

TECNiques DE PROTECCIO DEL MEDI AMBIENT

Assignatura: Tècniques de protecció del medi ambient

Estudis: 10è quadrimestre, enginyeria industrial

Crèdits: 6 (4 teòrics, 2 pràctics)

Departament: Enginyeria química agrària i tecnologia agroalimentària

Professors: Miquel Llop / Pere Mutjé

TEMA 1: ELS CONTAMINANTS DE L'AIGUA

Els contaminants de l'aigua

- Matèria orgànica en DBO/DQO
 - ◆ DBO = Demanda biològica d'oxigen
 - ◆ DQO = Demanda química d'oxigen (engloba la biològica)
 - ◆ Disminueix la concentració d'oxigen
 - ◇ Afecta a la vida dels rius
 - ◇ Afecta a la biodegradabilitat de la matèria
 - ◆ DBO Residual 100–300 ppm
 - ◆ DQO Residual 250–600 ppm
 - ◆ DBO / DQO < 0,2 (inorgànic)
 - ◆ DBO / DQO > 0,6 (orgànic)
- Patògens
 - ◆ Bacteris (Coliformes): malalties: tifus, diarrea, còlera, disenteria
 - ◆ Protozous : Malalties: disenteria
 - ◆ Virus : Sobretot hepatitis i poliomeilitis
 - ◆ Helmíntics
- Sals (Na, Mg, K, SO₄⁼, Cl⁻, CO₃H⁻)

TDS (Total dissolved solids), determina el tipus d'aigua

- ◆ Aigua potable: TDS < 500 mg/l
- ◆ Aigua dolça: TDS < 1500 mg/l
- ◆ Aigua Salobre: TDS < 5000 mg/l
- ◆ Aigua salada: TDS > 5000 mg/l
- Nutrients (N,P,C,Ca,K,Fe,Mn,B)
 - ◆ Són necessaris per a la vida
 - ◆ Possibles contaminants en quantitats grans
 - ◆ N > 50 mg/l (ppm) afecta als intestins (purins)
 - ◆ Eutrofització (Senescent = Mort d'un llac per sobrevegetació)
- Pesticides
 - ◆ Compostos orgànics usats per matar organismes vius indesitjables
 - ◆ Insecticides / Pesticides / fungicides / Herbicides
 - ◆ Organoclorats: DDT, Methoxiclor. Persistents e insolubles
 - ◆ Organofosfats: Paration, Diazinon. Poc persistents però més tòxics
 - ◆ Carbamats : Propoxur (tòxics)

- Contaminació tèrmica deguda al sobrecalfament
 - ◆ Disminueix la solubilitat de l'oxigen en l'aigua OD
 - ◆ Accelera la degradació / eutrofització
- Metalls pesants

Al, As, Be, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Se, Sr, Ta, Ti, Zn

- ◆ Metalls amb densitats elevades
- ◆ Són tòxics, afecten el sistema nerviós, mutacions, tumors
- ◆ Fonts: indústria galvànica, curtits, metalurgia
- Compostos orgànics volàtics (VOC)
 - ◆ Tetracloroetilè (CFC, dissolvent), provoca tumors
 - ◆ Clorur de Vinil (PVC, Monòmer), és cancerígen
 - ◆ Tricloroetilè (dissolvent), és sospitós de malalties, aigües sub.
 - ◆ 1-2 dicloroetà (desgreixant)
 - ◆ Tetraclorur de carboni (dissolvent), és tòxic

La qualitat de les aigües

Un dels índexs utilitzats per catalogar les aigües és el I.S.Q.A.

- Avençaments econòmics de l'aplicació de l'ISQA

T = coeficient de temperatura funció de la temperatura de les aigües del riu:

on t és la temperatura entre 20 i 35 °C

A = coeficient d'oxidabilitat

Aquest coeficient conté el contingut orgànic natural o artificial sigui o no biodegradable. DQO (KMnO₄)

$A = 30 - a$ per $a < 10$ on $a =$ consum d'oxigen en ppm d'oxidació amb KMnO₄

$A = 21 - 0.35 * a$ si el consum d'oxigen és superior a 10 ppm. $A < 0$ es considera 0

B = Coeficient de sòlids solubles

Matèria en suspensió que pot separar-se per filtració; informa de la poluició.

$B = 25 - 0.15b$ per $b < 100$ essent b els ppm de matèria en suspensió.

$B = 17 - 0.07b$ per $b > 100$ si $B < 0$ es considera 0

C = Coeficient de OD

OD està relacionat amb la DBO i el contingut de nutrients

$C = 0 + 2,5c$ essent c la DBO de l'aigua (oxigen en mg/l)

D = Coeficient de conductivitat a 18°C

Es medeix la concentració de sals inorgàniques (clorurs i sulfats)

essent d la conductivitat en

- Es considera que 60 unitats I.S.Q.A., hauria d'èsser el valor mínim per qualsevol punt, dins d'una situació normal de qualitat d'aigua dels rius
 - **Avaluació de l'impacte ambiental**
 - Indicador de l'impacte ambiental
 - ◆ Factors qualitatiu i quantitativ
 - Extensió de l'impacte ambiental
 - Fragilitat ambiental
 - Estudis ambientals
 - ◆ Document tècnic que identifica i determina els agents impactants i elements impactats. Sol ser un indicador qualitatiu de l'impacte
 - Valoració de l'impacte: valors a comparar en una escala de valors (índexs)
 - Declaració: Alegacions, recursos, paperassa
 - Estimació de l'impacte causat (efectes sobre el medi, decisions)
-
- **Matriu de causa – efecte**

Matriu que ens relacions les accions impactants amb els factors impactats

Índex d'importància Índex qualitatiu sobre l'efecte d'un impacte

El valor de I varia entre 13 – 100

$I < 25$ efecte irrellevant

$25 < I < 50$ efecte moderat

$50 < I < 75$ efecte sever

$I > 75$ efecte crític

- Qualitat ambiental

Per passar d'índex importància (I) a qualitat necessitem una funció de transformació = $f(I)$, aquestes funcions estan tabulades.

- Valoració de l'impacte sobre un factor

Aquests factor es posen en caselles i es ponderen els valors

- Valor de l'impacte

Hi ha impactes positius i negatius pel medi.

Es calcula entre $-1000 < V < +1000$

TEMA 2: EFLUENTS LÍQUIDS

Degradació de la matèria

Degradació de la matèria

La matèria orgànica es degrada seguint una equació exponencial

Essent LO la càrrega orgànica inicial i LT la càrrega orgànica en un temps t.

de la constant KD n'hi diem ritme de degradació orgànica. Aquesta constant depèn de la temperatura seguint aquesta relació:

El paràmetre té el següent valors:

- 1.135 si la temperatura està entre -4 i 20 °C
- 1.056 si la temperatura està entre 20 i 30 °C

Els valors de $K(20)$ solen estar compresos entre 0.12 i 0.7 dies $^{-1}$

Factor de dilució en la mesura de la DBO

l'oxigen dissolt (DBO) màxima d'un riu és de 9 mg/l. No és possible mesurar més oxigen dissolt en una mostra d'aigua. El problema és per rius que tenen una DBO superior, el que cal fer és agafar una mostra i diluir-la fins a aconseguir un valor més petit de 9 mg/l.

De les dissolucions sabem la següent relació:

El problema no sabem la DBO que té la mostra. Si la mostra inicial és X, el factor de dilució de la mostra serà:

essent FD el factor de dilució

Normalment per mesurar DBO ens movem dins d'un marge de maniobra, entre $2 - 7$.

tipus de DBO

Habitualment la DBO és dona a 5 dies vista, però aquesta DBO només contempla la degradació del carboni. A partir d'aproximadament 15 dies també hi ha la degradació del nitrogen.

