de bromur pel test de traçadors s'ha realitzat per cromatografia iònica amb el cromatògraf marca DIONEX, Model IC5000, amb una columna IonPac AS18, posteriorment a filtrar les mostres a 0,22 µm Ø.

Capítol 3. Resultats

- 7. Definició de l'estudi de modelització
- 8. Recopilació de dades
- 9. Configuració del model de planta
- 10. Calibració

7. Definició de l'estudi de modelització

La finalitat del model desenvolupat en aquest projecte és estudiar diferents estratègies d'operació de la planta per tal de millorar el rendiment al mateix temps que s'estalvien costos. Per aquest motiu, cal un model que descriuï correctament les dinàmiques de matèria orgànica i nitrogen i la producció de fangs. En aquest projecte es realitzen les tasques de modelització inicials (recopilació de dades, estudi de la hidràulica i calibració en estat estacionari). En una fase posterior es realitzarà la calibració en estat dinàmic, la validació del model i l'avaluació d'escenaris.

El sistema d'estudi seleccionat en aquest projecte és el procés de tractament biològic de l'EDAR de Granollers juntament amb la decantació. Les variables que s'utilitzen per calibrar el model són les presentades en la figura 10.1

Per aconseguir els objectius proposats, l'eina utilitzada és el simulador SIMBA 0.6 (IFAK, Alemanya) exposat en l'apartat 6.2 de la metodologia.

8. Recopilació de dades

8.1. Dades de disseny¹⁰

En aquest apartat es presenten les dades de disseny del reactor biològic (taules 8.1, 8.2, 8.3, 8.4, 8.5 i 8.6), dels decantadors (taula 8.7) i els cabals de disseny (taula 8.8).

- Reactor biològic

Tipologia	Flux Pistó
Nombre de línies	2 unitats
Alçada útil d'aigua	5,00 m.
Amplada	6,47 m.
Longitud	150,90 m.
Volum útil unitari	4881,62 m ³
Volum total	9763,23 m ³
Alçada	10 m.

Taula 8.1. Característiques del reactor biològic
Font: projecte de construcció de la EDAR

- Zones del reactor

Zona Anòxica	
Alçada útil d'aigua	5,00 m.
Amplada	6,47 m.
Longitud	50,20 m.
Nombre de subzones	3 unitats
Volum útil per línia	1623,97 m ³
Volum total	3247,94 m ³

Taula 8.2. Característiques de la zona anòxica
Font: projecte de construcció de la EDAR

Zona Aeròbica 1	
Alçada útil d'aigua	5,00 m.
Amplada	6,47 m.
Longitud	73,90 m.
Nombre de subzones	3 unitats
Volum útil per línia	2390,67 m ³
Volum total	4781,33 m ³

Taula 8.3. Característiques de la zona aeròbica1
Font: projecte de construcció de la EDAR

Zona facultativa	
Alçada útil d'aigua	5,00 m.
Amplada	6,47 m.
Longitud	16,42 m.
Nombre de subzones	1 unitat
Volum útil per línia	531,19 m ³
Volum total	1062,37 m ³

Taula 8.4. Característiques de la zona facult. Font: projecte de construcció de la EDAR

Zona Aeròbica 2	
Alçada útil d'aigua	5,00 m.
Amplada	6,47 m.
Longitud	10,38 m.
Nombre de subzones	1 unitat
Volum útil per línia	335,79 m ³
Volum total	671,59 m ³

Taula 8.5. Característiques de la zona aeròbica 2 Font: projecte de construcció de la EDAR

En total cada línia del reactor té 8 zones amb els volums presentats en la taula 8.6.

Zona	Volum (m ³)
Anòxica 1	541
Anòxica 2	541
Facultativa	541
Aeròbica 1	817
Aeròbica 2	817
Aeròbica 3	757
Anòxica 3	531
Aeròbica 4	336

Taula 8.6. Volums de les zones del reactor Font: projecte de construcció de la EDAR

- Decantadors secundaris

Nombre de decantadors	4 unitats
Diàmetre	33 m.
Volum unitari	3421,19 m ³
volum total	13684,76 m ³

Taula 8.7. Característiques del decantadors secundaris Font: projecte de construcció de la EDAR

- Cabals de disseny

Influent	30000 m ³ /d
Recirculació externa	18750,24 m ³ /d
Purga	1665,12 m ³ /d
Recirculació interna	37500 m ³ /d

Taula 8.8. Cabals de disseny Font: projecte de construcció de la EDAR

8.2. Dades Online de SCADA i diàries

Aquestes dades van ser facilitades per CCB Serveis Medi Ambientals S.A. Es tracta d'una empresa que dona suport a les depuradores del Consorci per a la Defensa de la Conca del

Besòs. Es van demanar les següents variables, que es van obtenir amb una freqüència de 45 segons pel període estudiat:

- Cabal d'entrada de planta (mitjana del mes de juny = 24.452 m³/d)
- Cabal d'entrada a reactor (mitjana del mes de juny = 25.917 m³/d)
- Nitrats a la sortida del reactor (mitjana del mes de juny = 6,96 mg/L)
- Amoni a la sortida del reactor (mitjana del mes de juny = 2,31 mg/L)
- Oxigen en els diferents punts del reactor (mitjana del mes de juny = 1,48 mg/L)
- Cabals d'aireació (mitjana del mes de juny = 18.937 m³/d)
- Cabal de recirculació externa (mitjana del mes de juny = 29954 m³/d)
- Cabal de purga (mitjana del mes de juny = 710 m³/d)

A més, la depuradora va proporcionar dades físiques i analítiques des del 1 de juny fins al 30 de setembre (annex 3).

