



## Preàmbul

El projecte s'inscriu en el marc d'una empresa fabricant de tints i pintures.

Aquesta empresa, atenent al seu procés productiu i als dissolvents que utilitza, genera una quantitat important de Compostos Orgànics Volàtils (COV) que emet a l'atmosfera a través de les xemeneies.

Tot i ser una empresa conscienciada amb el medi ambient, que utilitza tècniques de prevenció en origen per disminuir l'emissió de COV a l'atmosfera (les seves emissions es troben dins dels rangs permesos per la legislació en aquest sector), els seus directius pretenen conèixer les alternatives possibles per si decideixen aplicar algun sistema de tractament dels Compostos Orgànics Volàtils a la sortida de la xemeneia, amb la finalitat de recuperar o reduir l'emissió d'aquests contaminants a l'atmosfera.

En aquest projecte es presenta una avaluació econòmica i ambiental de diferents sistemes de tractament dels COV aplicables a l'empresa.





## 1. Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és fer l'estudi de diferents sistemes de tractament dels compostos orgànics volàtils per a la seva recuperació o eliminació, aplicables a l'empresa que demana l'estudi. Consisteix en fer una avaluació econòmica i ambiental d'aquests sistemes de tractament, amb la finalitat de poder disposar d'informació rellevant a l'hora de decidir si cal aplicar un determinat sistema de tractament i, si és el cas, escollir la millor alternativa.

En tota avaluació econòmica i ambiental dels tractaments de compostos orgànics volàtils per a la seva recuperació o eliminació es diferencien cinc objectius que són, també, els objectius d'aquest projecte:

1. Determinació dels sistemes de tractament de COV aplicables a l'empresa d'estudi.
2. Elaboració d'una avaluació econòmica per als sistemes de tractament de COV escollits en l'apartat anterior.
3. Elaboració d'una avaluació ambiental per als mateixos sistemes de tractament de COV.
4. Estudi de les avaluacions de manera conjunta (econòmica i ambiental).
5. Estudi de la viabilitat de la millor alternativa en el tractament de compostos orgànics volàtils.





## 2. Justificació

A l'hora de dur a terme aquest projecte es pretén avaluar processos industrials tant a nivell econòmic com a nivell ambiental, però fent-ho sempre des d'una visió conjunta i global d'aquests dos factors.

Pel que fa referència a la part econòmica, s'intenta avaluar qualsevol alternativa que pugui minimitzar costos empresarials. Tot i que certs canvis portats a terme en els processos industrials poden suposar considerables inversions, un cop superat un període de retorn de la inversió suposen un increment en els beneficis empresarials.

Per altra banda, dins la vessant ambiental, la implementació de certes alternatives al procés industrial actual poden suposar:

- l'acompliment de la legislació vigent
- una millor imatge empresarial
- avantatges en l'obtenció de permisos i tràmits simplificats
- estalvis en la gestió de corrents residuals
- avantatges amb companyies asseguradores
- reducció de possibles responsabilitats civils i penals

Cal tenir en compte també que sovint les empreses requereixen als seus proveïdors una política i un comportament ambientalment correctes i demostrables. Aquest fet pot fer que aquelles empreses que no les compleixin puguin ser excloses dels catàlegs de proveïdors.

Es per aquest motiu que les empreses tenen la necessitat d'adoptar canvis en els seus processos per tal que satisfaci el client, com a part integrant d'una cadena de producció.





## 3. Introducció

### 3.1. Contaminació atmosfèrica

La contaminació atmosfèrica es defineix com una condició atmosfèrica on les substàncies hi són presents en concentracions més altes que les d'un ambient normal (atmosfera neta), podent produir efectes significatius sobre els éssers vius, les estructures (edificacions, monuments,...) i sobre les propietats intrínseques de l'atmosfera (reducció de visibilitat, alteració del balanç de calor del sistema terra-atmosfera, alteracions sobre el clima...).



*Fig.1. Emissió de contaminació atmosfèrica degut a una xemeneia industrial*

#### 3.1.1. Marc introductor

L'interès emergent per la contaminació atmosfèrica ha estat la causa de la realització d'estudis, l'engegada de metodologies prou fiables per a la determinació dels diferents tipus d'agents i compostos contaminants en els diferents compartiments del medi atmosfèric, i la investigació detallada de les fonts d'emissió i dels complicats processos atmosfèrics en què intervenen.



Els resultats d'aquests estudis han permès l'adopció de mesures restrictives i preventives d'emissió atmosfèrica per part de diferents contaminants.

També cal fer notòria la resposta tecnològica al fenomen, ja que s'han desenvolupat una sèrie de sistemes de tractament (veure ap. 3.4) que permeten minimitzar i controlar les emissions i com a conseqüència, el seu impacte atmosfèric.

La contaminació de l'aire és un procés que s'inicia amb les emissions a l'aire per part dels diferents focus emissors. Una vegada aquestes substàncies es troben a l'atmosfera pateixen diferents efectes de transport i/o transformació.

Com a resultat d'aquests processos, en un punt determinat es dona una determinada concentració de cada contaminant, que es coneix com a nivell d'immissió.

Són els nivells d'immissió o de qualitat de l'aire els que determinen l'efecte d'un contaminant sobre la salut o el medi ambient.

Així doncs, la problemàtica de la contaminació atmosfèrica depèn de tres factors:

- a) Les fonts emissores que produeixen els pol·luents atmosfèrics. En el procés d'emissió es llancen a l'atmosfera quantitats determinades d'un o varis contaminants.
- b) L'atmosfera on aquests pol·luents es transporten, es difonen i experimenten transformacions químiques. El temps de residència del contaminant està relacionat amb la seva reactivitat química, amb el rentat de l'atmosfera que efectua la pluja i amb la capacitat del medi per dispersar-lo.
- c) Els receptors propers al sòl que responen a les quantitats traça dels contaminants que hi arriben.





Per tant, per tal de minimitzar la contaminació atmosfèrica és necessari, per una banda, el control de les emissions atmosfèriques (nivells d'emissió), i per altra banda, el control i la vigilància de la presència dels contaminants a l'aire en diferents punts receptors (nivells d'immissió).

### 3.1.2. Compostos orgànics volàtils (COVs)

En general, no existeix encara una definició per als Compostos Orgànics Volàtils (d'ara en endavant, COVs) mundialment acceptada. No obstant, segons l'USEPA es pot considerar que són totes aquelles substàncies amb baix punt d'ebullició i una pressió de vapor mínima de 0,13 Kpa, a 25 °C i a 101 Kpa de pressió, i que presenten en la seva molècula un o més àtoms de carboni.

S'utilitzen en nombroses aplicacions: combustibles, refrigerants, propel·lents, agents d'extracció, dissolvents, desgreixants, aromatitzants... i provenen, per regla general, dels ventejos del procés, de l'emmagatzematge o la transferència de líquids i gasos, de fonts fugitives i de ventilacions intermitents.

Els COVs es poden classificar en funció de diferents criteris:

- En funció de la volatilitat: *(criteri plantejat per l'USEPA)*

Classe	Pressió de vapor	Punt d'ebullició
Volàtils (COV)	>0.13 mmHg	<100° C
Semivolàtils (COSV)	0.1 – 10 <sup>-7</sup> mmHg	100 – 325° C
No volàtils (CONV)	<10 <sup>-7</sup> mmHg	>325° C

Taula 1. Classificació dels COVs en funció de la seva volatilitat



Dels contaminants atmosfèrics considerats per l'USEPA com a perillosos, 99 són hidrocarburs totals, 51 es classifiquen com a semivolàtils i només 5 es classifiquen com no volàtils.

- En funció dels efectes que produeixen:

Classe COVs	característiques
Oxidants	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenten un elevat potencial de formació d'ozó: alquens, alquins, alcans i hidrocarburs aromàtics</li> <li>- Involucrats en processos fotoquímics i en la formació d'àcids: aldehids, cetones i àcids lliures</li> </ul>
Estratosfèrics	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenten elevats potencials de depleció de l'ozó estratosfèric: CFC, halons, tetraclorometà</li> </ul>
Tòxics	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Traces de substàncies directament tòxiques o perjudicials per l'home, animals o vegetals: dissolvents halogenats, benzè i derivats, aldehids, nitrils...</li> </ul>
Odorífers	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Presenten baixos llindars de detecció olfactiva i estan involucrats en episodis d'olors: mercaptans, tioèters, amines, clorofenols, aldehids, cetones</li> </ul>
Climàtics	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adsorbeixen la radiació IR (involucrats en l'efecte hivernacle)</li> <li>- Contribueixen a la formació de nuclis de condensació atmosfèrics: sulfur de dimetil</li> </ul>

Taula 2. Classificació dels COVs en funció dels efectes que produeixen

- En funció de les característiques pròpies:

Principals famílies de COV atmosfèrics			
Hidrocarburs alifàtics (C <sub>1</sub> -C <sub>14</sub> )	Alcohols	Àcids lliures	Nitrils
Hidrocarburs olefínics (C <sub>2</sub> -C <sub>14</sub> )	Èsters	Amines	Nitrats de peroxoacil
Hidrocarburs aromàtics	Èters	Terpens	Nitroalcans
Dissolvents halogenats	Aldehids	Mercaptans	Nitroaromàtics
Freons i halons	Cetones	Tioèters	Altres compostos

Taula 3. Classificació dels COVs en funció de les seves característiques



Cal indicar que en la taula anterior es refereix a hidrocarburs quan les molècules només contenen carboni i hidrogen, i a altres compostos quan poden tenir, a més, elements com O, N, P, Cl o S i fins i tot metalls.

### 3.1.3. Anàlisi de la problemàtica dels COVs

Les propietats químiques dels dissolvents poden afectar de forma directa al medi ambient, ja sigui per la destrucció de la capa d'ozó estratosfèric, o bé per la formació d'ozó troposfèric.

També poden afectar de forma indirecta a la salut de la població. Quan es tracta d'agents tòxics també poden afectar les persones per exposició directa, principalment per inhalació.

Val a dir que tot sovint els problemes de la contaminació atmosfèrica no vénen d'un únic focus d'emissió, quan les normatives actuals se centren, de forma insuficient, a limitar les emissions de COV a un únic focus.

A continuació es llisten els riscos més importants:

	Problemàtica	Característiques
<b>Riscos sobre la qualitat ambiental</b>	Destrucció capa d'ozó	
	Formació d'ozó fotoquímic	
	Inflamació i explosió	
	Formació de peròxids	
	Males olors	Si es combinen amb altres elements
<b>Riscos sobre la salut</b>	Agents cancerígens, tòxics o mutàgens	
	Efectes sobre els òrgans	Sistema Nerviós Central Sistema Nerviós Perifèric Necrosis del fetge i nefritis Alteracions a pell i mucoses Sang (anòxia)

Taula 4. Riscos que afecten a la qualitat ambiental i a la salut



### Riscos sobre la qualitat ambiental

#### ■ Destrucció de la capa d'ozó

L'ozó actua com un filtre que no deixa passar la dita radiació perjudicial fins a la superfície de la Terra.

Tot i això, l'equilibri de l'ozó en l'estratosfera es veu afectat per la presència de contaminants, com algun tipus de compost orgànic volàtil, que reaccionen amb aquest i fan que es destrueixi més ràpidament del que es regenera.

#### ■ Formació d'ozó fotoquímic:

La formació d'ozó a nivell troposfèric en els processos del que després s'anomena *smog* o boirum oxidant és atribuïble a fenòmens d'oxidació fotoquímica on estan involucrats els COV, conjuntament amb els òxids de nitrogen.

### Riscos sobre la salut

L'exposició humana es basa principalment en la seva inhalació. Entre els efectes crònics que poden produir destaca el càncer. Com a efectes d'intoxicacions agudes es poden destacar algunes alteracions del sistema nerviós central i una important reactivitat dèrmica.

#### ■ Agents cancerígens, mutàgens o tòxics per a la reproducció

Molts dissolvents s'han mostrat carcinogènics en animals i, per tant, es consideren potencialment carcinogènics per als humans. També és conegut que molts d'aquests retarden el creixement fetal. (p. ex: isopropanol)



Cal afegir que els alcohols saturats d'un sol grup OH (oxidat) pertanyen al grup de COVs inflamables. Per tant, poden provocar cremades i problemes relacionats. Així doncs, per minimitzar tots aquests riscos associats als COVs i també per evitar queixes com ara les originades per males olors o per l'aspecte visual d'una columna de fum, les autoritats competents dicten cada cop normatives ambientals més específiques i exigents.

El control eficient d'emissions d'instal·lacions industrials permet una major seguretat i un millor coneixement de les emissions dels processos, cosa que suposa una reducció del risc d'exposició laboral, etc.



*Fig. 2. Aspecte de la boira fotoquímica (smog)*

### 3.2. Marc legal

Amb l'objectiu d'evitar o reduir els efectes derivats de l'ús de dissolvents orgànics en determinades activitats que produeixen emissions de compostos orgànics volàtils, la Unió Europea i l'estat espanyol han aprovat un seguit de directives, lleis i reials decrets que afecten a aquelles activitats que utilitzen dissolvents en quantitats importants.



Rang/ Referència	Transposició	Àmbit d'aplicació	Observacions
Directiva 1996/61/CE IPPC	Llei 16/2002	Prevenció i control integrats de la contaminació  Reducció d'emissions a l'atmosfera, aigua i sòl	Concessió d'autorització ambiental integrada Aplicació de les BATs (Millors Tècniques Disponibles)
Directiva 1999/13/CE	Reial Decret 117/2003	Reducció dels nivells d'emissió dels COVs aplicables a :  - Neteja de superfícies - Recobriment de superfícies - Assecat de superfícies	Afectació dels dissolvents en el medi ambient i la salut  Defineix llindars de consum i valors límits d'emissió
Directiva 2004/42/CE	Reial Decret 227/2006	Emissions de COV en l'acabat i renovació de vehicles  - Màxims continguts de COV en vernissos i pintures - Recobriments funcionals - Recobriments decoratius	Modifica la Directiva 1999/13/CE

Taula 5. Marc legal de referència

FONT: Instituto tecnológico metalmeccánico ([www.aimme.es](http://www.aimme.es))

### 3.2.1. Directiva Europea 1996/61/CE

La Directiva 96/61/CE del Consell del 24 de setembre, relativa a la prevenció i control integrats a la contaminació, coneguda amb el nom de IPPC (*Integrated Pollution Prevention and Control*), té per objectiu evitar, reduir i controlar la contaminació en el seu conjunt, establint criteris per a determinar els valors límits d'emissió i els paràmetres i les mesures tècniques equivalents de l'activitat, tot basant-se en les millors tècniques disponibles (MTDs) des del punt de vista ambiental.

Aquesta directiva és aplicable a les instal·lacions de titularitat pública o privada en les que es desenvolupi qualsevol de les activitats incloses en l'annex I de la directiva.



Queden excloses d'aquesta legislació les instal·lacions o parts d'instal·lacions que siguin utilitzades per a la investigació i el desenvolupament de productes i processos.

L'aplicació d'aquesta llei en l'estat espanyol es basa en una transposició d'aquesta, la Llei 16/2002 i suposa la modificació de certes normatives del sector tals com:

- Reial Decret 1217/1992 sobre limitacions d'emissions a l'atmosfera de determinats contaminants procedents de grans instal·lacions d'incineració de residus municipals.
- Llei 10/98 de protecció de l'ambient atmosfèric
- Ordre del 12 de novembre del 1987 sobre normes d'emissió, objectius de qualitat i mètodes de medició de referència relatius a determinades substàncies nocives o perilloses contingudes en els abocaments d'aigües residuals.

La transposició de la directiva comporta, també, unes repercussions directes per a les empreses, entre les que cal destacar:

- exigència a les empreses de considerar les MTDs del seu sector
- simplificació dels tràmits administratius d'autorització d'activitats per a l'establiment d'un permís integrat
- obligació d'obtenir una autorització ambiental per al desenvolupament de les activitats industrials afectades
- obligació de participar en un inventari d'emissions i notificar els resultats a l'autoritat ambiental
- establiment de les bases de dret i mecanismes per a l'accés públic a la informació ambiental



La directiva europea és recollida també en l'àmbit autonòmic com a Llei 3/1998 de la Intervenció Integral de l'Administració Ambiental (IIAA), amb l'objectiu prioritari de desenvolupar accions per potenciar la sensibilització de la indústria respecte els problemes mediambientals, incloure instruments que facilitin la tasca de informació per a les empreses sobre les millors tècniques disponibles mitjançant els BREF i millorar la difusió de les tecnologies més netes i millorar les pràctiques ambientals.

D'acord amb aquesta llei, les MTDs han de ser el punt de referència per a fixar els límits d'emissió permesos per a les diferents activitats.

El mecanisme per a la determinació de les MTDs s'inicia amb una col·laboració entre la indústria i l'administració, les quals formen els grups de treball tècnic (participació d'indústries catalanes i el Departament de Medi Ambient i Habitatge) que per cada activitat industrial proposen al Fòrum D'intercanvi d'Informació (FII) els documents de referència sobre les MTDs; els BREF.

Un cop aprovat el BREF pel FII, aquest passa a la Comissió Europea que adopta aquest document mitjançant una decisió publicada al Diari Oficial de la Unió Europea (DOUE).

El contingut del document es pot emprar de la manera que cada estat membre consideri adequada.

En el cas de Catalunya, el Departament de Medi Ambient i Habitatge, després de participar en l'elaboració dels BREF, reprèn aquest document per adaptar-lo a la realitat i a les condicions locals de Catalunya. Aquesta actuació en el territori català pot venir donat de dues maneres complementàries entre elles:

- Elaboració i publicació de les guies catalanes de la col·lecció "Documents de referència sobre les millors tècniques disponibles aplicades a la indústria".





Les guies catalanes són una síntesi dels principis, conceptes, tècniques i recomanacions de cada un dels BREF en el territori català. En aquest procediment, es fixen els paràmetres i nivells recomanats per cada sector industrial.

- Aplicació directa de tot allò contingut en el BREF com en les guies catalanes, que seran considerats per a l'establiment dels valors límits d'emissió i les prescripcions tècniques de caràcter general.

Aquesta normativa és de gran importància per tal de mantenir permanentment informat el sector industrial, de forma que puguin incloure des del primer moment en la seva estratègia metodologies de millores ambientals que els permeti establir-se dins els límits, mantenint-se competitius.

El sector de fabricació de pintures, vernissos i tintes d'impressió, no està afectat per la llei IPPC ja que dit sector no està citat en l'annex I i, per tant, el sector no està desenvolupant cap BREF on hi quedin recopilades totes les MTD del sector.

Per tant, i atès que la legislació que si afecta directament a aquest sector, com el Reial Decret 117/2003 sobre limitació d'emissions de COVs degut al ús de dissolvents en determinades activitats, fan referència explícita a les MTD, ha estat el propi sector qui ha pres la iniciativa de tractar de recopilar en un document aquelles pràctiques que pel procés de fabricació de pintures i tintes poden ser considerades com a MTD.



### 3.2.2. Reial Decret 117/2003

El Reial Decret 117/2003 té per objectiu evitar o, quan no sigui possible, reduir els efectes directes o indirectes de les emissions de compostos orgànics volàtils sobre el medi ambient i la salut de les persones.

Queden incloses en el seu àmbit d'aplicació les instal·lacions en les que es desenvolupen algunes de les activitats incloses en l'annex I de la pròpia directiva, sempre que es realitzin sobrepassant els llindars de consum de dissolvents establerts en l'annex II de la mateixa.

Per al compliment del Reial decret, es donen quatre possibles alternatives d'aplicació<sup>1</sup>:

- I. Complir els valors límits d'emissió de gasos residuals i els valors d'emissió difusa establerts en l'annex II de la directiva.

Llindar de consum de dissolvents (t/any)	Valors límits d'emissió en gasos residuals (mg C/Nm <sup>3</sup> )	Valors d'emissió difusa (% d'entrada de dissolvents)
100-1000	150	5
> 1000		3

Taula 6. Valors límits d'emissió difusa segons el llindar de consum dels dissolvents

Pel fet que l'emissió difusa no pot determinar-se amb una medició directa, el Reial Decret proposa dos mètodes per determinar-la a través de càlculs del conjunt de les emissions que la conformen.

<sup>1</sup> "Guía practica para el cumplimiento del Real Decreto 117/2003 sobre limitación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) debidos al uso de disolventes en determinadas actividades". Asociación española de fabricantes de pinturas i tintas de imprimir (ASEFAPI)



Ia. Es defineix l'emissió difusa com:  $F = I1 - O1 - O5 - O6 - O7 - O8$

On:

F : emissió difusa

I1: Quantitat de dissolvent orgànic utilitzat com a matèria primera per el període que es calcula el balanç de massa.

O1: emissió de gasos residual

O5: dissolvents orgànics o compostos orgànics perduts degut a reaccions químiques o físiques.

O6: dissolvents orgànics continguts en els residus recollits

O7: dissolvents orgànics continguts en preparats, venuts com a productes comercials.

O8: dissolvents orgànics continguts en preparats recuperats per a la seva reutilització.

Tots els paràmetres anteriors es poden determinar per mètodes analítics coneixent la composició dels productes de cada una de les línies de procés de la instal·lació.

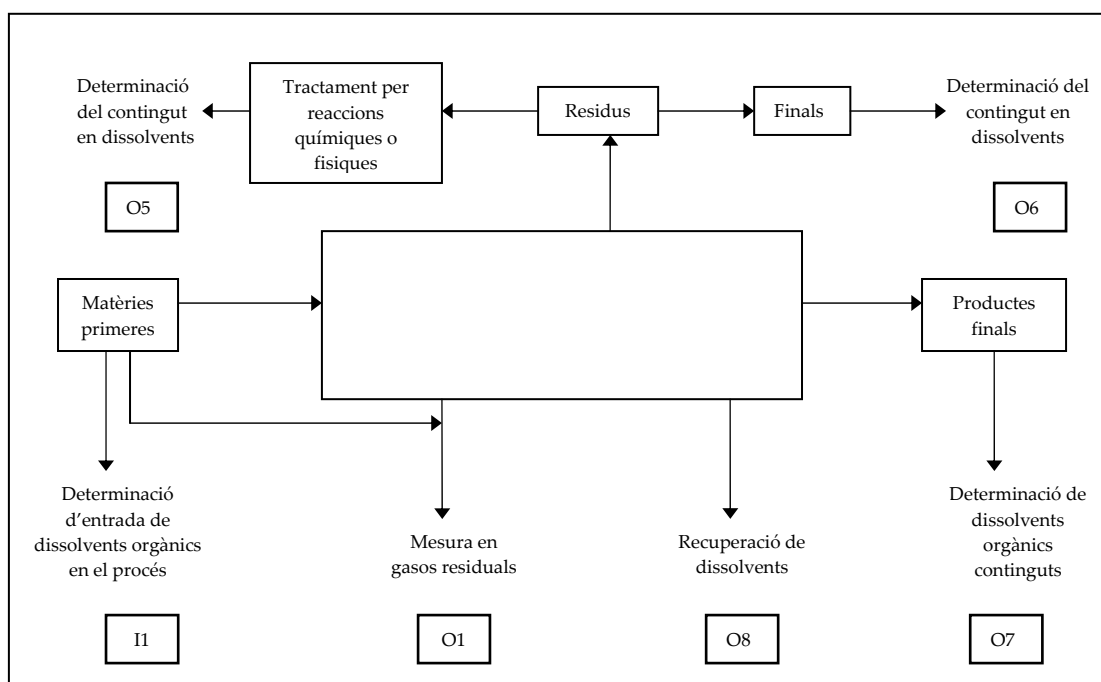


Fig.3. Esquema de determinació de l'emissió difusa



**Ib.** Es defineix l'emissió difusa com:  $F = O2 + O3 + O4 + O9$

On:

O2: dissolvents orgànics perduts en l'aigua

O3: quantitat de dissolvent orgànics que romanen com a contaminació o residu en la sortida de productes del procés

O4: emissions no capturades de dissolvents orgànics en l'aire.

O9: dissolvents orgànics alliberats per altres vies

Per aquest mètode els paràmetres O4 i O9 han de ser determinats per diferència, per lo que és obligat prèviament haver calculat l'emissió difusa per el primer mètode.

Per últim és necessari establir el valor d'emissió difusa com a proporció de l'entrada de dissolvents orgànics volàtils, de manera que:

$$\text{Entrada dissolvents orgànics} = I = I1 + I2$$

On:

I2: quantitat de dissolvents orgànics o la seva quantitat en preparats recuperats i reutilitzats com entrada de dissolvents en el procés.

Si per les dues determinacions realitzades, el resultat de les emissions de gasos residuals i les emissions difuses és menor que el valor llindar indicat en l'annex II de la directiva, la instal·lació compleix amb els requisits que estableix el Reial Decret.

En cas contrari, serà necessari establir mesures correctores en el procés per reduir les emissions per sota els valors llindars establerts.



## II. Complir els valors llindar d'emissió total, establerts en l'annex II de la directiva:

Llindar de consum de dissolvents (t/any)	Valors d'emissió total (% d'entrada de dissolvents)
100-1000	5
> 1000	3

Taula 7. Valors límits d'emissió total segons el llindar de consum de dissolvents

L'emissió total pot expressar-se com:

$$Emissió\ total\ (E) = emissió\ difusa + emissió\ de\ gasos\ residuals$$

La diferència que presenta l'avaluació del compliment segons aquesta alternativa és que és possible que l'emissió difusa o la emissió de gasos residuals no compleixin per separat els valors llindars d'emissió que estableix el Reial decret, mentre que la suma de les dues conjuntament sí que compleixi els valors límits d'emissió total permesos pels requisits fixats pel Reial Decret.

