

Bases d'enginyeria ambiental

Alberto Bouzas, Juan A. González
Vicente Martínez-Soria, Josep M. Penya-roja

PUV

Alberto Bouzas Blanco
Juan A. González Romero
Vicente Martínez-Soria
Josep M. Penya-roja Oltra

BASES D'ENGINYERIA AMBIENTAL

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA
2007

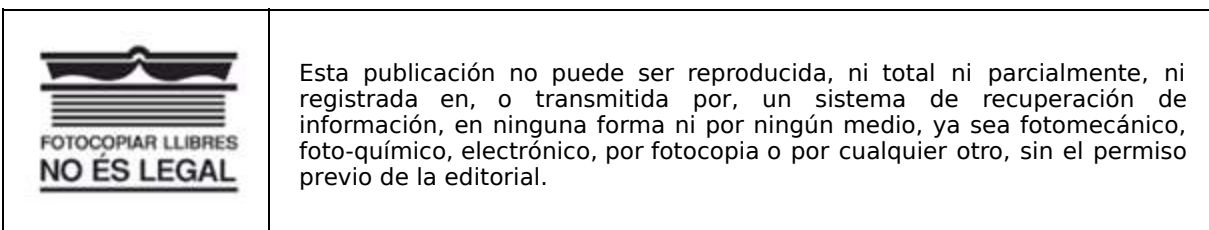
Educació. Materials 98

Col·lecció: Educació. Materials

Director de la col·lecció: Guillermo Quintás Alonso

La publicació d'aquest llibre ha rebut l'ajut d'una beca del Servei de Política Lingüística de la Universitat de València per a la redacció de manuals en català.

Aquesta publicació ha comptat amb l'ajut de la Generalitat de Catalunya.



© Els autors, 2007

© D'aquesta edició: Universitat de València, 2007

Coordinació editorial: Maite Simon

Fotocomposició i maquetació: Inmaculada Mesa

Correcció: José Manuel Guevara (Servei de Política Lingüística)

Coberta:

Disseny: Pere Fuster (Borràs i Talens Assessors SL)

Fotografia i tractament gràfic: Celso Hernández de la Figuera

Realització ePub: produccioneditorial.com

ISBN: 978-84-370-6648-6

Índex

Portada

Portada interior

Crèdits

Índex

Introducció

1. Conceptes generals

1.1 Quina és la funció de l'enginyeria ambiental?

1.2 Exemple de sistema de tractament: estació depuradora d'aigües residuals

1.3 Operacions unitàries. Definició i classificació

1.3.1 Operacions unitàries basades en el transport de la quantitat de moviment

1.3.2 Operacions unitàries basades en el transport d'energia

1.3.3 Operacions unitàries basades en el transport de matèria

1.4 Formes d'operació

1.4.1. Règim estacionari i no estacionari

1.4.2. Inconvenients i avantatges dels dos tipus d'operació considerades

1.5 Plantejament general de l'anàlisi i el disseny de sistemes

2. Balanços de matèria

- 2.1 Principi de conservació de matèria
- 2.2 Balanç de propietat en un entorn
- 2.3 Magnituds, unitats i formes d'expressar la composició
- 2.4 Balanços de matèria en estat estacionari
 - 2.4.1 Sense generació
 - 2.4.2 Amb generació
 - 2.4.3 Sistemes amb més d'una unitat
- 2.5 Balanç de matèria en estat no estacionari
 - 2.5.1 Operació discontinua
 - 2.5.2 Operació contínua

Problemes addicionals

3. Balanços d'energia

- 3.1 Importància dels balanços d'energia
- 3.2 Balanç total d'energia
 - 3.2.1 Deducció de l'expressió general: anàlisi dels termes
- 3.3 Balanç entàlpic
 - 3.3.1 Propietats de l'entalpia: determinació i càlcul
 - 3.3.2 Aplicació al règim estacionari
 - 3.3.3 Balanç d'energia en un reactor
 - 3.3.4 Aplicació a l'estat no estacionari
- 3.4 Balanç d'energia mecànica
 - 3.4.1 Energia mecànica
 - 3.4.2 Expressió del balanç d'energia mecànica
 - 3.4.3 La pressió

Problemes addicionals

4. Introducció als reactors

- 4.1 Processos de transformació en enginyeria ambiental
- 4.2 Exemples de transformació química/biològica en enginyeria ambiental

4.3 Classificació dels reactors

4.3.1 Per la forma d'operar

4.3.2 Model de flux i contacte de la mescla de reacció

4.3.3 Per la forma d'intercanviar calor

4.3.4 Per la naturalesa de les fases

4.4 Equacions de disseny

4.4.1 Grandària del reactor

4.4.2 Velocitat de reacció

4.4.3 Dependència respecte de la concentració

4.4.4 Dependència respecte de la temperatura

4.5 Els reactors ideals

4.5.1 Descripció dels reactors ideals

4.5.2 Reactor discontinu de tanc agitat (RDTA)

4.5.3 Reactor continu de tanc agitat (RCTA)

4.5.4 Reactor tubular amb flux de pistó (RFP)

4.6 Aplicació a un sistema natural. Estudi de l'impacte d'una descàrrega d'aigua residual en un riu

4.7 Anàlisi comparativa dels dos sistemes continus (tanc agitat i flux de pistó). El cas particular del sistema de fangs activats

Problemes addicionals

5. Introducció als fenòmens de transport

5.1 Generalitats

5.2 Mecanismes de transport molecular i de transport turbulent

5.3 Transport molecular: equacions de velocitat

5.3.1 Llei de Fourier

5.3.2 Llei de Newton

5.3.3 Llei de Fick

5.4 Transport turbulent: coeficients de transport

- 5.4.1 Coeficients individuals de transport
- 5.5 Transport entre diverses fases. Coeficients globals de transport
 - 5.5.1 Transport entre fases
 - 5.5.2 Coeficient global
- 5.6 Plantejament i resolució de problemes
- Problemes addicionals
- 6. Operacions i processos unitaris de depuració
 - 6.1 Classificació
 - 6.2 Operacions unitàries físiques
 - 6.2.1 Sedimentació
 - 6.2.2 Flotació
 - 6.2.3 Filtració
 - 6.2.4 Centrifugació
 - 6.2.5 Absorció
 - 6.2.6 Membranes
 - 6.2.7 Bescanvi de calor
 - 6.2.8 Floculació
 - 6.3 Processos unitaris químics de depuració
 - 6.3.1 Adsorció
 - 6.3.2 Bescanvi iònic
 - 6.3.3 Coagulació
 - 6.3.4 Precipitació
 - 6.3.5 Oxidació
 - 6.3.6 Desinfecció
 - 6.4 Processos unitaris biològics de depuració
 - 6.4.1 Classificació del processos biològics
 - 6.4.2 Processos biològics de cultiu en suspensió
 - 6.4.3 Processos biològics de suport sòlid
- 7. Índexs de qualitat ambiental
 - 7.1 Funció dels índexs de qualitat
 - 7.2 Índex de qualitat de l'aire