8.3. Dades del test de traçadors

Com ja s'ha comentat anteriorment el test de traçadors es va realitzar l'11 juny del 2013. Es van abocar 10kg de BrK a l'entrada del reactor, concretament a l'entrada de la línia 2. Un cop introduït el BrK es van agafar mostres en tres zones diferents del reactor i en el efluent amb una freqüència de 30 i 60 minuts (figures 8.1 i 8.2)

El codi utilitzat per definir les diferents zones del reactor i els punts de mostreig es presenta en la taula 8.9.

Zona	Codi	Punt de mostreig	Oxímetres	Freqüència de mostreig
Anòxica 1	Ax1	R.AX	-	30 i 60 min.
Anòxica 2	Ax2	-	-	-
Facultativa	Fac.	-	2.1	-
Aeròbica 1	Aer1	R.OX1	2.2	30 i 60 min.
Aeròbica 2	Aer2	-	2.3	-
Aeròbica 3	Aer3	-	2.4	-
Anòxica 3	Ax3	-	-	-
Aeròbica 4	Aer4	R.OX2	2.5	30, 60 i 120 min.
Efluent	Effl	Effl	-	60 i 120 min.

Taula 8.9. Codificació de les zones d'estudi

Font: elaboració propia

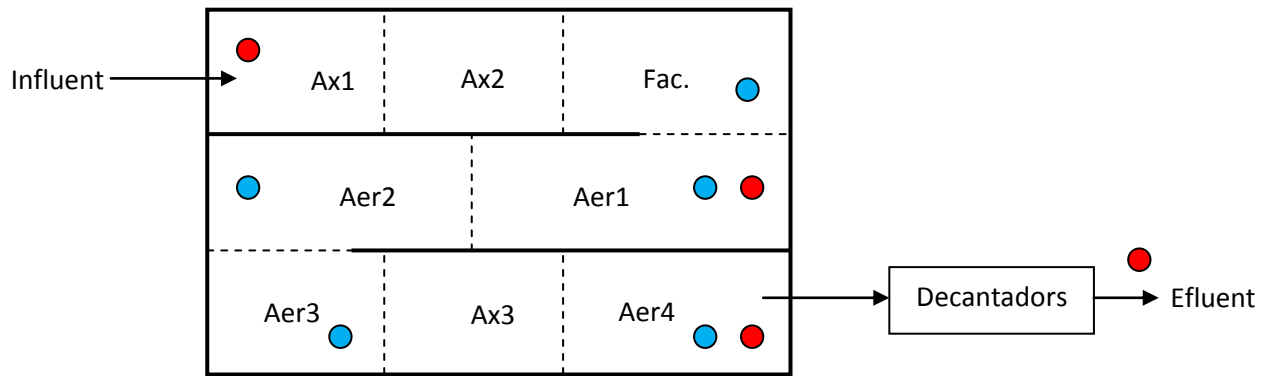


Figura 8.1. Vista aèria del reactor. Punts de mostreig per l'estudi de traçadors (vermell) i punts on hi ha instal·lades sondes d'oxigen (blau)

Font: elaboració pròpia

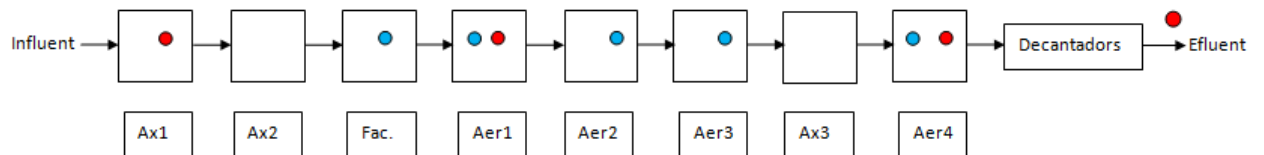


Figura 8.2. Configuració del reactor a punt per ser introduïda en el simulador SIMBA. Punts de mostreig (vermell) i oxímetres (blau).

Font: elaboració pròpia

9. Configuració del model de planta

En primera instància es realitza l'estudi de traçadors per analitzar el comportament hidràulic del reactor. A continuació es presenta la caracterització de l'influent, i finalment s'exposa la configuració del model de planta introduïda al SIMBA.

9.1. Test de traçadors

Els objectius principals d'aquest apartat són:

- Entendre el comportament hidràulic del reactor biològic de la depuradora de Granollers.
- Determinar el Temps de Retenció Hidràulic (TRH) experimental de les diferents zones del reactor.
- Identificació de zones mortes, by-pass, recirculacions internes i altres fenòmens o processos que poden intervenir en la hidràulica del reactor.