DBO5 = DBO a 5 dies, deguda només a la degradació del carboni

DBOC = DBO produïda de la degradació de la matèria orgànica del carboni

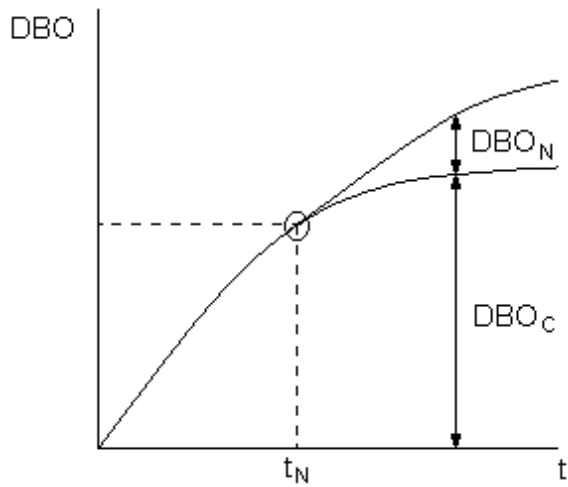
Mat.Org + O₂ CO₂ + H₂O + compostos i cèlules

DBON = DBO produïda de la degradació dels compostos del nitrogen (amines)

NH₄ + O₂ NO₃ + 2H⁺ + H₂O

Determinació de les DBO degudes al carboni i nitrogen

La gràfica de la DBO en funció del temps és la següent:



Les funcions són funcions exponencials

t_N és el temps en dies on comença el procés de degradació del nitrogen

L'equació de la degradació ens diu que:

per tant:

DBO deguda al carboni a temps = t

DBO deguda al nitrogen a temps = t on $t > t_N$

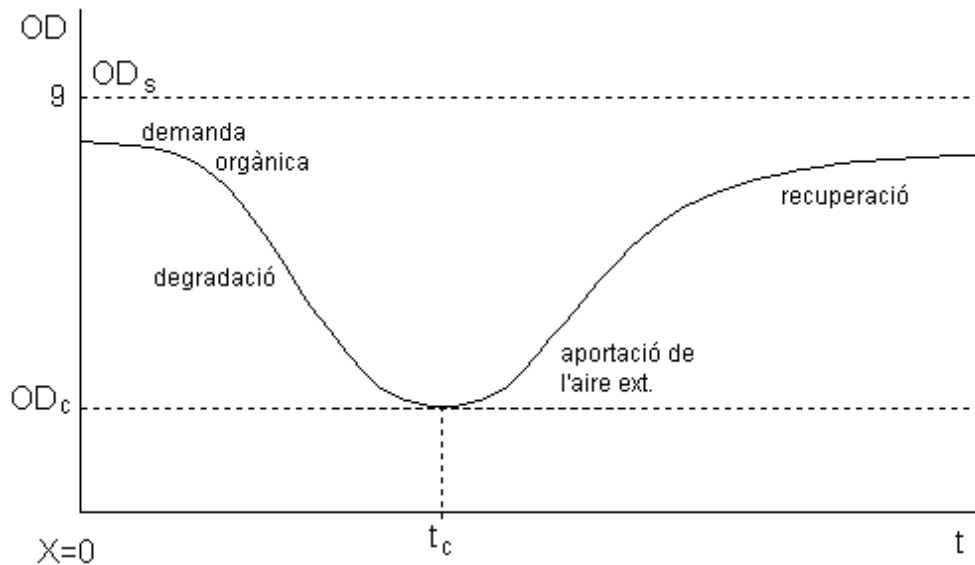
La DBO total en temps $t < t_N$ serà:

La DBO total en temps $t > t_N$ serà la suma de la degradació del carboni i el nitrogen

Contaminació de rius

Dinàmica de l'oxigen dissolt en un riu

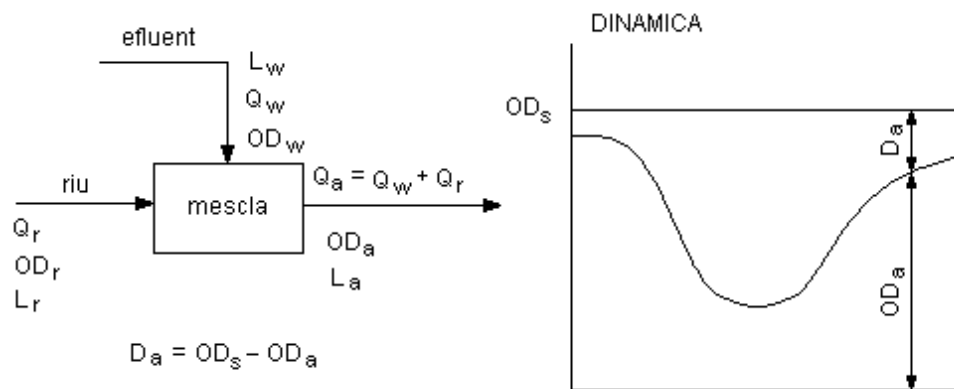
Gràfica de la dinàmica d'OD en un riu contaminat per un efluent orgànic



ODC = Oxigen dissolt crític, si baixa de 4 mg/l els peixos es moren.

La recuperació del riu esdevé degut a l'absorció de l'oxigen de l'aire exterior.

Esquema de mescla d'un efluent contaminant en un riu

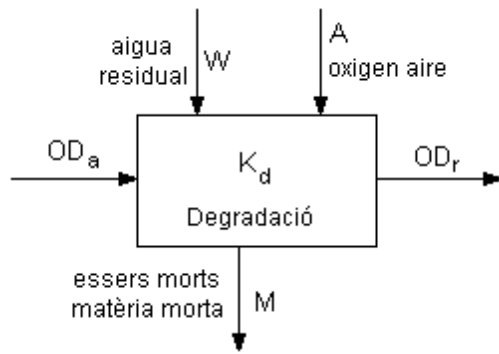


Fent un balanç de matèria en la mescla obtenim l'expressió d'ODA i LA

Essent OD l'oxigen dissolt en l'aigua i D el dèficit d'oxigen respecte la saturació.

ODS (oxigen dissolt de saturació), és funció de la temperatura i de les condicions del riu (qualitat) i es troba tabulat, sinó ja ens el donen com a dada.

Equació de la degradació de la matèria orgànica



M és petita i difícil d'avaluar, i habitualment no es considera la seva influència

Sabem que el dèficit és

Aquesta es l'equació de degradació, equivalent a la generació del sistema.

Variació del dèficit d'oxigen

Per l'equació del paràmetre A (captació d'oxigen de l'aire) utilitzem l'equació general de transferència de matèria entre 2 sistemes.

Essent KR la constant de reaireació, el dèficit disminueix amb la reintroducció d'oxigen de l'aire.

El balanç global ens queda:

Solucionant aquesta equació ens dona que:

Paràmetres de l'equació del dèficit en l'efluent d'un riu:

Expressió de KD = constant degradació

El paràmetre té el següent valors:

- 1.135 si la temperatura està entre -4 i 20 °C
- 1.056 si la temperatura està entre 20 i 30 °C

Els valors de K(20) solen estar compresos entre 0.12 i 0.7 dies⁻¹

Expressió de KR = constant de reaireació (tabulada)

Com que KR depèn de la temperatura, l'expressió és a 20°C, cal corregir-la:

Correcció per temperatura

Els valors de KR solen estar compresos entre 0.05 i 18 dies⁻¹

Balanç de matèria del riu+efluent

Expressió per la DBO després de la barreja

Cal tenir en compte que els paràmetres de l'equació del dèficit són els de després de la barreja.
Esquemàticament:

Determinació del temps crític i el dèficit crític

Hem vist anteriorment la dinàmica de la OD quan hi aboquem un efluent contaminant i sabem que hi ha un moment crític on el dèficit d'oxigen és màxim (OD és mínim)

Per determinar aquest punt cal derivar l'expressió e igualar a 0.

temps crític

A partir de la velocitat del riu, si es suposa constant, es pot calcular la distància crítica a partir de la relació

distància crítica

finalment, substituïnt a l'expressió general trobem el dèficit crític:

dèficit crític

OD crític

- mínims d'oxigen dissolt en un riu

Les carpes, per viure, necessiten $ODC = 3 \text{ mg/l}$

Es considera que si $ODC < 4 \text{ mg/l}$ hi ha perill greu de mort de peixos

A ser possible, cal controlar els abocaments per evitar dèficits d'oxigen crítics que puguin ocasionar la mort dels peixos en els rius.

Resolució de problemes d'efluents líquids

1-Càlcul del dèficit d'oxigen crític degut a un abocament

- Calcular els paràmetres després de la barreja amb l'efluent

dèficit oxigen després de la barreja

DBO després de la barreja

- Determinar el temps crític

I substituir aquest TC a l'expressió general del dèficit en funció del temps.

2- Càlcul de DBO d'un riu per assimilar un efluent i que els peixos no morin

Sabem que OD límit és de 4 mg/l (per legislació)

Evidentment, al desconèixer TC, és un procés iteratiu

- Aïllar el valor de LR del riu:

LA desconegut, haurem de suposar-lo

- A partir del LA o LR suposat calcular tC
- Substituir els valors en l'expressió del dèficit crític.

Sabent que

Construir una taula de valors amb LR, LA, tC, DC i ODC

El valor més pròxim a serà el que busquem, haurem trobat LR.

3- Càlcul de paràmetres a una distància determinada

Com sempre procedir a calcular els valors després de la barreja

En aquest cas s'ha d'utilitzar l'equació que lliga la distància amb la velocitat:

- A partir del temps substituir a l'expressió general

Dèficit d'oxigen

Oxigen dissolt

- Equacions de la degradació en funció del temps

DBO a la distància X

Contaminació de llacs

Els llacs inicialment no tenien vegetació. Els nutrients, bàsicament compostos de CO₂, P i N escassejaven i si hi ha pocs nutrients no hi ha creixement d'algues.

Amb el pas del temps, les poques algues que hi ha, al morir, provoquen sediments que es converteixen en nutrient provocant el creixement de més algues. El llac, quan hi comença a haver-hi més vegetació esdevé mesotròfic.

Cada cop, al haver-hi més nutrient, el llac cada cop està més poblat de vida vegetal, arriba un moment en que el llac, amb ja molta vida vegetal, esdevé eutròfic.