7.3 Índex de qualitat de l'aigua

7.3.1 Indicadors fisicoquímics

7.3.2 Indicadors biològics

7.4 Índex de qualitat del sòl

Bibliografia

Apèndixs

Apèndix A

Nomenclatura

Apèndix B

Magnituds, unitats i dimensions

Sistema Internacional de Magnituds i Unitats (SI)

Factors de conversió

Canvis d'unitats en concentracions: pes molecular,
densitat i equació d'estat dels gasos

Exemples de conversió

Índex analític

Introducció

L'enginyeria ambiental es pot definir com la disciplina en què s'apliquen els fonaments de matemàtiques, física, química i biologia amb el propòsit de protegir la salut humana i el medi ambient i proporcionar la resposta tècnica als requeriments mediambientals. Per tant, un llibre amb el títol de *Bases d'enginyeria ambiental* ha de proporcionar a l'estudiant les eines per tal de començar a plantejar i resoldre qüestions com ara les següents:

- En què consisteix, com funciona i com es dissenya i es construeix una planta de tractament d'aigües residuals?
- Quina és la forma d'operar d'una planta de tractament de residus?
- Quins són els processos de depuració i/o de combinació de residus més apropiats per al tractament d'un determinat efluent o residu?
- Quina és la grandària d'un reactor químic o biològic i en quines condicions ha d'operar per tal de portar a terme l'eliminació d'un determinat contaminant?
- Quina és l'opció més aconsellable per al subministrament d'aigua en una determinada zona: la instal·lació d'una dessaladora o el transvasament d'aigua?
- Com es mesura i classifica la qualitat de l'aire? I la de l'aigua? I la del sòl?
- Quin és l'efecte d'un abocament en la concentració d'oxigen d'un riu?
- Quina serà l'evolució de la concentració d'un patògen a partir d'un abocament puntual a l'Albufera?

El present treball pretén com a objectiu principal servir de text bàsic i iniciàtic en l'enginyeria ambiental, cobrir les mancances bibliogràfiques existents al respecte i ser un llibre pioner en el seu gènere escrit en la nostra llengua. Malgrat que el text ha estat elaborat específicament pensant en les necessitats de formació de l'assignatura *Bases de l'enginyeria ambiental*, de la llicenciatura de Ciències Ambientals, el caràcter bàsic de l'obra fa que també pugui ser utilitzada per estudiants de qualsevol disciplina científica o enginyeria com a text introductori als fonaments i a les aplicacions pràctiques de l'enginyeria ambiental.

L'obra s'estructura en diferents capítols segons els continguts bàsics que configuren l'enginyeria ambiental, que corresponen als descriptors de l'esmentada assignatura del pla d'estudis de la llicenciatura de Ciències Ambientals. Els capítols en què s'ha organitzat el llibre són:

1. Conceptes generals.
2. Balanços de matèria.
3. Balanços d'energia.
4. Introducció als reactors.
5. Introducció als fenòmens de transport.
6. Processos de depuració físics, químics i biològics.
7. Índexs de qualitat del medi.

La seqüència dels capítols no és arbitrària, ja que segueix un ordre de complexitat creixent i, generalment, l'adequada comprensió d'un determinat capítol requereix els coneixements fonamentals que es presenten en els capítols precedents.

En el primer capítol es presenten una sèrie de conceptes bàsics generals que apareixeran molt sovint al llarg del llibre. Així, termes com ara *fenòmens de transport*, *règim estacionari* i *no estacionari*, o com ara *operació unitària*, són definits en aquest capítol.

Els dos capítols següents es dediquen a l'estudi dels balanços de les dues propietats de major importància en l'estudi i disseny de processos, la matèria i l'energia. S'hi estudiaran sistemes de diferent complexitat: règim estacionari i no estacionari, amb i sense reacció, etc. L'ensenyament dels balanços ha de ser fonamentalment aplicat, això vol dir que s'aprenen resolent problemes. En aquests capítols, a la resolució d'exemples il·lustratius dels diferents tipus de sistemes que s'estudien s'adjunta una sèrie d'enunciats de problemes que poden servir de material didàctic complementari per a l'estudi.

El capítols quatre i cinc pretenen ser una introducció bàsica i senzilla a dues de les disciplines més importants en l'enginyeria de processos: l'enginyeria dels reactors i els fenòmens de transport, i s'aborda aquest estudi des d'una perspectiva ambiental.

L'estudi dels reactors tracta els casos més senzills: els reactors ideals isoterms. Partint de l'expressió cinètica i aplicant els balanços pertinents es desenvolupen les equacions necessàries per dissenyar i analitzar el funcionament dels reactors, i s'il·lustren amb diferents exemples que es resolen. Des del punt de vista pràctic es descriuen alguns dels exemples característics d'aplicacions de reactors a l'enginyeria ambiental i es planteja la resolució i l'anàlisi de dos casos concrets: el reactor de fangs activats i una descàrrega d'aigua residual en un riu. Finalment, s'adjunta una sèrie d'enunciats de problemes complementaris per resoldre.