9.1.1. Corbes experimentals de resposta del traçador

Les concentracions de bromur analitzades en els diferents punts del reactor (R.AX, R.OX1 i R.OX2) i en el efluent es representen en la figura 9.1 en funció del temps (hores).

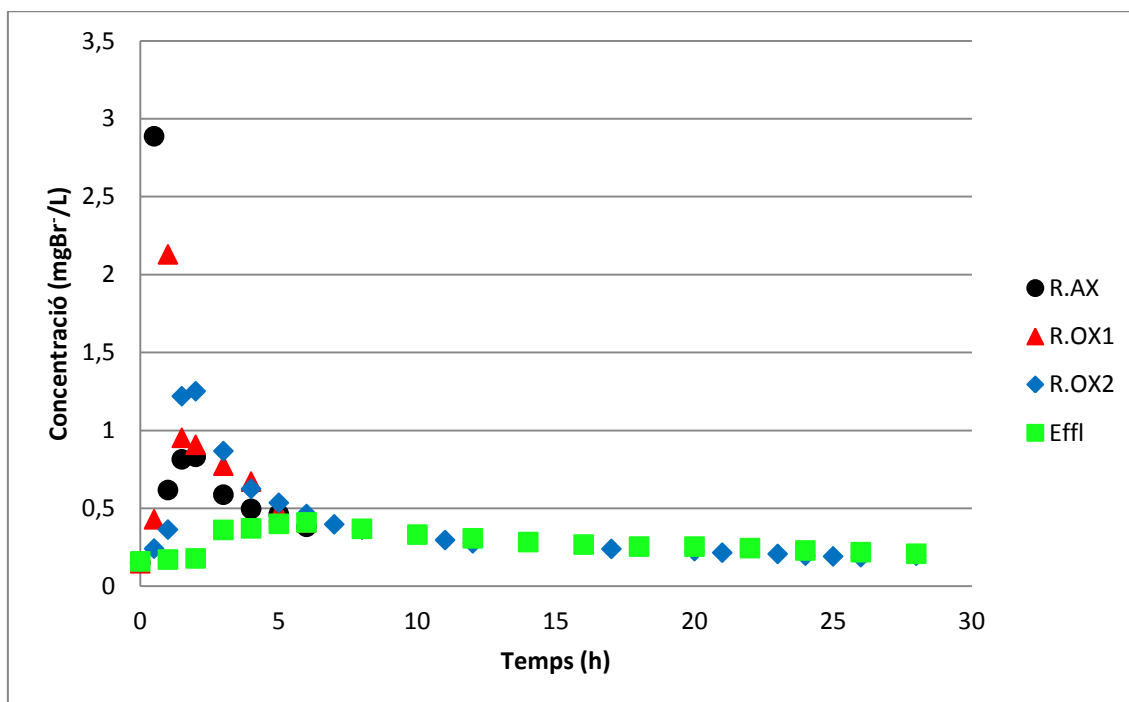


Figura 9.1. Representació de les concentracions de bromur en funció del temps en els diferents punts de mostreig (annex 2).

En aquesta representació es pot concloure:

- En un principi la concentració de bromur hauria de disminuir en tots els punts després d'arribar a la concentració màxima. Això no s'observa en la gràfica del punt R.AX (color negre) ja que hi ha un segon pic de bromur. Aquest fenomen és degut a la recirculació interna que hi ha dins del reactor, per tant una part del bromur que està en la fase final del reactor es recircula a l'inici provocant aquest segon pic. Aquest fenomen permetrà ajustar el cabal de recirculació, ja que es realitzaran diferents iteracions de cabal fins a trobar el cabal que ofereix un millor ajust del segon pic de Bromur en R.AX.
- El reactor es comporta com un flux pistó ja que en el gràfic s'observa una consecució de pujades i baixes seqüencial per les corbes R.AX, R.OX1 i R.OX2. Inicialment a les 2.4 hores hi ha un pic de bromur (gairebé 3 mg/L) en el punt R.AX. Posteriorment, hi ha un pic a les 2.79 hores en el punt R.OX1 i finalment, un tercer pic en el punt R.OX2. Per tant en el moment de crear el model en el simulador, el reactor es representa com un conjunt de reactors en sèrie (figura 9.3).

9.1.2. Càlcul del Temps de Retenció Cel·lular (TRC) i Hidràulic experimental (TRH)

Aplicant l'equació 6.4 es calcula el temps de retenció cel·lular experimental.

$$TRC = \frac{Vr}{Qp} = \frac{9763}{895} = 10,9 \text{ dies}$$

Vr = volum total del reactor (m^3)

Qp = cabal de purga promig del mes de juny (m^3/d)

Amb les dades de concentració de Bromur en els diferents punts de mostreig (R.AX, R.OX1, R.OX2 i Effl), s'aplica la fórmula 9.1 per calcular el Temps de Retenció Hidràulic:

$$TRH = \frac{\sum Ci \cdot \Delta ti \cdot ti}{\sum Ci \cdot \Delta ti} \quad (9.1)$$

Ci = Concentració de bromur (mg/L)

ti = temps (minuts)

Δti = interval de temps entre les mostres (minuts)

Els càlculs realitzats per a cada punt de mostreig es poden observar en l'annex 2 Es presenta un exemple (taula 9.1) dels càlculs corresponents per un dels punts de mostreig, en aquest cas el primer de tots (R.AX).