Si enlloc de parar-se el creixement, cada cop hi ha més algues i arriba un moment on la concentració d'oxigen baixa, si aquesta disminució és important, les algues, quan moren, enlloc de degradar-se aeròbicament o fan anaeròbicament.

Mat Org + Mat. Oxidants H₂S + H₂O + CO₂ + Metà + Compostos

L'H₂S és símptoma evident de què el llac s'està morint. De la mort del llac per assecament degut a l'excessiva presència d'algues se l'anomena senescent.

L'evolució d'un llac pot parar-se en algun dels punts del procés:

oligotròfic(naixement) mesotròfic eutròfic Senescent (mort)

La velocitat en què aquest procés avança depèn molt de l'aportació de nutrients i contaminants. Quan es contamina un llac s'accelera el procés cap a la senescent.

El problema és com controlar els nutrients (N,P,CO₂) perquè no hi hagi mort del llac

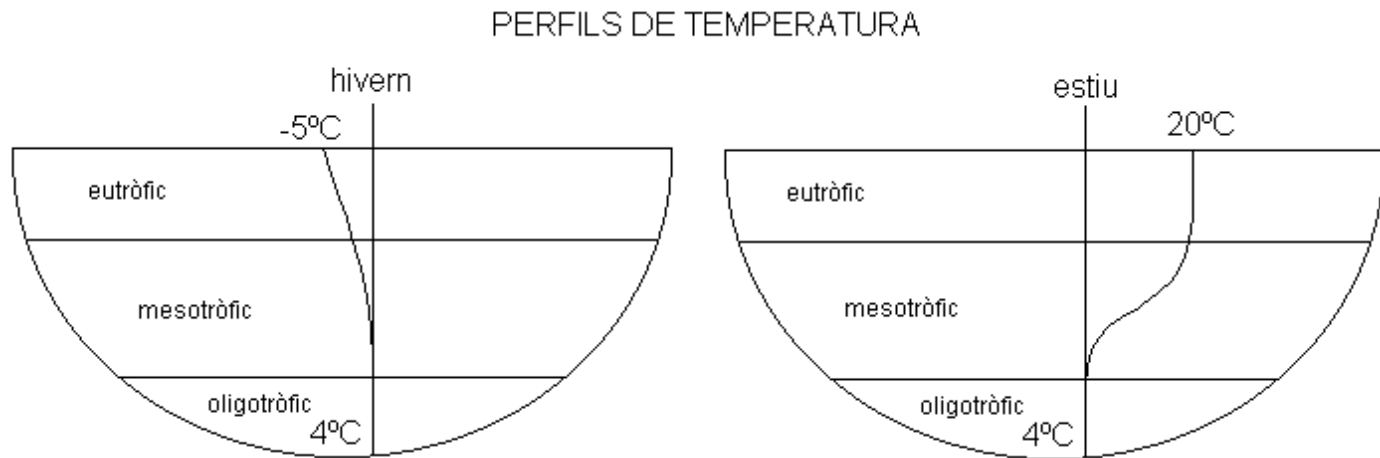
Hi ha una clara relació entre l'esquema tèrmic del llac i les parts del procés:

epilimnion = la temperatura es manté constant aproximadament

termoclime = És on hi ha el gradient de temperatura des de epilimnion a hypolimnion.

hypolimnion = Zona on l'H₂O és a 4°C, hi ha escassa vegetació

La densitat de l'aigua a la zona hypolimnion és màxima



A l'estiu hi ha canvi de densitat apreciable, això afavoreix el moviment d'aigües, s'oxigena la part baixa del llac. A l'estiu la zona termoclime coincideix on hi ha una variació brusca de densitat (temperatura).

A l'hivern la variació de densitat és molt petita i no hi ha moviment d'aigües vertical, per tant, no s'oxigena la part baixa del llac.

El procés d'eutrofització de llacs

L'aportació excessiva de nutrients a un llac provoca:

- Creixement desorbitat de les algues
- Disminució de l'oxigen dissolt en el llac
- Dificultat d'assimilar les algues mortes
- Degradació anaeròbica d'aquestes algues mortes per falta d'O₂.

Per evitar l'eutrofització i la consegüent mort del llac cal evitar:

- Nutrients en base nitrats i fòsfor responsables del creixement de les algues

El procés de nitrificació segueix aquest procés evolutiu:

NO₃ Nutrient

NH₂ Amina deguda a l'assimilació del nutrient per part de les algues.

NH₄ Degradació de l'amina a amoni degut a la mort de l'alga

NO₃ Amb la degradació els amonis es converteixen un altre cop en nutrient

El procés de desnitrificació segueix la següent reacció química

Nutrient + compost orgànic N₂ + CO₂ + H₂O

els compostos orgànics són compostos del carboni (DBO) que degraden els nutrients.

Creixement de les algues:

Per a què les algues creixin cal que hi hagi una relació estequiomètrica entre la quantitat de nutrient i fòsfor present a la composició de l'aigua del llac.

Una reacció química que defineix el creixement d'una alga és aproximadament:

$106\text{CO}_2 + 16\text{NO}_3^- + \text{HPO}_4^{2-} + 122\text{H}_2\text{O} + 18\text{H}^+ \text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P} + 138\text{O}_2$

Més o menys, perquè creixi una alga es necessiten 16 nutrients i 1 fòsfor.

- condicions límit de creixement de les algues

quan N/P > 20 El reactiu limitant del creixement és el fòsfor

quan N/P < 5 El reactiu limitant del creixement és el nitrogen(nutrient)

- Concentracions que originen el creixement de les algues

si [P] > 0.015 mg/l

si [N] > 0.3 mg/l

En un llac en condicions normals [P] = 0.01 mg/l. Si [P] és superior a 0.02 mg/l el ric d'eutrofització del llac per creixement d'algues és molt gran.

Sedimentació del fòsfor

El fòsfor és difícil que s'incorpori a les algues, és fàcilment medible (no com el N), com que és una molècula de pes bastant considerable i radi atòmic bastant gran comparat amb N té una velocitat de sedimentació (entre 3 i 30 m/s)

s'ha de considerar una secció de llac ponderant les concentracions de [P] en mg/l

Quan es vessa al riu un efluent que conté fòsfor la concentració final és:

d'on:

QE[PE] = cabals dels corrent ponderats per la seva concentració en fòsfor

QS = cabal de sortida (el del llac + efluents de sortida)

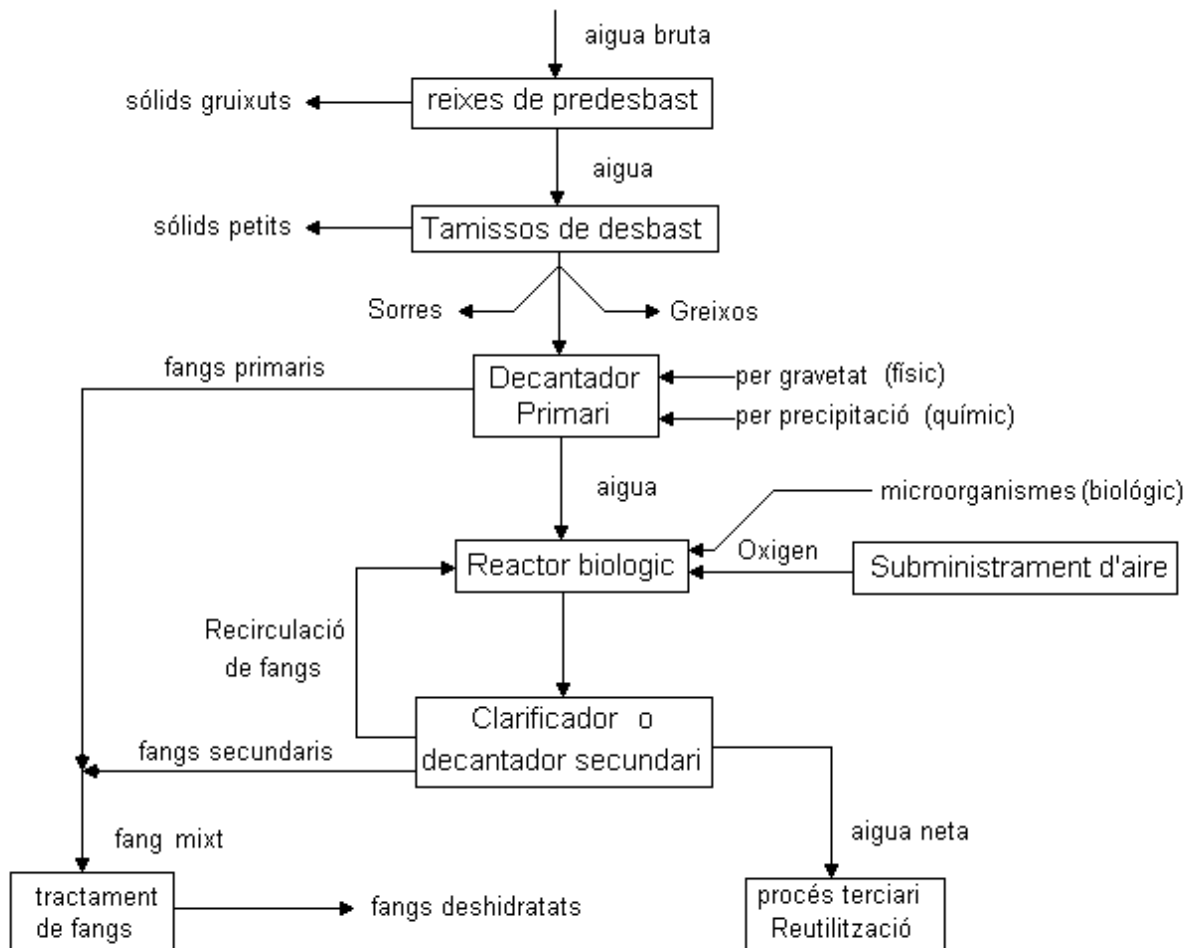
VS = velocitat de sedimentació del fòsfor en el llac (entre 3 i 30 m/s)

A = secció del llac. Habitualment s'agafa una secció mitjana

Si $[P] > 0.02 \text{ mg/l}$ hi ha perill d'eutrofització del llac per excés de fòsfor.