Els fenòmens de transport es tracten referint-nos a la importància i la necessitat de conèixer la velocitat a què es produeixen les transformacions a l'hora d'abordar l'estudi i el disseny de qualsevol sistema. Es mostren el dos mecanismes de transport, molecular i turbulent, i les equacions de velocitat per a les diferents propietats d'interès: matèria, energia i quantitat de moviment. Es presenta el concepte de coeficients de transport i el mètode

per calcular-los. L'aplicació pràctica dels diferents conceptes es fa palesa mitjançant la resolució d'exemples senzills. L'anàlisi de problemes amb sistemes més complexos s'aborda mitjançant el plantejament i la resolució de diferents casos concrets representatius. S'afegeix una col·lecció de problemes addicionals per al treball personal.

En el capítol sis es defineixen i es descriuen les principals operacions unitàries físiques de depuració i els processos unitaris químics o biològics de depuració més destacables. A causa del caràcter bàsic d'aquesta obra, l'estudi de les diferents operacions i processos es fa atenent a la seua aplicació i a la descripció pràctica del seu funcionament. La complexitat necessària per a l'estudi del disseny dels aparells que es requereixen en les diferents operacions i processos queda fora de l'abast d'aquesta obra, però es poden estudiar adequadament en l'extensa bibliografia específica disponible.

Els índexs de qualitat ambiental, ja siguen de l'aigua, de l'aire o del sòl, representen una eina relativament nova per descriure d'una forma estàndard, senzilla i universal l'estat ecològic dels medis. En l'últim capítol del llibre es descriuen i s'analitzen alguns dels principals índexs de qualitat que s'utilitzen per determinar la qualitat d'un medi.

1. *Conceptes generals*

1.1 Quina és la funció de l'enginyeria ambiental?

La titulació i la professió d'enginyer ambiental han aparegut en l'àmbit internacional molt recentment –dècada dels 70 del segle xx– a partir, en algunes universitats, de la reorientació i l'especialització dels estudis d'enginyeria sanitària, i en d'altres a partir de l'enginyeria química. Aquesta *joventut* en l'àmbit acadèmic no significa que no s'hagen adoptat solucions tecnològiques en els problemes ambientals des de l'antiguitat.

Els orígens d'allò que *grosso modo* es pot anomenar *enginyeria ambiental* es remunten a l'antiguitat clàssica. La cultura grega fou la primera a relacionar de forma empírica la manca d'higiene amb la proliferació de malalties. Aquesta constatació, junt amb el desenvolupament tecnològic dut a terme per la civilització romana posteriorment, féu possible l'existència de ciutats de grans dimensions durant el domini romà. Així, la ciutat de Roma assolí al començament de la nostra era una població propera al milió d'habitants. Una concentració urbana d'aquestes dimensions només és possible amb un sistema d'infraestructures que proporcione aigua fresca a la metròpoli i transporte fora de la ciutat els residus generats. El govern romà n'era conscient, de forma que tota una xarxa de conduccions i aqüeductes transportaven aigua de forma contínua a Roma, on es distribuïa a la multitud de fonts i banys públics al servei dels ciutadans. L'aigua corrent arribava fins i tot als habitatges de l'aristocràcia. Per altra banda, la ciutat disposava d'una xarxa de

clavegueres que transportaven els residus generats fins al Tíber.

Amb la caiguda de l'Imperi romà es va produir al món occidental un declivi de la salut pública que es va perllongar fins ben entrat el segle XIX. L'elit dirigent no percebia com a responsabilitat pròpia el manteniment de les instal·lacions adequades. A les ciutats de l'Europa medieval les aigües residuals i els residus sòlids eren abocats directament al carrer. Aquesta situació d'insalubritat impulsà la propagació de malalties, que assoliren nivells descomunals al segle XIV amb les epidèmies de pesta que arrasaren tot el món occidental. Malgrat els grans avanços mèdics en anatomia i en cirurgia al llarg del Renaixement, la conjuntura en qüestions de salut pública es mantingué més o menys inalterable.

L'aparició de grans aglomeracions humanes al voltant dels centres de producció, com a conseqüència del desenvolupament de la revolució industrial, donà lloc a una situació insostenible: encara en ple segle XIX els residus domèstics, líquids i sòlids, eren abocats al carrer, on es podrien i es dispersaven. En front d'aquesta adversitat, al Regne Unit es duen a terme alguns estudis amb la finalitat de trobar solucions als greus problemes de salut de l'època. En aquest sentit, cal subratllar que el problema es considerava *econòmic*, pels efectes sobre la producció industrial, més que social. Cal tenir en compte el context històric: en una època en la qual la doctrina del *laissez faire* del capitalisme salvatge s'entén gairebé com una llei natural, les institucions encara no han adquirit la responsabilitat en els problemes de salut pública.

Un punt d'inflexió de gran importància respecte a la salut pública és l'informe de Sir E. Chadwick de 1842, *Enquiry into the Sanitary Condition of the Labouring Population of Great Britain*. Entre les conclusions d'aquest document destaca la importància de *buscar l'ajut de la ciència de l'enginyer, no del metge*. Entre les solucions que

l'enginyeria pot aportar a la salut pública, segons aquest informe, destaquen:

- Equipar cada allotjament amb aigua potable.
- Eliminar l'aigua residual dels habitatges i recollir-la mitjançant una xarxa de clavegueres.
- Transportar als terrenys agrícoles els residus recollits als centres urbans.

El reconeixement de la importància de l'enginyeria en la salut pública fa que sorgisca de l'enginyeria civil una disciplina que es consolidarà a partir d'aquestes dates: l'enginyeria sanitària. En un principi la seua funció era simplement la de transport de materials: transport d'aigua de subministrament a les ciutats i evacuació dels residus i de les aigües residuals urbanes. Amb el creixement industrial i l'augment de les aglomeracions urbanes es fan necessaris uns tractaments més complexos que tenen els fonaments en l'enginyeria química.

En definitiva, es pot dir que l'enginyeria ambiental és una disciplina moderna amb un caràcter marcadament multidisciplinari que es recolza fonamentalment en l'enginyeria civil i l'enginyeria química i que necessita per al seu desenvolupament el coneixement que proporcionen els camps de les ciències bàsiques de la química, la física, la biologia i l'economia.