Com en l'alternativa anterior, el Reial Decret permet calcular l'emissió total del procés per dues metodologies diferents:

- a. Càlcul per determinació de les pèrdues de dissolvents

$$E = I1 - O5 - O6 - O7 - O8$$

- b. Càlcul per determinació de les emissions de dissolvents

$$E = O2 + O3 + O4 + O9 + O1$$

El Reial Decret fixa el valor límit com el percentatge que suposa l'emissió de COVs que es produeixen en la instal·lació en relació a l'entrada de dissolvents en la instal·lació:

$$Entrada\ de\ dissolvents\ orgànics = I = I1 + I2$$



De tal manera que el que s'ha de comparar amb el valor límit fixat per el Reial Decret és el resultat de la següent operació:

$$\left(\frac{E}{I}\right) \cdot 100 < \text{Valor límit d'emissió total}$$

De fet, aquesta segona alternativa és més restrictiva que la primera en el sentit de que imposa un 3% d'entrada de COVs com a límit en les emissions difuses, mentre que la segona alternativa aquest límit s'aplica a la suma de la difusa més la dels gasos residuals. Aquesta última alternativa pot ser interessant en el cas de processos amb certs focus que superin els 150 mg C/ Nm<sup>3</sup> i amb baixes emissions difuses.

**III.** Establir un sistema de reducció d'emissions, establert en l'annex III de la directiva

**IV.** Utilització de millors tècniques disponibles (MTD) el que exigeix de:

- El compliment dels valors llindars d'emissió difusa
- El compliment dels valors llindars d'emissió difusa, emissions de gas residual i emissions totals, si l'activitat no pot dur-se a terme de manera confinada, havent d'establir, llavors, un sistema de reducció d'emissions, excepte que es pugui demostrar que aquesta possibilitat no és factible ni tècnicament ni econòmica.



### 3.3. Antecedents

Per a la realització de l'estudi en qüestió ha estat possible obtenir dades reals, a través del contacte amb una empresa dels sector de tints i pintures. En el moment de plantejar-los-hi l'estudi, l'empresa ja havia realitzat un conjunt d'actuacions dirigides en aquest àmbit.

Prèvia a l'entrada en vigor de la Directiva 1999/13/CE sobre limitació de COVs per als límits d'emissió d'aquests compostos es prenia com a referència la normativa alemanya T.A.Luft.

Les principals diferències entre les dues normatives es mostren en la taula 8:

T.A.Luft	Directiva 1999/13/CE
Anàlisi de COVs individual	Anàlisi de COVs conjunt
Anàlisi de xemeneies individualment	Anàlisi de la instal·lació conjuntament
No regula emissions fugaces	Regula emissions fugaces ( COVs enaire, aigua, residus i no capturats)
Aplicable a tots els sector	Aplicable a determinats sectors amb un valor llindar
Tall d'aplicació segons emissió màssica	Tall d'aplicació segons llindar de consum de dissolvents

Taula 8. Principals diferències entre la T.A.Luft i la Directiva 1999/13/CE

Per tant, l'empresa es regia per la normativa alemanya fins l'any 2000, on es fixava l'emissió de COV a 3 Kg/h d'emissió de compostos orgànics volàtils.



L'empresa avaluada té 32 focus d'emissió, però 2 dels focus, procedents del procés de lacat, no complien amb la normativa.

Tenint present el problema l'empresa es planteja tres alternatives:

- Instal·lació d'un tractament a final de procés
- Reducció en l'origen
- Deixar de lacar

L'empresa opta per la reducció en l'origen de COVs en tintes. Aquesta opció comporta dues actuacions:

#### **1) Reducció del contingut d'etanol en el vernís**

Es partia d'una tinta tipus formada per un 65% de vernís (contingut en etanol), 18,5% de dissolvent en base alcohòlica i una resta de pigments, resines i additius.

La principal idea era modificar la formulació de les tintes emprades. Després d'un any de proves es va aconseguir desenvolupar un vernís, base de les tintes, que reduïa el seu contingut d'etanol (COV) d'un 35% a un 3%, amb la consegüent reducció de les emissions de COV a l'atmosfera.

#### **2) Substitució del dissolvent per aigua destil·lada**

Gràcies a la reformulació del vernís contingut en les tintes, es pot substituir el dissolvent en base alcohòlica per una base d'aigua destil·lada.





Emissions de COVs amb i sense actuació per impressores o lacadores:

	COVs (Tn) sense actuació	COVs (Tn) amb actuació
Impressió	76,8	7,7
Lacat	8,3	9,8
<b>Total</b>	<b>85,1</b>	<b>17,5</b>

Taula 9. Emissions de COVs per impressió i lacat

Amb la implementació de l'alternativa l'empresa redueix la seva emissió de COVs en unes 100 tones anuals i té un estalvi d'uns 100.000 €/any.

Observant la normativa alemanya vigent abans del 2000 es demostra l'eficiència de la implementació de l'alternativa:

Límit de COVs segons T.A.Luft = 3 Kg/h (focus a focus)

Abans de l'alternativa = 2,26 Kg/h

Després de l'alternativa = 0,43 Kg/h

Per a la implementació d'aquesta actuació, l'empresa interessada no ha hagut de realitzar una inversió en maquinària específica i ha aconseguit reduir aproximadament en un 75% les emissions de COVs generats durant el procés d'impressió i lacat, amb el seu consegüent estalvi econòmic anual.

Tanmateix, s'ha proposat avaluar com li repercutiria realitzar tractaments de final de procés ("end of pipe") per controlar l'emissió dels 2 focus més contaminants i que analitzats individualment no compleixen amb la normativa vigent d'emissió de COVs.



Fig. 4. Procés d'impressió de l'empresa d'estudi



Fig. 5. Emissions derivades del procés d'impressió

### 3.4. Tècniques de tractament de COVs

Cal especificar que la recuperació dels contaminants depèn de l'aplicació d'etapes addicionals de separació. Moltes tècniques de depuració de l'aire, com són les recuperatives o les de disminució, també podrien requerir un tractament addicional.

#### 3.4.1. Tractaments recuperatius

Es coneix com a tractaments recuperatius aquells processos que tenen com a objectiu recuperar els dissolvents dels corrents residuals, separant-los d'altres substàncies i evitant així la seva emissió a l'atmosfera. És difícil però, que el dissolvent recuperat pugui ser emprat per a la seva aplicació inicial degut una pèrdua important de qualitat.

##### 3.4.1.1. Adsorció

El tractament d'adsorció és el procés pel qual les molècules de COV que es troben en el gas residual són transferides a la superfície sòlida del adsorbent, on queden retingudes.



A mesura que les molècules de contaminant circulen per l'adsorbent, disminueix la capacitat de retenció d'aquest fins a arribar al punt de ruptura, és a dir, la saturació del propi adsorbent. Així, el llit d'adsorbent té una capacitat de càrrega limitada de fixació del COV, i quan es supera aquesta capacitat, cal substituir l'adsorbent o procedir a un procés de regeneració del propi llit d'adsorbent.

El carbó actiu és l'adsorbent més comú per a la retenció de COVs tot i que es pot trobar altres adsorbents com la silicagel, zeolita, alumina o altres polímers.



*Fig.6. Sistema de tractament per carbó actiu*

Generalment, es treballa amb sistemes de llit fix amb carbó actiu. El procés consisteix en dues columnes en paral·lel on una d'elles opera adsorbint, mentre que l'altre columna opera desorbint.

La capacitat d'adsorció de la columna augmenta en baixar la temperatura, al contrari que la segona columna, que podrà duu a terme l'objectiu de desorció de contaminants, augmentant la temperatura o bé disminuint la pressió d'aquesta.



L'ús de columnes d'adsorció és molt indicada per a corrents residuals on la concentració de contaminants i la humitat és molt baixa i on l'adsorbat és fàcilment retingut per l'adsorbent.

Cal destacar que l'adsorció pot ser emprat com a tractament secundari a final de procés, per tal d'assegurar una alta qualitat de l'emissió de gasos a l'atmosfera. La retenció dels contaminants en l'adsorbent pot veure's afectada per factors tals com la temperatura, la pressió, la concentració, la humitat i la presència de partícules.

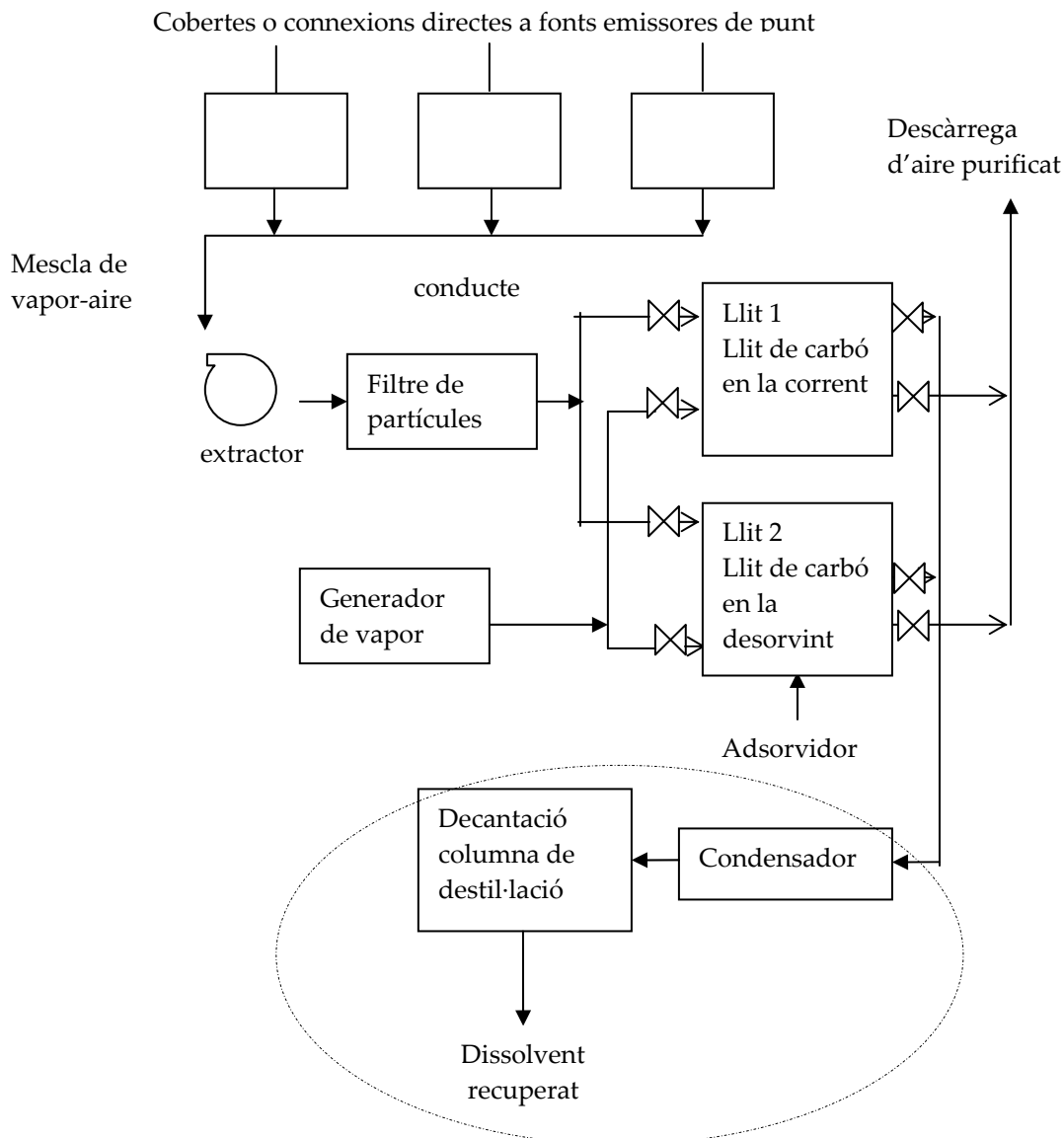


Fig.7. Sistema típic d'adsorbidor de carbó actiu de llit fix de dos llits, operant contínuament



### 3.4.1.2. Condensació

La recuperació de contaminants per mitjà de la condensació consisteix en el refredament del corrent de gas residual provocant la condensació d'aquest, sempre que s'arribi a una temperatura de condensació.

En general, la condensació està indicada per a dissolvents amb concentracions altes i punts d'ebullició alts, i sovint s'aplica aquest tractament com a fase prèvia a l'adsorció per eliminar selectivament aquells dissolvents amb punts d'ebullició més alts.

La viabilitat del tractament depèn de la temperatura de condensació de cada un dels dissolvents. En un principi, com més baix és el punt d'ebullició del dissolvent, més difícil és la seva recuperació.

La selecció del líquid de refrigeració es fa en funció de la volatilitat del dissolvent. A baixa volatilitat, s'utilitza aigua o sistemes d'aire com a refrigerant. Si el dissolvent requereix temperatures més baixes per a la seva condensació, es pot emprar aigua sotsrefredada o refrigerant com el glicol.

En el cas que el dissolvent sigui altament volàtil, pot obtenir-se la condensació a partir de dues fases: una primera fase de refredament amb aigua i una segona fase de refrigeració a baixa temperatura.

L'ús del tractament a dues fases minimitza els requeriments de refrigerant i condensa la major part de compostos amb punt de condensació relativament alts.

El canvi de fase a líquid s'aconsegueix incrementant la pressió o reduint la temperatura o bé per combinació de totes dues. Generalment es procedeix a la condensació del contaminant per mitjà de nitrogen líquid a  $-196^{\circ}\text{C}$  i 1 bar de pressió.



Cal tenir en compte, però, que el tractament de mescla de contaminants pot suposar problemes de congelació degut als diferents punts de congelació que poden presentar els diversos compostos.

Si es dóna el cas de congelació d'algun dels compostos sobre la superfície de l'absorbent es pot veure afectada la transferència i el bloqueig parcial dels tubs de pas del corrent de gas, provocant una disminució de la velocitat de condensació.

L'aplicació d'aquesta tècnica és interessant per tractar emissions de cabals baixos i altes concentracions de COVs en els quals la recuperació de contaminant sigui valoritzable, com és en el cas del sector de la indústria farmacèutica.

#### **3.4.1.3. Absorció**

L'absorció o *scrubbers* a contracorrent consisteix en introduir per la part inferior del sistema el gas residual a tractar i per la part superior la solució absorbent.

Per tal de millorar l'eficiència del procés s'introdueix un farciment sintètic per tal d'aconseguir una major àrea i temps de contacte.

Les solucions d'adsorbent utilitzades inclouen aigua, sosa càustica, amines i alguns hidrocarburs, tot i que l'elecció de l'absorbent depèn del tipus de contaminants present en el gas a tractar.

L'absorció està dissenyat per operar en un ampli rang d'eficiències d'entre el 70 i 98%, tot i que el factor més important que afecta l'eficiència del sistema és la solubilitat del contaminant en la solució absorbent, seguit per la temperatura i el pH.



### 3.4.2. Tractaments finalistes

No sempre la problemàtica ambiental derivada de l'ús de dissolvents orgànics pot solucionar-se per mitjà de tractaments que permetin la recuperació dels COVs i per la implementació de mesures preventives sinó que cal, en certs casos, la combinació amb tractaments finalistes que permetin l'adequació del corrent residual als requeriments del medi receptor.

#### 3.4.2.1. Tractaments tèrmics

La incineració és un procés pel qual el gas residual és capturat per un sistema industrial de ventilació, preescalfat, barrejat i oxidat a altes temperatures, donant com a resultat altres compostos.

En el cas dels hidrocarburs orgànics amb una composició única de carboni i oxigen, els compostos resultants són diòxid de carboni i aigua, tot i que la presència de clor, fluor o sofre en el corrent residual pot originar la formació d'àcids i fins i tot dioxines.

#### ■ Oxidació tèrmica

La incineració tèrmica és un procés de combustió de la barreja de contaminants amb aire o oxigen dins la cambra de combustió (recoberta en el seu interior per material refractari) mitjançant cremadors que escalfen el gas residual per damunt del seu punt d'ignició.



Aquesta temperatura es manté durant un determinat temps, amb la finalitat que es produeixi la combustió completa del gas. Els paràmetres que determinen l'eficiència i la velocitat del procés són el temps de residència, la temperatura, la turbulència i la disponibilitat d'oxigen.

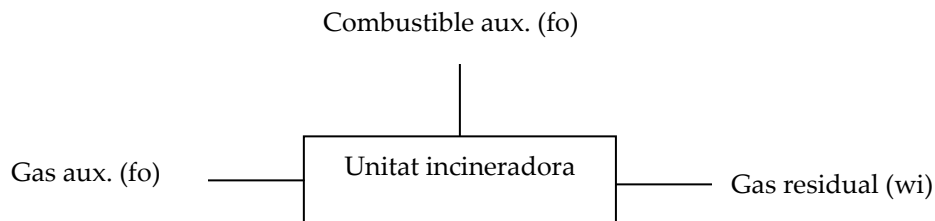


Fig. 8. Incinerador tèrmic no recuperatiu

El combustible emprat pot ser gas natural, propà o butà i el seu consum es pot veure reduït mitjançant la utilització de sistemes de recuperació d'energia.

La recuperació d'energia del procés es fa mitjançant intercanviadors de calor que aprofiten el calor dels gasos ja tractats a alta temperatura per escalfar els gasos d'entrada.

Els bescanviadors poden ser d'acer o de material ceràmic i, tot i que requereixen una inversió molt més elevada, permeten recuperacions de calor molt altes i, fins i tot, un funcionament autotèrmic, és a dir, sense consum energètic per part del sistema.

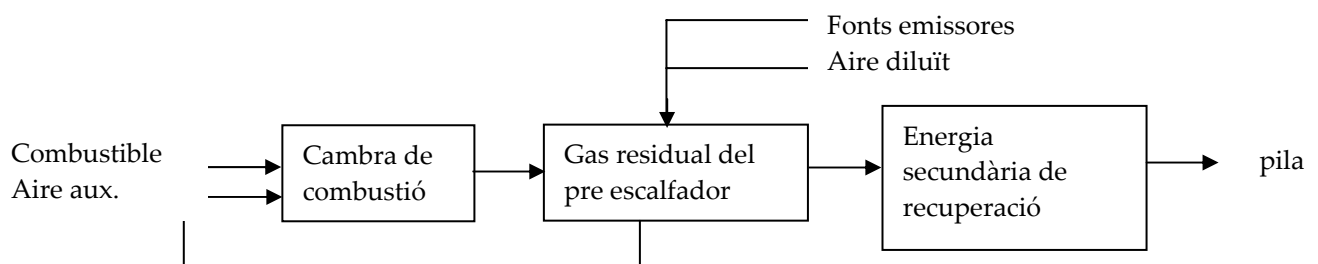


Fig. 9. Incinerador tèrmic recuperatiu





## ■ Oxidació catalítica

Els incineradors catalítics operen de manera similar als incineradors tèrmics, amb la principal diferència que el corrent de gas, després de travessar la flama, passa a través d'un llit de catalitzador.

El catalitzador té l'efecte d'incrementar la velocitat de reacció d'oxidació, donant lloc a temperatures inferiors per a l'oxidació. Per tant, els catalitzadors també permeten una mida menor de l'incinerador.

Cal tenir en compte que el catalitzador va perdent eficiència amb el temps i cal ser substituït cada certs temps (2-3 anys), la qual representa un cost de gestió del catalitzador esgotat.

En el procés, el corrent de gas es preescalfa en un bescanviador de calor que recupera el calor dels gasos de combustió, per després passar al forn. En el forn hi ha una entrada addicional de combustible.

Finalment, el corrent passa a través d'un llit amb material ceràmic amb el catalitzador on es finalitza i completa l'oxidació dels COVs.

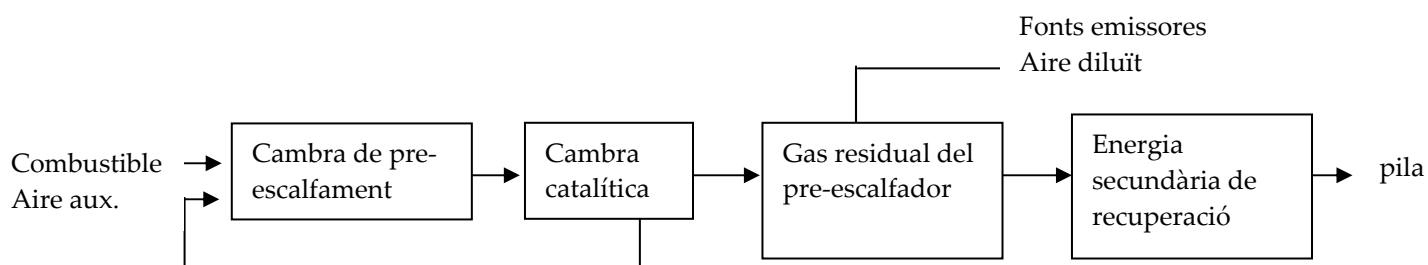


Fig 10. Incinerador catalític



### 3.4.2.2. Tractaments biològics

Tractaments basats en la destrucció de contaminants per l'acció biològica donant com a resultat compostos innocus.

#### ■ Biofiltració

El procés de depuració de gasos mitjançant biofiltració consta, generalment, d'un pretractament de rentat que filtra i condiciona l'aire a tractar per tal d'aconseguir la temperatura i la humitat òptima per a un tractament biològic posterior.

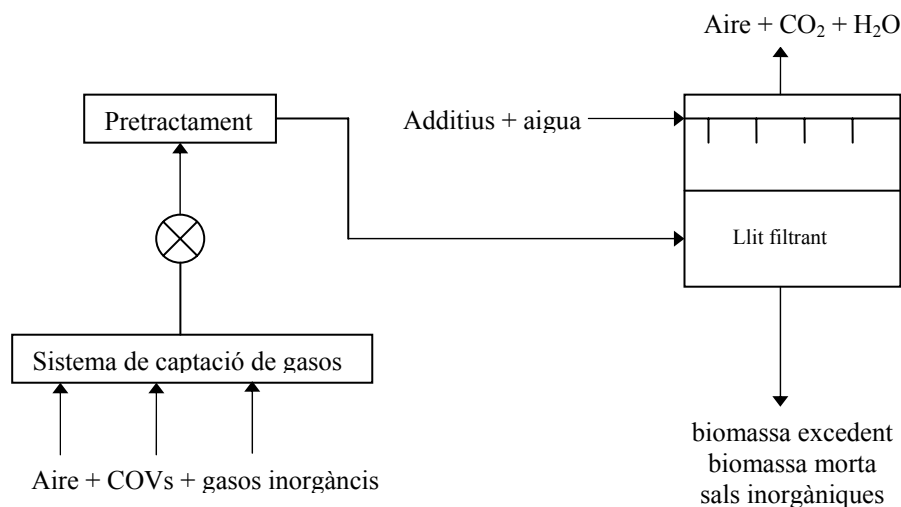


Fig. 11. Esquema del tractament de biofiltració

El biofiltre consisteix en una estructura de característiques poroses i inertes que serveixen de suport dels cultius bacterians que realitzen la depuració.



A mesura que el gas residual travessa el llit biològic, els contaminants i nutrients són assimilats pels microorganismes del biofiltre, d'on els microorganismes obtenen l'energia i el carboni necessari per a ells i transformen els COVs en compostos de menor pes molecular i produeixen diòxid de carboni i aigua com a producte final.

La oxidació incompleta dels contaminants per part dels microorganismes pot donar lloc a la generació de COVs intermedis o secundaris.

L'arribada de flux constant de COVs i nutrients provoca un creixement exponencial dels microorganismes presents en el filtre.

El control de l'addició de nutrients en el corrent permet un estat estacionari en el sistema, tot i que l'excés mínim de biomassa produïda és retirada periòdicament.

#### ■ Biosorció (*bioscrubbing*)

La biosorció o *bioscrubbing* és un procés que combina l'absorció i la biodegradació per el qual el corrent residual és absorbit per un rentatge amb aigua que conté microorganismes en suspensió que degraden els contaminants del corrent residual per mitjà de la oxidació biològica.

Els contaminants es degraden en un bioreactor de llots actius agitats i airejats. La torre d'absorció es dissenya per un temps de contacte de aproximadament un segon.

L'evaporació que es dona lloc en aquest tractament i juntament amb la mineralització i addició de nutrients i agents neutralitzadors en el corrent, dona lloc a un augment en el contingut de sals en l'aigua absorbent.



Aquest efecte pot inhibir el procés biològic però per tal d'evitar-ho cal: una purga adequada i addició d'aigua freda i operar amb aigua desmineralitzada.