TEMA 3: TRACTAMENT D'AIGÜES RESIDUALS

Tipologies i tipus de tractaments



Això és un esquema simplificat de tractament d'aigües o depuració. Primerament del corrent de fluid cal passar-lo per les reixes de desbast on es treuen les partícules més grans. El tractament primari és un condicionament del corrent d'aigua traent-li les partícules sòlides per decantació o sedimentació abans de passar pel tractament secundari on es tracta d'eliminar l'excés de matèria orgànica. Es pot procedir a un tractament terciari en cas de que no es complissin especificacions legislatives per acondicionar el fluid.

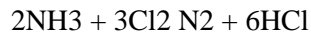
Tractaments químics per la descontaminació d'aigües

Neutralització

- Es solen utilitzar quan el pH = 6–10 (requeriments 6.5 – 8.5)
- Pels efluentes àcids s'utilitza:
 - ◆ Calç, Ca(CO₃)₂, bicarbonat sòdic (NaHCO₃)
 - ◆ Sosa càustica (NaOH), KOH, NH₄OH
- Pels efluentes alcalins s'utilitza:
 - ◆ H₂SO₄ (àcid sulfúric), HCl (àcid clorhídric, sulfumant)
 - ◆ CO₂, fums de combustió (en medis poc alcalins)

Oxidació química

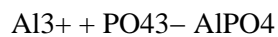
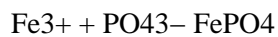
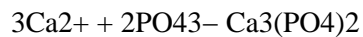
- Per tractar efluentes amb amoníac



- Per tractar efluent amb cianurs



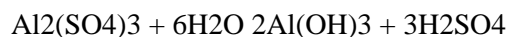
Eliminació de fòsfor per precipitació (per evitar eutrofització)



Reaccions de precipitació

- Coagulació
- Floculació
 - ◆ Polielectròlits (catiònics, no iònics, aniònics)
 - ◆ Òxids de Silici (SiO₂)
 - ◆ Floculants naturals (almidó, tanins)
 - ◆ Microorganismes (reaccions biològiques)
- Decantació

Alumini (pH = 5– 8)



Ferro (sulfat de ferro o fèrric, clorur de ferro, pH = 4–9)



EL TRACTAMENT PRIMARI

Determinació de la velocitat de sedimentació

Determinació de la velocitat de sedimentació tipus I (no impedida)

- En la sedimentació hi ha 2 règims possibles:
 - ◆ Règim d'Stokes $Re < 1$

◆ Règim transitori $Re > 1$

On Re = nombre de Reynolds per a un sòlid que es calcula:

on v_T = velocitat terminal;

- Règim d'Stokes

Velocitat terminal

- Règim Transitori

Velocitat terminal

Coefficient de fregament

Paràmetres

= viscositat dinàmica o cinemàtica depenen si tenim o no la densitat.

- Procés iteratiu

Per determinar la velocitat terminal el primer problema que tenim és que, en règim transitori ens depèn del n° de Reynolds i aquest, alhora, depèn de la velocitat terminal.

- ◆ Calcular la velocitat terminal per Stokes

- ◆ Obtenim el nombre de Reynolds

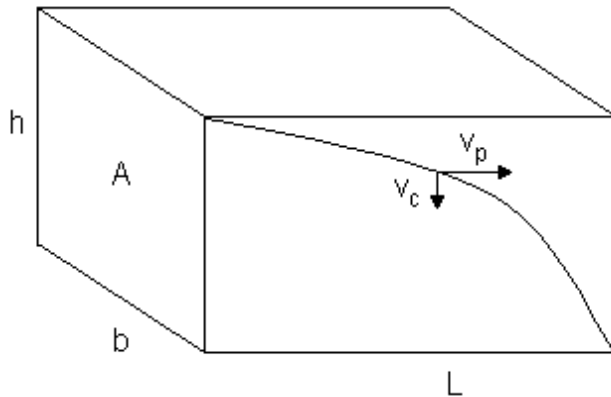
si $Re < 1$, la suposició de llei d'Stokes és vàlida

si $Re > 1$, hem d'utilitzar el règim transitori

- Aplicació de les fórmules del règim transitori

A partir d'aquesta velocitat es torna a buscar el n° de Reynolds i es va iterant fins a obtenir la velocitat amb la precisió que nosaltres volem: **Disseny de cambres de sedimentació**

Si en un corrent de fluid que conté partícules arrossegades es disminueix la seva velocitat de manera que aquesta i la de caiguda lliure són del mateix ordre, aquestes partícules es poden separar.



La condició més desfavorable és la mostrada a la figura on la partícula entra per la part superior. El temps de caiguda lliure a velocitat constant és...

i el temps de pas és

Per poder captar la partícula s'ha de complir, que $t_C < t_P$ per tant la relació:

La velocitat de caiguda v_C és la calculada anteriorment.

- Si estem en règim d'stokes hem de complir que:

f = factor de reintroducció (habitualment 1)

A aquest diàmetre de partícula es diu diàmetre crític.

Les partícules tenen una distribució granulomètrica determinada. Per diàmetres de partícula menors que el diàmetre crític anterior la separació és del 100%.

Rendiment de la sedimentació

essent m_0 la massa inicial i m_1 la massa final després de la sedimentació

Aspectes pràctics de la sedimentació

Les cambres de sedimentació són efectives per diàmetres de partícula superiors a 50 μ m per partícules lleugeres i de 10 μ m en amunt si són partícules pesants

La velocitat de sedimentació ha de ser alta i superior a 0,1 m/s. Per tant $V_T > 0,1$ m/s

La velocitat de pas ha de ser inferior a 3 m/s, i millor si és de l'ordre dels 0,3 m/s.

EL TRACTAMENT SECUNDARI

De tractaments secundaris n'hi ha de varis tipus

- Filtres per coladors
- Llacunatge
- Contactors rotatoris (biològics)
- Fangs actius (biològics) + clarificador

L'objectiu d'un tractament secundari és posar en contacte microorganismes i substrate, oxigenar i tot ben mesclat per obtenir una bona transferència de matèria.

Hi ha d'haver un bon contacte entre ells i una bona quantitat d'oxigen per que la reacció sigui aeròbica. Cal controlar paràmetres de DBO, pH, Temperatura, generació de residus (fangs secundaris).

Segons les característiques del corrent d'entrada s'utilitza l'un o altre tractament

Fangs actius : Utilitzats per disminuir la DBO d'un corrent

- **Els filtres**

Un filtre es compon d'un llit amb rebliment dins d'un contenidor amb un diàmetre característic on les macropartícules (rebliment) formen una porositat amb espai per l'aire. Es mulla tota la mescla i s'hi introdueixen microorganismes. La degradació es produeix a la superfície del rebliment on hi ha les majors concentracions d'oxigen.

Aventatges

- Es econòmic
- la DBO a tractar ha de ser petita
- La velocitat de pas és petita

Disseny

- Cal mantenir el coeficient
- El diàmetre màxim del contenidor és de 60 m
- L'altura màxima sol ser d'uns 12 m (els habituals tenen entre 6 i 7 m)

- **Fangs actius**

En un contenidor on hi ha microorganismes, s'hi introdueix matèria orgànica (aigua) i aire. Es mescla per obtenir una bona transferència de matèria.