L'activitat humana es pot considerar, de forma simplificada, com un procés que es proveeix de recursos naturals i genera materials manipulats que tornen al medi en forma de residus (figura 1.1). Resulta clar que aquest esquema no produeix problemes ambientals si l'escala de l'acció humana és negligible en comparació amb l'escala del medi: en una societat primitiva la utilització de recursos naturals és infinitament petita enfront del total disponible i els residus produïts són absorbits pel medi de forma que

els efectes hi queden totalment diluïts o s'hi integren mitjançant l'acció de processos naturals.

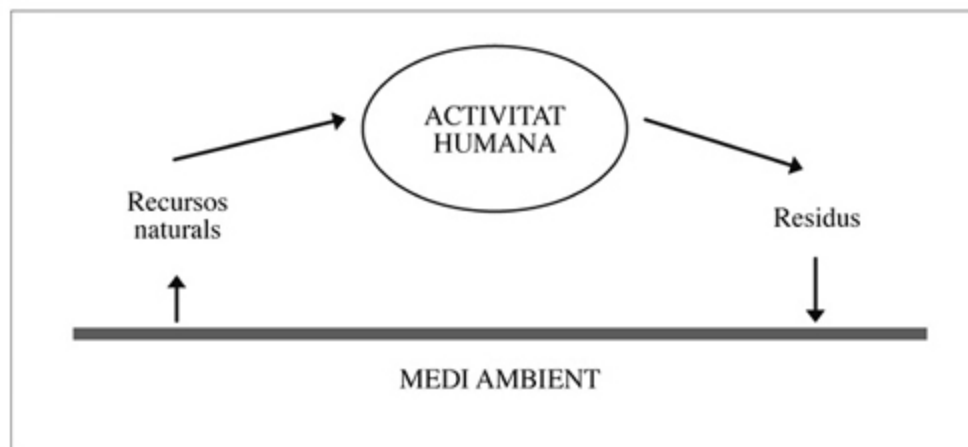


Figura 1.1 Interacció activitat humana-medi ambient.

El problema sorgeix quan la magnitud de l'escala de l'activitat humana és del mateix ordre que la grandària del medi que la sosté -conseqüència de l'augment de la població i de l'activitat per càpita de les societats desenvolupades-, de forma que es produeix una situació insostenible. En aquest context es pot definir l'enginyeria ambiental com el camp de la tecnologia que té per objecte la concepció, el disseny i la implantació de solucions per minimitzar els efectes de les activitats humanes en el medi ambient. Aquestes solucions es materialitzen en forma de sistemes correctius o en estratègies de caràcter preventiu. Segons aquesta definició són possibles diverses alternatives per actuar sobre el sistema insostenible:

- Reducció: de la fabricació de productes, de l'ús final de béns; implantació de tecnologies netes més eficients en l'ús de materials i de l'energia.
- Recuperació (valorització): dels materials (reciclatge i reutilització); de l'energia (incineració, gasificació, compostatge).
- Tractament: minimització de la toxicitat i del perill de l'impacte sobre el medi.

- Eliminació: dipòsits de seguretat per a residus tòxics o perillosos, abocadors controlats per a residus domèstics.

En la taula 1.1 es mostren els principals àmbits de treball de l'enginyeria ambiental per minimitzar els efectes de l'activitat humana en el medi ambient.

TAULA 1.1
Àmbits d'aplicació de l'enginyeria ambiental

Proveïment d'aigua
Potabilització d'aigua
Col·lectors d'aigües residuals
Tractament d'aigües residuals
Tractament de fangs
Tractament de residus sòlids
Tractament de residus perillosos
Control d'emissions atmosfèriques
Control de la contaminació acústica
Control de la contaminació agrícola i ramadera
Minimització de la producció de residus i del consum de recursos
Modelització ambiental

L'anàlisi o disseny d'un procés ja siga de tractament, de recuperació o d'eliminació a escala industrial fa necessari un estudi detallat de les diferents etapes del procés, per la qual cosa cal aplicar els coneixements englobats en les següents denominacions:

- Balanços de matèria i energia.
- Operacions bàsiques.
- Reactors químics i biològics.
- Economia.

Els balanços de matèria i energia són essencialment aplicacions de les lleis de conservació de la matèria i de

l'energia en el sistema de tractament o instal·lació.

Les operacions bàsiques (operacions físiques unitàries) engloben els processos de natura física que tenen lloc en una determinada planta o instal·lació. En aquestes operacions es produeix el transport de les propietats de matèria, d'energia i de quantitat de moviment. Aquestes operacions es poden classificar segons el tipus de transport que controla el procés tal com es mostrarà més endavant en aquest capítol.

En el bloc de coneixement corresponent als reactors (que la bibliografia ambiental denomina processos unitaris biològics i químics) s'estudien els sistemes en què intervenen reaccions químiques, encara que en ocasions poden ser controlades per processos físics com la difusió (com en un reactor biològic de suport sòlid). A més de conèixer la cinètica de la reacció s'ha de seleccionar el tipus de reactor on dur-la a terme, segons la reacció i el funcionament continu o discontinu del sistema.

Per últim, com en qualsevol altre camp de la tecnologia, el factor econòmic juga un paper fonamental en la selecció d'alternatives en un determinat problema ambiental. No obstant això, cal tenir en compte que l'economia de la solució depèn, lògicament, de la dificultat i la importància del problema, la qual cosa no permet de generalitzar en termes quantitius. Per exemple, el cost de tractament d'una aigua residual varia sensiblement segons la natura i la concentració dels contaminants presents, de forma que es poden trobar diferències fins i tot en ordres de magnitud entre els tipus d'efluents de diferents orígens i naturalesa.

1.2 Exemple de sistema de tractament: estació depuradora d'aigües residuals

Per presentar els conceptes bàsics de l'enginyeria ambiental es dóna tot seguit un exemple de sistema de tractament en què es presenta a partir d'un cas concret el

concepte d'operació unitària, que es desenvoluparà en el següent apartat.

En la figura 1.2 s'ha representat l'esquema d'una estació depuradora d'aigües residuals urbanes. La selecció d'operacions unitàries en cada etapa de depuració depèn de diversos factors, la qual cosa implica múltiples esquemes de tractament possibles. Cal insistir en el fet que es tracta d'un exemple entre les infinites possibilitats disponibles.