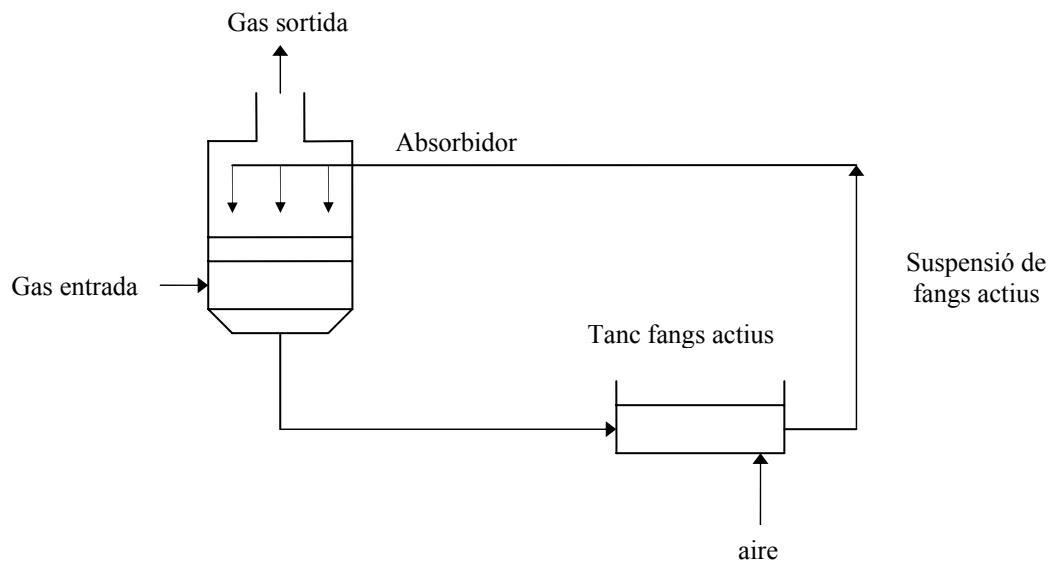


Fig. 12. Esquema del tractament de Biosorció

Cal destacar que les variacions de cabal i concentració en aquest tipus de procés pot ser un inconvenient per el sistema ja que pot tenir un impacte negatiu sobre el rendiment. L'excés de biomassa cal extreure'l ja que pot causar el bloqueig de l'aigua circulant.

La biosorció presenta com avantatge, davant els altres tractaments biològics, que pot destruir altes concentracions de contaminant degut a la elevada conversió microbiana.

#### ■ Biopercolació (*biotrickling*)

Les condicions emprades en aquest tipus de tractament són similars a les citades en la biosorció però en aquest cas, els microorganismes no es troben en suspensió aquosa sinó que es troben fixats a la superfície d'un reblliment (biofilm) que els serveix de suport dins el bioreactor percolador.

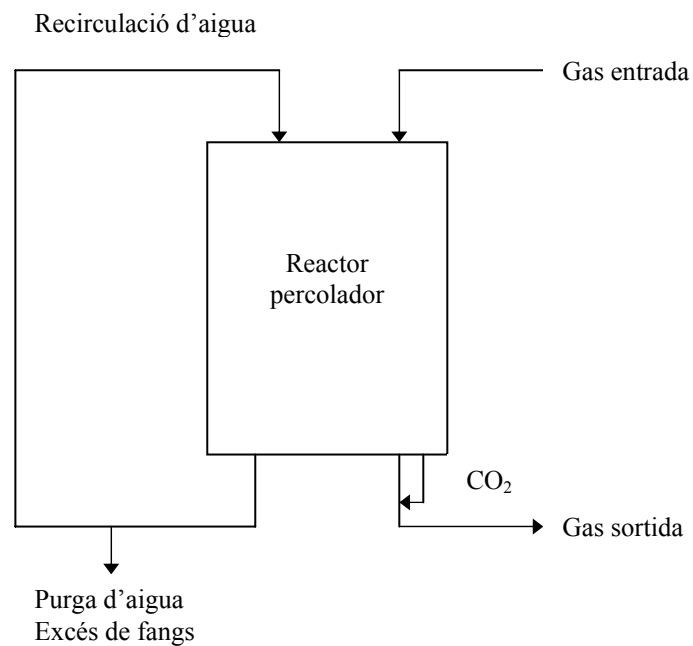


Fig. 13. Esquema del tractament de Biopercolació

En el procés, els contaminants són absorbits a la fase aquosa i transportats fins al biofilm on tindrà lloc l'oxidació biològica.

La qualitat de transferència de massa des del gas a la fase líquida i l'eficàcia del reactor depèn de la superfície mullada del rebliment. Per a obtenir resultats òptims, la fase líquida ha de estar distribuïda uniformement sobre tota la superfície del biofilm



Fig.14. Sistema de tractament per biotrickling



La formació de biolfilm és un procés que es controla de manera natural: la circulació permanent de la fase líquida té la funció de subministrar substàncies nutritives necessàries a la població microbiana. Al mateix temps, l'excés de fangs actius i els productes de la reacció que podrien inhibir el procés biològic es purguen del reactor.

A continuació es comparen les diferents tecnologies de tractament dels COVs segons el seu cabal, concentració volumètrica i eficiència:

Tecnologia	Recuperació contaminant	Cabal (Nm <sup>3</sup> /h) <sup>1</sup>	Concentració (ppm) <sup>2</sup>	Eficiència (%)
<b>Adsorció</b>	Possible	Alt	Mitjana – baixa	80 - 99
<b>Condensació</b>	Possible	Baix	Alta	50 – 95
<b>Absorció</b>	Possible	Baix – mitjà	Mitjana – alta	95 – 98
<b>Oxidació tèrmica recuperativa</b>	No	Baix	Alta – mitjana	> 95
<b>Oxidació tèrmica regenerativa</b>	No	Baix – mitjà	Baixa	> 95
<b>Oxidació catalítica recuperativa</b>	No	Baix	Mitjana – baixa	> 95
<b>Oxidació catalítica regenerativa</b>	No	Baix-mitjà	Baixa	> 95
<b>Biofiltració</b>	No	Qualsevol	Baixa	> 99

Taula 10. Comparació de les diferents tecnologies pel tractament dels COVs

<sup>1</sup> Cabals : alts > 200.000; mitjans 30.000-200.000; baixos <30.000

<sup>2</sup> Concentracions: alta > 10.000; mitjana 5.000-10.000; baixa 1.000-5000

Com s'observa en aquesta taula, exceptuant en alguns casos els tractaments d'adsorció i condensació, les eficiències de destrucció de COVs es troben al voltant del 95% d'eficiència del sistema. L'elecció dels tractaments vindrà, doncs, marcada principalment per les característiques que es tinguin del corrent residual d'estudi, és a dir, pel cabal i la concentració que tingui el corrent de l'empresa avaluada.



## 4. Estudi de cas

### 4.1. Àmbit d'estudi

L'empresa escollida utilitza diferents tipus de laques les quals contenen concentracions de diferents COVs. La problemàtica d'aquesta empresa és que disposa de 32 focus d'emissió de contaminants però només 2 focus, provinent de les lacadores, emeten una càrrega de massa del COV de 462,5 mg/m<sup>3</sup>, superior a l'establerta pel Reial Decret 117/2003.

Del total de COVs esmentats a la taula 11, l'estudi únicament s'ha centrat en l'Isopropanol (IPA), el Butildiglicol (BDG), el Dietilenglicol (DG) i el Trietanol (Triet), ja que són els compostos que sobrepassen els llindars establerts per la normativa vigent.

COVs continguts a les laques	
ETOH	Etanol
IPA	Isopropanol
AC BUT	Acetat de Butil
BG	Butilglicol
BDG	Butildiglicol
DG	Dietilenglicol
PG	Propilenglicol
PEG 400	Polietilenglicol
PM	Metoxipropanol
PC	Carbonat de Propilè
MFN	Morfolina
Triet (85%)	Trietanolamina (85%)

Taula 11. Resum del total de COVs continguts a les laques



■ **Butildiglicol (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>O<sub>3</sub>):**

Nº de cas (de les fitxes internacionals de seguretat): 112-34-5

També anomenat Eter monobutílic del dietilen glicol (o bé del diglicol) o 2-(2-butoxi)etanol.

Efectes:

Ingestió: atordiment, diarrea, vertigen, somnolència, nàusees, pèrdua del coneixement, vòmits.

Efectes d'exposició de curta durada: la substància irrita els ulls, la pell i el tracte respiratori.

La substància pot tenir efectes sobre el SNC, fetge i ronyons. L'exposició pot produir la mort. Els efectes poden aparèixer de forma no immediata.

■ **Dietilenglicol (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>):**

Nº de cas (de les fitxes internacionals de seguretat): 111-46-6

També anomenat Diglicol, 2.2'oxidietanol o bé eter 2.2'dihidroxidietílic

Efectes:

Ingestió: cefalea, pèrdua del coneixement, vòmits

Les dades disponibles dels efectes d'aquesta substància sobre la salut humana són insuficients.

El dietilenglicol és un subproductes de l'òxid d'etilè (EO), i aquests són tòxics i cancerígens per a les persones. Els etilenglicols es produeixen fent reaccionar l'EO amb aigua a una temperatura elevada (aprox. 250°C)





■ **Isopropanol (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O):**

Nº de cas (de les fitxes internacionals de seguretat): 67-63-0

També anomenat Propan-2-ol, 2-propanol o bé alcohol isopropílic.

Efectes:

Té fases de risc i és inflamable. S'aconsella firmament impedir que el producte penetri al medi.

No destrueix la capa d'ozó, és barat, soluble en aigua i s'evapora fàcilment.

Inhalació: faringitis, tos, cefalea, nàusees

Ulls: visió borrosa

Ingestió: vòmits, vertigen, somnolència

Efectes d'exposició de curta durada: substància irrita els ulls, la pell i les mucoses.

Pot tenir efectes sobre el SNC donant lloc a depressions. Els efectes poden aparèixer de forma no immediata.

El contacte prolongat amb la pell pot produir dermatitis.

■ **Trietanolamina (C<sub>6</sub>H<sub>15</sub>NO<sub>3</sub>):**

Nº de cas (de les fitxes internacionals de seguretat): 102-71-6

També anomenat 2,2'2''-Nitrilo-3-trietanol

Efectes :

La substància es pot absorbir per inhalació de l'aerosol i irrita els ulls, la pell i el tracte respiratori.

Es descompon al cremar, produint núvols tòxics i corrosius, incloent òxids de nitrogen, els quals també estan involucrats en la formació d'*smog* fotoquímic.



Per a l'estudi de riscos provocats pels compostos orgànics volàtils amb els quals es treballa, s'han tingut en compte les fitxes internacionals de seguretat química.

Com es pot observar, tots els compostos escollits per a l'estudi són alcohols superiors, és a dir, formats per una cadena llarga d'hidrocarburs.

Aquests compostos, s'empren com a diluents i poden millorar la capacitat dissolvent si es combinen amb els ésters acetats corresponents.

Són convenients pel recobriment d'imprimació, degut a que proporcionen una bona adhesió a la pintura de plàstics i una bona qualitat d'impressió en paper.

Com ja s'ha exposat anteriorment, es seguirà el procediment de càlcul del manual de costos de la EPA per obtenir l'avaluació econòmica d'alguns dels tractaments pels COVs de l'estudi en qüestió.



## 4.2. Propietats i característiques dels COVs del corrent residual

En la taula 12 es pot observar el consum dels dissolvents (en quantitat i en percentatge) emesos per l'empresa:

	Bdg	Dg	Ipa	Triet	Total
<b>Dissolvents (Kg)</b>	179,3	66,9	621	31	898,2
	20,2	8,5			28,7
	63	26,8			89,8
	1,1	0,4			1,5
	82,4	32,8			115,2
	372,6	600,3			972,9
<b>Total (Kg)</b>	<b>718,6</b>	<b>735,7</b>	<b>621</b>	<b>31</b>	<b>2106,3</b>
<b>Percentatge (%)</b>	<b>34,1</b>	<b>34,9</b>	<b>29,5</b>	<b>1,5</b>	<b>100</b>

Taula 12. Consum de dissolvents emesos per l'empresa

Les característiques del corrent inicial obtingut a partir de les dades proporcionades per l'empresa són:

- Cabal volumètric (Q) = 7008 m<sup>3</sup>/h
- Càrrega de massa del COV d'entrada (q) = 3800 Kg COV/any
- Concentració mitja dels COVs = 462,5 mg/m<sup>3</sup>

Amb aquestes dades es calculen les hores anuals de funcionament de les lacadores útils per l'estudi com:

$$\frac{3800 \text{ Kg COV}}{\text{any}} = \frac{7008 \text{ m}^3}{\text{hora}} \cdot \frac{x \text{ hores}}{\text{any}} \cdot \frac{462,5 \text{ mg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ Kg}}{10^6 \text{ mg}}$$



$$x = \frac{3800 \cdot 10^6}{7800 (462,5)} = 1172 \text{ hores/any}$$

Sabent el temps de funcionament de cada màquina, i a partir de les dades de la taula, es pot calcular la concentració en volum de cada COV:

■ **Butildiglicol**

$$\left[ \frac{718,6 \text{ Kg Bdg}}{\text{any}} \cdot \frac{(7008)1172 \text{ hores}}{\text{any}} \right] \cdot 10^6 = \frac{87,49 \text{ mg}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{87,49 \text{ mg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mg}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{162,3 \text{ gr}} \cdot \frac{1000 \text{ mmols}}{1 \text{ mol}} \cdot \frac{22,4 \text{ ml}}{1 \text{ mmol}} = 12,07 \text{ ppmv Bdg}$$

■ **Dietilenglicol**

$$\left[ \frac{735,7 \text{ Kg Dg}}{\text{any}} \cdot \frac{(7008)1172 \text{ hores}}{\text{any}} \right] \cdot 10^6 = \frac{89,57 \text{ mg}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{89,57 \text{ mg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mg}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{106,1 \text{ gr}} \cdot \frac{1000 \text{ mmols}}{1 \text{ mol}} \cdot \frac{22,4 \text{ ml}}{1 \text{ mmol}} = 18,91 \text{ ppmv Dg}$$

■ **Isopropanol**

$$\left[ \frac{621 \text{ Kg Ipa}}{\text{any}} \cdot \frac{(7008)1172 \text{ hores}}{\text{any}} \right] \cdot 10^6 = \frac{75,6 \text{ mg}}{\text{m}^3}$$



$$\frac{75,6 \text{ mg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mg}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{60,1 \text{ gr}} \cdot \frac{1000 \text{ mmols}}{1 \text{ mol}} \cdot \frac{22,4 \text{ ml}}{1 \text{ mmol}} = 28,17 \text{ ppmv Ipa}$$

■ **Trietanol**

$$\left[ \frac{31 \text{ Kg Bdg}}{\text{any}} \cdot \frac{(7008)1172 \text{ hores}}{\text{any}} \right] \cdot 10^6 = \frac{3,774 \text{ mg}}{\text{m}^3}$$

$$\frac{3,774 \text{ mg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1 \text{ gr}}{1000 \text{ mg}} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{149,2 \text{ gr}} \cdot \frac{1000 \text{ mmols}}{1 \text{ mol}} \cdot \frac{22,4 \text{ ml}}{1 \text{ mmol}} = 0,56 \text{ ppmv Triet}$$

El volum del corrent inicial, així com els paràmetres principals dels compostos orgànics volàtils, necessaris per a la realització dels càlculs del disseny d'operació són els següents:

COV	Corrent inicial (Xi) en ppmv	LEL min en ppmv	Calor de combustió $\Delta h_{c_{w0}}$ en Btu/min
<b>Butildiglicol<sup>2</sup></b>	12,07	-	-
<b>Dietilenglicol</b>	18,91	10.000	53,2
<b>Isopropanol</b>	28,17	20.000	36,95
<b>Trietanol</b>	0,56	36.000	74,1

Taula 13. Paràmetres del corrent residual a tractar

<sup>2</sup> D'aquest component no s'han pogut obtenir les dades que manquen a la taula.





## 5. Metodologia

Per avaluar la viabilitat ambiental i econòmica de les tres alternatives de tractament d'eliminació de COVs, el *Draft Reference Document on Economics and Cross-Media Effects* proposa una metodologia per dur a terme l'objectiu esmentat. La metodologia s'esquematitza de la següent manera:

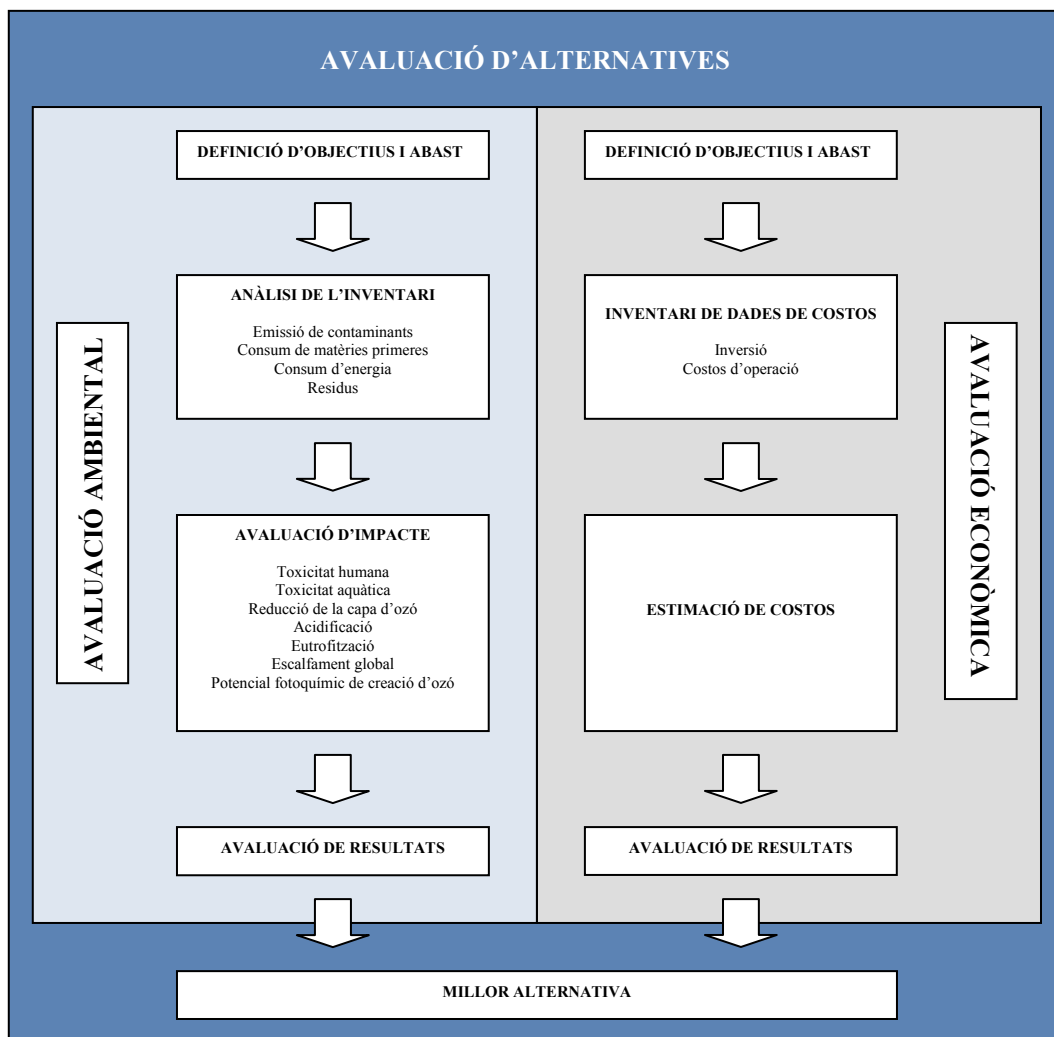


Fig. 15. Esquema de la metodologia per a l'avaluació ambiental i econòmica



## 5.1. Metodologia de l'avaluació econòmica

Es determina l'avaluació econòmica per mitjà de quatre fases diferents: definició dels objectius i abast, inventari de dades dels costos, estimació dels costos i avaluació dels resultats.

### 5.1.1. Definició dels objectius i abast

L'estimació econòmica comparativa per a les diferents alternatives d'estudi té el mateix abast que l'indicat en la fase d'avaluació ambiental (definició dels objectius i abast de l'estudi) i, per tant, la part econòmica comporta considerar a part dels costos de les diferents alternatives els costos associats durant el cicle de vida.

### 5.1.2. Inventari de les dades de costos

La informació relativa als consums d'energia, així com els propis sistemes de tractament de gasos seran la base per poder dur a terme l'estimació de costos, tant els costos d'inversió com els costos d'operació del procés.

Tal com recull el document *Integrated Pollution Prevention and Control Draft Reference Document on Economics and Cross-Media Effects*, les dades necessàries per a l'estimació econòmica s'obtenen per mitjà de diferents vies:

- Dades reals proporcionades per l'empresa
- Proveïdors de tecnologia
- Projectes
- Informació pública (informes tècnics, revistes, pàgines web, etc.)





A l'inventari de dades és interessant que el recull sigui a partir de diferents fonts, per tal de poder-les contrastar entre elles.

### **5.1.3. Estimació de costos**

Un cop es disposa de les dades necessàries es procedeix a l'estimació de costos (costos d'inversió i d'operació) de les tres alternatives en estudi.

L'estimació de costos es duu a terme seguint el document *Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire de la EPA* que proporciona tota una metodologia de càlcul per a avaluar econòmicament les tres alternatives.

### **5.1.4. Avaluació dels resultats econòmics**

Un cop vistos els costos totals, tant d'inversió inicial com els costos anuals de les diferents alternatives, es podrà procedir a l'elecció de la millor alternativa considerant els aspectes econòmics i ambientals de manera conjunta.

## **5.2. Metodologia de l'avaluació ambiental**

En l'anàlisi d'alternatives pel que fa a la part ambiental es consideren quatre fases principals: definició dels objectius i abast, anàlisi de l'inventari, avaluació d'impacte i avaluació de resultats.

### **5.2.1. Definició dels objectius i abast**

És el pas inicial per a identificar les diferents alternatives que seran considerades en l'avaluació ambiental.



El principal objectiu de l'avaluació ambiental és comparar les càrregues ambientals que suposen els diferents tractaments de COV: adsorció per carbó actiu, oxidació tèrmica i oxidació catalítica.

Es té en compte la contribució per part dels consums energètics i l'ús de matèries primeres a les càrregues ambientals detallades en l'avaluació d'impacte.

### 5.2.2. Anàlisi de l'inventari

S'han de llistar i quantificar totes les càrregues ambientals i els recursos consumits per cada una de les tècniques portades a estudi.

L'inventari ha de incloure els contaminants alliberats en el procés, les matèries primeres consumides, l'energia utilitzada i els residus produïts.

Algunes de les fonts d'informació útils que proporcionen dades de les càrregues i els recursos consumits inclouen:

- Control de la informació en instal·lacions existents o investigació en configuracions similars
- Estudis de plantes pilot amb dades calculades
- Càlculs de dades, càlculs estequiòmètrics o eficiències teòriques
- Processos d'intercanvi d'informació
- Informació de venedors d'equips i fabricants



### 5.2.3. Avaluació d'impacte

Per avaluar els efectes ambientals de cada una de les tècniques alternatives que es prenen en consideració, la metodologia permet que els diferents contaminants identificats en l'inventari puguin ser inclosos en set temàtiques diferents:

- Toxicitat humana
- Toxicitat aquàtica
- Reducció de la capa d'ozó
- Acidificació
- Eutrofització
- Escalfament global
- Potencial fotoquímic de creació d'ozó

El cas d'estudi es centra en una única temàtica: veure la repercussió per part dels diferents consums energètics i el material emprat en els processos sobre l'escalfament global.

L'estudi pren en consideració el consum d'energia elèctrica, de gas natural, i l'ús de materials en els diferents processos avaluats.

La quantitat creixent dels anomenats gasos hivernacles tenen l'efecte de capturar més energia solar en l'atmosfera. Aquest efecte és anomenat escalfament global o efecte hivernacle.

Les prediccions dels efectes de l'escalfament global inclouen un augment en les temperatures globals del planeta, canvis creixents en el clima que poden tenir implicacions en les pluviometries, la disponibilitat d'aigua dolça, el canvi de pràctiques agrícoles, oscil·lacions en el nivell de l'aigua del mar, etc.



L'indicador emprat per donar a conèixer l'impacte per part de les emissions és l'anomenat *Global Warming Potencial* (GWP) que va ser creat per *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

El GWP d'una substància és la contribució global relativa a l'escalfament per l'emissió d'un Kg de gas hivernacle particular comparat amb l'emissió d'un Kg de CO<sub>2</sub>, expressat com a Kg de CO<sub>2</sub> equivalents.

El conjunt d'aquesta part de la metodologia permet la comparació dels efectes de l'escalfament global de les diferents alternatives sota consideració.

#### **5.2.4. Avaluació dels resultats ambientals**

Un cop identificades les emissions de CO<sub>2</sub> equivalent per als diferents consums energètics i matèries primeres de cada tractament, es pot identificar quin dels processos és el que té unes cargues ambientals menors.

Tot i haver trobat el procés ambientalment més viable, caldrà considerar l'avaluació econòmica per dur a terme l'elecció de la millor tècnica tant ambiental com econòmica.



## 6. Elecció dels tractaments

La selecció de la tècnica de tractament més apropiada per condicionar els gasos d'emissió a una qualitat convenient depèn de diversos factors, entre els quals es troben:

- El cabal de fase gas a tractar, la concentració de dissolvent present en el gas, el fet que el dissolvent sigui únic o es tracti d'una combinació de dissolvents, i la presència d'aigua i/o de sòlids arrossegats pel gas. No només depèn dels valors mitjans dels cabals i les concentracions, sinó també del rang de valors entre els quals fluctuen aquests factors.
- La pressió de vapor a diferents temperatures, els punts de fusió i ebullició, el punt d'inflamabilitat, les solubilitats en aigua i les solubilitats mútues de les substàncies presents, l'adsorbatat en sòlids, etc.
- El cost dels dissolvents, la disponibilitat i el cost dels serveis auxiliars, els requeriments de depuració, les instal·lacions disponibles, etc.