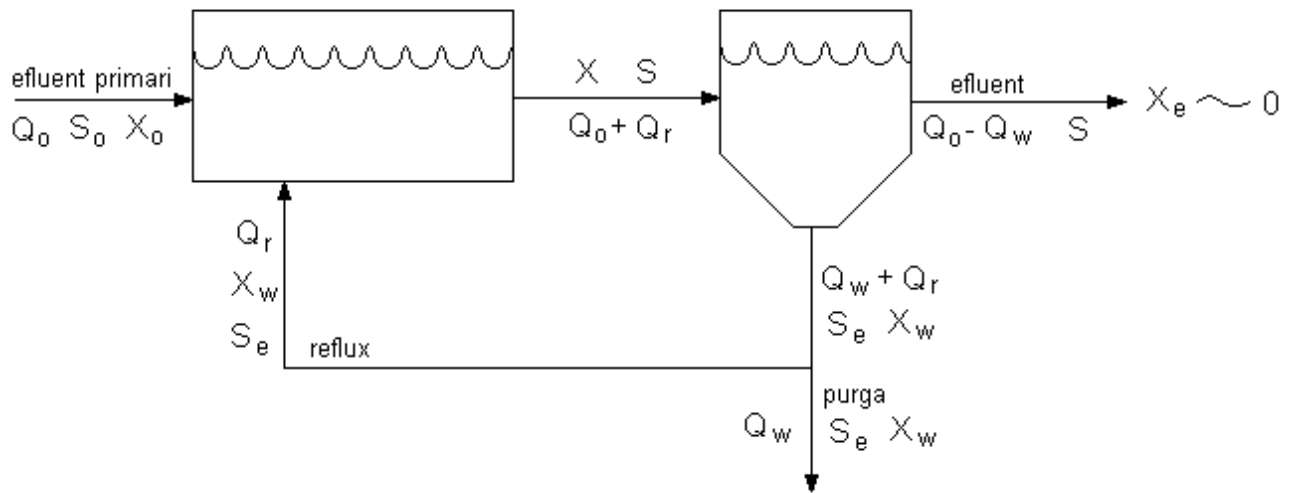
La quantitat de massa corresponent als microorganismes (biomassa) s'adapta a partir del cabal d'entrada, la purga i el temps de residència (entre 6 i 8 h). La biomassa juntament amb la matèria orgànica flocculitza formant conglomerats.

Aventatges:

- La matèria orgànica dissolta es converteix en flocs que llavors es poden separar llavors amb un procés terciari de recollida en un sedimentador
- Cal un cabal de purga perquè la reacció biològica estigui amb bones condicions, no hi hagi acumulació excessiva de biomassa
- El clarificador serveix per netejar la mescla de microorganismes
- Es el tractament secundari més utilitzat

FANGS ACTIUS + CLARIFICADOR

Esquema



Aquest és l'esquema d'un sistema de fangs actius + clarificador

Balanços de matèria del sistema

A partir de l'esquema podem plantejar la típica equació dels balanços de matèria:

Simplificacions a tenir en compte:

- El cabal de sortida, al passar pel clarificador, la concentració de microorganismes és irrisoria i es pot considerar 0
- El cabal d'entrada, no conté microorganismes

L'equació del creixement microorganismes

sigui X la concentració de microorganismes d'una mostra.

Equació del creixement dels microorganismes

Paràmetre de creixement dels microorganismes

ajuntant termes i considerant que la reacció de creixement no té un rendiment del 100% podem escriure l'equació general de creixement

Equació de pas de substrate a biomassa

Valors i significat dels paràmetres

S = quantitat de matèria orgànica present en la mostra (mg/l; DBO5)

x = concentració de microorganismes a la mostra (mg/l)

M = constant mitjana (valor habitual = 2,5 d⁻¹)

KS = constant cinètica (valor habitual = 100 mg/l)

KD = constant endògena (valor habitual = 0.05 d⁻¹)

= rendiment de la reacció biològica (valor habitual del 50%)

Aplicació del balanç de matèria:

els cabal d'entrada i sortida no contenen microorganismes

Interessa que hi hagi el mínim d'acumulacions possibles $A = 0$

$X = \text{MLVSS}$ (mixer liqueur volatile suspendes solids)

v = volum del contenidor de fangs actius.

El primer balanç possible és el de concentració de microorganismes

- Simplificacions

Balanç de matèria

Incorporant l'equació de creixement

- Edat del fang, temps cel·lular de residència (C)

Edat del fang, es controla a partir de la purga

El segon balanç és fixar-nos amb el substracte (DBO_5)

- Simplificacions

En el clarificador no s'altera la DBO , només es neteja de microorganismes

Incorporant equació creixement

A partir d'aquí obtenim 2 expressions per la concentració de microorganismes:

essent H = Residència hidràulica

El temps de residència hidràulica es defineix per

Relació entre reflux, cabals i concentracions.

Paràmetres de disseny

En un reactor de fangs actius hi ha molts paràmetres.

El que pertoca a un enginyer és actuar sobre els següents paràmetres:

- temps cel·lular del fang

C entre 3–4 dies significa purgar sovint, tractaments amb grans cabals i una generació de llot bastant alta

C entre 10–15 dies significa purgar poc, que tenim un fang esgotat, , tractaments amb cabals petits i una generació de llot petita. Més econòmic.

C > 15 dies si el que es vol es eliminar també la DBO provinent dels contaminats de nitrogen, es fa amb aigües contaminades per purins

- Reflux

La disminució o augment del reflux està amb consonància amb la DBO que necessitem per legislació a la sortida del clarificador i també als nostres recursos d'aportació d'aire i econòmics. A més reflux millor és el tractament de l'aigua

- temps de residència hidràulica

Depèn del cabal d'entrada i del volum del contenidor. Cal un compromís entre la concentració de microorganismes, costos de construcció i DBO a tractar

- Paràmetres constants

Els paràmetres constants solen variar poc, els paràmetres relatius als microorganismes afecten poc al rendiment i són difícils de modificar.

TEMA 4: DISPERSIO DE CONTAMINANTS

L'aire sec a nivell del mar té la següent composició

- Nitrogen 78.08%
- Oxigen 20.95%
- Argó 0.934%
- Altres 0.035%

Contaminants atmosfèrics:

- partícules

Pols fina "P < 100 m

Pols grossa "P > 100 m

Boires "P entre 0,1 i 10 m

Vapors "P inferiors

CO (5000 ppm)

Es forma la carbo-hexo-hemoglobina que evita l'oxigenació de la sang

a 8h d'exposició, 9 ppm ja són perjudicials per la salut

A les zones urbanes n'hi ha entre 5–50 ppm

Es forma en les combustions incompletes (sobretot de vehicles)

NOX (òxids del nitrogen)

El seu origen són els motors d'automòbils, i les powerplants, degudes a l'excés d'oxigen en les combustions

Efectes:

- Smog Es forma a partir de la reacció $H + NOX$
- pluja àcida
 - ◆ $2NO_2 + H_2O \rightarrow NO_3 + HNO_2$
 - ◆ $3NO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + NO$
- Produeix oxidants fotoquímics, O_3 , PAN
- Cicle fotolític
- Procés natural
 - ◆ $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
 - ◆ $NO + O-R \rightarrow NO_2$
- Formació d'ozó a les capes baixes de l'atmosfera

A partir d'una reacció $RO_2 + NO \rightarrow NO_2 + RO$.

SO_2 (diòxid de sofre) $S + O_2 \rightarrow SO_2$

- Pluja àcida per formació d'àcid sulfúric
 - ◆ $SO_2 + OH^* \rightarrow HOSO_2$
 - ◆ $HOSO_2^* + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2^*$
 - ◆ $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$
- Carbonatació
 - ◆ $CaCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + H_2O$

Destrucció de la capa d'ozó (CF_2Cl_2 , $CFC1_3$, cloroform, CCl_4) CFC's

Efecte hivernacle degut al CO_2

- El CO_2 absorbeix longituds d'ona de 7 – 14 m i provoca alliberació de calor
- En 100 anys s'ha doblat la $[CO_2]$ a l'atmosfera

Altres contaminants

- Metalls pesants de la indústria galvànica, metalúrgia, curtits...
- Compostos orgànics (C_1-C_5 , VOC)
- Halogenurs (HF, HCl)
- Compostos de sofre (H_2S)

Relació ppm mg/l en contaminants gasosos

On la massa de contaminant va en g/l

En efluents líquids ppm = mg/l

En efluents sòlids es treballa en mg/m³

- **Gradient tèrmic adiabàtic**

Emissió Lloc des d'on el contaminant atmosfèric és emès

Immissió Lloc on el contaminant afecta a la superfície

L'Altura d'emissió (hab.xemeneia) des d'on és emés un contaminant determina la dispersió, a més altura més dispersió dels fums contaminants i menys concentracions perilloses.

GTA = Gradient tèrmic adiabàtic

- De les lleis de la termodinàmica

Adiabàtic no cedeix ni rep calor de l'entorn

dP és el gradient de pressions present en l'atmosfera

En un diferencial la pressió / densitat no varia considerablement i es pot considerar constant, si Z és petita es pot considerar una densitat promig

Una bombolla de contaminant, amb propietats semblants a les de l'aire, amb comportament adiabàtic quan ascendeix 100 m es refreda 1°C. El comportament però, és funció del gradient real.

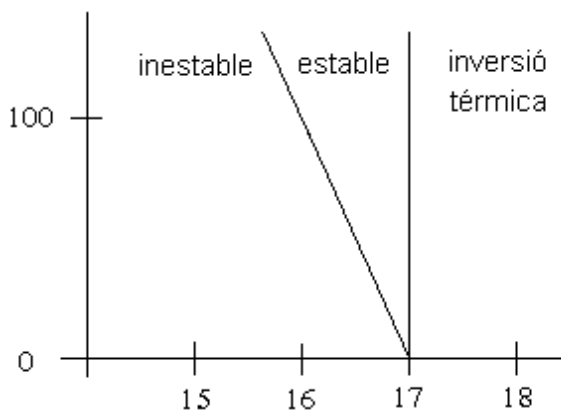
Valor de gradient adiabàtic

Valor del gradient real atmosfèric

Estabilitat

Les condicions meteorològiques afecten al gradient real.