El sistema de depuració produeix separacions i/o transformacions de components inicialment presents en l'aigua residual i produeix diverses línies de flux de matèria al llarg de la instal·lació. En el diagrama de flux de la figura 1.2 s'ha representat cada operació amb un rectangle. Aquests rectangles estan units per fletxes que indiquen el sentit de circulació dels materials -de forma contínua- d'una etapa a l'altra. A l'interior de cada rectangle s'indica el nom de la transformació que hi té lloc.

Abans d'analitzar el diagrama de flux cal recordar que l'aigua residual de tipus domèstic té com a principals agents contaminants compostos orgànics que s'hi troben en suspensió, en dispersió col·loïdal i/o en dissolució, per la qual cosa s'empra un reactor biològic. La resta d'operacions són necessàries per condicionar l'aigua per tal que es pugui desenvolupar la transformació biològica i per tractar el residu sòlid generat. (Pregunta per al lector: quin problema produeix la presència de matèria orgànica en l'aigua?)

La primera operació que es du a terme en entrar l'aigua en brut a l'estació depuradora, segons es pot observar en el diagrama, és el desbast. Rep aquest nom l'operació d'eliminació de sòlids gruixuts que poden fer malbé les instal·lacions de tractament. Consisteix a fer passar l'aigua residual a través d'enreixats i tamisos. L'enreixat consisteix en una sèrie de barres d'acer verticals o inclinades, separades a distàncies iguals al llarg del canal per on

circula l'aigua residual. En circular l'aigua entre les barres, els sòlids hi queden retinguts i són separats mitjançant una operació de neteja de forma manual o automàtica.

Al desarenador se separen partícules minerals amb un pes específic superior al dels sòlids orgànics com ara grava, arenes, etc. L'eliminació d'aquests materials del corrent d'aigua residual permet protegir els elements mecànics mòbils de l'abrasió i del desgast, reduir la formació de pòsits de material pesant a l'interior dels canals, de les canonades i de les conduccions, i reduir la freqüència de neteja dels digestors, requerida per l'excessiva acumulació d'arenes.

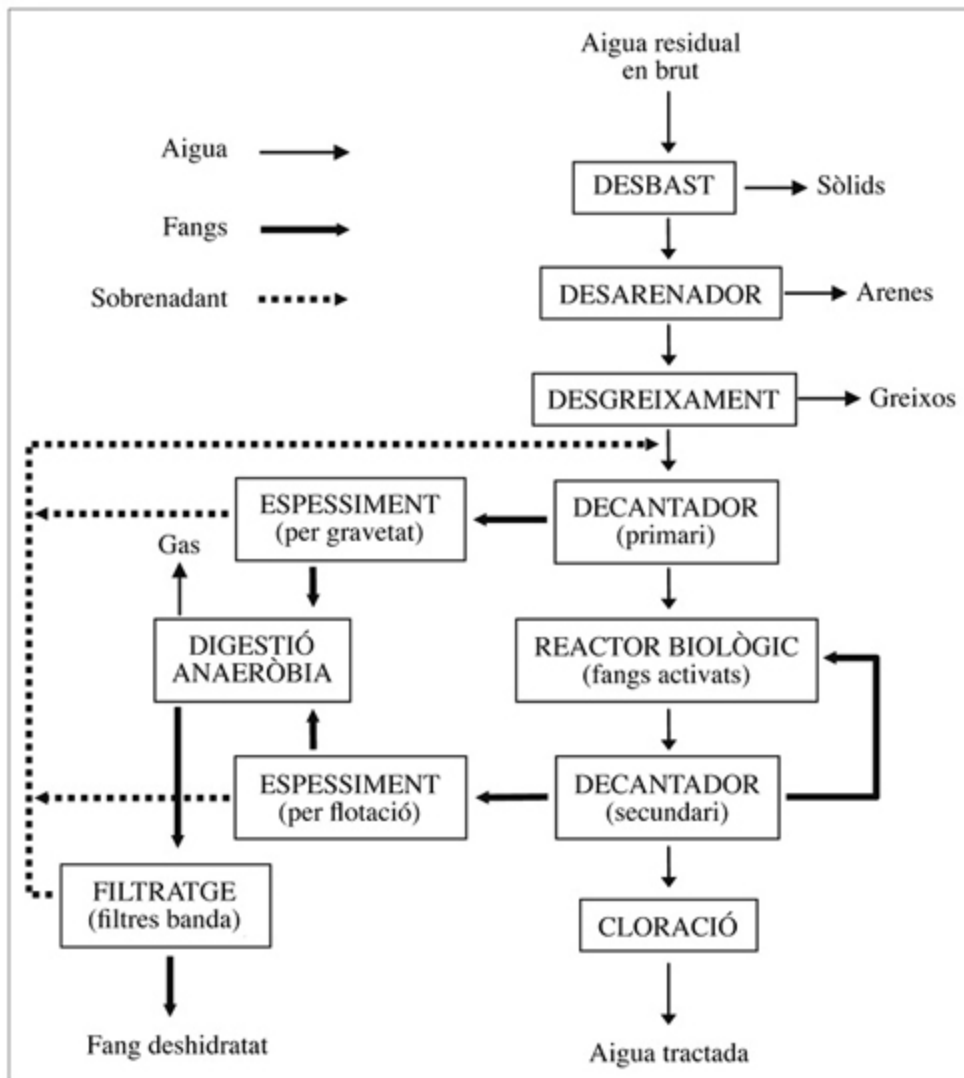


Figura 1.2 Estació depuradora d'aigües residuals de tipus domèstic.

Les aigües residuals sempre porten una important quantitat de greixos i olis que cal eliminar ja que produeixen diversos problemes durant el procés de tractament d'aquestes: provoquen obstruccions de sistemes mecànics; en tractar-se de compostos orgànics, incrementen les necessitats del tractament biològic; redueixen el coeficient de transferència d'oxigen als processos biològics; pertorben la posterior separació de fangs, i dificulten el procés de digestió d'aquests darrers. El desgreixament se sol dur a terme mitjançant la introducció d'aire en el corrent d'aigua per tal d'afavorir el trencament de la dispersió, de forma que les partícules de greix es desplacen a la superfície de l'aigua per la seua menor densitat. També es possible eliminar els greixos en la sedimentació primària, on no cal emprar aire atès que l'elevat temps de retenció de l'aigua en el clarificador primari possibilita la deposició superficial del greix.