Un cop s'han definit les diferents tipologies de tractament, tant de recuperació com finalistes existents pels compostos orgànics volàtils en un corrent gasós, cal observar la relació de concentració de dissolvent en funció del cabal d'entrada per escollir les alternatives que, per les característiques del disseny de l'equip, seran més interessants per l'estudi.

Com s'ha esmentat anteriorment, el cabal i la concentració del corrent residual permetran la tria de diferents tractaments a avaluar.



Observant la taula 1 de l'annex s'obté el valor del cabal total emès per l'empresa objecte de l'estudi. El valor és de 4124 ft<sup>3</sup>/min, o sigui, de 7008 m<sup>3</sup>/h i el rang de concentracions volumètriques de corrent inicial va de 0,56 (en el cas del trietanol) fins a 28,17ppmv (en l'isopropanol).

Els gràfics següents permeten elaborar una primera tria dels tractaments més adequats per a la reducció/eliminació dels compostos orgànics volàtils:

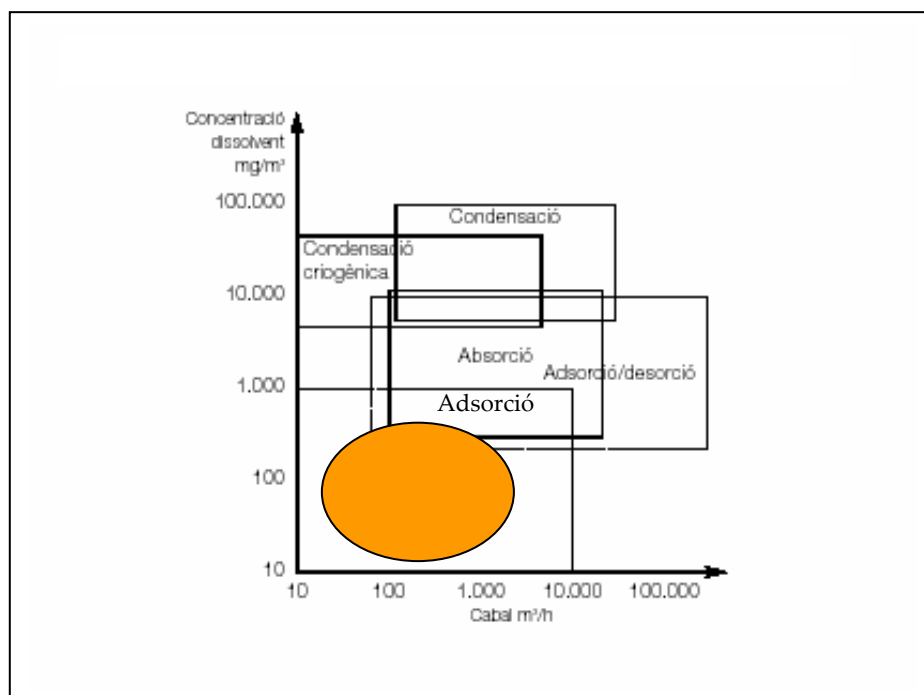


Fig. 16. Zones d'aplicació de les tècniques de recuperació

Font: Manuals d'Ecogestió, núm 22. Rigola i Lapeña, Miquel "Prevenició de la contaminació en l'ús dels dissolvents"

En la Fig. 16 s'observen les tècniques de recuperació més utilitzades pel tractament de COVs. La part encerclada amb color correspon a la zona d'estudi on les característiques són idònies pel disseny del sistema.



La recuperació de dissolvents per adsorció és una tècnica d'ús generalitzat, molt indicada quan la concentració de gas en el corrent és molt petita, el nivell d'humitat també és molt petit, i el dissolvent és fàcilment adsorbit pel carbó actiu o un altre adsorbent del qual es pugui recuperar.

A més de depurar el gas i permetre la recuperació del dissolvent, com que l'adsorció permet arribar a nivells de depuració molt alts, també s'aplica com a mètode de salvaguarda al final de qualsevol tractament per assegurar la qualitat final de l'emissió de corrents gasosos a l'atmosfera.

Per aquest motiu, s'ha escollit únicament el tractament d'adsorció com a tècnica de recuperació degut a les seves característiques de concentració i cabal adequades a l'estudi.

Els tractaments d'adsorció no regenerativa, crioc condensació i condensació no s'han trobat adequats pel disseny, ja que no entren dins el rang (cercle de color) establert pel cabal i la concentració de COVs de l'estudi. La biofiltració i l'*scrubbing* tampoc són adequats ja que els tractaments biològics han de portar-se a terme amb dissolvents fàcilment biodegradables i aquesta característica no la compleixen tots els COVs de l'estudi.

En els processos d'aplicació dels dissolvents s'originen uns corrents residuals que de vegades són massa complexos per poder-los sotmetre a processos de recuperació i/o reciclatge.

Els mateixos processos de recuperació i reciclatge també originen uns corrents residuals que ja no es poden reutilitzar i als quals cal trobar un destí apropiat.



S'ha tenir en compte que qualsevol romanent de COV que no hagi estat destruït pot significar una volatilització diferida. Si els corrents residuals són de base aquosa amb algun contingut de dissolvents orgànics, quan se sotmetin als tractaments adequats, fisicoquímics i biològics, les restes de dissolvents poden ser degradats. No obstant això, en segons quines condicions, els COV poden ser emesos parcialment a l'atmosfera.

També poden passar a l'atmosfera per volatilització aquells dissolvents volàtils associats a residus sòlids que no estiguin especialment retinguts.

Si es tracta de residus bàsicament orgànics, d'alt poder calorífic, el més indicat pot ser la valorització energètica.

Per tots els motius esmentats anteriorment s'ha escollit l'adsorció (tractament recuperatiu) i la incineració (tractament finalista) per realitzar una avaluació econòmica i una avaluació ambiental, i decidir quina és la millor alternativa pel cas estudiat.

## **6.1. Tractament d'adsorció**

### *6.1.1. Principi de funcionament*

Els sistemes d'adsorció no constitueixen pròpiament un sistema de depuració, ja que el que realment es produeix és la separació i transferència dels contaminants d'un medi a un altre. La contaminació, en aquest cas, passa d'un medi gasós a un medi sòlid.

El procés d'adsorció consisteix en l'adhesió, mitjançant enllaços físicoquímics (del tipus de forces de Van der Waal's, interaccions dipol-dipol, etc.), de les molècules dels COV que es trobin en un medi fluid sobre la superfície d'un material (generalment un sòlid porós de gran àrea específica) denominat adsorbent.





Aquests enllaços febles fan que la molècula pugui ser desordida de forma relativament fàcil, ja sigui per calor o fent el buit, que s'aconsegueixen per mitjà d'oscil·lacions de pressió i temperatura.

Es diferencia de l'absorció, ja que aquesta última absorbeix el gas, de forma química (enllaços molt més forts) en una superfície líquida. Per tant, és el medi on es produeix la barreja i/o unió de les molècules el que varia d'un sistema a l'altre.

Els adsorbents més utilitzats habitualment són les diferents classes de carbó actiu, les zeolites, l'alúmina, etc<sup>3</sup>.

- Carbó actiu: el carbó s'activa per mitjà d'una piròlisis del carbó mineral, fusta, escorça d'arbre... per eliminar tot el material volàtil en forma de gas i deixar únicament el carbó mineral. També es pot oxidar per engrandir els seus porus. No és altament selectiu als COV que van a adsorbir.
- Zeolita: Té estructura cristal·lina d'aluminosilicat i posseeix porus de mida uniforme a través de tota la seva estructura. Es poden trobar 118 tipus de zeolites que es diferencien per la relació silici-alumini en el cristall, quan aquest es forma. La majoria dels COVs són hidrofòbics (no polars) i per tant la zeolita s'ha de desaluminitzar intercanviant tot l'alumini per silici, sense canviar l'estructura del cristall
- Polímers adsorbents: posseeixen porus formats durant la seva fabricació. Aquests tenen una mida molt variable, però els porus més petits són, de forma general, superiors que els microporus del carbó actiu. Els polímers són plàstics i s'utilitzen com grànuls o perles. S'ha observat que desorbeixen més ràpid que el carbó. No són altament selectius al COV que van a adsorbir.

---

<sup>3</sup> *Technical Bulletin* : "Choosing an adsorption system for VOC: Carbon, Zeolite, or Polymers?" EPA 456/F-99-004, Maig 1999



La selecció del millor adsorbent no és senzilla. El carbó actiu és l'adsorbent més conegut i per tant el més utilitzat per tots els fabricants, tot i que els nous adsorbents sorgits en l'actualitat també tenen característiques molt positives.

En el cas d'estudi, s'ha escollit el carbó actiu com a adsorbent del corrent de COVs, ja que els procediments en què cal basar-se per a l'estimació de costos dels altres sistemes d'adsorció encara no han estat desenvolupats per la EPA.

També cal especificar que per determinar el bon funcionament de l'adsorbent seleccionat caldria sotmetre'l a una prova amb la mescla de contaminants que es pretén adsorbir i a les concentracions que s'espera tenir, amb una mescla de vapors de COV.

En el present estudi no s'han disposat dels mitjans necessaris per poder efectuar aquesta prova i s'ha donat per vàlida l'opció escollida.

Cal assenyalar que, si no es preveu una estratègia de regeneració de l'adsorbent deguda a la sobrecàrrega d'aquest, tan sols es pot considerar aquesta tècnica per tractar emissions de petits cabals, o quan la concentració de contaminants sigui baixa.

### *6.1.2. Adsorció en carbó actiu*

El carbó elemental és una substància inert i insoluble en aigua que existeix en dues formes cristal·lines diferents: diamant i grafit. Una altra manera poc cristal·litzada de trobar-lo és en forma de carbó vegetal. Químicament, es pot sintetitzar per descomposició tèrmica de la sacarosa (sucre) en absència d'aire. Les propietats físiques i químiques del carbó, depenen de l'estructura cristal·lina de l'element.



El carbó actiu és únic per les seves característiques químiques ja que és un sòlid produït específicament per aconseguir la màxima superfície interna (entre 500-1500 m<sup>2</sup>/g).

Es coneixen dues variacions del carbó actiu: carbó actiu en pols (PAC), i carbó actiu granular (CAG). El GAC és la versió més utilitzada en els tractaments de gasos, ja que a part d'adsorbir molta varietat de substàncies, compostos i olors, pot tractar hidrocarburs amb varis grups alcohols. Les característiques bàsiques del carbó actiu són:

- Elevada retenció d'aigua
- Elevat temps de residència
- Requereix recanvis granulars (degradació mitjana)

### *6.1.3. Isotherma d'adsorció*

El nivell d'activitat de l'adsorció depèn de la concentració de la substància en l'aigua, de la temperatura i de la polaritat. Una substància polar (soluble en H<sub>2</sub>O) no s'atrapa bé en un sistema d'adsorció; en canvi una substància no polar és totalment adsorbida.

Les molècules de la fase gas, queden atrapades de forma física en la superfície del carbó actiu durant un procés constituït en 3 passos:

1. Macro transport: El moviment de material orgànic cap al sistema dels macro-porus del carbó ( macro-porus > 5nm)
2. Micro transport: El moviment de material orgànic cap al sistema de meso-porus i micro-porus del carbó (meso-poru 2-5 nm; micro-porus < 2 nm)
3. Sorció: L'atrapament físic del material orgànic a la superfície del carbó actiu, concretament en els meso/micro-porus.



Cada adsorbent té una capacitat d'adsorció coneguda com la "isoterma d'adsorció en fase vapor" usada per determinar la capacitat d'adsorció del carbó actiu en un rang de diferents concentracions. La capacitat d'adsorció del sòlid (carbó actiu) tendeix a incrementar-se amb:

- Concentració de la fase gas
- Pes molecular
- Difusivitat
- Polaritat
- Punt d'ebullició

Per aquest motiu, la isoterma d'adsorció és diferent per cada tipus d'adsorbent i per cada tipus de contaminant.

En condicions estàndards de temperatura, humitat relativa i pressió ambiental, la capacitat d'adsorció del carbó actiu s'incrementa de la mateixa manera que augmenta la concentració, fins que arriba a un màxim de saturació.

Es pot definir la isoterma d'adsorció segons la funció de Freundlich:

$$\frac{X}{m} = K_f C_e^{1/n}$$

On  $X/m$  és la capacitat d'equilibri ( $W_e$ ), o sigui, és la quantitat màxima d'adsorbat que el carbó pot retenir a una temperatura i pressió parcial de COV donades.  $C_e$  és la diferència de les concentracions i  $K_f$  i  $n$  són constants específiques.

La isoterma de Freundlich és una funció exponencial que es traça com una línia recta en un paper logarítmic, per concentracions poc elevades de COVs.



La figura 17 representa el procés que segueix un contaminant (gas) que es tracta amb una columna de carbó actiu. S'observa com en el punt 3, la columna comença el punt de ruptura i en el punt 4, ja no pot purificar més el gas. La columna està saturada.

Un cop s'arriba en aquest valor preestablert (concentració de saturació) es para l'adsorbidor per a executar un procés de desorció, o per reemplaçar-lo. Serà entre els punts 3 i 4 que es necessitarà regenerar la columna.

Un cop s'atura el procés, la concentració promig de COV en el llit pot ser solament el 50% o menys de la concentració d'equilibri. Això significa que el llit de carbó pot estar en equilibri saturat a l'entrada de gas, però contenir solament una petita quantitat de COV prop de la sortida.

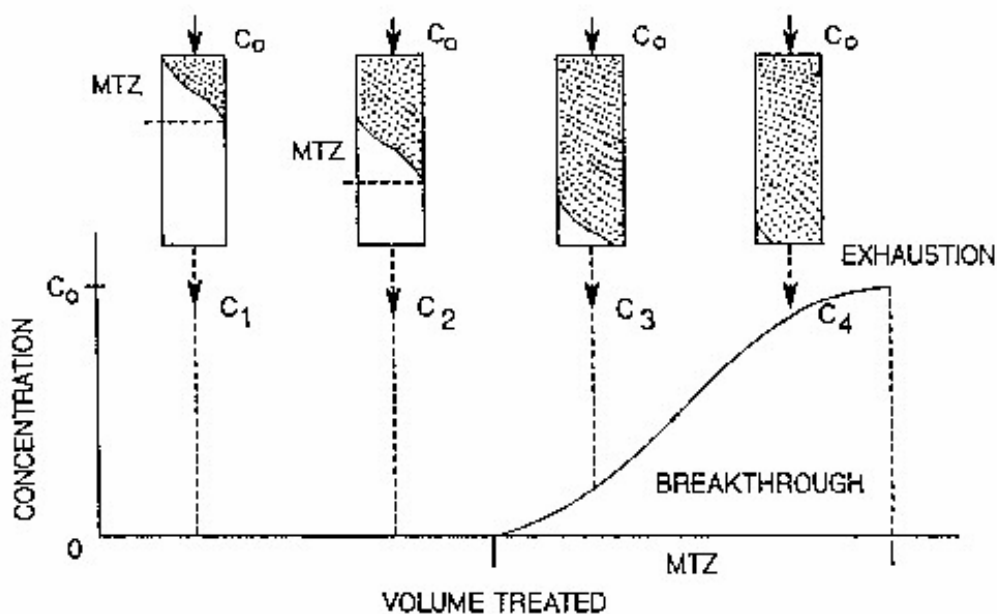


Fig. 17. Capacitat d'adsorció d'una columna de carbó actiu



#### *6.1.4. Aplicacions*

S'utilitza en tractaments de gasos amb una baixa concentració de COV i amb fluxos d'aire relativament elevats, especialment en punts on es requereix una instal·lació de baix manteniment, com és el cas de les emissions de les estacions depuradores, els pous de bombeig i, també, les fàbriques d'aromes, en la indústria alimentària, en la indústria química, etc.

Només s'instal·la per tractar emissions d'alta càrrega quan aquesta té una freqüència molt baixa o quan un sistema de regeneració in situ (amb vapor o nitrogen) sigui viable tècnicament i econòmicament.

Típicament, el control de les emissions de COV en adsorció redueix les concentracions des d'un rang entre 400 i 2000 ppmv fins a menys de 20 ppmv (fins a una quarta part del límit inferior d'explosivitat) A part del control d'emissió, un sistema d'adsorció fa possible la recuperació del COV de forma reutilitzable o comercial i en pot controlar el seu cost.

#### *6.1.5. Comentaris sobre la tecnologia*

Com s'ha assenyalat anteriorment, el llit adsorbent té una capacitat de càrrega limitada de fixació dels COV i, quan se supera aquesta capacitat, s'ha de substituir l'adsorbent o procedir a regenerar-lo, tot alterant les condicions d'equilibri corresponents (mitjançant, per exemple, tractament amb vapor d'aigua, tractament tèrmic, etc.).

Per aquest motiu, es diu que un sistema d'adsorció haurà d'anar sempre acompanyat d'un sistema de tractament final, ja sigui per reciclatge o per destrucció.



Els vapors de COV desorbitats es troben en una concentració superior i, per tant, el COV pot ser recuperat o destruït. Per aquest motiu, la funció dels sistemes d'adsorció és bàsicament la captura del COV a partir d'una concentració diluïda i la seva alliberació a una concentració més alta.

### 6.1.6. Regeneració dels sistemes d'adsorció

Existeixen tres sistemes de regeneració dels sistemes d'adsorció:

#### 1. Regeneració per oscil·lació tèrmica:

Es tracta del sistema tradicional d'adsorció amb carbó que utilitza vapor per elevar la temperatura del COV adsorbit i evaporar-lo del carbó després de què aquest hagi adsorbit el COV.

Com es pot observar en l'esquema, el vapor en l'aire és transportat cap a una unitat adsorbent mentre l'altra és regenerada.

La regeneració tèrmica esdevé més útil per COVs amb pressions de vapor més baixes.

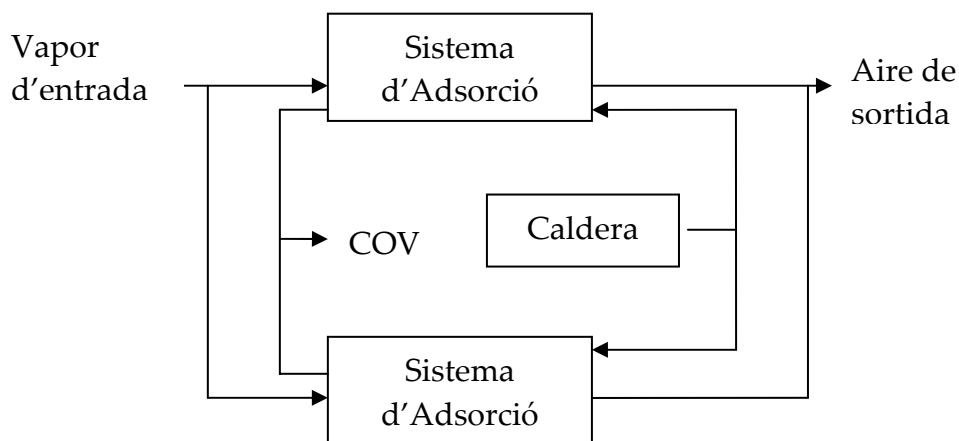


Fig. 18. Sistema d'adsorció per oscil·lació tèrmica (regeneració al vapor)



## 2. Regeneració al buit:

S'utilitza per augmentar la recuperació de dissolvent i eliminar la contaminació del COV. Aquest mètode pot ser utilitzat tant per adsorbents de carbó, com de polímer i zeolita.

A l'esquema s'observa com una bomba de buit redueix la pressió, ocasionant una evaporació del COV a temperatura ambient dins de l'adsorbent.

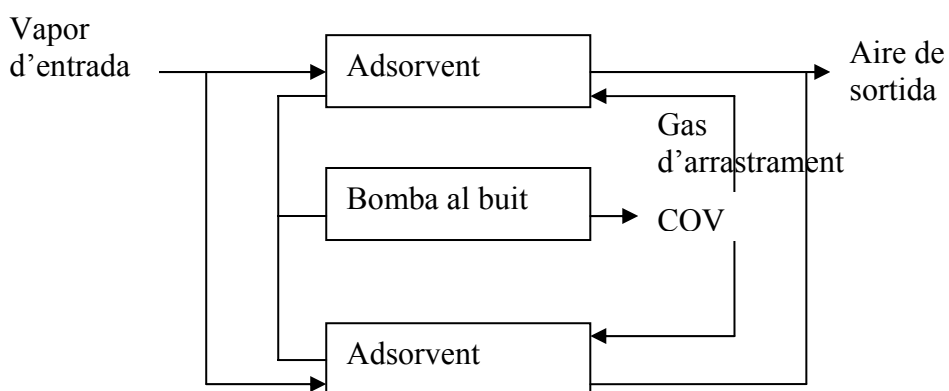


Fig. 19. Sistema d'adsorció per regeneració al buit

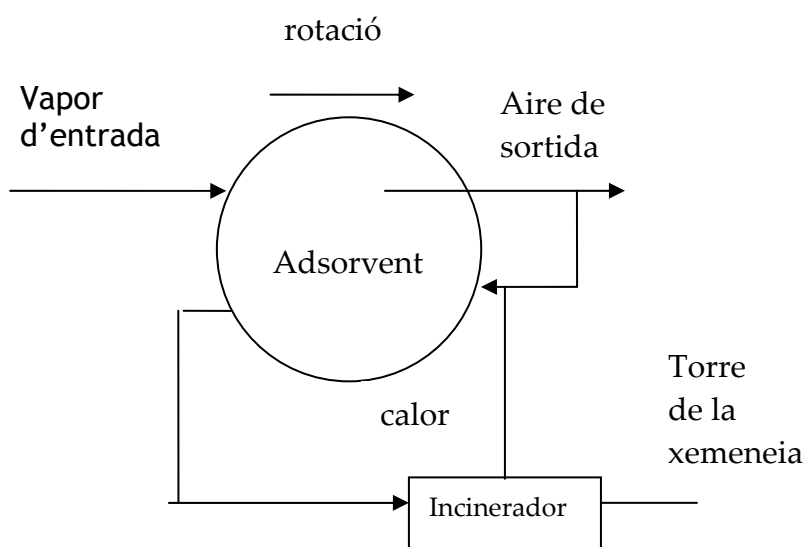


Fig. 20. Concentrador de compostos orgànics volàtils





Si la puresa del COV és massa baixa per una recuperació econòmica, el COV seria destruït en fase vapor amb una de les alternatives següents: oxidació sense flama, incineració tèrmica o incineració catalítica.

Amb un concentrador de vapor, s'eleva la concentració de vapor de COV per tal de disposar d'un tractament més econòmic en els dispositius de combustió o de condensació.

Normalment, caldrà un mínim combustible auxiliar per assegurar un suficient valor calorífic per a aconseguir una incineració adequada.

### 3. Regeneració per oscil·lació de pressió:

S'utilitza per separar gasos o vapors de l'aire i també per separar contaminants dels gasos de combustió. Els vapors han d'estar a concentracions molt superiors a les del cas d'estudi.

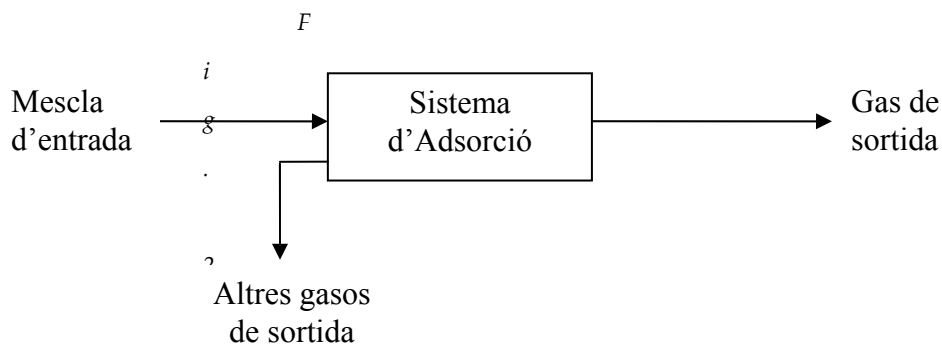


Fig. 21. Sistema d'adsorció per oscil·lació de pressió

La concentració real del COV és la clau per determinar quan i com s'utilitza un sistema d'adsorció. Un sistema d'adsorció es torna gairebé inútil quan la concentració a l'entrada disminueix tant que no podrà ser adsorbida efectivament.



Per raons de seguretat s'indica que les concentracions de COVs es mantinguin per sota d'una quarta part del LIE (Límit Inferior d'Explosivitat). Si és així, es pot disposar econòmicament dels COVs per mitjà d'un incinerador, capturar per una membrana, o recuperar amb un condensador.

Tot i això, a mesura que la concentració de COVs de sortida del adsorbent descendeixi per sota de la quarta part del LIE, s'haurà d'afegir més combustible auxiliar per proporcionar una combustió adequada a l'incinerador.

#### *6.1.7. Control de la contaminació de l'aire*

En el control de la contaminació de l'aire, quan es pretén restringir alguna concentració de sortida o aconseguir la recuperació del COV, s'utilitza l'adsorció per remoure COVs de corrents de gas amb baixa o mitjana concentració.