Inversió tèrmica Les partícules no ascendeixen, no hi ha dispersió de contaminant



- Estable : Força descendent de la partícula
- Inestable : Força ascendent de la partícula
- inversió tèrmica : Dispersió de contaminant descendent

- Criteris d'estabilitat segons meteorologia

L'estabilitat de l'atmosfera es basa en la velocitat del vent i la radiació solar. La radiació solar s'estima segons l'angle d'una coberta, estació de l'any i nubulositat.

De la taula, A és la més inestable i F la més estable. La D és neutre.

Velocitat Dia Nit

vent (m/s) Radiació solar >50% cel <50% cel

forta moderada suau tapat nubols tapat nubols

< 2 A A-B B E F

2-3 A-B B C E F

3-5 B B-C C D E

5-6 C C-D D D D

> 6 C D D D D

* Utilitzar la D si el cel està completament cobert de nubols independentment de les altres condicions.

El període nit es refereix 1 hora abans de la posta del sol fins a una hora després de la sortida del sol al matí.

Classe d'insolació:

segons la radiació solar:

- Insolació forta > 50 cal/h. cm²
- Insolació moderada: 25 – 49 cal/h. cm²
- Insolació suau < 24 cal/h. cm²

segons l'altura solar

- Insolació forta > 60°
- Insolació moderada: 35 – 60°
- Insolació suau < 35°

Model gaussià per a fuites contínues i gasos neutres

Hipòtesis del model de Gauss

Per abordar el problema de la dispersió de contaminants a l'atmosfera, com que és un problema complex, cal recórrer a la simulació matemàtica.

El model més senzill i utilitzat és el model Gaussià, tot hi que a la realitat, moltes de les suposicions sobre el model no es compleixen.

- El contaminant ha de dispersar-se de tal manera que les concentracions a la rodalia siguin mínimes
- La funció de concentració segueix una corba Gaussiana
- La velocitat del vent és superior a 1 m/s (sino hi ha inestabilitat local)
- La contaminació es produeix a una alçada H del terra on
- La velocitat del vent és constant i sempre bufa en una direcció determinada
- El component que s'emet té característiques semblants a les de l'aire o està tan diluït que les propietats

que té poden ser aproximades a les de l'aire

- ◆ ex: SO₂ (causant de la pluja àcida), contaminant on la concentració és tan petita que es pot considerar que els fums són aire
- El gas ha de ser neutre, i si provoca reaccions no han de ser immediates
- El model deixa de ser vàlid si (llavors utilitzar model gas pesat)
- Les condicions meteorològiques es mantenen constants durant el temps que dura l'emissió de contaminant

La rugositat del terreny és camp obert sense obstacles. Els edificis o muntanyes desvien els contaminants

Expressió del model Gaussià

El model gaussià s'utilitza per determinar la concentració de contaminant a qualsevol punt d'interès. La seva expressió és la següent:

Significat i unitats dels paràmetres

q = cabal de contaminant (en mg/s)

uW = velocitat del vent (en m/s)

y = coordenada y del punt a avaluar (en m respecte focus contaminant)

z = coordenada z del punt a avaluar (en m respecte nivell de terra)

x = coordenada x del punt a avaluar (en m respecte focus contaminant)

vS = velocitat de sortida dels gasos contaminants (en m/s)

P = pressió atmosfèrica (en milibar) en C.N. posar 1013 milibar

D = diàmetre de la boca de la xemeneia (en m)

TS = Temperatura de sortida dels gasos contaminants (en K)

TA = Temperatura ambiental (en K)

H = altura de la xemeneia + sobreelevació del plomall

a,b,c,d = Constants meteorològiques i d'estabilitat (depenen de l'estabilitat)

y/ z = desviacions standard per fuites contínues

R0 = Factor de rugositat superficial

Z0 = Altura d'on es determina la velocitat del vent (en m)

V0 = Velocitat del vent determinada a Z0 (en m/s)

= Coeficient de variació de la velocitat del vent (depèn de l'estabilitat)

KH = factor d'estabilitat de sobreelevació del plomall

• **Equacions de paràmetres**

Sobreelevació del plomall

Velocitat del vent a Z

• **Tabulació de constants**

1– Factor de rugositat del terreny (R0)

Tipus de Zona	R0
Terreny totalment pla	0,03
Terreny pla amb arbres	0,10
Terreny de conreus i cases	0,30
Zona residencial o indústries poc altes	1,00
Zona urbana amb edificis alts	3,00

2– Factor de variació de la velocitat del vent ()

Tipus d'estabilitat	valor
A (molt inestable)	0,10
B (inestable)	0,15
C (lleugerament inestable)	0,20
D (neutral)	0,25
E (lleugerament estable)	0,30
F (estable)	0,30

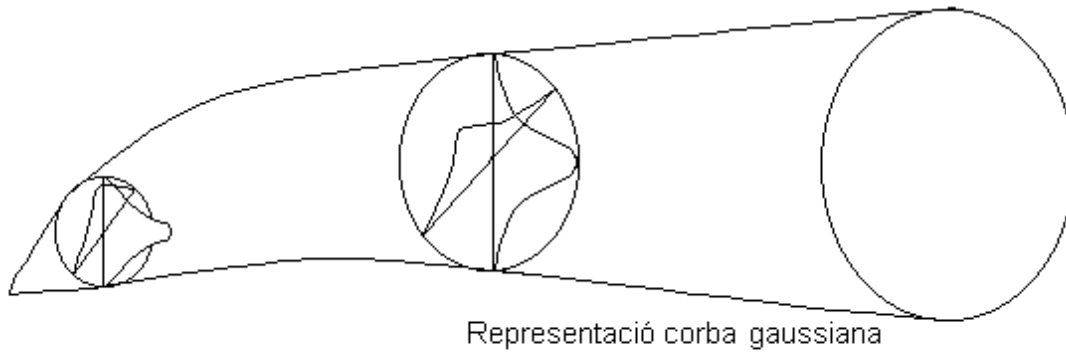
3– Constants a,b,c,d

tipus d'estabilitat	a	b	c	d
A (molt inestable)	0,527	0,865	0,28	0,90
B (inestable)	0,371	0,866	0,23	0,85
C (lleugerament inestable)	0,209	0,897	0,22	0,80
D (neutral)	0,128	0,905	0,20	0,76
E (lleugerament estable)	0,098	0,902	0,15	0,73
F (estable)	0,065	0,902	0,12	0,67

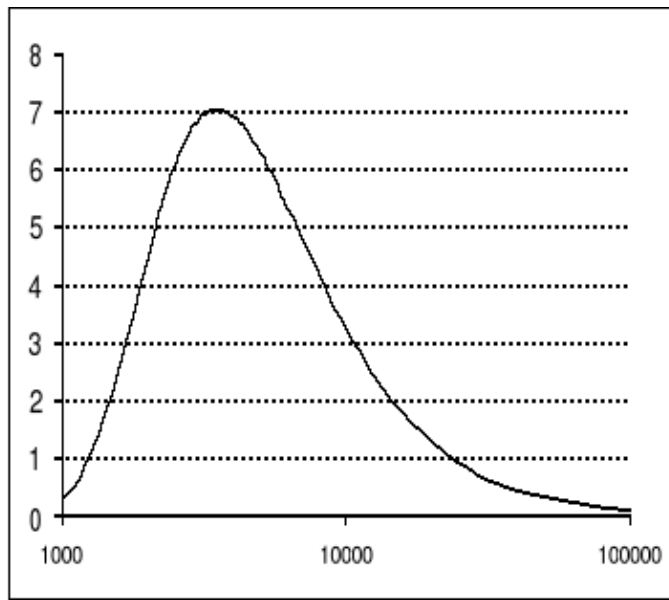
• **Casos particulars**

Z = 0, arran de terra

Font lineal emissora de contaminant



Per trobar la concentració màxima de contaminant no es pot derivar l'expressió pq hi han molts paràmetres que me depenen de X , el que s'ha de fer és per a diferents valors de X , tabular i llavors grafiar per veure on pot caure el màxim de la concentració. Una gràfica típica de concentracions segons la distància X , arran de terra és la següent:



TEMA 5: SEPARADORS CENTRÍFUGS

Si es substitueix la força gravitatòria per separar les partícules per una força centrífuga es pot aconseguir una major eficàcia, i un augment sensible del cabal de gas a processar. El separador centrífug més senzill i utilitzat és el cicló.

Les seves característiques són:

- Construcció senzilla i econòmica
- No té parts mòbils
- Pot operar a altres pressions i temperatures
- Pot tractar elevats cabals de fluid i amb concentracions altres de pols
- Té un baix cost operatiu
- Es eficaç però l'eficàcia disminueix molt per a partícules inferiors a 10 μ m.