Punt de mostreig	TEMPS (h)	Br ⁻ (mg/L)	temps (min)	Δt (min)	C*Δt	C*Δt*t
R.AX	0	0,151	0	0	0	0
R.AX	0,5	2,888	30	30	86,64	2599,2
R.AX	1	0,618	60	30	18,54	1112,4
R.AX	1,5	0,815	90	30	24,45	2200,5
R.AX	2	0,831	120	30	24,93	2991,6
R.AX	3	0,588	180	60	35,28	6350,4
R.AX	4	0,497	240	60	29,82	7156,8
R.AX	5	0,4623	300	60	27,738	8321,4
R.AX	6	0,382	360	60	22,92	8251,2
					Σ=270,318	Σ=38983,5

Taula 9.1. Exemple dels càlculs realitzats per obtenir el TRH de la zona anòxica.

Font: ICRA

$$TRH = \frac{38983,5}{270,318} = 144,21 \text{ minuts}$$

Els resultats per les diferents zones es presenten en la taula 9.2.

Punt de mostreig	TRH (hores)
R.AX	2,40
R.OX1	2,79
R.OX2	11,15
Effl	13,81

Taula 9.2. Temps de retenció hidràulic per a cada zona

Font: elaboració propia

Un cop dissenyat el model inicial i introduïdes les dades del dia 11 de juny (cabals d'entrada, recirculacions i purga) es realitza una primera simulació de 100 dies per tal d'establir les condicions inicials del sistema i posteriorment una segona simulació de tres dies, injectant el bromur en el dia 1. En la figura 9.2 es presenten els resultats de bromur simulats en funció del temps per la següent configuració: 2 línees paral·leles amb 8 reactors en sèrie cadascuna d'elles (2 reactors anòxics, 4 reactors aerobis, 1 d'anòxic i finalment un altre d'aerobi). Els volums dels reactors són presentats en la taula 8.6. La recirculació interna surt de l'últim reactor anòxic i va fins el primer reactor anòxic. Un cop les dues línees 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).

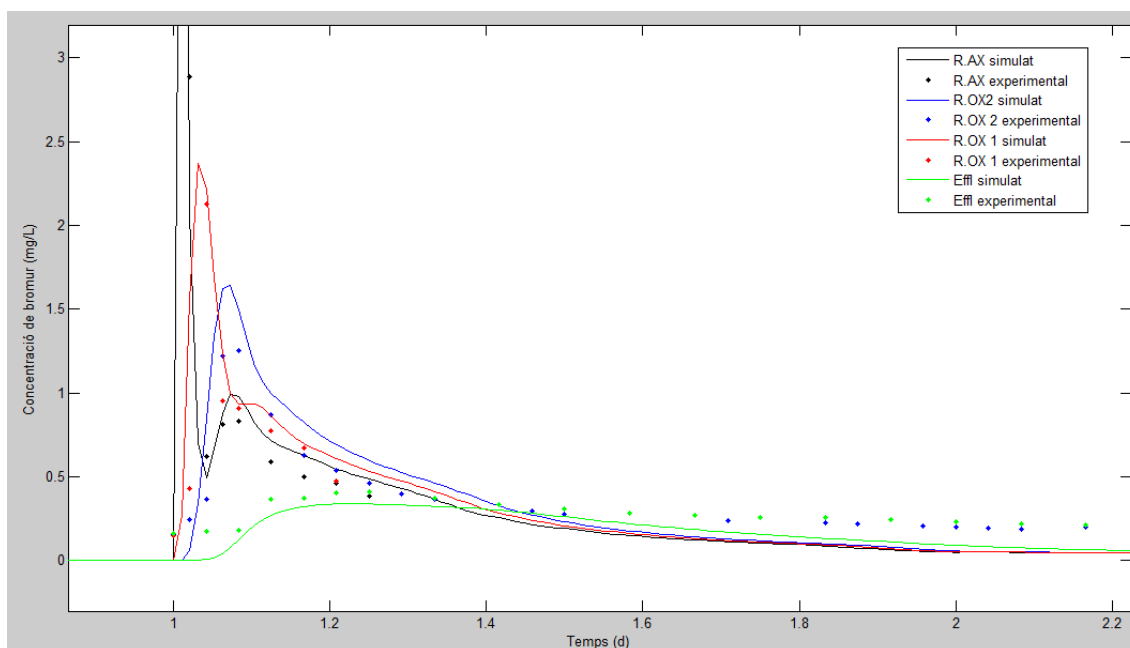


Figura 9.2. Concentració simulada de bromur en funció del temps

En aquest gràfic es representen les corbes simulades (línies contínues) de resposta del traçador en els diferents punts de mostreig (R.AX, R.OX1, R.OX2 i Effl). També s'introdueixen els valors analítics de bromur (punts experimentals) obtinguts en la campanya de mostreig del dia 11 de juny. Comparant aquest gràfic amb els punts experimentals s'observa que la representació gràfica dels resultats simulats de les zones R.AX, R.OX1 i R.OX2 i Effl estan ajustades fins i tot aconseguint una bona representació del doble pic de R.AX després d'ajustar el cabal de recirculació interna de $37500 \text{ m}^3/\text{d}$ a $51834,4 \text{ m}^3/\text{d}$. El cabal de 37500 és el cabal de disseny, que no necessàriament es correspon amb el real. En el consorci no tenen dades d'aquest cabal i per tant s'ha trobat oportú ajustar-lo utilitzant l'estudi de traçadors.