Aquest conjunt d'operacions rep el nom de *pretractament*, l'objectiu principal del qual és condicionar l'aigua mitjançant l'eliminació dels materials que podrien causar problemes en les instal·lacions del tractament posterior.

A continuació se sotmet l'aigua al *tractament primari*. En l'exemple considerat consisteix en una decantació o sedimentació primària amb la qual se separen els sòlids en suspensió sedimentables del corrent d'aigua (al voltant del 60% del total de sòlids), per a la qual cosa es redueix la velocitat de pas de l'aigua. En sedimentar aquest material, malgrat que la major part és de caràcter mineral, arrossega i adsorbeix en la caiguda certa quantitat de matèria orgànica.

El principal agent contaminant de l'aigua residual domèstica (material orgànic, principalment soluble i col·loïdal) encara hi és present després del pretractament i del tractament primari. La degradació de la matèria orgànica té lloc al reactor biològic, que és el nucli principal

d'una estació depuradora d'aigües residuals. Aquest reactor pot tenir múltiples configuracions, d'entre les quals el procés de fangs activats de mescla completa és el més utilitzat al nostre entorn. Consisteix en un tanc agitat per tal de mantenir en suspensió la mescla de reacció (aigua residual i microorganismes), i airejat per tal de treballar en condicions aeròbies.

Al reactor té lloc la degradació biològica del material orgànic per part dels microorganismes heteròtrofs (principalment bacteris). La matèria orgànica s'utilitza com a font d'energia (catabolisme) i de carboni (anabolisme) pel metabolisme de la població microbiana. Així, part de la matèria orgànica inicial s'oxida completament en productes inerts ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) i una altra part es transforma en material cel·lular. Malgrat ser un agent contaminant orgànic, les cèl·lules formades presenten la important característica de ser separables per decantació. Cal, doncs, un sistema de sedimentació per separar la matèria orgànica del corrent d'aigua residual (decantador secundari). D'aquesta forma s'obté un corrent amb una concentració baixa de matèria orgànica (aigua tractada) i un altre corrent amb una concentració alta de biomassa (microorganismes) que es recircula cap al reactor amb la finalitat de mantenir una concentració adequada de població microbiana en el sistema. Part del corrent de recirculació es purga per regular el funcionament del reactor i eliminar l'excés de biomassa (fangs) produïda, que se sotmet a un tractament posterior abans del seu abocament o disposició.

Després d'un tractament en el qual s'ha eliminat la matèria orgànica i els sòlids en suspensió, el corrent depurat conté una quantitat de microorganismes com ara virus, bacteris, paràsits, que poden ser portadors de malalties. Caldrà, doncs, una major protecció en el cas que la vessada del corrent d'aigua residual tractada es done a zones sensibles com ara zones de bany, zones de provisió

de rec, zones d'aqüicultura, etc. En aquests casos normalment es fa una desinfecció química mitjançant addició de clor (cloració). El procés de destrucció de microorganismes depèn, a més de la quantitat de clor residual en l'aigua, del temps de contacte. Així, per fer una bona desinfecció es recomana un període mínim de contacte de quinze minuts.

Els fangs produïts en el tractament primari i biològic es caracteritzen per tenir un alt contingut de matèria orgànica, la qual cosa fa que no es puguin abocar directament sense un tractament previ. Cal una estabilització que disminueixi la fracció de matèria orgànica degradable i reduïsci el contingut de microorganismes patògens. Aquesta estabilització es pot dur a terme mitjançant digestió -és a dir, descomposició biològica, aeròbia o anaeròbia- o per altres processos de tipus químic o tèrmic. El sistema més àmpliament utilitzat per estacions depuradores de tipus mitjà o gran és la digestió anaeròbia ja que té un menor consum energètic i permet l'aprofitament del biogàs que es produeix en el procés, encara que la inversió de capital és major que en la digestió aeròbia.

En la digestió anaeròbia la degradació es du a terme mitjançant un tractament en absència d'oxigen en el qual es desenvolupa una població microbiana capaç de transformar la matèria orgànica en CO_2 i CH_4 . N'existeixen diferents configuracions, però la més emprada és la de dues fases. En un primer tanc té lloc la digestió pròpiament dita. Cal escalfar el sistema per treballar a la temperatura adequada i mantenir el medi en suspensió. En la segona fase té lloc l'emmagatzematge i la concentració del fang digerit, i continua el procés de fermentació en l'estratificació del fang. El líquid sobrenadant produït es recircula al principi de la planta.

Tal com es pot observar en la figura 1.2, abans de dur a terme la digestió dels fangs cal disminuir la fracció líquida

amb l'objectiu de minimitzar el volum de matèria que es processa (i, per tant, abaratir la digestió posterior). Aquesta operació física s'anomena espessiment. Els fangs es poden espessir de diferents formes, entre les quals hi ha les següents:

- Espessiment per gravetat. Es du a terme en equips de disseny molt similar als decantadors de la línia de tractament d'aigua. Aquest sistema és més adequat per a la concentració del fang primari.
- Espessiment per flotació. En aquest cas el fang es concentra en la superfície mitjançant la introducció d'aire dissolt. L'operació consisteix a dissoldre aire en aigua a alta pressió i despressuritzar l'aigua al tanc de separació de forma que s'hi produïska un deslliurament d'aire en forma de bombolles molt petites que arrossegueuen els sòlids cap a la superfície, des d'on s'extrauen. Aquest sistema resulta més efectiu en el fang secundari, és a dir, el que prové del tractament biològic.

L'aigua que se separa dels fangs presenta un alt contingut de matèria orgànica, per la qual cosa cal recircular-la al principi de la planta.

La deshidratació i l'assecamament són operacions físiques unitàries que serveixen per reduir la humitat o el contingut d'aigua dels fangs estabilitzats, pas previ a la seua destinació final. L'eliminació d'aigua del fang digerit és necessària com a pas previ en qualsevol de les opcions que es trie per a la destinació final dels fangs: cal reduir la producció de lixiviats si es destinen a un abocador; cal augmentar el poder calorífic si s'empra la incineració, i cal reduir els costos de transport en qualsevol de les opcions.