Es per l'última causa que s'utilitza habitualment com a separador primari combinat amb un altre tipus de col·lector com fangs actius al secundari.

Funcionament d'un cicló

El gas a tractar entra tangencialment per la part superior del cicló i descendeix en trajectòria espiral fins arribar a la part inferior on la trajectòria s'inverteix i el corrent de gas puja, també en forma d'espiral. El gas abandona el cicló pel conducte de sortida, coaxial al cos del cicló.

Les partícules arrastrades pel cicló, al ser més pesades són projectades contra la paret interior del cicló i descendeixen en forma helicoidal i es recullen a la part inferior del cicló, generalment de forma cònica. Les que no impacten, degut al seu tamany reduït segueixen el recorregut del gas i conseguen escapar del cicló.

tipus de ciclons

Hi ha múltiples dissenys de ciclons amb l'objectiu de millorar-ne l'eficàcia de separació, augmentar el cabal a tractar i disminuir la pèrdua de càrrega. Tot hi això tots tenen uns elements en comú que són:

- El cos propi del cicló, generalment cilíndric
- El conducte d'entrada. N'hi ha d'axials, tangencials i d'entrada inclinada
- El conducte de sortida del gas netejat de partícules
- El conducte de recollida de partícules retingudes, generalment cònic

Ciclons d'entrada axial

Els ciclons d'entrada axial el gas entra per la part superior i adquireix una trajectòria tangencial deguda als àlabs inclinats adequadament per aconseguir-ho. El gas abandona el cicló per la part superior i les partícules captades per l'inferior.

Les avantatges del cicló axial són:

- Poden tractar un gran cabal de fluid

Els seus inconvenients són:

- Es desgasten ràpidament si les partícules són abrasives
- Hi ha major possibilitat de provocar-se taponaments amb materials adherents
- Pèrdua de càrrega

Ciclons d'entrada tangencial

De ciclons d'entrada tangencial n'hi ha de dos tipus:

- Configuració d'entrada normal
- Configuració amb deflector paral·lel o constrictiu en forma d'evoluta

L'objectiu d'aquests és intentar minimitzar les deficiències dels axials.

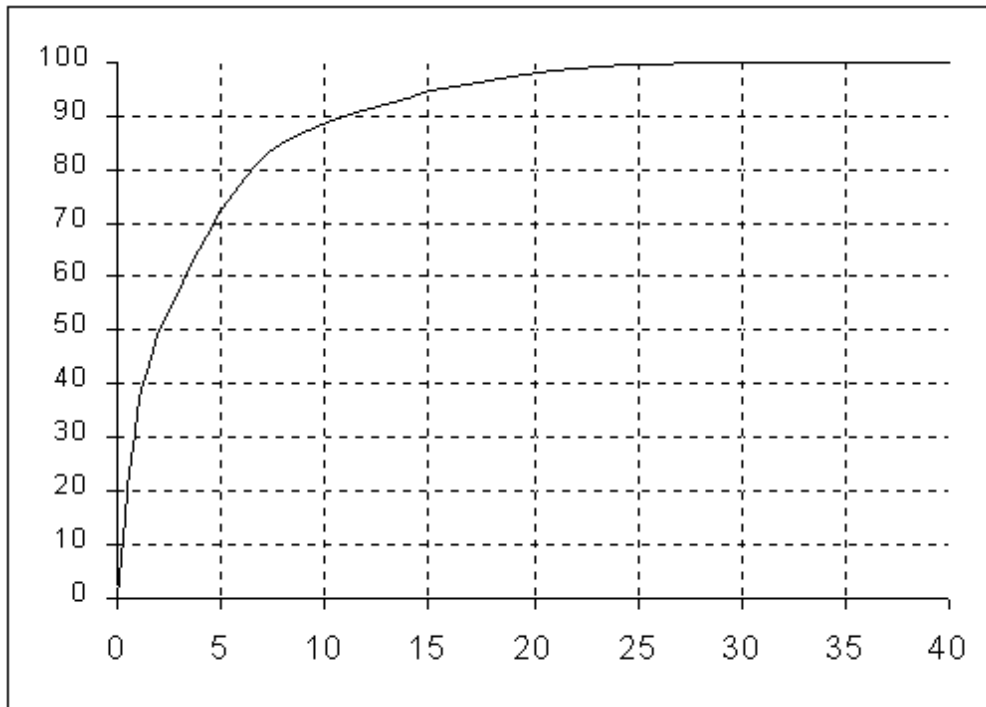
- Disminuir la pèrdua de càrrega els que tenen deflectors
- Augmentar la capacitat els que tenen forma d'evoluta
- Augmentar l'eficàcia els que tenen entrada helicoidal

Les proporcions d'un cicló solen estar fixades segons el tipus de cicló.

Eficàcia d'un cicló

L'eficàcia d'un cicló es defineix com el % de partícules captades respecte al total

Taula de l'eficàcia d'un cicló en funció de la granulometria del pols a separar



La relació entre la massa d'entrada i sortida i del diàmetre de la pols a separar depèn del tipus de cicló que, generalment, és una informació que facilita el fabricant.

Diàmetre de tall

El tamany de les partícules contingudes en un corrent de fluid a netejar no és uniforme sinó que és una distribució granulomètrica determinada que és imprescindible de conèixer per dissenyar correctament qualsevol captador de partícules.

Es defineix com a diàmetre de tall aquell que tenen les partícules que un cicló separa amb una eficàcia del 50%.

Aquest diàmetre de tall depèn dels següents factors:

- geometria del cicló
- propietats del fluid
- la densitat del sòlid a separar
- la velocitat d'entrada del gas
- la força d'un cicló depèn de la velocitat d'entrada del gas i del diàmetre.

Fent un balanç de forces de la partícula quan entra al cicló helicoïdalment s'obté l'expressió del diàmetre de tall.

d'on

d_1 = diàmetre mínim que pot ser separat (en m)

= constant que depèn del tipus de cicló ($K = 0.729$ per un Zenz)

u = velocitat del gas (en m/s)

= Diàmetre del cos del cicló (en m)

= nombre de voltes de l'espiral (habitualment 4)

S = densitat del sòlid (kg/m³)

= densitat del gas (kg/m³), per simplificar es pot considerar menyspreable

= la viscositat dinàmica del gas (kg/m s)

Amb aquesta expressió es calcula el diàmetre mínim de partícula que es pot separar en un cicló de diàmetre .

Hi ha una altra expressió per ciclons Zenz, que és aquesta:

on els paràmetres són els anteriors

b = altura de la boca d'entrada (en m) Considerar $b = 0,25h$ si no hi ha dades

Aquest diàmetre de Zenz s'aproxima al diàmetre de tall (eficàcia del 50%) i per tant s'escriu com a d_{50} .

Hem de tenir en compte varies coses:

- Tot i que la velocitat augmenta el diàmetre de tall, cal extrapolar—ho fins a uns certs límits. Velocitats grans impliquen nombre de Reynolds gran i règims turbulents on s'arrastren partícules que haurien de ser captades, per tant, l'eficàcia disminueix.
- La velocitat en un cicló ha d'estar entre 15 i 30 m/s

Càlcul general de l'eficàcia

La millor manera de determinar l'eficàcia es basa en el càlcul de d_{50} per un diàmetre determinat del cicló. Per fer—ho cal conèixer prèviament la distribució granulomètrica i la densitat de les partícules. Es suposa en valor del diàmetre del cicló amb el que es calcula d_{50} i amb el valor de es determina l'eficàcia per la fracció i de diàmetre d mitjançant la corba d'eficàcia corresponent. Es determina l'eficàcia individual per a cada fracció de la distribució i la total serà el sumatori corresponent de cadascuna d'elles:

el valor de l'eficàcia calculat correspon al funcionament del cicló en buit, o sigui, per partícules aïllades. Quan fem circular un fluid pel cicló el rendiment augmenta degut a la interacció entre partícules.