El model introduït al SIMBA després d'haver realitzat diverses iteracions es presenta en la Figura 9.3.

9.2. Caracterització de l'influent

Un cop ajustada la hidràulica del model amb el test de traçadors, es procedeix a la caracterització de l'influent utilitzant les dades analítiques realitzades per l'ICRA (taula 9.3). Les dades de la taula 9.3 no poden ser introduïdes directament en el simulador ja que aquest només reconeix un conjunt de variables d'estat presentades en l'apartat 3.2.2.1. Per tant, utilitzant les fórmules de les taules 6.1 i 6.2 i les dades de la taula 9.3 es calculen les variables d'estat i els paràmetres del fraccionament del model (taules 9.4 i 9.5).

Variable	Valor (mg/L)
DQO soluble, efluent	40
DQO soluble, influent	150
NH ₄ influent	61,24
TKN influent	82,21
DQO total, influent	448

Taula 9.3. Dades analítiques

Els resultats de la caracterització de l'influent són:

Variable d'estat	Resultat (mg/L)
S _i	40
S _s	110
X _i	44,80
X _s	253,20
S _{NH}	61,24
S _{ND}	6,35
X _{ND}	14,62

Taula 9.4. Variables d'estat

Paràmetres	Resultat
fS _i	0,089
fS _s	0,246
fX _i	0,100
fX _s	0,565
f _s	0,303

Taula 9.5. Paràmetres del fraccionament

Aquests paràmetres són introduïts en el fraccionament del simulador (figura 6.10.)

Finalment, es presenta en les taules 9.6, 9.7, 9.8 i 9.9 les dades sol·licitades a la depuradora que han permès obtenir els millors resultats possibles. El model definitiu, calibrat en estat estacionari, es presenta en la figura 10.2.

Caracterització de l'influent	Valor
DQO	359,63 g/m ³
TKN	51,49 g/m ³
P	7,07 g/m ³
Cabal	25917,20 m ³ /d

Taula 9.6. Mitjanes de juny

Font: EDAR de Granollers

Cabals	Valor
Recirculació interna per línia	25917,20 m ³ /d
Recirculació externa	29953,80 m ³ /d
Purga	895,03 m ³ /d

Taula 9.7. Cabals mitjans de juny

Font: EDAR de Granollers

Cabals d'aire	Valor
Zona facultativa	17903 m ³ /d
Zona aeròbica 1	29040 m ³ /d
Zona aeròbica 2	27048 m ³ /d
Zona aeròbica 3	18371 m ³ /d
Zona aeròbica 4	5203 m ³ /d

Taula 9.8. Cabals d'aireació de la línia 1

Font: EDAR de Granollers

Cabals d'aire	Valor
Zona facultativa	22656 m ³ /d
Zona aeròbica 1	23304 m ³ /d
Zona aeròbica 2	23616 m ³ /d
Zona aeròbica 3	17376 m ³ /d
Zona aeròbica 4	4848 m ³ /d