A continuació es llisten diferents tipus d'equips d'adsorció per al control de la contaminació de l'aire:

- Llit fix regenerable
- Equips d'un sol ús o regenerables
- Llit mòbil (*travelling bed*)
- Llit fluïditzable
- Cases de bosses cromatogràfiques

D'aquestes, les més comunament utilitzades són les de llit fix i les de recipients de carbó d'un sol ús:



#### *6.1.7.1. Adsorció per llit fix regenerable*

Es pot dissenyar la mida de les unitats de llit fix per a poder controlar corrents contínues de gasos que contenen COVs sobre un ampli rang de relacions de cabal (de centenars a milers de ft<sup>3</sup>/min). Poden operar de forma intermitent o bé contínua:

*En l'operació intermitent* es realitza l'adsorció durant el dia, i de nit (quan l'adsorvidor i la font dels COVs són apagats) la desorció, on els COVs capturats són remoguts del carbó.

Passos que segueix el cicle adsorció-desorció en l'operació intermitent:

- Regeneració del carbó per escalfament
- Assecat del llit mitjançant un ventilador
- Refredament del llit fins a la temperatura d'operació (també per mitjà d'un ventilador)

*En l'operació contínua*, es disposa que un llit de carbó regenerat estigui sempre disponible per l'adsorció, de manera que pot operar contínuament, sense parades.

Si es disposen dos llits de carbó (un que adsorbeix i l'altre que desorbeix/en pausa) s'haurà de dimensionar el doble de carbó actiu que en un sistema intermitent.



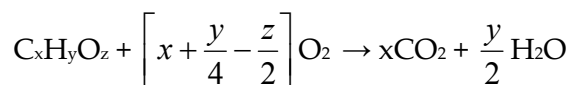
### 6.1.7.2. Adsorció amb equips d'un sol ús o regenerables

Originàriament es referien a envasos retornables relativament petits. Difereixen de les unitats de llit fix, ja que estan normalment limitats a controlar corrents de cabal intermitent, de baix volum (típicament 100 ft<sup>3</sup>/min màxim).

Els recipients de carbó d'un sol ús no són dissenyats per la desorció en el mateix lloc. Però el carbó pot ser regenerat en una planta central. Un cop el carbó arriba a un cert contingut de COV, es para la unitat i es reemplaça per una altra. El tipus de carbó actiu, depèn de la naturalesa del COV que ha de ser tractat.

## 6.2. Tractaments d'incineració

Generalment, els corrents residuals que han de ser incinerats, són una barreja complexa de compostos orgànics. La combustió d'una barreja de compostos orgànics amb un contingut de carboni, hidrogen i oxigen es descriu per la següent reacció exotèrmica:



Els productes de la combustió completa són relativament innocus, deixant lloc a la incineració com a una tècnica molt interessant per a la deposició de residus.

La base d'un incinerador és una cambra de combustió on el corrent de gas residual és cremat. En el procés, la temperatura d'entrada del corrent de gas residual és generalment molt més baixa que la requerida per a la combustió; és per aquest motiu



que s'ha de subministrar energia al incinerador per tal d'augmentar la temperatura del gas residual.

La combustió de gas residual pot aconseguir-se mitjançant un incinerador tèrmic o bé un incinerador catalític. En el darrer cas, s'utilitza un catalitzador per augmentar la proporció de la reacció de combustió, i fer que aquesta es produeixi a temperatures més baixes.

Degut al fet que el procés catalític opera a temperatures més baixes que el procés tèrmic, la incineració catalítica sol requerir menys combustible auxiliar per preescalfar el corrent de gas residual. Així doncs, els requeriments de combustible auxiliar es poden veure reduïts i millorar la seva eficiència energètica, proporcionant un intercanvi de calor entre certs corrents d'entrada i de sortida.

El corrent de sortida, que conté els productes de la combustió, pot ser utilitzat per preescalfar el corrent d'entrada del gas residual mitjançant un bescanviador de calor primari o recuperatiu.

L'eficiència energètica encara pot millorar-se col·locant un segon bescanviador de calor secundari després del primari per tal de recuperar energia addicional del corrent de sortida.

La majoria dels gasos industrials que contenen COVs són barreges diluïdes de gasos combustibles en l'aire. En certes aplicacions, com és el cas dels processos oxidatius amb aire, el corrent de gas residual és molt deficient en oxigen. Depenent del contingut d'oxigen en el corrent residual, pot requerir-se aire auxiliar per cremar el contingut total d'orgànics del gas residual.

La concentració de gas combustible en el corrent de gas residual té un paper molt important en el disseny i l'operació d'un incinerador.



Des de els punt de vista dels costos, s'ha de minimitzar la quantitat d'aire en excés de les quantitats estequiomètriques. En canvi, per raons de seguretat, qualsevol barreja dins dels límits de flamabilitat, presenta un perill inacceptable de foc per un corrent d'alimentació al incinerador.

És important, doncs, definir la concentració mínima del compost en aire que pot produir més energia que la necessària per augmentar la seva pròpia temperatura fins al punt d'ignició, anomenat límit inferior d'explosivitat (LEL). Al mateix temps, cal doncs definir la concentració més alta de l'orgànic en l'aire amb capacitat d'ignició anomenat límit superior d'explosivitat (UEL).

La majoria de gasos residuals industrials que contenen COVs són barreges diluïdes de gasos combustibles en l'aire, el seu valor calorífic és baix i el seu contingut d'oxigen excedeix el requerit per cremar els orgànics residuals i el combustible auxiliar.

Si es troba el cas d'un gas residual per sobre del 50% del LEL, ha de diluir-se per complir les regulacions de seguretat contra incendis.

L'objectiu de qualsevol sistema d'incineració es controlar la quantitat de COV emesos a l'ambient. És important, però, tenir en compte que la combustió incompleta dels COVs d'entrada pot provocar la formació d'altres COVs no presents originalment.

Hi ha diferents dissenys d'incineradors. Aquests dissenys poden classificar-se generalment com sistemes tèrmics i catalítics.

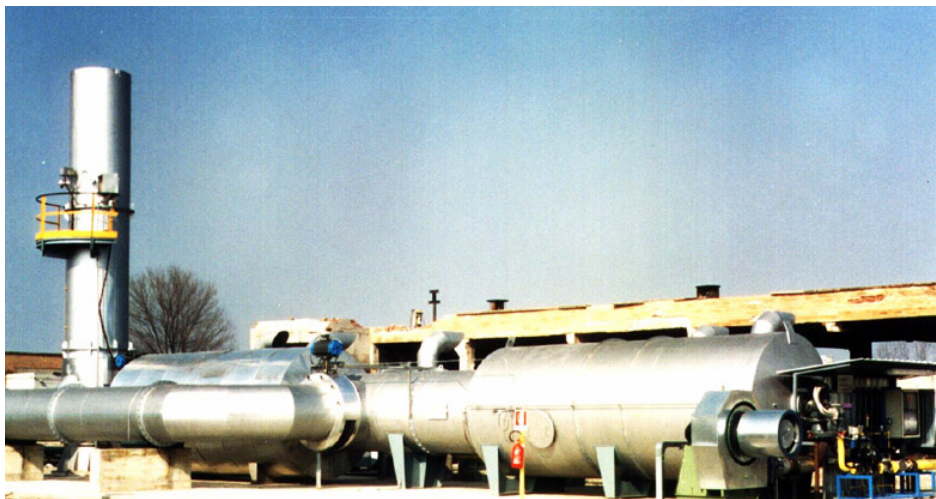
Els sistemes tèrmics poden ser incineradors de flama directa, sense recuperació d'energia, incineradors de flama amb un bescanviador de calor recuperatiu o sistemes regeneratius que operen de manera cíclica per tal d'aconseguir una alta recuperació d'energia.



Els sistemes catalítics inclouen sistemes de llit fix i sistemes de llit fluiditzats, els quals proporcionen recuperació d'energia.

### 6.2.1. Oxidació tèrmica

L'oxidació tèrmica és el procés d'oxidar materials combustibles elevant la temperatura del material per sobre del seu punt d'auto-ignició, en presència d'oxigen, mantenint-lo a altes temperatures durant un temps suficient per completar la seva combustió a diòxid de carboni i aigua.



*Fig. 22.. Incinerador tèrmic*

Tant el temps de residència com la temperatura, la turbulència i la disponibilitat d'oxigen afecten la velocitat i l'eficiència del procés de combustió.

Un incinerador tèrmic senzill està format per una cambra de combustió que no inclou cap sistema de recuperació de calor per mitjà d'un bescanviador de calor (incinerador tèrmic recuperatiu).



L' incinerador tèrmic es basa en una flama estabilitzada que es manté mitjançant una combinació de combustible auxiliar, compostos gasosos contaminats i aire suplementari, afegit quan sigui necessari.

Mentre el gas travessa la flama, és escalfat des de la seva temperatura de preescalfat d'entrada fins a la seva temperatura d'ignició. Aquesta temperatura varia pels diferents compostos i en general es determina empíricament. És la temperatura per la qual la velocitat de reacció de la combustió excedeix la velocitat de les pèrdues de calor, elevant d'aquesta manera la temperatura dels gasos a valors majors. Per tant, qualsevol barreja orgànica/aire s'encendrà si la seva temperatura és elevada a un nivell suficientment alt.

El nivell requerit de control dels COVs del gas contaminat que ha de ser assolit dins el temps que el gas passa en la cambra de combustió, determina la temperatura del reactor. Quan més curt sigui el temps de residència, més alta ha de ser la temperatura del reactor.

La majoria de les unitats tèrmiques són dissenyades per proporcionar, al menys, un segon de temps de residència al gas contaminat amb temperatures típiques de 650 a 1100°C.

Un cop la unitat tèrmica s'ha dissenyat i construït, el temps de residència no es pot canviar fàcilment, de manera que la temperatura de reacció requerida es torna funció de l'espècie gasosa en particular i el nivell de control desitjat.

Els estudis basats en dades reals de proves de camp, demostren que els incineradors tèrmics comercials han d'operar generalment a 850 °C i amb un temps de residència nominal de 2 segons, per tal d'assegurar el 98% de la destrucció dels COVs.





Es troben tres tipologies de sistemes d'oxidació tèrmica:

■ **Incineradors de flama directa (0% de recuperació d'energia)**

És el procés més simple per arribar a l'objectiu de la incineració: portar el corrent amb continguts de COV a la temperatura requerida de reacció, i mantenir-la el temps de reacció, per tal d'arribar a l'eficiència requerida de destrucció.

L'incinerador de flama directa està format únicament per la cambra de combustió. El pre-escalfador de gas residual i el bescanviador de calor de recuperació secundària d'energia es consideren dispositius de recuperació d'energia i per tant no formen part de l'incinerador de flama directa.

■ **Incineradors recuperatius (< 90% recuperació d'energia)**

Els incineradors recuperatius tenen una eficiència energètica millorada, resultat de col·locar intercanviadors de calor en els corrents calents del gas de sortida.

L'incinerador recuperatiu es compon d'una cambra de combustió, el preescalfador de gas residual i, quan és necessari, el bescanviador de calor recuperador secundari d'energia.

Els bescanviadors de calor poden recuperar fins a un 70% de l'energia. La majoria dels bescanviadors de calor no s'han dissenyat per treballar a temperatures elevades, així que la major part de l'energia necessària per a la ignició dels COVs ha de ser subministrada per la combustió del combustible en la cambra de combustió.



### ■ Incineradors tèrmics regeneratius

Els incineradors tèrmics regeneratius (OTR) utilitzen un medi d'alta densitat, tal com un llit de ceràmica que encara es manté calent d'un cicle previ que s'ha emprat per preescalfar el corrent de gas contaminat de COV. Els gasos preescalfats i parcialment oxidats entren en una cambra de combustió on són escalfats per la combustió d'un combustible auxiliar (gas natural) a una temperatura d'oxidació final entre 760 i 820 °C i mantinguts a aquesta temperatura per arribar a la destrucció màxima de COVs.

Es poden arribar a utilitzar temperatures al voltant dels 1100°C per a eficiències de control molt elevades de certs COVs altament tòxics.

Els gasos tractats i calents surten de la cambra i són dirigits cap a un llit empaquetat de ceràmica que procedirà al seu refredament.

El calor que prové dels gasos és absorbit pel llit o llits, abans de que els gasos siguin ventilats cap a l'exterior. El llit empaquetat i reescalfat comença un nou cicle escalfant un nou corrent contaminat.

### 6.2.2. Oxidació catalítica

L'oxidació catalítica, a diferència de la tèrmica, usa un catalitzador dins del sistema per tal de disminuir l'energia d'activació necessària per a l'oxidació total, de tal manera que aquest procés succeeix a temperatures inferiors.

Tot i treballar a temperatures inferiors, el corrent residual ha de ser preescalfat a una temperatura prou elevada (150-480°C) per iniciar les reaccions d'oxidació.



El preescalfat del gas es pot dur a terme directament dins la cambra de combustió del preescalfador o bé indirectament per intercanvi de calor amb l'efluent de l'incinerador.

Un cop finalitzat aquest procés, el corrent de gas residual circula pel llit del catalitzador on, a la seva superfície, succeeix la reacció química (combustió) entre l'oxigen del corrent gas i els contaminants gasosos.

La incineració catalítica pot ser utilitzada per destruir qualsevol compost oxidable en un corrent residual. Cal considerar, però, que hi han limitacions pràctiques als tipus de composts que poden ser oxidats degut a l'efecte contaminant que algunes espècies tenen sobre el catalitzador.

Els gasos que contenen compostos amb clor i sofre poden desactivar els catalitzadors de metall noble utilitzat en la incineració catalítica. És per això que es van crear els catalitzadors tolerants a aquests compostos, per tal de poder dur a terme la seva oxidació.

El contingut de matèria particulada dins del corrent residual pot donar problemes al procés, ja que aquestes partícules obstrueixen els porus del catalitzador.

L'incinerador catalític regeneratiu (OCR) opera de la mateixa manera que el tèrmic regeneratiu, amb la diferència que el primer utilitza un material catalític en comptes d'un material ceràmic. Aquest fet permet la destrucció de COVs a temperatures d'oxidació més baixes.

L'OCR utilitza un catalitzador de metall precís en el llit, permetent que l'oxidació es produeixi a uns 400°C. El requeriment d'una temperatura més baixa redueix la quantitat de gas natural necessari per alimentar el sistema de reducció de COVs i la mida total de l'incinerador.



### ■ Incineradors catalítics de llit fix

Els incineradors catalítics de llit fix poden utilitzar diferents tipus de catalitzador:

- **Incineradors catalítics monolítics:** el catalitzador és un bloc sòlid porós, amb canals paral·lels no interconnectats, alineats en la mateixa direcció del flux de gas. Aquest tipus de catalitzador ofereix una mínima fricció degut a l'expansió/contracció tèrmica durant el temps d'engegada/parada i una baixa caiguda de pressió.
- **Incineradors catalítics de llit empaquetat:** les partícules del catalitzador estan situades ja sigui en un tub o en safates poc profundes per on passaran els gasos. Aquest tractament és molt usat en el sector industrial on hi ha elevades concentracions de compostos de fòsfor.

### ■ Incineradors catalítics de llit fluïditzat

Els incineradors catalítics de llit fluïditzat tenen l'avantatge de raons de transferència de massa molt alta, tot i que la caiguda de pressió total és lleugerament més alta que la d'un catalitzador de tipus monolític, i que tenen major transferència de calor comparat amb la transferència de calor normal que pot tenir un gas.

Aquest últim avantatge permet majors raons de transferència de calor per unitat de volum de gas tractat i, per tant, permet tractar el gas residual amb valors calorífics majors sense excedir les temperatures màximes permeses en el llit del catalitzador.



En aquests reactors, la temperatura del catalitzador depèn de la proporció de reacció que hi ha entre la superfície del catalitzador i la proporció de transferència de calor entre el catalitzador i les superfícies de transferència de calor.

Cal destacar que, generalment, els sistemes de llit fluiditzat toleren més els gasos amb material particulat que no pas els de tipus monolític, ja que en el primer cas hi ha l'abstracció constant de comprimits fluiditzats del catalitzador que ajuda a remoure les partícules de l'exterior del catalitzador d'una manera continua.

Tot i això, els incineradors catalítics de llit fluiditzat tenen una pèrdua gradual del catalitzador degut a aquestes abstraccions.





## 7. Estimació de costos

### 7.1. Adsorbidors

En primer lloc s'estimen els costos pel tractament d'adsorció.

#### 7.1.1. Procediments de disseny

Per dur a terme l'avaluació econòmica es fixen les característiques del corrent que es tindran en compte per fer els càlculs pel tractament d'adsorció.

Aquestes especificacions pel disseny es determinen en la taula 14.

Especificacions de disseny	
Temps de treball	1172 [h]
Cabal (Q)	4124 ft <sup>3</sup> /min = 7008 [m <sup>3</sup> /h]
Carga del COV d'entrada (M <sub>COV</sub> )	3,2 [Kg/h]
Capacitat equilibri del carbó (W <sub>e</sub> )	0,45 [gr/gr]
Llits d'adsorció (N <sub>A</sub> )	2
Llits de desorció (N <sub>D</sub> )	1
Temps d'adsorció (θ <sub>A</sub> )	12 [h]
Temps de desorció (θ <sub>D</sub> )	5 [h]
Velocitat superficial (V <sub>b</sub> )	0,33 [m/s]

Taula 14. Valors específics per l'avaluació econòmica en el cas dels adsorbidors



#### 7.1.1.1. Paràmetres per al dimensionament

Tant en els sistemes d'adsorció de carbó actiu de llit fix, com en els d'envasos d'un sòl ús, la mida i el cost de l'equip comprat depenen principalment de cinc paràmetres:

- el cabal volumètric de gas carregat de COV passant a través del llit de carbó
- les càrregues de massa d'entrada i sortida de COV del corrent de gas
- el temps d'adsorció
- la capacitat de treball del carbó i/o la capacitat de l'equilibri del carbó
- la humitat del corrent de gas

A més a més, el cost també es pot veure afectat per altres condicions del corrent de gas, com la presència de quantitats excessives de partícules, d'humitat o altres substàncies, les quals requeririen l'ús de pretractaments i/o l'ús de materials de construcció resistent a la corrosió.

#### 7.1.1.2. Temps d'adsorció i desorció

Els temps relatius per adsorció i desorció i la configuració del llit de l'adsorbidor estableixen el perfil del cicle d'adsorció/desorció.

El cicle d'adsorció/desorció és important per a determinar els requeriments de carbó i dels envasos, i per establir els requeriments dels equips auxiliars de desorció i serveis.

En el cas tractat, el procés opera contínuament, és a dir, s'instal·la un llit extra de carbó per proporcionar capacitat adsorbent durant el temps que el primer llit s'està regenerant.





La quantitat de capacitat extra dependrà del nombre de llits de carbó que estarien adsorbint en qualsevol moment, de la longitud del període d'adsorció en relació al període de desorció i de la configuració dels llits operants.

Es demostra que el nombre de llits desorbint necessaris en un sistema continu està relacionat amb el temps de desorció ( $\theta_D$ ), el temps d'adsorció ( $\theta_A$ ) i la quantitat de llits adsorbint:

$$\theta_D \leq \theta_A \left( \frac{N_D}{N_A} \right) \quad ; \quad 5h \leq 12h \cdot \left( \frac{1}{2} \right) = 6h$$

Es comprova que la configuració donada és viable, atenent les hores d'adsorció i desorció especificades.

#### 7.1.1.3. Estimació dels requeriments de carbó

El procediment d'estimació del carbó està basat en la capacitat de treball ( $W_c$ ), és a dir, la diferència per unitat de massa de carbó entre la quantitat de COV en el carbó al final del cicle d'adsorció i la quantitat permanent en el carbó al final del cicle de desorció.

La capacitat de treball, juntament amb el temps d'adsorció i la càrrega de COV d'entrada s'utilitzen per computar la necessitat de carbó per un adsorbidor de carbó de llit fix.

Cal, abans, definir la capacitat de treball del carbó ( $W_c$ ) com el 50% de la capacitat d'equilibri:

$$w_c \approx 0,5 w_e$$

$$w_c \approx 0,5 \cdot 0,45 \text{ lb/lb} = 0,225 \text{ lb/lb} = 0,225 \text{ gr COV/gr carbó}$$



Així el requeriment de carbó queda definit com:

$$M_c = \frac{m_{cov}}{w_c} \cdot \theta_A \cdot \left( 1 + \frac{N_D}{N_A} \right)$$
$$M_c = \frac{7,13 lb/h}{0,225 lb/lb} \cdot 12h \cdot \left( 1 + \frac{1}{2} \right) = 570,4 lb = 260 Kg \text{ de carbó}$$

El requeriment de carbó és directament proporcional al temps d'adsorció.

Aquest fet indica que el sistema es podria dissenyar amb un temps d'adsorció més curt per tal de minimitzar el requeriment de carbó i així el cost de l'equip.

Per altra banda, un temps d'adsorció més baix comportaria que el llit de carbó hagués de ser desorbit amb més freqüència, fet que originaria un alt consum energètic per part dels ventiladors d'assecat i refredament i una vida útil del carbó més curta.

### 7.1.2. Estimació de la inversió inicial de capital

Tal com s'indica anteriorment, el cost de l'equip comprat és una funció de la relació de cabal volumètric, de les càrregues de COV d'entrada i sortida, del temps d'adsorció i de la capacitat de treball del carbó actiu.

De tots els components que formen un sistema d'adsorció, els recipients de l'adsorbidor i el carbó suposen fins el 90 % del cost total de l'equip.

Dins del sistema es troba també un equip auxiliar format per ventiladors, bombes, condensadors, decantadors i canonades internes que normalment no són tinguts en compte en el càlcul de la inversió del capital total, degut a que suposen una petita part dels costos globals.



### 7.1.2.1. Cost del carbó

Aquest cost és el producte dels requeriments inicial de carbó ( $M_c$ ) pel seu preu actual, tot i que aquest preu és una mica inferior al dels llistats de compra, ja que els proveïdors d'adsorbidors compren carbó en grans quantitats i això fa que els seu cost sigui més baix.

$$C_c = \text{preu del carbó} \cdot M_c$$

$$C_c = 3,2 \$ \cdot 570,4 \text{ lb} = 1825 \$ = 1425 \text{ €}$$

### 7.1.2.2. Cost del recipient

El cost del recipient d'un adsorbidor està determinat principalment per les seves dimensions que depenen, alhora, de les quantitats de carbó que ha de contenir i de la velocitat superficial del gas que ha de mantenir a través del seu llit per a una adsorció òptima.

Generalment, el cost del recipient està correlacionat amb el seu pes, però amb freqüència aquesta dada és difícil de calcular o d'obtenir. Per aquest motiu el cost es pot estimar a partir de la seva àrea superficial externa.

La disposició d'aquest recipient pot ser horitzontal o vertical, depenent del flux de gas d'entrada.

En el cas d'estudi, es farà ús d'una disposició vertical ja que, a relacions de flux de gas de menys de  $15.300 \text{ m}^3/\text{h}$ , és més viable escollir una configuració vertical.

Per estimar els requeriments de carbó per cada un dels recipients s'ha d'utilitzar la següent relació de cabal volumètric per dur a terme els càlculs de dimensionament:



$$Q' = \frac{Q}{N_A}$$

$$Q' = \frac{4124 \text{ ft}^3 / \text{min}}{2} = 2062 \text{ ft}^3 / \text{min} = 58,4 \text{ m}^3 / \text{min}$$

$$M'_c = \frac{M_c}{(N_A + N_D)}$$

$$M'_c = \frac{570,4 \text{ lb}}{(2 + 1)} = 190,13 \text{ lb} = 86,2 \text{ Kg}$$

S'estima el diàmetre de recipient com:

$$D = \left( \frac{4Q'}{\pi v_b} \right)^{1/2}$$

$$D = \left( \frac{4 \cdot 2062 \text{ ft}^3 / \text{min}}{\pi \cdot 66 \text{ ft} / \text{min}} \right)^{1/2} = 6,3 \text{ ft} = 1,83 \text{ m}$$

La longitud del recipient vertical depèn principalment de l'espessor del llit de carbó.

Ha d'incloure un espai addicional per sota del llit de carbó per al suport del llit i per sota i per sobre del llit per a la distribució del corrent de gas i per a l'accés físic al llit de carbó.

S'estima la longitud del recipient com:

$$L = t_b + t_{a,g} \quad \text{on:}$$



$$t_b = \frac{\left(\frac{M'_c}{r_b}\right)}{\left(\frac{Q'}{v_b}\right)} ; \quad t_b = \frac{\left(\frac{190,13 \text{ lb}}{30 \text{ lb/ft}^3}\right)}{\left(\frac{2062 \text{ ft}^3 / \text{min}}{66 \text{ ft/min}}\right)} = 0,2029 \text{ ft} = 0,06 \text{ m}$$

$$t_{a,g} = 4 \text{ ft} = 1,22 \text{ m}$$

$$L = 0,2029 \text{ ft} + 4 \text{ ft} = 4,203 \text{ ft} = 1,28 \text{ m}$$

Finalment es calcula l'àrea superficial del recipient:

$$S = \pi D (L+D/2)$$

$$S = \pi \cdot 6,3 \text{ ft} \cdot \left(4,203 \text{ ft} + \frac{6,3 \text{ ft}}{2}\right) = 145,76 \text{ ft}^2 = 13,48 \text{ m}^2$$

La superfície del recipient ha d'estar inclòs en el rang següent per ser viable:

$$97 \leq S \leq 2110 \text{ ft}^2$$

En el cas d'estudi la superfície determinada s'inclou dins el rang i per tant tenim una configuració viable. Basat en els últims càlculs, es desenvolupa una correlació entre el cost del recipient de l'adsorbidor i l'àrea superficial, de manera que:

$$C_v = 271 S^{0,778}$$

$$C_v = 271 \cdot 145,76 \text{ ft}^{0,778} = 13170,22 \$ = 10270 \text{ €}$$

Els recipients es fabriquen generalment d'acer inoxidable 304, però en el cas que s'optés per fabricar les unitats amb un altre material, el cost del recipient s'hauria de multiplicar per un factor dependent del material de fabricació:



Material	Factor (F <sub>m</sub> )
Acer inoxidable 316	1,3
Carpenter 20 CB-3	1,9
Montel - 400	2,3
Niquel - 200	3,2
Titani	4,5

Taula 15. Factors específics segons el tipus de material de fabricació.