Per tant, quan circulem el fluid cal corregir el rendiment d'aquesta manera:

- Correcció per variacions de cabal

expressió vàlida per petites variacions de cabal

- Correcció per variacions en la viscositat

Expressió vàlida per petites variacions de viscositat

- Correcció per concentració de partícules

Pèrdua de càrrega en un cicló

La pèrdua de càrrega d'un cicló és un factor important ja que ens determina els costos d'operació i cal tenir-lo en compte en el disseny d'un cicló. Es considera acceptable un valor inferior a 2500 Pascals (N/m²) o bé 250 mm columna d'aigua tot hi que el valor ideal està entre 25 i 180 mm. columna d'aigua. La pèrdua de càrrega es produeix per les següents causes:

- Expansió del gas a l'entrada del cicló
- Pèrdua d'energia cinètica en la trajectòria helicoïdal seguida pel gas
- Friccions sobre la paret interior
- Recuperació d'energia cinètica en forma d'energia de sobrepressió a la sortida

Una fórmula empírica per calcular la pèrdua de càrrega és la següent:

d'on:

n = constant de velocitat (agafi's entre 1.5 i 2, habitualment $n=2$)

G = densitat del gas en kg/m³

u = velocitat del gas a l'entrada del cicló en m/s

= paràmetre geomètric del cicló que l'ha de facilitar el fabricant

si no es disposa d'aquest paràmetre es pot aproximar per la fórmula:

on a i b són les mesures de la boca d'entrada

D és el diàmetre del conducte de sortida

La pèrdua de càrrega calculada correspon al cicló treballant en buit, si es considera una certa concentració de partícules aquest valor disminueix a mesura que s'augmenta la concentració de sòlid en el gas. Això és degut a la inèrcia de les partícules que afavoreixen el pas del gas i la disminució de la velocitat del gas per fricció:

La pèrdua de càrrega real és pot calcular a partir de la pèrdua de càrrega en buit i la concentració de partícules sòlides.

d'on a i b són unes constants que depenen del tipus de cicló

P = Pèrdua de pressió en buit (N/m²)

P_R = pèrdua de pressió amb partícules o real (N/m²)

C = concentració de partícules sòlides en el gas (g/m³)

La pèrdua de càrrega es pot reduir en més d'un 50% si es disposa d'una pantalla que uneixi el lateral de la boca d'entrada amb la paret del conducte de sortida, de manera que es canalitzi la corrent de fluid. També s'obtenen reduccions considerables si l'entrada és de forma helicoïdal.

Connexió de ciclons en paral·lel

Quan els cabals a tractar són considerables les dimensions d'un cicló han de ser tan grans que això provocaria una disminució dràstica de la seva eficàcia.

Si el tamany és excessivament petit, l'eficàcia serà acceptable però la pèrdua de càrrega per fricció i velocitat serà excessiva produint-se abrassió i una demanda d'energia excessivament gran.

Per aquest motiu es connecten varis ciclons de diàmetre petit en paral·lel, podent-se tractar aquest dispositiu en conjunt grans cabals amb unes eficàcies elevades.

Coses que cal tenir en compte en la connexió en paral·lel:

- La pressió del gas a tots els ciclons ha de ser la mateixa per evitar corrents secundàries entre ciclons i una disminució d'eficàcia
- Les pèrdues de càrrega a cada cicló han de ser les mateixes
- Les dimensions de cadascun dels ciclons han de ser les mateixes
- Cal aconseguir una granulometria semblant a totes les entrades dels ciclons que estan operant en paral·lel

Els ciclons utilitzats per operar en paral·lel són els axials ja que són els que augmenten més el cabal quan es connecten en paral·lel.

Connexió de ciclons en sèrie

La connexió en sèrie permet augmentar l'eficàcia de la separació però afecta negativament a la pèrdua de càrrega augmentant-la.

l'eficàcia global es calcula:

d'on:

= eficàcia global de la connexió en sèrie

P = eficàcia del cicló primari

S = eficàcia del cicló secundari

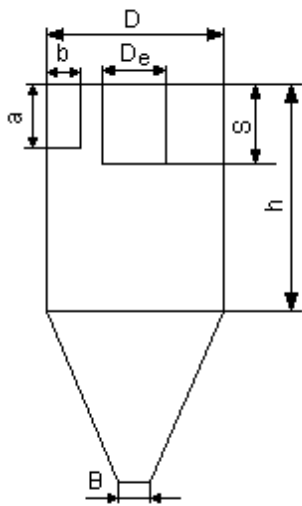
Usos habituals de la connexió en sèrie:

- Quan s'han de tractar partícules fràgils, la connexió en sèrie disminueix la velocitat i la probabilitat de què les partícules es trenquin
- Gradació: El cicló primari s'utilitza per eliminar les partícules de diàmetres més grans i llavors el secundari les més petites.

Normalment no es connecten més de 3 dispositius en sèrie.

Dades dels ciclons més utilitzats:

dimensions i paràmetres ciclons segons el tipus



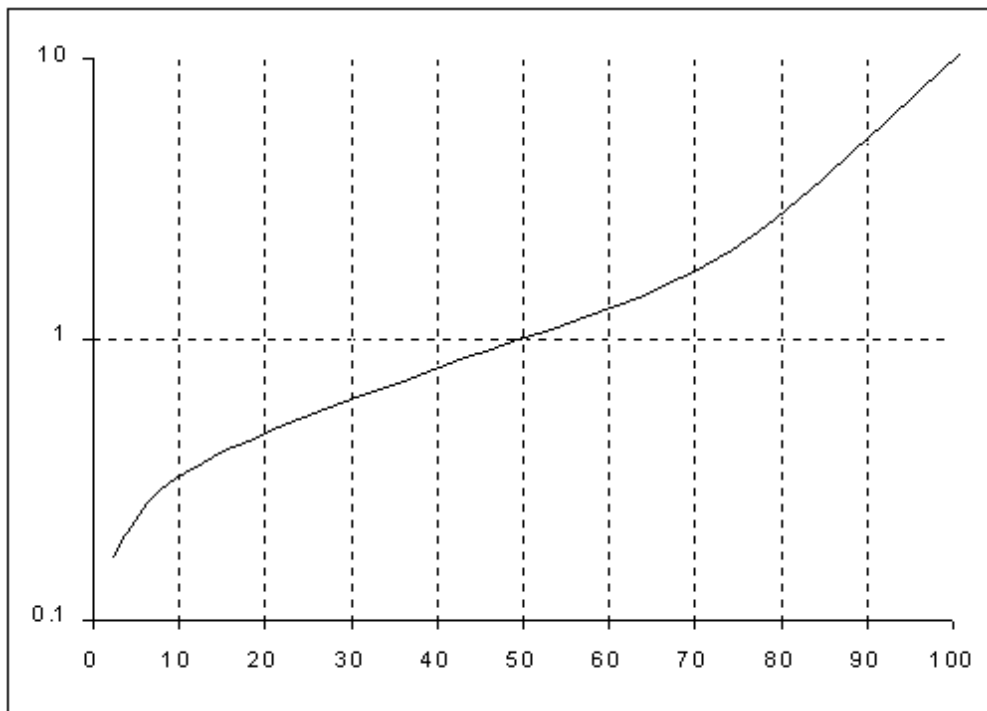
Dimensions de ciclons

paràmetres	Alta eficàcia		Us general			
	Stairmand	Swift	Lapple	Swift	Peterson	Zenz
D	1	1	1	1	1	1
a/D	0.5	0.44	0.5	0.5	0.583	0.5
b/D	0.2	0.21	0.25	0.25	0.208	0.25
S/D	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583	0.75
De/D	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
h/D	1.5	1.4	2	1.75	1.333	2
H/D	4	3.9	4	3.75	3.17	4
B/D	0.375	0.4	0.25	0.4	0.5	0.25
v (espiral)	3	3.2	4	3.5	2.3	----
k	0.659	0.674	0.729	0.729	0.671	0.729
K	551	699	403	382	342	347

v = nombre de voltes d'espiral

k = constant del diàmetre de tall (d1)

Corba de rendiments d'un cicló típic



Exemple de resolució de problemes de ciclons:

- Fracció granulomètrica

di (um)

20

35

50

65

80

95

110

125

140

155

170

Xi (màssica)

3

12.5

30

49

66

76.4

86

93.3

97

98.9

100

- Paràmetres de partícules

Velocitat de gas de 2.25 m³/s; densitat d'1 kg/m³; viscositat de 3.6*10⁻⁵ Pa.s. Densitat de partícules de 1590 kg/m³ i una concentració de 72 g/m³.

- Paràmetres del cicló

Zenz amb diàmetre de 0.9 m, 4 voltes d'espiral

- Determinació del diàmetre de tall

Fòrmula de Zenz

Fòrmula de Rosin

càlcul de la velocitat

m/s

càlcul de les voltes d'espiral

S'agafa el de Zenz al ser el més desfavorable, per tant $d_{50} = 12.8 \text{ m}$

- Determinació del rendiment o eficàcia global

Corbes de relació: entrem per i obtenim per cada fracció granulomètrica el seu rendiment. La corba utilitzada és la de la pàgina anterior.

- columna 4: Obtenció del quocient d / d_{50}
- columna 5: Obtenció dels rendiments (δ_i) a partir de les gràfiques
- columna 6: Producte $\delta_i * m_i$
- columna 7: És la resta entre la massa present i la massa captada

Pel càlcul del rendiment corregit cal utilitzar la següent relació:

- Càlcul del rendiment global

= 92,27 % de rendiment en buit

- Correcció del rendiment

Es considera que en buit la concentració és de 0.024 g/m^3

obtenim $B = 98.2 \%$

- Obtenció de la pèrdua de càrrega

utilitzarem que $n=2$

calcular el paràmetre λ ja que no ens el donen en el problema

N/m^2

Es considera acceptable un valor inferior a 2500 Pascals (N/m^2), per tant, podem acceptar aquesta pèrdua de pressió. A la realitat, degut als efectes d'interacció entre partícules i a la inèrcia que les partícules donen el gas fa que la pèrdua de pressió real sigui menor a la calculada. Com que no disposem de les dades de les constants, no és possible calcular la pèrdua de càrrega real.