Taula 9.9. Cabals d'aireació de la línia 2

Font: EDAR de Granollers

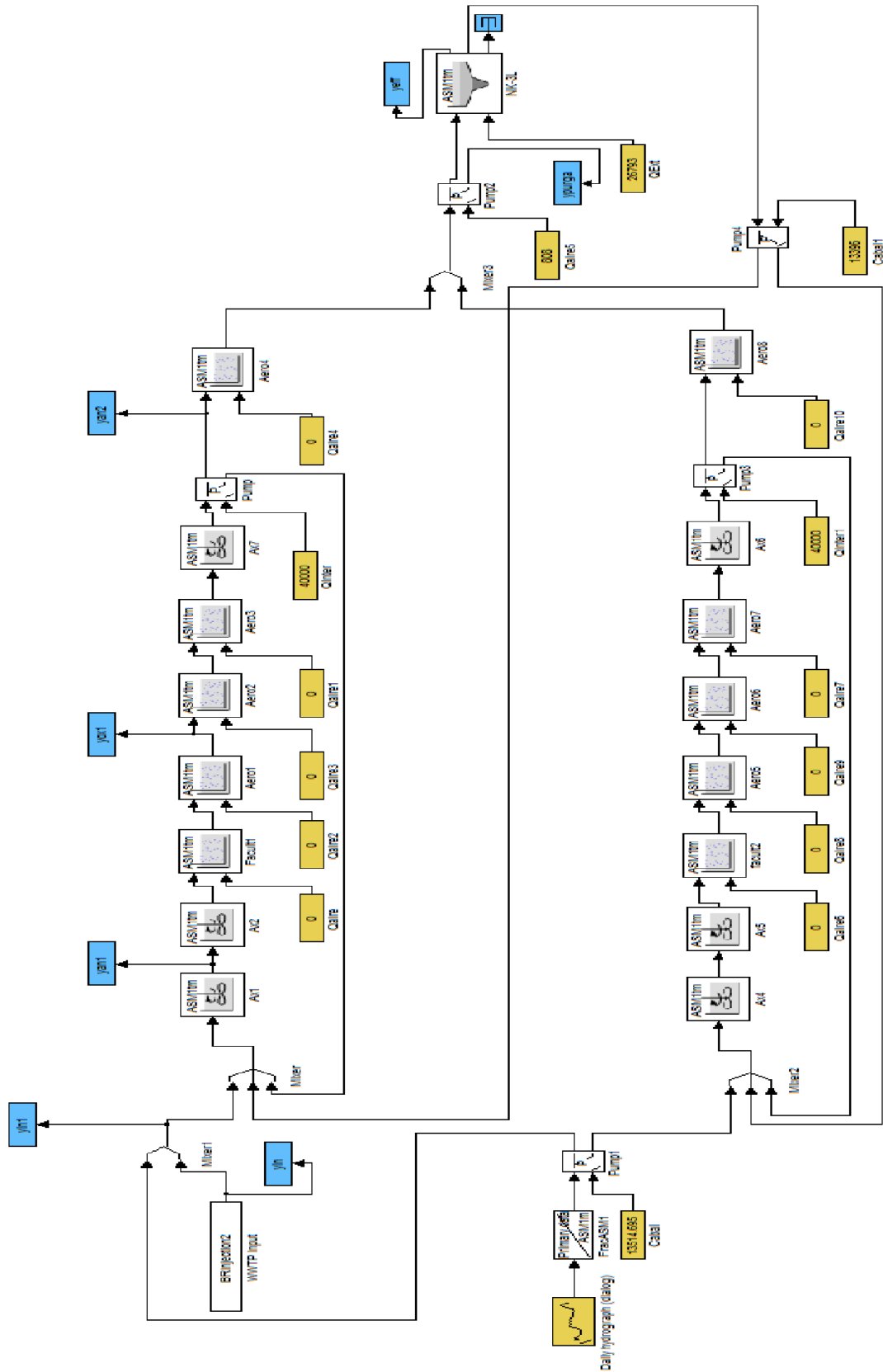


Figura 9.3. Model de les dos línies del reactor

10. Calibració

En aquest apartat és realitza la calibració del model bioquímic ASM1. S'ha realitzat la calibració del model en estat estacionari utilitzant la mitjana de les dades diàries del mes de juny facilitades per la depuradora (annex 3).

10.1. Calibració del model bioquímic de l'EDAR de Granollers

Un cop ajustada l'hidràulica del reactor, s'introdueixen les dades mitjanes del mes de juny proporcionades per la depuradora (annex 3) 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 figura 10.1 es presenta el procediment que s'ha seguit per calibrar el model.