### 7.1.2.3. Cost total de l'equip

Depenent de la relació total del flux de gas (Q), la relació del cost total de l'equip d'adsorbidors i del cost és pot determinar la següent correlació:

$$R_c = 5,82 Q^{-0,133}$$

$$R_c = 5,82 \cdot 4124 \text{ ft}^3 / \text{min}^{-0,133} = 1,923$$

Finalment, es determina el cost total de l'equip com el producte de  $R_c$  per la suma dels costos del carbó i del recipient:

$$C_A = R_c [C_C + C_V (N_A + N_D)]$$

$$C_A = 1,923 [1825\$ + 13070,22\$(2 + 1)] = 78912\$ = 61550 \text{ €}$$

### 7.1.2.4. Inversió inicial de capital

A la taula 16 es pot observar una metodologia de càlcul on, a partir del valor del cost de l'equip d'adsorció ( $C_A=61550 \text{ €}$ ) s'obté la inversió total de capital mitjançant el producte amb diferents factors establerts pel manual de referència.



Concepte de Cost	Factor
<b>Costos Directes</b>	
Costos de l'equip comprat	
Adsorbidor + equip auxiliar	$A = 78931,43\$ = 61566 \text{ €}$
Instrumentació	$(78931,43 \cdot 0,01) = 7706,28 \text{ \$}$
Impostos sobre vendes	$(78931,43 \cdot 0,16) = 12629,03 \text{ \$}$
Nòlits	$(78931,43 \cdot 0,05) = 3946,57 \text{ \$}$
<b>Costos de l'equip comprat (CEC)</b>	$B = (78931,43 \cdot 1,31) = 103400,17 \text{ \$}$
Costos directes d'instal·lació	
Cimentació i suports	$(103400,17 \cdot 0,08) = 8272,01 \text{ \$}$
Maneig i aixecament	$(103400,17 \cdot 0,14) = 14476,02 \text{ \$}$
Elèctric	$(103400,17 \cdot 0,04) = 4136,01 \text{ \$}$
Canonades	$(103400,17 \cdot 0,02) = 2068 \text{ \$}$
Aïllants	$(103400,17 \cdot 0,01) = 1034 \text{ \$}$
Pintura	$(103400,17 \cdot 0,01) = 1034 \text{ \$}$
Costos directes d'instal·lació	$(103400,17 \cdot 0,3) = 31020,05 \text{ \$}$
<b>Costos Directes Totals (CD)</b>	$(103400,17 \cdot 1,30) = 134420,22 \text{ \$}$
<b>Costos indirectes (instal·lació)</b>	
Enginyeria	$(103400,17 \cdot 0,10) = 10340,02 \text{ \$}$
Construcció i despeses de camp	$(103400,17 \cdot 0,05) = 5170,01 \text{ \$}$
Honoraris del contractista	$(103400,17 \cdot 0,10) = 10340,02 \text{ \$}$
Arrancada	$(103400,17 \cdot 0,02) = 2068 \text{ \$}$
Proves de funcionament	$(103400,17 \cdot 0,01) = 1034 \text{ \$}$
Contingències	$(103400,17 \cdot 0,03) = 3102,01 \text{ \$}$
<b>Costos Indirectes Totals (CI)</b>	$(103400,17 \cdot 0,31) = 32054,05 \text{ \$}$
<b>Inversió inicial de capital (IIC)</b>	$(103400,17 \cdot 1,61) = 166475 \text{ \$}$

Taula 16. Metodologia i càlcul de la inversió inicial de capital

Seguint el procediment de càlcul establert, s'obté que la Inversió Inicial de Capital (IIC) en el cas de l'adsorbidor, i tenint en compte el disseny de l'equip, és de **166.475 \$**, és a dir, **129.850 €**



### 7.1.3. Estimació del cost total anual

El cost total anual del sistema comprèn tres components que són considerats separatament: costos directes, costos indirectes i la recuperació de crèdits.

#### 7.1.3.1. Costos directes anuals

##### a. Vapor

El vapor és utilitzat durant el cicle de desorció. La quantitat de vapor necessària depèn de la quantitat de carbó en el recipient, del dimensionament del recipient, i del tipus i quantitat de COV adsorbit.

Es desenvolupa la següent expressió per a determinar el cost anual del vapor requerit:

$$C_s = 3,5 \times 10^{-3} \cdot m_{cov} \cdot \theta_s \cdot p_s$$

$$C_s = 3,5 \times 10^{-3} \cdot 7,13 \text{ lb/h} \cdot 1172 \text{ h/any} \cdot 11,5 \text{ \$/lb} = 336,35 \text{ \$/any} = 263 \text{ €/any}$$

##### b. Aigua de refredament

L'aigua de refredament és consumida pel condensador, on la barreja de vapor-COV de la sortida del llit de carbó desorbit queda totalment condensada.

Els requeriments d'aigua de refredament és generalment una funció del consum de vapor i de l'increment de temperatura permissible en el refrigerant, normalment  $-1^\circ$  i  $4^\circ\text{C}$ .





Fent ús del promig de temperatures permissibles en el refrigerant es pot determinar el cost total anual de l'aigua de refredament com:

$$C_{cw} = 3,43 \cdot \frac{C_s}{p_s} \cdot p_{cw}$$

$$C_{cw} = 3,43 \cdot \frac{336,35\$/any}{,2\$/mil\ gal} = 20,06\$ = 16\text{€}$$

### c. Electricitat

En el cas d'estudi, l'electricitat és consumida pel ventilador del sistema, el ventilador pel secat/refredament del llit i la bomba de l'aigua de refredament.

S'ha de considerar, però, que mentre el ventilador del sistema ha de conduir contínuament el flux de gas a través del sistema, el ventilador de refredament del llit només és usat durant una part del cicle de desorció.

En tots dos ventiladors, la potència necessària depèn el flux de gas i la caiguda de pressió del sistema. La caiguda de pressió generalment depèn de variables com la temperatura d'adsorció, la velocitat en el llit i del gruix d'aquest.

Però pel cas d'estudi, on ja han estat determinats les temperatures i el tipus de carbó, la caiguda de pressió per unitat de gruix depèn únicament de la velocitat del gas.

$$\frac{\Delta P_b}{t_b} = 0,03679 v_b + 1,107 \times 10^{-4} v_b^2$$

$$\frac{\Delta P_b}{t_b} = 0,03679 \cdot 66\text{ft} / \text{min} + 1,107 \times 10^{-4} \cdot (66\text{ft} / \text{min})^2 = 2,98\text{in} \text{ aigua} / \text{ft} \text{ carbó}$$



Per a determinar la caiguda final del sistema s'ha de conèixer l'espessor del llit i l'àrea dels recipients verticals:

$$t_l = \frac{0,0333 \cdot M'_c}{A_b} \quad \text{on} \quad A_b = \frac{Q'}{v_b}$$

$$A_b = \frac{2062 \text{ ft}^3 / \text{min}}{66 \text{ ft} / \text{min}} = 31,24 \text{ ft}^2 = 2,88 \text{ m}^2$$

$$t_l = \frac{0,0333 \cdot 190,13 \text{ lb}}{31,24 \text{ ft}^2} = 0,2 \text{ ft} = 0,06 \text{ m}$$

La caiguda total del sistema es defineix com:

$$\Delta P_s = \Delta P_b + 1$$

$$\Delta P_b = 0,2 \text{ ft} \cdot 2,98 \text{ in} / \text{ft} = 0,6 \text{ in} = 0,015 \text{ m}$$

$$\Delta P_s = 1 + 0,6 \text{ in} = 1,6 \text{ in} = 0,04 \text{ m}$$

Un cop coneguda la caiguda de pressió del llit, el requeriment de potència del ventilador del sistema es pot calcular com:

$$hp_{sf} = 2,5 \times 10^{-4} \cdot Q \cdot \Delta P_s$$

$$hp_{sf} = 2,5 \times 10^{-4} \cdot 4124 \text{ ft}^3 / \text{min} \cdot 1,6 \text{ in} = 1,65 \text{ hp}$$

L'última equació incorpora una eficiència del ventilador del 70% i una eficiència del motor del 90%.

Les hores d'operació dels ventiladors per al secat es poden definir amb la següent equació:



$$\theta_{cf} = 0,4 \cdot \theta_D \cdot \left( \frac{N_A \cdot \theta_S}{\theta_A} \right)$$

$$\theta_{cf} = 0,4 \cdot 5h \cdot \left( \frac{2 \cdot 1172h}{12h} \right) = 390,6 h$$

I el consum elèctric es pot determinar com en el cas del ventilador del sistema:

$$hp_{cf} = 2,5 \times 10^{-4} \cdot 158,4 ft^3 / \min \cdot 1,6 in = 0,064 hp$$

La potència del ventilador es podrà expressar com a consum elèctric:

$$KWh_{cf} = 0,746 KWh / hp \cdot 0,064 hp \cdot 390,6 h / any = 18,65 KWh / any$$

Aquesta mateixa equació és útil per determinar el temps d'operació de la bomba de refredament. En aquest cas es substitueix el 0,4 (40% del cicle de desorció) per 0,6.

$$\theta_{cwp} = 0,6 \cdot 5h \cdot \left( \frac{2 \cdot 1172h}{12h} \right) = 586 h$$

Per conèixer el consum dels ventiladors d'assecat, primerament s'ha de determinar el requeriment d'aire per part del ventilador en dues hores de treball:

$$Q'' = 100 ft^3 / lb \cdot M'_c \cdot \frac{1}{120} \min$$

$$Q'' = 100 ft^3 / lb \cdot 190,13 lb \cdot \frac{1}{120} \min = 158,4 ft^3 / \min = 4,48 m^3 / \min$$

El requeriment de potència en el cas de la bomba de l'aigua de refredament, pot ser determinat com:



$$hp_{cwp} = \frac{2,52 \times 10^{-4} \cdot q_{cw} \cdot H}{\eta}$$

$$hp_{cwp} = \frac{2,52 \times 10^{-4} \cdot 20,06 \text{ gal/min} \cdot 100 \text{ ft}}{0,63} = 0,8 \text{ hp}$$

$$KWh_{cf} = 0,746 KWh / hp \cdot 0,8 \text{ hp} \cdot 586 \text{ h / any} = 349,7 KWh / any$$

Un cop calculats els diferents consums energètics dels dos ventiladors i la bomba de refredament, es sumen tots els consums per tal de determinar el consum total d'energia elèctrica del tractament d'adsorció.

$$KWh_{total} = 1446,45 KWh + 18,65 KWh + 349,7 KWh = 1814,8 KWh$$

#### d. Reemplaçament del carbó

El carbó té una vida econòmica diferent de la resta del sistema de l'adsorbidor. És per això que el cost del seu reemplaçament s'ha de calcular separatament:

$$CRC_c = CRF_c (1,08 C_c + C_d)$$

$$CRC_c = 0,2439 \cdot (1,08 \cdot 1825\$ + 0,05\$ / lb) = 480 \$ = 375 €$$

#### 7.1.3.2. Costos indirectes anuals

Els costos indirectes anuals inclouen costos com la recuperació de capital, impostos, assegurances i despeses administratives. El cost de recuperació de capital està basat en el temps de vida de l'equip i de les taxes anuals d'interès emprades.



Pels adsorbidors, el temps de vida del sistema és típicament de deu anys, excepte pel carbó que, com ja s'ha esmentat anteriorment, es fixa en cinc anys.

Per tant, quan s'estimen els costos de recuperació de capital del sistema, s'ha de considerar el cost del capital instal·lat menys el cost de reemplaçament del carbó.

Així s'obté que el cost de recuperació de capital és:

$$CRC_s = [ICT - (1,08C_c + C_{cl})] CRF_s$$

$$CRC_s = [146410,51\$ - (1,08 \cdot 1825\$ + 0,05\$/lb)] 0,1424 = 20568 \$ = 16045 €$$

### 7.1.3.3. Ingressos per producte recuperat (RC)

La partida d'ingressos per producte recuperat és aplicable directament al COV, el qual és adsorbit, desorbit, condensat i separat del vapor de condensació. Si el COV recuperat és suficientment pur, pot ser venut.

Per altra banda, si la capa de COV conté impureses o es tracta d'una barreja de compostos, requerirà un tractament addicional, com la destil·lació.

Com a alternativa a la seva venda, el COV pot ser cremat com a combustible i avaluat com a tal. En qualsevol cas, la recuperació de crèdits (RC) pot ser calculada amb la següent expressió:

$$RC = m_{cov} \theta_s P_{cov} E$$

$$RC = 7,13lb/h \cdot 1172h/any \cdot 0,0533\$/lb \cdot 0,8 = 356,3 \$/any = 278 €/any$$



#### 7.1.3.4. Cost total anual (CTA)

A la columna de càlculs de la taula 17, es pot observar com s'han obtingut els costos directes i indirectes anuals, per tal d'aconseguir el cost total anual de la implementació del sistema d'adsorció. El procediment de càlcul també segueix els passos de la metodologia de referència.

Concepte de cost	Càlculs	Cost
<b>Cost directe anual (CD)</b>		
Mà d'obra d'operació		
Operador	Hores de treball * 6 €	7032 \$
Supervisor	15% del cost de l'operador	1054,8 \$
Manteniment		
Mà d'obra	Hores de treball * 7 €	8204 \$
Materials	100% mà d'obra de manteniment	8204 \$
Recanvi de carbó (5 anys)		
Mà d'obra	0,2439 (\$0,5/lb×Mc)	69,56 \$
Cost del carbó	0,2439 (Cc x 1,08+0,05)	480,81 \$
Serveis		
Electricitat	Consum anual * 0,06 \$/KWh	108,78 \$
Vapor	(calculat ap. 7.1.3.1.1)	336,34 \$
Aigua de refredament	(calculat ap. 7.1.3.1.2)	20 \$
<b>Total CD</b>		<b>25510,35 \$</b>
<b>Cost indirecte anual (CI)</b>		
Costos generals	60% de la mà d'obra d'operació i	14696,88 \$
Despeses d'administració	2% ICT	3329,49 \$
Assegurances	1% ICT	16647,43 \$
Amortitzacions	1% ICT	23425,22 \$
<b>Total CI</b>		<b>58099,01 \$</b>
Ingressos per producte recuperat	(calculat ap. 7.1.3.3)	356,31 \$
<b>Cost total anual</b>		<b>83253 \$</b>

Taula 17. Metodologia i càlcul del cost total anual pel sistema d'adsorció



Seguint el procediment de càlcul establert s'obté que el cost anual total en el cas de l'adsorbidor, i tenint en compte el disseny de l'equip, és de **83.253 \$, és a dir, 64.940 €**

## 7.2. Incineradors

### 7.2.1. Procediments de disseny

En el cas dels incineradors, el procediment de disseny va dirigit a corrents de gas residual que són mesclades diluïdes de COVs en aire.

Els principals paràmetres d'interès són:

- Cabals de flux del gas de combustió, sobre el qual es basen totes les correlacions dels costos de l'equip.
- Requeriments del combustible auxiliar: important per determinar els costos d'operació anuals.
- Recuperació percentual de l'energia

#### 7.2.1.1. Càlculs comuns a les unitats tèrmiques i catalítiques

Seguint amb la mateixa metodologia de càlcul del manual de costos de la EPA, es defineixen un conjunt d'especificacions pel disseny d'un incinerador que es poden observar a la taula 18 del present document. També s'hi troben dades definides segons el cas d'estudi.



Especificacions de disseny		
Raó cabal volumètric (Qwi)	4124 ft <sup>3</sup> /min = 7008 [m <sup>3</sup> /h]	
Temperatura gas residual d'entrada (Twi)	49 [°F] = 38 [°C]	
Continguts inerts	Negligible	
Contingut particulat	Negligible	
Valor calorífic	56,6 [Btu/lb]	
Contingut en humitat	Negligible	
Eficiència de control desitjada (EC %)	98 (variable)	
Recuperació energia desitjada (RE %)	0, 35, 50, 70 (variable)	
Composició química dels combustibles (Xi en ppmv)	Butildiglicol	12,07
	Dietilenglicol	18,91
	Isopropanol	28,17
	Trietanol	0,56
Eficiència destrucció COV (%)	98 (variable)	
Temperatura reactor (Tfi)	1117 [°F] = 871[°C]	
Temps residència gas residual al reactor	2 segons	

Taula 18. Especificacions inicials pel disseny d'incineradors tèrmics i catalítics

Una vegada establertes les especificacions del sistema, ja es poden realitzar els càlculs necessaris. D'aquests, n'hi ha que es calculen de la mateixa manera en els dos tipus d'incineradors: són els que s'indiquen a continuació.

Més endavant s'indiquen les operacions específiques per a cada tipus d'incinerador.

- a. Verificació que el contingut d'oxigen del gas residual excedeix el 20% del contingut en aire (% vol):

$$\text{Cont Oxig (\% en vol.)} = 100 - \frac{Bdg}{10^6} \times 100 - \frac{Dg}{10^6} \times 100 - \frac{Ipa}{10^6} \times 100 - \frac{Triet}{10^6} \times 100$$

$$100 - \left[ \left( \frac{12,07}{10^6} \cdot 100 \right) + \left( \frac{18,91}{10^6} \cdot 100 \right) + \left( \frac{28,17}{10^6} \cdot 100 \right) + \left( \frac{0,566}{10^6} \cdot 100 \right) \right] = 99,994 \%$$





$$99,994 \times 0,209 \text{ (21\% O}_2 \text{ en aire)} = \mathbf{20,898\%}$$

Segons el càlcul el contingut en oxigen és superior al 20%. Per tant és viable.

**b. Càlcul del Límit Inferior d'Explosivitat (LEL<sub>mix</sub>) i el seu percentatge (%LEL<sub>mix</sub>) de la mescla de gas:**

$$LEL_{mix} = \left[ \sum_{j=1}^n \frac{x_j}{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right) LEL_j} \right]^{-1} \text{ [ppmv]} \quad [1]$$

$$\%LEL_{mix} = \frac{\text{[conc. combustible total a la mescla]}}{LEL_{mix}} \times 100 \quad [2]$$

A partir de l'equació [1] i posteriorment calculant el percentatge mitjançant [2] s'obté:

$$\sum_{i=1}^n X_i = (12,07 + 18,91 + 28,17 + 0,566) \cdot 10^{-6} = 59,71 \cdot 10^{-6}$$

$$LEL_{mix} = \left[ \frac{18,91}{(59,71 \cdot 10000)} + \frac{28,17}{(59,71 \cdot 20000)} + \frac{0,566}{(59,71 \cdot 36000)} \right]^{-1} = 18011,76 \text{ ppmv}$$

$$\%LEL_{mix} = \frac{59,71}{18011,76} \cdot 100 = 0,33\%$$

El resultat és molt inferior al 25%. La combustió no necessitarà aire per tal de satisfer les regulacions de l'assegurança contra incendis.



**c. Calor de combustió volumètric dels corrents de gas residual.**

Com a valor del calor de combustió per la mescla de compostos orgànics volàtils en aire, s'ha utilitzat el valor definit al manual de costos de 56,6 Btu/lb. Empíricament s'ha trobat un valor més precís pel corrent d'estudi, de 54,75 Btu/lb. Per tant, si es canviés el valor en el full d'excel utilitzat per realitzar els càlculs (veure annex III), suposaria una mínima variació dels resultats.

Per aplicacions catalítiques, el manual informa que el calor de combustió ha de ser inferior a 10 Btu/scf per COVs en aire, per evitar temperatures excessivament altes al llit catalític.

**7.2.1.2. Càlculs específics per a les unitats tèrmiques**

Primerament, cal especificar que els càlculs descrits a continuació s'han resolt pels tres tipus d'incineradors possibles (tèrmic, catalític de llit fix i catalític de llit fluïditzat segons s'ha definit a la part metodològica de l'estudi) amb una recuperació fraccional de l'energia del 70%.

Tot i això, a la taula 30 dels costos anuals es poden observar els resultats dels càlculs per una recuperació d'energia del 0% (sense recuperació d'energia o també anomenat per flama directa) del 35%, del 50% i del 70%. Una recuperació energètica superior al 90% seria pròpia de sistemes regeneratius i aquests han estat descartats degut a les característiques del disseny de l'estudi.



Com s'ha resultat en el capítol anterior, en primer lloc s'adjunta una taula resum amb els requeriments inicials per la realització dels càlculs per les unitats tèrmiques:

Requeriments del combustible auxiliar (Qaf)	Capacitat calorífica aire (cpmaire)	0,255 (entre 77 i 1375°F)
	Densitat aire ( $\rho_{wo}=\rho_{wi}$ [lb/scf])	0,0739 (a 77°F i 1 atm)
	$Q_{wo} = Q_{wi}$	4124 ft <sup>3</sup> /min = 7008 m <sup>3</sup> /h
	$\Delta h_{caf}$ [Btu/lb]	21502 (Metà, combustible aux.)
	$q_{af}$ [lb/ft <sup>3</sup> ]	0,0408 (Metà, a 77°F i 1 atm)
	$T_{af} = T_{ref}$	32 [°F] = 25 °C
Temperatures	$\Delta h_{cwo}$ [Btu/lb)	56,6 [Btu/lb]
	$T_{fi}$	1117 [°F] = 871 °C
	$T_{wi}$	49 [°F] = 38 °C

Taula 19. Especificacions característiques pel disseny d'incineradors tèrmics

A continuació s'indiquen els passos que s'han de seguir per avaluar els costos dels incineradors tèrmics recuperatius:

**d. Temperatura a la que operarà l'incinerador ( $T_{fi}$  [°F] )**

Segons la legislació estatal, a un temps de residència de 2 segons i una eficiència de destrucció dels COVs del 98%, li pertoca una temperatura de funcionament d'aproximadament **1600 °F**

**e. Temperatura del gas residual a la sortida del precalentador ( $T_{wo}$ )**

$$\text{Recuperació fraccional d'energia} = \frac{T_{wo} - T_{wi}}{T_{fi} - T_{wi}} \quad (\text{tant per u})$$

$$\text{Recuperació fraccional d'energia :} \quad \frac{T_{wo} - 100}{1600 - 100} = 0,7$$

$$T_{wo} = 1150^{\circ}\text{F} = 621^{\circ}\text{C}$$



$$\text{Temperatura de sortida: } T_{f0} = -(T_{wo} - T_{wi}) + T_{fi} \quad [^{\circ}\text{F}]$$

$$T_{f0} = -(1150 - 100) + 1600 = 550^{\circ}\text{F} = 288^{\circ}\text{C}$$

f. **Requeriments del combustible auxiliar,  $Q_{af}$  [scfm]**

Amb les següents suposicions, es pot estimar  $Q_{af}$  utilitzant un balanç de massa i energia entorn la cambra de combustió.

- Se suposa que les pèrdues d'energia són un 10% de l'entrada total d'energia.
- Es pren  $T_{ref}$  com la temperatura d'entrada del combustible auxiliar ( $T_{af} = 25^{\circ}\text{C}$ , a condicions ambientals).
- Les capacitats calorífiques dels gasos residuals d'entrada i de sortida de la cambra de combustió són aproximadament les mateixes, independentment de la seva composició.
- Les capacitats calorífiques mitjanes per sobre de la temperatura de referència del gas residual d'entrada i de sortida de la cambra de combustió són aproximadament les mateixes, independentment de la temperatura. Per aquest motiu la capacitat calorífica mitjana del corrent de gas s'ha de calcular com la mitja de  $T_{wo}$  i  $T_{fi}$ . ( $C_{p_{\text{mair}}} = 0,255 \text{ Btu/lbF}$ )
- La capacitat calorífica del combustible auxiliar (metà) és:  $\Delta h_{caf} = 21.502 \text{ Btu/lb}$ .



- Com que el corrent residual és essencialment aire,  $q_{wo} = q_{wi} = 0,0739$  lb/scf, a 25 °C i 1atm, i la densitat del combustible auxiliar (metà) és de  $q_{af} = 0,0408$  lb/ft<sup>3</sup> en les mateixes condicions ambientals.

$$Q_{af} = \frac{[\rho_{wi} \times Q_{wi} \times (c_{p_{mair}}(1,1T_{fi} - T_{w0} - 0,1T_{ref}) - \Delta h_{cw})]}{[\Delta h_{caf} - 1,1c_{p_{mair}}(T_{fi} - T_{ref})] \times \rho_{af}}$$

Amb el total de requeriments descrits a la metodologia dels càlculs i mitjançant l'equació [8] es pot trobar el combustible auxiliar com:

$$Q_{af} = \frac{[0,0739 \cdot 4124 \cdot (0,255(1,1 \cdot 1600 - 1150 - 0,177) - 56,6)]}{[21502 - 1,10,255(1600 - 77)] \cdot 0,0408} = 34 \text{ scfm} = 0,963 \text{ m}^3/\text{min}$$

- g. **Verificació que el requeriment de combustible auxiliar és suficient per estabilitzar la flama del cremador**

Segons el manual, serà suficient un percentatge inferior al 5% de l'entrada total d'energia i de l'entrada total d'energia del combustible auxiliar

- h. **Cabal de flux volumètric del gas a través de l'incinerador.**

$$Q_{fi} = Q_{wo} + Q_a + Q_{af} \quad [\text{scfm}]$$

$$Q_{fi} = 4124 + 34 = 4158 \text{ scfm}$$

$$Q_{fi} = 117,74 \text{ m}^3/\text{min}$$



### 7.2.1.3. Càlculs específics per a les unitats catalítiques

La metodologia que se segueix per calcular els costos associats a un incinerador catalític divergeix en alguns passos de la utilitzada en els incineradors tèrmics. Aquest fet és degut a les restriccions addicionals que s'imposen en els catalítics.