L'esquema que es presenta en la figura 1.2 és només un cas concret entre les múltiples variacions que podrien plantejar-se per al tractament de l'aigua residual. Entre les

diverses alternatives a l'esquema proposat es poden apuntar les següents:

- Digestió aeròbia dels fangs (estacions depuradores amb poc volum de tractament).
- Treballar amb el reactor amb alta càrrega i prescindir de la decantació primària.
- Diferents opcions de reactor biològic: mescla completa, flux de pistó.
- Mesclar fangs primaris i secundaris abans de l'espessiment.
- Deshidratar el fang mitjançant eres d'assecat, si l'espai disponible ho permet, amb la qual cosa es pot obtenir un considerable estalvi energètic.
- Tractament fisicoquímic amb addició de reactius que potencien la floculació de material col·loïdal i, per tant, l'augment de la capacitat d'eliminació del decantador primari.
- Introduir sistemes biològics avançats per tal d'aconseguir l'eliminació de nutrients (nitrogen i fòsfor) que causen els problemes d'eutrofització tan freqüents al nostre entorn, amb l'exemple paradigmàtic de l'Albufera.

1.3 Operacions unitàries. Definició i classificació

La resolució d'un problema ambiental generat per un corrent contaminant presenta múltiples alternatives possibles. Hi ha una gran quantitat i varietat de processos de tractament, però tots ells estan constituïts per un nombre relativament petit d'etapes físiques, químiques i/o biològiques comunes a diferents processos.

Normalment, el nombre d'etapes de tipus físic és sempre superior al d'etapes químiques o biològiques, fins i tot hi ha processos de tractament en què no hi ha cap etapa de reacció. Si s'aprofundeix en l'estudi d'aquestes etapes

físiques, es pot comprovar que el seu nombre és limitat i que, a més a més, es repeteixen en diferents sistemes de tractament. Aquesta observació ha donat lloc al concepte *operació bàsica o unitària*, com normalment s'anomenen aquestes etapes en la indústria química i que l'enginyeria ambiental ha adoptat a partir d'aquesta. Des del punt de vista pedagògic resulta molt més útil i senzill estudiar les operacions bàsiques (limitades) que els sistemes complets de tractament (infinites variacions). Si es coneixen les diferents operacions unitàries que la tecnologia actual posa al nostre abast, es podran acoblar de tal forma que es puga dissenyar un sistema de tractament per a un cas concret. Algunes d'aquestes operacions -les més importants- són les que veurem en aquest apartat.

El concepte *operació bàsica o unitària*, que l'enginyeria ambiental pren de l'enginyeria química, es va encunyar a l'inici del segle xx. La importància d'aquest concepte rau en el fet que a partir d'ell es va poder arribar a una primera sistematització en l'estudi dels processos de transformació. Una mateixa operació s'aplica a diferents processos amb independència del sistema considerat. Per exemple, una operació de filtratge del fang produït en una estació depuradora d'aigües residuals per disminuir el seu contingut d'aigua és anàleg a un filtratge per a l'eliminació de partícules sòlides d'una emissió atmosfèrica.

L'aprofundiment en l'estudi d'aquestes etapes físiques, gràcies a la intensa recerca en aquest camp, ha permès arribar a la conclusió que totes les operacions bàsiques responen a tres fenòmens físics anàlegs, denominats fenòmens de transport, els quals es regeixen per lleis que són essencialment similars. En totes les operacions bàsiques es produeix el transport d'almenys una de les tres propietats: matèria, energia i/o quantitat de moviment. Aquests fenòmens de transport (que es poden produir tant al si de sòlids i de fluids com entre sòlids i fluids) són conseqüència de l'existència de gradients de concentració

d'aquestes propietats i representen la tendència del sistema a arribar a un equilibri.

Així, per exemple, en el cas de la circulació de fluids l'energia que es dissipa per fregament es tradueix en un transport de quantitat de moviment entre zones del fluid que es desplacen a diferent velocitat. El transport de calor té lloc entre regions del sistema amb diferent concentració energètica, és a dir, amb diferent temperatura. El transport de matèria representa el canvi de composició d'una mescla (líquida o gasosa) com a conseqüència del desplaçament d'algun o d'alguns dels components de les zones on la seua concentració és major a zones on és menor.

És important fer una distinció entre els processos de transport de les tres propietats al si d'un fluid i el transport pel desplaçament del fluid. El primer, tal com s'ha indicat, és conseqüència exclusiva de l'existència d'una força impulsora (un desequilibri o gradient de concentracions) que tendeix a l'equilibri; el segon és conseqüència simplement del moviment del fluid.

Els tres fenòmens de transport (quantitat de moviment, matèria i energia) es produeixen gairebé sempre simultàniament, però la seua importància relativa varia en cada cas de forma que el més lent és el fenomen que controla el procés, és a dir, el que determina la velocitat global del procés i, en conseqüència, el que determina la grandària de l'equip en el qual es desenvoluparà l'operació concreta. Així, les operacions unitàries es poden classificar segons el fenomen que controla el procés:

- Operacions basades en el transport de la quantitat de moviment.
- Operacions basades en el transport d'energia.
- Operacions basades en el transport de matèria.

Tot seguit es descriuen les operacions unitàries més representatives de cada tipus.

1.3.1 *Operacions unitàries basades en el transport de la quantitat de moviment*

Aquestes operacions corresponen fonamentalment al transport de fluids i es poden classificar en dos grans grups:

a) De *flux intern*, és a dir, el fluid circula per l'interior de conduccions.

-L'estudi de la circulació de fluids en conduccions s'ocupa del càlcul de la pèrdua de pressió del fluid per determinar el diàmetre de la conducció o la potència de la bomba o del compressor necessari per fer-lo-hi circular.

b) De *flux extern*, és a dir, un sòlid es desplaça al si d'un fluid.

-Filtratge: operació de separació d'un sòlid en suspensió en un fluid en fer passar la mescla per un medi permeable al fluid i impermeable al sòlid.

-Sedimentació: separació sòlid-líquid per acció de la gravetat. El líquid es deixa en repòs de forma que el sòlid, amb una densitat major, cau al fons per gravetat.