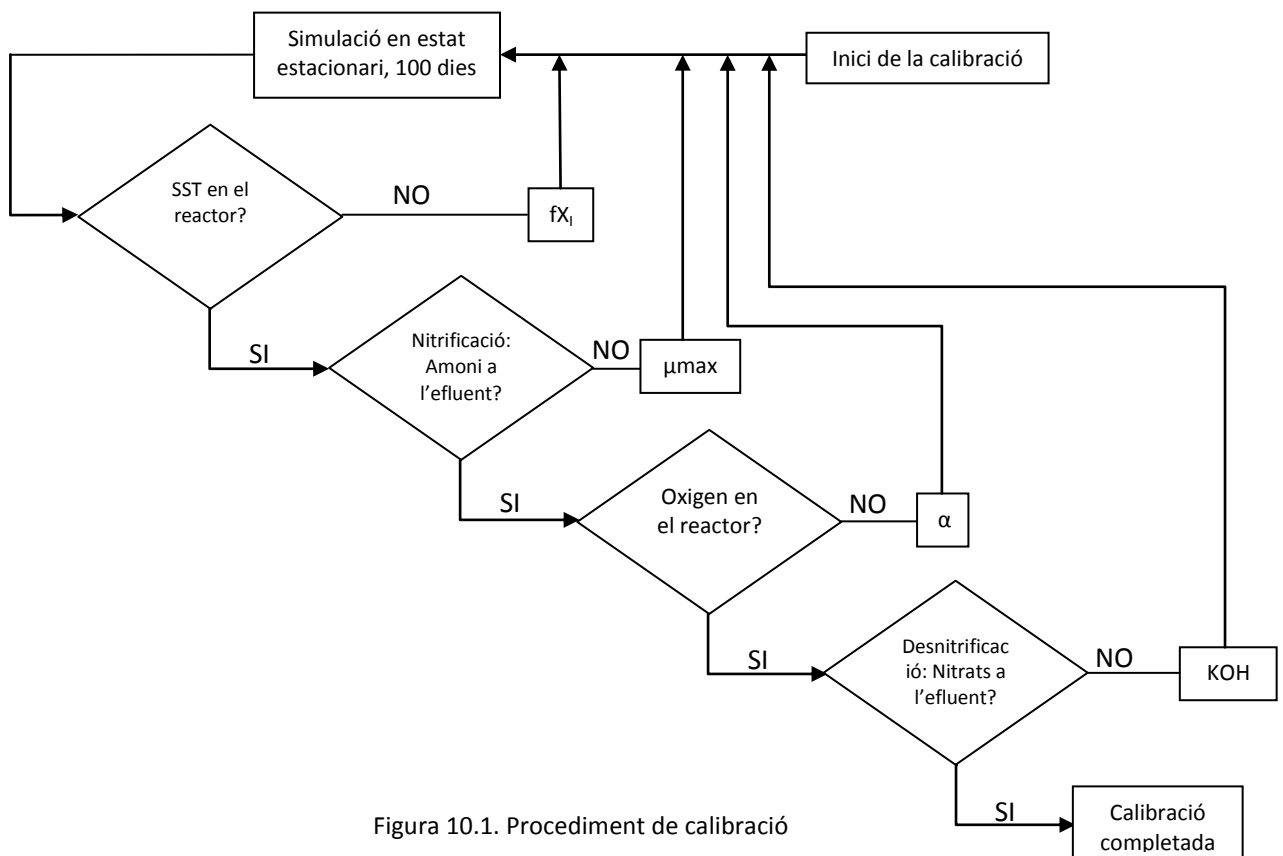


Figura 10.1. Procediment de calibració

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 el influent. Per tant la quantitat de sòlids que entren en el reactor és 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 és de 0.1 i el valor ajustat és 0.05; veure taula 10.2).

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} . En conseqüència l'activitat bacteriana autòtrofa es redueix i la concentració d'amoni en l'efluent augmenta, 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 neta¹⁴ 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 desnitrificació¹⁵. Aquest canvi permet reduir la concentració de nitrats a l'efluent fins al valor mitjà de juny.

En la taula 10.1 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 10.2 s'exposen les variables cinètiques del model que s'han modificat.

	Valors mitjà de juny (mg/L)	Valors 1 ^a 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 10.1. 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 10.2. Paràmetres cinètics d'ASM1 modificats

Font: elaboració pròpia

Així doncs, s'observa un ajust molt bo de les diferents variables (SST, O₂, amoni i nitrats), finalitzant amb èxit la calibració en estat estacionari del model.