T <sup>a</sup> sortida catalitzador (T <sub>fi</sub> )	371-482 °C
T <sup>a</sup> màx. catalitzador	649 °C

#### i. Temperatura requerida de la sortida del llit del catalitzador (T<sub>fi</sub>)

En aquest disseny no es pot excedir de 1200 °F per problemes relacionats amb la desactivació catalítica. El rang de temperatures va des de 300 a 900 °F

En el cas d'estudi s'utilitzarà: T<sub>fi</sub> = 900 °F = 482 °C

#### j. Temperatura del gas residual a la sortida del intercanviador precalentador (primari) de calor

Es calcula de la mateixa manera que en l'incinerador tèrmic

$$\text{Recuperació fraccional d'energia: } \frac{T_{wo} - 100}{900 - 100} = 0,7$$

$$T_{wo} = 660^{\circ}\text{F} = 349^{\circ}\text{C}$$

$$T_{fo} = -(660 - 100) + 900 = 340^{\circ}\text{F} = 171^{\circ}\text{C}$$



**k. Càlcul del requeriment de combustible auxiliar (Q<sub>af</sub>)**

En aquest cas també es realitza un balanç d'energia com en l'estudi de l'incinerador tèrmic. Només se'n diferencia la capacitat calorífica mitjana per aire entre 77°F i 780 °F, ja que pren un valor de 0,248 Btu/lbF, i naturalment les temperatures associades al procés.

$$Q_{af} = \frac{[0,0739 \cdot 4124 \cdot (0,248(1,1900 - 660 - 0,177) - 56,6)]}{[21502 - 1,10,248(900 - 77)] \cdot 0,0408} = 8 \text{ scfm} = 0,22 \text{ m}^3/\text{min}$$

**l. Verificació que el requeriment de combustible auxiliar és suficient per establir la flama del cremador.**

Com en el cas anterior, el requeriment del combustible auxiliar és més que suficient per establir la flama del cremador

**m. Temperatura d'entrada al llit del catalitzador (T<sub>ri</sub>)**

Es necessita una mínima temperatura d'entrada al llit del catalitzador per tal que quan se li agregui la temperatura d'elevació a través del llit del catalitzador, la resultant sigui de 900°F

Elevació de la temperatura a través del llit del catalitzador  $\Delta T = T_{fi} - T_{ri}$   
(temperatura sortida reactor – temperatura entrada)



$$T_{ri} = \frac{\rho_{af} \times Q_{af} [\Delta h_{caf} + 1,1C_{pmair} \times T_{ref}] + r_{wo} \times Q_{wo} \times C_{pmair} \times (T_{wo} + 0,1T_{ref})}{1,1C_{pmair} (\rho_{af} \times Q_{af} + \rho_{wo} \times Q_{wo})}$$

$$T_{ri} = \frac{0,048 \cdot 8 [21502 + 1,10,248 \cdot 77] + 0,0739 \cdot 4124 \cdot 0,248 \cdot (660 + 0,1 \cdot 77)}{1,10,248 (0,0408 \cdot 8 + 0,0739 \cdot 4124)} = 693^{\circ} F$$

$$T_{ri} = 367,22^{\circ} C$$

$$\Delta T = 900 - 693 = 207^{\circ} F = 97,2^{\circ} C$$

**n. Raó de flux volumètric total del gas a través de l'incinerador (Q<sub>fi</sub>)**

És la suma dels corrents d'entrada a l'incinerador catalític, de la mateixa manera com ho era en el tèrmic.

$$Q_{fi} = 4124 + 8 = 4132 \text{ scfm}$$

$$Q_{fi} = 117 \text{ m}^3/\text{min}$$

**o. Volum del catalitzador en el llit del catalitzador (ft<sup>3</sup>):**

En el cas d'estudi s'ha escollit un catalitzador monolític de metalls nobles per tal que elimini el percentatge desitjat de compostos orgànics volàtils.

Aquests, operen sobre gasos d'hidrocarburs purs en aire, com en el nostre cas d'estudi. En canvi, els catalitzadors a base d'òxids metàl·lics operen sobre hidrocarburs clorats en aire. Cal especificar que la tipologia de catalitzadors utilitzats és més cara (3000\$/ft<sup>3</sup>), però també dura més (de 3 a 4 anys de vida).





Existeix una relació per calcular el volum del catalitzador, però es computa a una temperatura de 60 °F i no de 77 °F. Per aquest motiu es pot corregir la raó del flux volumètric com:

$$Q_{fi} \text{ a } 60^{\circ}\text{F} = Q_{fi} [(60+460)/(77+460)] = 0,9683 Q_{fi} \text{ [ft}^3\text{/min]}$$

$$Q_{fi} \text{ a } 60^{\circ}\text{F} = 4132(0,9683) = 4001 \text{ [ft}^3\text{/min]} = 113,3 \text{ m}^3\text{/min}$$

La raó especial ( $\emptyset$ ) apropiada per obtenir el nivell desitjat de conversió en el llit del catalitzador depèn de la tipologia d'aquest. En el cas d'estudi s'usarà 500 min<sup>-1</sup> com a valor més apropiat.

$$\phi = \frac{Q_{fi}}{V_{cat}} \quad ; \quad V_{cat} = \frac{4001}{500} = 8 \text{ ft}^3 = 0,226 \text{ m}^3$$

Hi ha certs paràmetres del llit del catalitzador tals com la configuració i el disseny del llit que no són importants per les estimacions de costos. Per aquest motiu, el disseny d'aquests factors no es discuteix en aquest document.



A continuació es pot observar una taula amb els paràmetres de disseny obtinguts per cada tipus d'incinerador amb els percentatges de recuperació d'energia corresponents:

Paràmetres calculats	Percentatge recuperació de l'energia (%)			
	0	35	50	70
<b>Tèrmic</b>				
Two (° C)	38	330	455	621
Tfo (° C)	871	580	455	288
Qaf (m <sup>3</sup> /min)	3,65	2,32	1,72	0,96
Qtot = Qfi (m <sup>3</sup> /min)	120,43	119	118	118
<b>Catalítics</b>				
Two (° C)	38	193	260	349
Tfo (° C)	482	327	260	171
Qaf (m <sup>3</sup> /min)	0,37	0,93	0,63	0,22
Qtot = Qfi (m <sup>3</sup> /min)	116,4	118	117,4	117
Tri (° C)	84	225	286	367
ΔT	716	462	353	207
Vcat (m <sup>3</sup> )	7,96	0,23	0,22	0,226

Taula 20. Càlcul dels paràmetres per cada tipus d'incinerador, en funció de la recuperació d'energia.

## 7.2.2. Estimació de la inversió inicial de capital

El procediment a seguir segons el manual permet estimar els costos del capital i els costos anuals per quatre tipus d'incineradors: tèrmics-recuperatius, tèrmics-regeneratius, catalítics de llit fix i catalítics de llit fluiditzat.

Mitjançant les corbes de cost es tindrà coneixement de quin tipus de disseny s'adequa més a les dades de l'estudi de cas i, per tant, quina tipologia d'oxidació serà més interessant per portar a terme, econòmicament parlant.

Igualment que en el punt anterior, s'ha realitzat un càlcul d'exemple (cas d'exemple per incineradors tèrmics de flama directa). Els resultats totals s'han introduït a les taules 27, 28 i 29 del present document.



### 7.2.2.1. Cost de l'equip

Inclou tots els equips necessaris per oxidar el gas residual, incloent els cremadors auxiliars, les cambres de combustió, el catalitzador, l'intercanviador de calor primari (excepte en els casos que no hi ha recuperació d'energia), les proteccions i aïllaments, els ventiladors, els sistemes de control de flux i temperatura, una xemeneia i suports estructurals.

A continuació es pot observar la tipologia d'incineradors en funció de l'amplitud de la Correlació de Costos:

Tipus d'incinerador	cabal total de gas [scfm]	Nº de la figura
Tèrmic - Recuperatiu	500 - 50,000	24
Tèrmic - Regeneratiu	10,000 - 100,000	-
Catalític Llit fix	2,000 - 50,000	25
Catalític Llit Fluïditzat	2,000 - 25,000	26

Taula 21. Tipus d'incinerador en funció del cabal total de gas

Com s'observa a la taula 21, l'únic tipus d'incinerador que no entra dins el rang de cabals, i per tant resta fora de l'estudi de costos és l'incinerador Tèrmic - Regeneratiu, amb el doble de cabal necessari d'entrada de gas que el del cas avaluat (4124 Scfm)

La tipologia d'incineradors, en funció del flux volumètric de gas es pot aproximar al cost total que tindria cada sistema de tractament a partir de les corbes de cost.

Les corbes de cost, són regressions per mínims quadrats de dades de cost proporcionades per diferents proveïdors.



En aquest gràfic es poden observar els costos d'equip totals pels diferents tipus de tractament, amb una recuperació del 50% de l'energia.

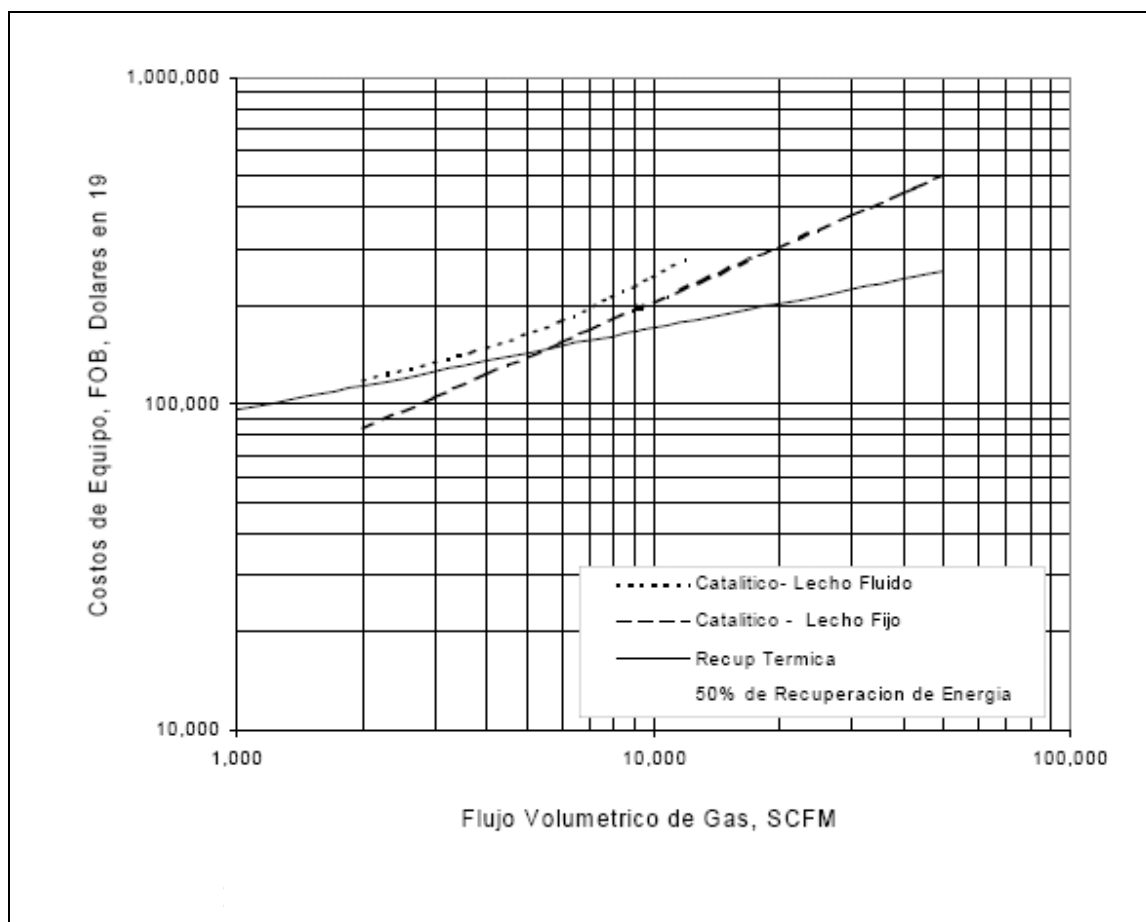


Fig. 23. Comparació de costos de tipus d'equip o incinerador

Pel cas d'estudi, el tractament idoni per a l'eliminació de COVs en funció del seu volum és el tèrmic amb o sense recuperació (flama directa), el catalític de llit fix així com el de llit fluïditzat.

El model tèrmic regeneratiu està dissenyat per un volum de COVs superior als 10000scfm.



### a. Incineradors tèrmics

Els sistemes de flama directa (0% de recuperació d'energia) i els recuperatius es tracten conjuntament perquè els últims s'obtenen a partir dels primers, agregant àrea superficial a l'intercanviador de calor.

S'ha trobat una relació dels costos de l'equip (EC) per a un nivell donat de recuperació de calor. A continuació s'indica la relació per a quatre percentatges concrets de recuperació:

- $EC = 10,294 \times Q_{tot}^{0,2355}$  Recuperació = 0%
- $EC = 13,149 \times Q_{tot}^{0,2609}$  Recuperació = 35%
- $EC = 17,056 \times Q_{tot}^{0,2502}$  Recuperació = 50%
- $EC = 21,342 \times Q_{tot}^{0,2500}$  Recuperació = 70%

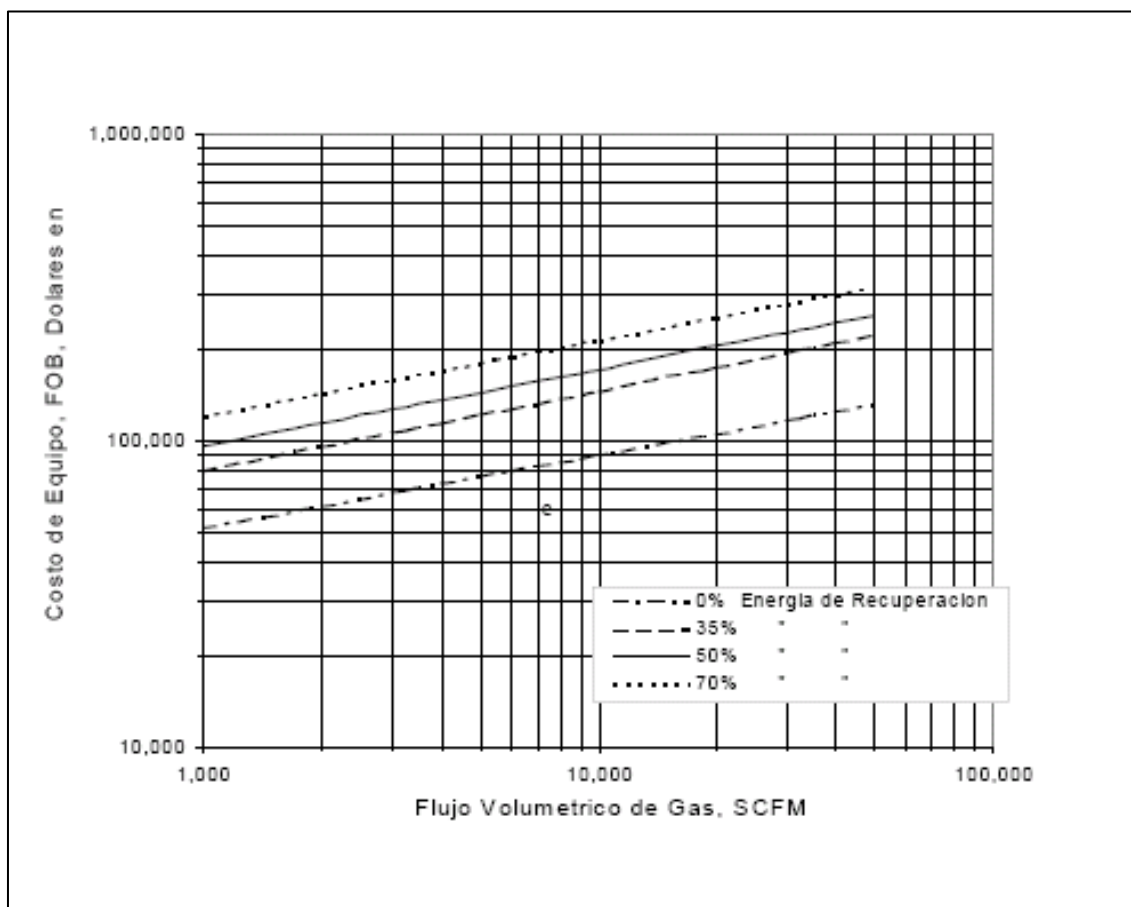


Fig 24. Corbes de cost dels incineradors tèrmics, recuperatius, segons el percentatge de recuperació



Com s'observa al gràfic, els costos més elevats de les unitats amb un gran percentatge de recuperació poden ser compensats per l'estalvi en els costos del combustible auxiliar.

L'incinerador tèrmic regeneratiu permetria una recuperació del 95% de l'energia, però no es tindrà en compte en aquest estudi ja que, com s'ha dit anteriorment, el seu disseny no s'adequa al volum de COVs a tractar per l'estudi en qüestió.

Els costos d'equip per aquestes unitats estan donats com a funció de sortida volumètrica total ( $Q_{tot}$  [scfm]) i, per tant, significa exactament el mateix que el terme  $Q_{fi}$  utilitzat en la present metodologia.

#### **b. Incineradors catalítics de llit fix o monolític**

Els costos d'equip és una funció del tipus de patró que s'utilitzi per fer el contacte entre el catalitzador i la raó de flux total del gas ( $Q_{tot}$ ).

També es pot diferenciar diferents nivells de recuperació d'energia, de la mateixa manera que en el cas anterior.

S'observen les següents correlacions per raons de flux totals entre 2000 i 5000 scfm:

- $EC = 1105 Q_{tot}^{0,5471}$                       Recuperació = 0%
- $EC = 3623 Q_{tot}^{0,4189}$                       Recuperació = 35%
- $EC = 1215 Q_{tot}^{0,5575}$                       Recuperació = 50%
- $EC = 1443 Q_{tot}^{0,5527}$                       Recuperació = 70%

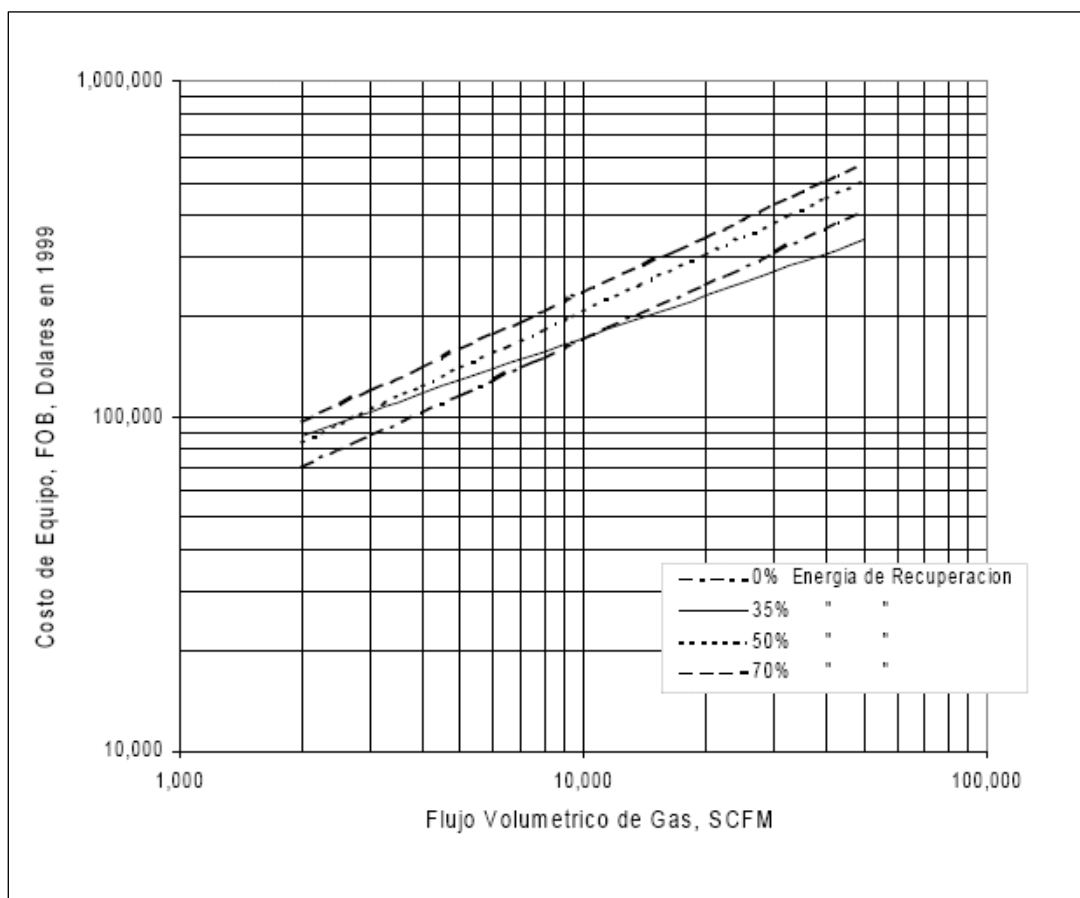


Fig.25. Costos de l'equip d'incineradors catalítics de llit fix segons el percentatge de recuperació

### c. Incineradors catalítics de llit fluïditzat

En el cas dels incineradors de llit fluïditzat, els costos d'equip estan en funció dels mateixos paràmetres que en el cas dels incineradors de llit fix.

Els catalítics de llit fluïditzat proporcionen certs avantatges respecte els anteriors, ja que toleren corrents residuals amb valors calorífics més elevats, amb contingut de particulats i amb espècies clorades.

Tot i això, i per aquesta major flexibilitat, tindran costos de capital superiors.



Els costos de l'equip s'aproximen a les equacions següents:

- $EC = 8,48 \cdot 10^{-4} + 13,2Q_{tot}$  Recuperació = 0%
- $EC = 8,84 \cdot 10^{-4} + 14,6Q_{tot}$  Recuperació = 35%
- $EC = 8,66 \cdot 10^{-4} + 15,8Q_{tot}$  Recuperació = 50%
- $EC = 8,39 \cdot 10^{-4} + 19,2Q_{tot}$  Recuperació = 70%

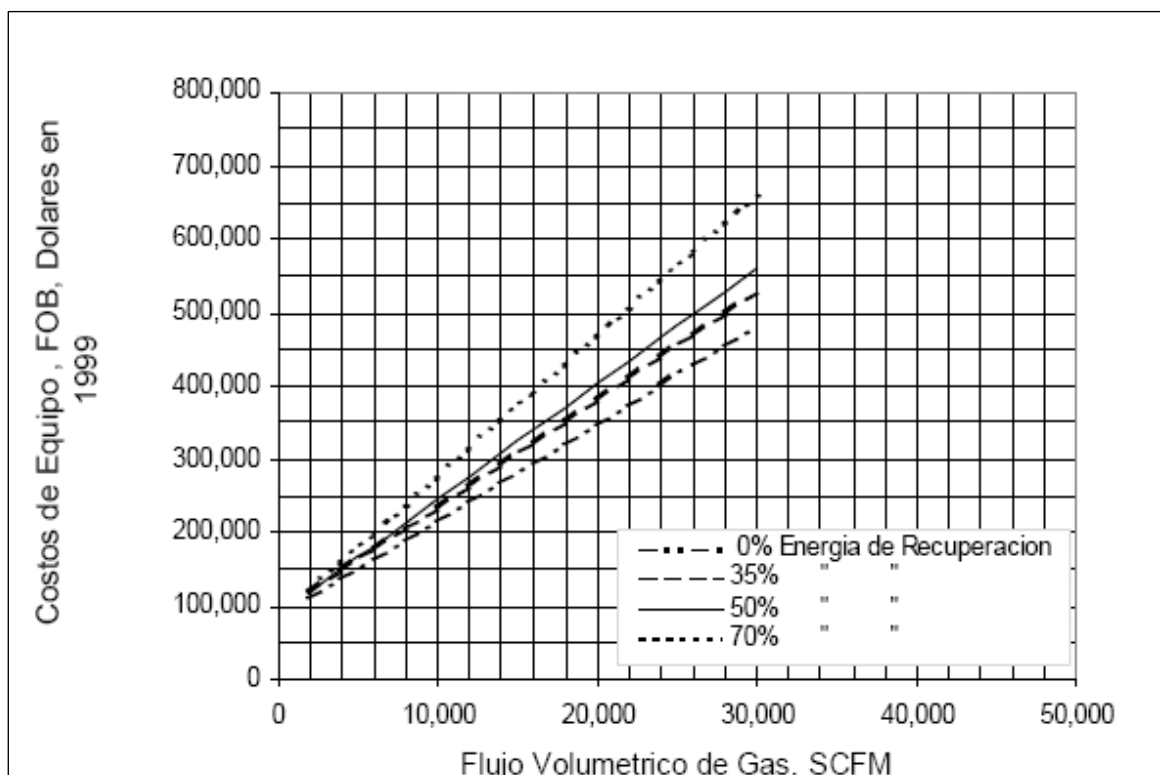


Fig 26. Corbes de cost dels incineradors catalítics de llit fluïditzat segons el percentatge de recuperació

#### 7.2.2.2. Cost de la instal·lació

El Cost de l'Equip Comprat anomenat CEC, es calcula a partir del cost de l'equip.