-Centrifugació: separació de dues fases de densitat semblant mitjançant l'acció d'un camp de força centrífuga originada per un sistema mecànic de rotació.

1.3.2 *Operacions unitàries basades en el transport d'energia*

La transmissió d'energia en forma de calor pot ocórrer en molts processos, però només en alguns la velocitat de transmissió de calor és l'etapa que controla el procés. Algunes d'aquestes operacions amb interès per a l'enginyeria ambiental són:

-Bescanviadors de calor (figura 1.3). L'operació consisteix en la transmissió de calor entre dos fluids a diferents

temperatures, separats per una paret metàl·lica o d'algun material d'alta conductivitat tèrmica, és a dir, que oferisca poca resistència a la transmissió de calor. L'operació es pot dur a terme amb canvi de fase o sense (l'elevada calor latent de vaporització de l'aigua fa que normalment s'empren vapor d'aigua com a fluid calefactor).

Aquesta operació s'utilitza en la digestió anaeròbia que s'ha plantejat en l'exemple de la figura 1.2. El procés es du a terme a una temperatura superior a l'ambiental, per la qual cosa cal escalfar el sistema mitjançant un bescanviador de calor (es pot emprar com a fluid calefactor el vapor d'aigua que s'obté a partir de la recuperació energètica del metà que produeixen les transformacions biològiques desenvolupades en la digestió).

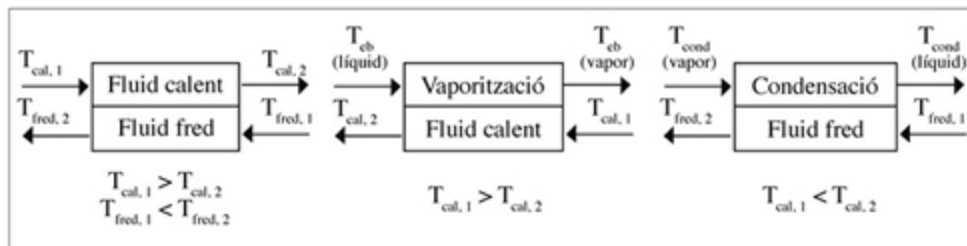


Figura 1.3 Bescanviadors de calor.

-Evaporació. Consisteix en l'eliminació del dissolvent d'una solució per augmentar la concentració de solut (figura 1.4). La calor cedida pel vapor s'empra per fer bullir la solució diluïda, de la qual s'evapora el dissolvent. Aquesta operació pot ser econòmicament viable enfront dels tractaments biològics per tractar aigua amb matèria orgànica: si la concentració de matèria orgànica és baixa (entre 50 i 4.000 mgDQO/l), la millor alternativa és el tractament biològic aerobi; per a concentracions més altes (entre 4.000 i 50.000 mgDQO/l), el tractament biològic anaerobi, i per a aigües amb una presència de contaminants orgànics molt elevada (> 50.000 mgDQO/l), la millor alternativa sol ser l'evaporació.

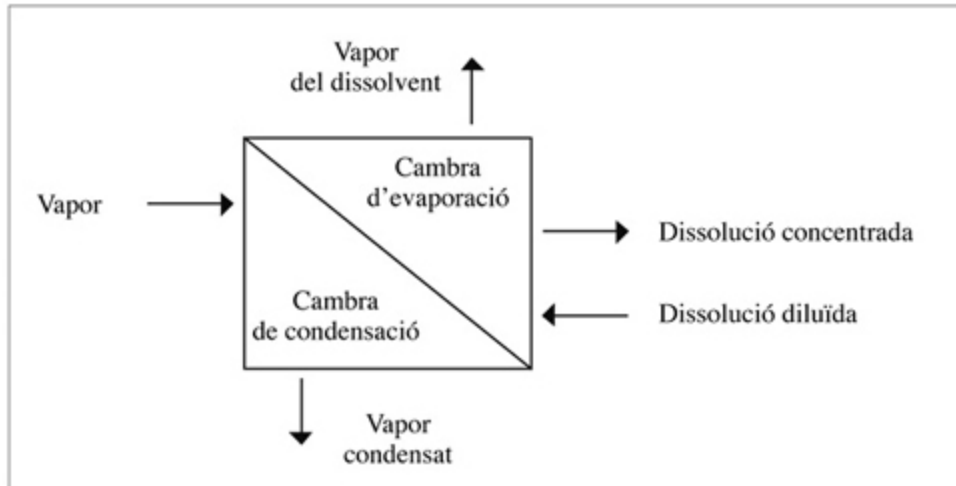


Figura 1.4 Evaporació.

1.3.3 Operacions unitàries basades en el transport de matèria

En aquest apartat es consideren les operacions unitàries en les quals l'etapa que controla el procés és la transferència de matèria. Tenen per objecte separar components o grups de components d'una fase, generalment homogènia. La figura 1.5 mostra un esquema general d'aquest tipus d'operació. Quan l'agent separador (matèria o energia) interacciona amb el corrent d'alimentació es generen dos o més corrents d'eixida de diferent composició, la qual cosa permet de separar o concentrar determinats agents contaminants d'un determinat corrent. Tot seguit se'n mostren alguns exemples.

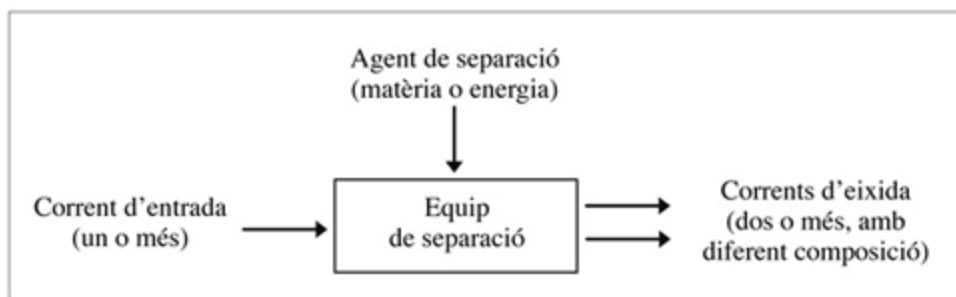


Figura 1.5 Operacions unitàries de transferència de matèria.