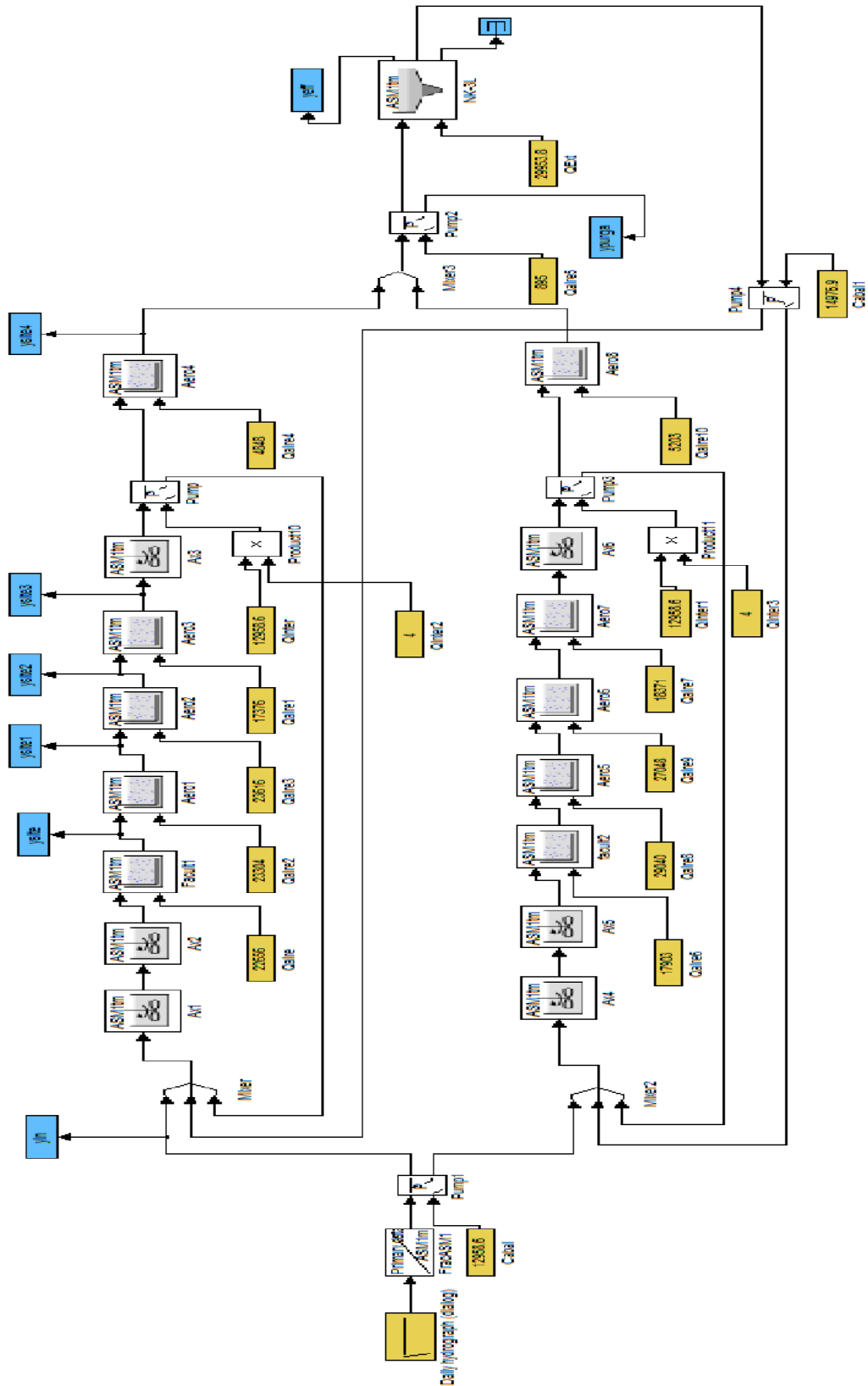


Figura 10.2. Model calibrat en estat estacionari

Capítol 4:

11. Conclusions

11. Conclusions

Analitzant 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 (f_{X_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 gO_2/m^3 .

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.

Capítol 5:

12. Referències bibliogràfiques

13. Programació

14. Pressupost

15. Annexos

12. Referències bibliogràfiques

- ¹ COROMINAS, LL. (2006). Control and optimization of an SBR for nitrogen removal: from model calibration to plant operation. Universitat de Girona.
- ² 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.
- ³ AYMERICH, I. (2013). Decision support tolos for the improvement in the management of urban waster systems. Universitat de Girona.
- ⁴ HENZE, M., GUJER, W., MINOT, T. AND VAN LOOSDRECHT, M. (2000). Activated Sludge Models: ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report nº9. IWA Publishing, London, UK.
- ⁵ IWA Task Group (2013). Guidelines for Using Activated Sludge Models. IWA Publishing, London and New York.
- ⁶ 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.
- ⁷ 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.
- ⁸ METCALF & EDDY (1985). Ingeniería sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. Edición revisada por George Tchobanoglous. Capítulo 9. Procesos biológicos unitarios.
- ⁹ RAMALHO, R. S. (2003). Tratamiento de aguas residuales. Capítulo 8. Tratamiento terciario de las aguas residuales.

¹⁰ Projecte de construcció i ampliació de l'EDAR de Granollers. Generalitat de Catalunya.

¹¹ Agència Catalana de l'Aigua (ACA): <http://aca-web.gencat.cat/aca/appmanager/aca/aca/>

¹² TAKACS, I., PATRY GG., NOLASCO D. (1991). A dynamic model of the clarification-thickening process. Water Res.

¹³ 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)

¹⁴ ROSSO, D., LARSON, L.E. AND STENSTROM, M.K. (2008). Aeration of large-scale municipal wastewater treatment plants: state of the art. IWA Publishing.

¹⁵ 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.

13. Programació

Mes	Setmana	Tasques
Octubre	1 – 2	Reunions amb Ernest Marco (tutor) i Lluís Corominas (director)
	3 – 4	Definició dels objectius i estudi del protocol presentat en el llibre <i>Guidelines for Using Activated Sludge Models</i>
Novembre	1 – 2	Recopilació de dades (visites a l'EDAR de Granollers)
	3	Familiarització amb el simulador SIMBA (ICRA)
	4	Anàlisi del test de traçadors
Desembre	1 – 2	Calibració en estat estacionari de la hidràulica del reactor
	3 – 4	Calibració en estat dinàmic de la hidràulica del reactor
Gener	1	Caracterització de l'influent
	2	Calibració del model en estat estacionari
	3 – 4	Redacció de la memòria
Febrer	1	Entrega del projecte

14. Pressupost

Costos	Concepte	Preu unitari	Unitats	Preu
Honoraris	Treball de camp	12€/h	25 h.	300 €
	Treball de despatx	10€/h	480 h.	4800 €
Desplaçament	Vehicle privat	0,104€/km.	2330 km.	242,32 €
Material	Impressions	0,04€	201 impr.	8,04 €
	Enquadernacions	3€	3 enq.	9 €
	CD's	0,3€	3 CD	0,9 €
Total costos variables				5360,26 €
Costos fixes (20% dels variables)				1072,05 €
Fixes + variables				6432,31€
IVA (21%)				1350,79 €
Total + IVA				7783,11 €

Annexos

Degut a l'extensió del documents presentats en aquest apartat, s'adjunta un CD a aquest projecte amb els annexos corresponents.

- **Annex 1:** Analítiques del test de traçadors (ICRA)
- **Annex 2:** Càlcul del temps de retenció hidràulic (ICRA)
- **Annex 3:** Dades diàries de juny fins a setembre (EDAR)
- **Annex 4:** Dades dels dies de campanya (EDAR)