A la taula 25, es mostren detallats els costos d'instal·lació que s'obtenen quan aquests factors d'instal·lació s'apliquen als CECs.





Segons les especificacions del manual, les unitats que treballen amb raons de flux inferiors a 20.000 scfm tenen uns mínims costos d'instal·lació (serien aproximadament del 20 al 25% del CEC)

### 7.2.3. Estimació del cost anual total

#### 7.2.3.1. Costos directes anuals

Com s'orienta a la taula 26, inclouen la mà d'obra (d'operació i de supervisió), el manteniment (mà d'obra i materials), combustible, electricitat i catalitzador de recanvi (a les unitats catalítiques). En el cas d'estudi s'ha suposat que el combustible auxiliar és gas natural (metà).

Els costos de l'electricitat estan associats bàsicament amb el ventilador necessari per a moure el gas a través de l'incinerador. El consum necessari d'electricitat en KW necessaris per la potència del ventilador cal multiplicar-la pel total d'hores anuals de funcionament i es descriu segons l'equació següent:

$$Potencia_{ventilador} = \frac{117 \times 10^{-4} Q_v \Delta P}{\epsilon}$$

Les eficiències del ventilador ( $\epsilon$ ) poden variar des d'un 40 a un 70 %. En el present estudi s'ha suposat una eficiència del 60% pel ventilador i el motor junts, seguint les especificacions del manual.

La caiguda de pressió ( $\Delta P$ ) del sistema de l'incinerador és funció de la recuperació d'energia depèn de la taula següent:



Tipus d'equip	Recuperació d'energia (%)	Caiguda de pressió típica
Incinerador tèrmic	0	4
Incinerador catalític de llit fix	0	6
Incinerador catalític de llit fluïditzat	0	6-10
Intercanviador de calor	35	4
Intercanviador de calor	50	8
Intercanviador de calor	70	15

Taula 22. Caiguda de pressió típica per l'incinerador

Seguidament es poden calcular els costos anuals d'electricitat, ja que serien els productes d'aquests usos, les hores d'operació manuals i el cost de l'electricitat (\$/KWh)

$$\text{Cost electricitat termica} = \text{potencia ventilador} \cdot \frac{\text{hores}}{\text{any}} \cdot \frac{\$}{\text{KWh}}$$

Els costos de reposició del catalitzador són molt variables i depenen de la naturalesa del catalitzador, de la quantitat de "verins" i de particulats en la corrent de gas, de l'historial de temperatures del catalitzador i del disseny de la unitat.

Com s'ha definit a l'apartat o del present document, en el cas d'estudi s'ha utilitzat un catalitzador monòlit de metalls nobles, concretament de platí, ja que opera amb gasos hidrocarburs purs en aire i tenen un temps de vida superior als catalitzadors en base a metall (normalment usats en llits fluïditzables), tot i que aquests últims són més força més barats.

Suposarem que la vida del catalitzador és de 2 anys. Coneixent el volum del catalitzador (ft<sup>3</sup>) i utilitzant el cost preu/volum i un factor de recuperació del capital de 0,5531 (una vida de 2 anys i un interès del 7%), és possible conèixer les despeses anuals del catalitzador de recanvi.



Per calcular el cost anual de combustible (gas natural) també és necessari multiplicar la taxa de consum del combustible pel cost unitari del gas natural estipulat com a 0,0033 \$/scf.

Exemple de càlcul de la potència del ventilador amb una eficiència del 60% en un sistema d'incineració tèrmica de flama directa (sense recuperació). Mirar la taula 23 per tal d'identificar la caiguda de pressió que li correspon en cada cas.

Per tant, si s'utilitza un incinerador catalític de llit fix a un 70% d'energia de recuperació, la caiguda de pressió serà = 6 +15 = 21.

D'aquesta forma trobem que:

Tipus incinerador	Caiguda de pressió segons percentatge recuperació			
	0 %	35 %	50 %	70 %
Tèrmic	4	8	12	19
Catalític llit fix	6	10	14	21
Catalític llit fluiditzat	8	12	16	23

Taula 23. Caiguda de pressió típica en funció dels percentatges de recuperació

$$Potencia_{ventilador} = \frac{1,17 \cdot 10^{-4} (4158) 4}{0,6} = 3,24 \text{ KWh}$$

Exemple de càlcul del cost de l'electricitat segons el consum d'aquesta per part del sistema d'incineració amb 0% de recuperació

$$Cost \text{ electricitat termica} = 3,24 \cdot 1172 \cdot 0,06 = 227,83 \text{ \$/any} = 177,7 \text{ €/any}$$

A continuació es pot observar una taula resum amb els consums i els seus costos corresponents per tots els tipus i modalitats d'incineradors tractats.



Tipus incinerador	Percentatge recuperació	Potència ventilador (KW)	Consum ventilador (KWh)	Cost electricitat (€)
<b>Tèrmic</b>	0	3,24	3780	177,88
	35	6,49	7605	362,8
	50	9,73	11405	533,6
	70	15,41	18060	845
<b>Catalític llit fix</b>	0	4,83	5660	265
	35	8,06	9445	442
	50	11,28	13220	718,7
	70	16,92	19830	928
<b>Catalític llit fluïditzat</b>	0	6,45	7560	353,5
	35	9,67	11335	707
	50	12,89	15110	707
	70	18,53	21720	1016,5

Taula 24. Costos totals d'energia elèctrica per cada tipus d'incinerador, en funció del seu consum

## 7.2.4. Estimació del cost anual total

### 7.2.4.1. Costos indirectes anuals

De la mateixa manera que en l'apartat anterior, s'ha calculat la inversió inicial de capital (mitjançant la taula 16) i els costos totals anuals (mitjançant el model de taula 17) pels incineradors tèrmics i recuperatius de llit fix i de llit fluïditzat amb els quatre percentatges escollits de recuperació d'energia.

Les taules 27, 28 i 29 que segueixen als models són les corresponents als resultats de la inversió inicial de capital. En cada taula s'ha obtingut els costos per un tipus diferent d'incinerador, en els quatre percentatges de recuperació d'energia.



La taula 30 correspon als costos totals anuals. També porta associada els costos obtinguts en la metodologia de càlcul per cada tipus d'incinerador.

<b>Concepte de Cost</b>	<b>Factor</b>
<b>Costos Directes</b>	
Costos de l'equip comprat	
Incinerador (EC)	Tal com s'ha estimat, A
Instrumentació	0,1 A
Impost sobre el valor afegit	0,16 A
Nòlit	0,05 A
<b>Cost de l'equip comprat (CEC)</b>	<b>B = 1,31 A</b>
Costos directes d'instal·lació	
Ciments i suports	0,08 B
Maneig i col·locació	0,14 B
Elèctric	0,04 B
Canonada	0,02 B
Aïllant pels conductes	0,01 B
Pintura	0,01 B
Costos directes d'instal·lació	0,3 B
Preparació del lloc	Segons es requereixi, C
Edifici	Segons es requereixi, D
<b>Costos Directes Totals (CD)</b>	<b>1,3 B + C + D</b>
<b>Costos Indirectes (instal·lació)</b>	
Enginyeria	0,1 B
Construcció i despeses de camp	0,05 B
Honoraris dels contractistes	0,1 B
Arrancada	0,02 B
Proves de funcionament	0,01 B
Contingències	0,03 B
<b>Costos Indirectes Totals (CI)</b>	<b>0,31 B</b>
<b>Inversió inicial de capital: CD + CI</b>	<b>1,61 B + C + D</b>

Taula 25. Model de càlcul per la inversió inicial de capital en incineradors.



Cal especificar que el manual suposa el cost de recuperació del capital a partir d'una estimació de la vida de l'equip de 10 anys. Aquest es defineix com el producte del CRF per l' ICT. D'aquest producte, cal restar-hi el cost de compra del catalitzador, que és el propi cost multiplicat pel factor 1,08 dels nòlits i els impostos sobre el valor afegit.

Concepte de Cost	Factor suggerit	Cost de la unitat
<b>Costos Anuals Directes, CD</b>		
Mà d'obra		
Operador	1172 h/any	4,68 €/any
Supervisor	15% de l'operador	
Materials operatius		
Manteniment		
Mà d'obra	1172h/any	5,46 €/any
Materials	100% mà d'obra de manteniment	
Recanvi catalítics	100% del recanvi catalítics	3000 \$/ft <sup>3</sup>
Utilitats		
Gas Natural	1172 h/any pel consum	0,033 \$/ft <sup>3</sup>
Electricitat	1172 h/any pel consum	0,006 \$/KWh
<b>Total DC</b>		
<b>Costos Indirectes Anuals, CI</b>		
Costos generals	60% de la suma de la mà d'obra d'operació, supervisió i manteniment i materials de manteniment	-
Despeses d'administració	2% TCI	-
Assegurança	1% TCI	-
Amortitzacions	<b>CRF [TCI - 1,08 (cost de catalitz)]</b>	-
<b>Costos Anuals Totals</b>		

Taula 26. Model de càlcul dels costos anuals totals en incineradors.



Concepte de Cost	Incineradors tèrmics de flama directa i recuperatius			
Costos Directes	Cost segons percentatge de recuperació (\$)			
	RE = 0%	RE = 35%	RE = 50%	RE = 70%
Costos de l'equip comprat				
Incinerador (EC)	73644,8	115973,9	137412,2	171378,5
Instrumentació	7364,5	11597,4	13741,2	17137,8
Impost sobre ventes	2209,3	3479,2	4122,4	5141,4
Fletes	3682,2	5798,7	6870,6	8568,9
Cost de l'equip comprat (CEC)	86900,8	136849,2	162146,4	202226,6
Costos directes d'instal·lació				
Ciments i suports	6952,1	10947,9	12971,7	16178,1
Maneig i col·locació	12166,1	19158,9	22700,5	28311,7
Elèctric	3476,0	5474,0	6485,9	8089,1
Tuberia	1738,0	2737,0	3242,9	4044,5
Aïllant pels conductes	869,0	1368,5	1621,5	2022,3
Pintura	869,0	1368,5	1621,5	2022,3
Costos directes d'instal·lació	<b>26070,2</b>	<b>41054,8</b>	<b>48643,9</b>	<b>60668,0</b>
Preparació del lloc	No es requereix			
Edifici	No es requereix			
<b>Costos Directes Totals (CD)</b>	<b>112971,1</b>	<b>177903,9</b>	<b>210790,4</b>	<b>262894,6</b>
<b>Costos Indirectes (instal·lació)</b>				
Enginyeria	8690,1	13684,9	16214,6	20222,7
Construcció i despeses de camp	4345,0	6842,5	8107,3	10111,3
Honoraris dels contractistes	8690,1	13684,9	16214,6	20222,7
Arrancada	1738,0	2737,0	3242,9	4044,5
Proves de funcionament	869,0	1368,5	1621,5	2022,3
Contingències	2607,0	4105,5	4864,4	6066,8
Costos Indirectes Totals (CI)				
<b>Inversió inicial del Capital: CD + CI</b>	<b>26939,3 \$ = 21013 €</b>	<b>42423,2 \$ = 33090 €</b>	<b>50265,4 \$ = 39207 €</b>	<b>62690,2 \$ = 48898 €</b>

Taula 27. Inversió del capital total per l'incinerador tèrmic



Concepte de Cost	Incineradors catalítics de llit fluiditzat			
Costos Directes	Cost segons percentatge de recuperació (\$)			
	RE = 0%	RE = 35%	RE = 50%	RE = 70%
Costos de l'equip comprat				
Incinerador (EC)	54265,2	60692	65507	79334
Instrumentació	5426,5	6069,2	6550,7	7933,4
Impost sobre ventes	1628	1820,8	1965,2	2380
Fletes	2713,3	3034,6	3275,3	3966,7
Cost de l'equip comprat (CEC)	64032,9	71616,8	77298	93614,6
Costos directes d'instal·lació				
Ciments i suports	5122,6	5729,3	6183,8	7489,2
Maneig i col·locació	8964,6	10026,4	10821,7	13106
Elèctric	2561,3	2864,7	3091,9	3744,6
Tuberia	1280,7	1432,3	1546	1872,3
Aïllant pels conductes	640,3	716,2	773	936,1
Pintura	640,3	716,2	773	936,1
Costos directes d'instal·lació	<b>19209,9</b>	<b>21485</b>	<b>23189,4</b>	<b>28084,4</b>
Preparació del lloc				
Edifici				
<b>Costos Directes Totals (DC)</b>	<b>83242,8</b>	<b>93101,8</b>	<b>100487,4</b>	<b>121699</b>
<b>Costos Indirectes (instal·lació)</b>				
Enginyeria	6403,3	7161,7	7729,8	9361,5
Construcció i despeses de camp	3201,6	3580,8	2864,9	4680,7
Honoraris dels contractistes	6403,3	7161,7	7729,8	9361,5
Arrancada	1280,7	1432,3	2546	1872,3
Proves de funcionament	640,3	716,2	773	936,1
Contingències	1921	2148,5	2318,9	2808,4
Costos Indirectes Totals (CI)	19850,2	22201,2	23962,4	29020,5
<b>Inversió inicial del Capital: CD + CI</b>	<b>103093 \$ = 80412 €</b>	<b>115303 \$ = 89936 €</b>	<b>124450 \$ = 97071 €</b>	<b>150719 \$ = 117561 €</b>

Taula 28. Inversió del capital total per l'incinerador catalític de llit fluiditzat





Concepte de Cost	Incineradors catalítics de llit fix			
Costos Directes	Cost segons percentatge de recuperació (\$)			
	RE = 0%	RE = 35%	RE = 50%	RE = 70%
Costos de l'equip comprat				
Incinerador (EC)	104846,3	118843	126300	143853
Instrumentació	10484,6	11884,3	12630	14385,3
Impost sobre ventes	3145,4	3565,3	3789	4315,6
Fletes	5242,3	5942,2	6315	7192,6
Cost de l'equip comprat (CEC)	123718,6	140235,3	149034,4	169746,2
Costos directes d'instal·lació				
Ciments i suports	9897,5	11218,8	11922,8	13579,7
Maneig i col·locació	17320,6	19632,9	20864,8	23764,5
Elèctric	4948,7	5609,4	5961,4	6789,8
Tuberia	2474,4	2804,7	2980,7	3394,9
Aïllant pels conductes	1237,2	1402,4	1490,3	1697,5
Pintura	1237,2	1402,4	1490,3	1697,5
Costos directes d'instal·lació	<b>37115,6</b>	<b>42070,6</b>	<b>44710,3</b>	<b>50923,9</b>
Preparació del lloc	No es requereix			
Edifici				
<b>Costos Directes Totals (CD)</b>	<b>160834,2</b>	<b>182305,9</b>	<b>193744,8</b>	<b>220670,1</b>
<b>Costos Indirectes (instal·lació)</b>				
Enginyeria	12371,9	14023,5	14903,4	1674,6
Construcció i despeses de camp	6185,9	7011,8	7451,7	8487,3
Honoraris dels contractistes	12371,9	14023,5	14903,4	16974,6
Arrancada	2474,4	2804,7	2980,7	3394,9
Proves de funcionament	1237,2	1402,4	1490,3	1697,5
Contingències	3711,6	4207,1	4471	5092,4
Costos Indirectes Totals (CI)	38352,8	43472,9	46200,7	52621,3
<b>Inversió inicial del Capital: CD + CI</b>	<b>199187 \$ = 155366 €</b>	<b>225779 \$ = 176107 €</b>	<b>239945 \$ = 187157 €</b>	<b>273291 \$ = 213167 €</b>

Taula 29. Inversió del capital total per l'incinerador catalític de llit fix



Concepte de Cost	Tèrmic recuperatiu (\$)				Catalític de llit fix (\$)				Catalític de llit fluïditzat (\$)			
	0 %	35 %	50 %	70 %	0 %	35 %	50 %	70 %	0 %	35 %	50 %	70 %
<b>Costos Anuals Directes,CD</b>												
Mà d'obra												
Operador	7032	7032	7032	7032	7032	7032	7032	7032	7032	7032	7032	7032
Supervisor	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8	1054,8
Materials operatius												
Manteniment												
Mà d'obra	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204
Materials	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204	8204
Recanvi catalític	0	0	0	0	13208	13357,4	13324,2	13274,4	13208	13357,4	13324,2	13274,4
Utilitats												
Gas Natural	7889,90	7889,90	7889,90	7889,90	1856,45	1856,45	1856,45	1856,45	1856,45	1856,45	1856,45	1856,45
Electricitat	228,06	465,13	684,19	1083,3	339,96	566,6	793,23	1189,85	453,28	679,92	906,55	1303,17
<b>Total CD</b>	<b>25176,4</b>	<b>25248,2</b>	<b>25393,5</b>	<b>25697,7</b>	<b>37992,5</b>	<b>38546,4</b>	<b>38697,3</b>	<b>38990</b>	<b>38105,8</b>	<b>38659,7</b>	<b>38810,6</b>	<b>39103,3</b>
<b>Costos Indirectes ,CI</b>												
Costos generals	14696,88	14696,88	14696,88	14696,88	16688,8	16954,7	17096,3	17429,8	15727,8	15849,9	15941,4	16204,1
Despeses d'administració	538,786	848,464	1005,308	1253,804	3983,74	4515,58	4798,9	5465,82	2061,86	2306,06	2489	3014,38
Assegurança	269,393	424,232	502,654	626,902	1991,87	2257,79	2399,45	2732,91	1030,93	1153,03	1244,5	1507,19
Amortitzacions	23699	39183	47025	59450	195947	222539	236705	270051	99853	112063	121210	147479
<b>Cost total anual (\$)</b>	<b>39204,4</b>	<b>55152,8</b>	<b>63230,2</b>	<b>76027,8</b>	<b>218611,36</b>	<b>24267,04</b>	<b>260999,68</b>	<b>295679,52</b>	<b>118673,6</b>	<b>131372</b>	<b>140884,88</b>	<b>168204,64</b>
<b>Cost total anual arrodonit (€)</b>	<b>30579</b>	<b>43019</b>	<b>49320</b>	<b>59302</b>	<b>170517</b>	<b>192088</b>	<b>203580</b>	<b>230630</b>	<b>92565</b>	<b>102470</b>	<b>109890</b>	<b>131200</b>

Taula 30. Inversió del cost total arrodonit pels sistemes d'incineració corresponents a l'estudi



## 8. Avaluació ambiental

### 8.1. Consum energètic

En el càlcul de les càrregues ambientals per part dels consum energètics, es diferencia la contribució en Kg de CO<sub>2</sub> equivalents per part de les dues fonts energètiques emprades en els tres processos a avaluar: electricitat i gas natural.

#### 8.1.1. Electricitat

L'electricitat és la principal font energètica usada en comú en els tres tractaments d'estudi. Es troba una relació entre els KWh consumits d'electricitat i gas natural i les emissions de CO<sub>2</sub> associades a l'ús de les anteriors fonts energètiques:

Font energètica	CO <sub>2</sub>
Electricitat	0,4556
Gas natural	0,401

Taula 31. Emissions (Kg) de CO<sub>2</sub> per KWh consumit

Tenint en compte el consum elèctric de cada tractament, es pot obtenir els Kg de CO<sub>2</sub> equivalents emesos en cada procés, segons la taula 32:



Tractament	Consum elèctric (KWh)	Kg CO <sub>2</sub>
<b>Adsorció</b>	<b>1.815</b>	<b>827</b>
<b>Oxidació tèrmica</b>		
Recuperació 0%	3.800	1.730
Recuperació 35 %	7.600	3.460
Recuperació 50 %	11.400	5.195
Recuperació 75 %	18.060	8.230
<b>Oxidació catalítica (llit fix)</b>		
Recuperació 0%	5.660	2.580
Recuperació 35 %	9.450	4.305
Recuperació 50 %	13.220	6.025
Recuperació 75 %	19.830	9.035
<b>Oxidació catalítica (llit fluïditzat)</b>		
Recuperació 0%	7.560	3.445
Recuperació 35 %	13.330	6.075
Recuperació 50 %	15.110	6.885
Recuperació 75 %	21.720	9.895

Taula 32. Quantitat de CO<sub>2</sub> emès a l'atmosfera en funció del consum elèctric de l'incinerador

### 8.1.2. Gas natural

Tenint en compte la relació anterior dels KWh consumits, es procedeix a continuació a determinar la càrrega ambiental dels processos que utilitzen el gas natural com a font energètica.

En aquest cas només s'avalua l'oxidació tèrmica i l'oxidació catalítica, ja que en el procés d'adsorció per carbó actiu no s'utilitza el gas natural com a combustible.

Degut a què els càlculs de consum es calculen en m<sup>3</sup> de gas natural, és necessari trobar una relació del poder calorífic del gas natural per poder-lo avaluar en KWh consumits.

La relació entre m<sup>3</sup> de gas natural i KWh està fixada en 11,6 KWh de consum elèctric per cada 1 m<sup>3</sup> de gas natural consumit, com s'observa a la taula següent:



Tractament	Consum gas natural (m <sup>3</sup> )	Consum gas natural (KWh)	Kg CO <sub>2</sub>
<b>Oxidació tèrmica</b>	67.700	785.320	314.915
<b>Oxidació catalítica</b>	15.930	184.788	74.100

Taula 33. Emissió de CO<sub>2</sub> en funció del consum de combustible auxiliar dels incineradors

## 8.2. Consum material

En el cas d'estudi s'ha considerat avaluar la producció de carbó actiu i la producció del catalitzador (TiO<sub>2</sub>) com a principals factors ambientals a tenir en compte.

La producció, tant del carbó actiu com del catalitzador, porta associada una càrrega ambiental que contribueix a una emissió de CO<sub>2</sub>.

### 8.2.1. Carbó actiu

De la mateixa manera que en el cas del consum energètic, es troba una relació entre la producció d'un Kg de carbó actiu i l'energia consumida en la producció d'aquest.

Font energètica	Carbó actiu
<b>Electricitat (KWh)</b>	1,6
<b>Gas natural (m3)</b>	0,33

Taula 34. Contribució energètica en la producció d'un Kg de carbó actiu

Prenent com a referència l'ús d'un carbó actiu amb una capacitat d'equilibri de 0,45 gr COV/gr carbó actiu, el requeriment de carbó en el sistema és de 260 Kg de carbó actiu en llit. Tenint el valor de requeriment de carbó per al sistema es determinen les emissions de CO<sub>2</sub> equivalents:



■ **Consum elèctric**

$$260 \text{ Kg de carbó actiu} \cdot \frac{1,6 \text{ KWh consumits}}{\text{Kg de carbó actiu produït}} = 416 \text{ KWh anuals consumits}$$

$$416 \text{ KWh consumits} \cdot \frac{0,4556 \text{ Kg CO}_2}{1 \text{ KWh consumit}} = 190 \text{ Kg CO}_2 \text{ anuals}$$

■ **Consum de gas natural**

$$260 \text{ Kg de carbó actiu} \cdot \frac{0,33 \text{ KWh consumits}}{\text{Kg de carbó actiu produït}} = 86 \text{ m}^3 \text{ de gas natural per la producció d'1 Kg de carbó actiu.}$$

La contribució en la producció d'un Kg de carbó actiu pel que fa al consum de gas natural ve donada per m<sup>3</sup> de gas.

Coneixent l'anterior relació, es pot calcular la càrrega ambiental deguda al consum de gas natural en la producció de carbó actiu:

$$86 \text{ m}^3 \text{ gas natural} \cdot \frac{10,5 \text{ KWh consumits}}{1 \text{ m}^3 \text{ gas natural}} \cdot \frac{0,401 \text{ Kg CO}_2}{1 \text{ KWh consumit}} = 400 \text{ Kg CO}_2 \text{ anuals}$$

### 8.2.2. Catalitzador (TiO<sub>2</sub>)

En la producció del catalitzador també es generen emissions de CO<sub>2</sub> associades al procés. En el nostre cas d'estudi, per falta de dades s'ha considerat que el volum total del catalitzador és de diòxid de titani i, per tant, les càrregues ambientals s'han avaluat a partir d'aquest material.



Es coneix que la relació per a determinar les emissions de CO<sub>2</sub> en la fabricació del catalitzador és de 4,25 Kg CO<sub>2</sub> per cada Kg de TiO<sub>2</sub> produït.

Coneixent el volum de catalitzador emprat en l'oxidació catalítica i la densitat del diòxid de titani, es determina els Kg de CO<sub>2</sub> com:

- Volum de catalitzador utilitzat en l'oxidació catalítica <sup>4</sup>= 0,046 m<sup>3</sup>
- Densitat del diòxid de titani (TiO<sub>2</sub>) = 4,2·10<sup>3</sup> Kg/m<sup>3</sup>

$$0,23 m^3 \text{ de } TiO_2 \cdot \frac{4,2 \cdot 10^3 \text{ Kg } TiO_2}{1 m^3 \text{ } TiO_2} = 193 \text{ Kg } TiO_2$$

$$193 \text{ Kg } TiO_2 \cdot \frac{4,25 \text{ Kg } CO_2}{1 \text{ Kg } TiO_2} = 820 \text{ Kg } CO_2 \text{ anuals}$$

Un cop calculades les càrregues ambientals per cada un dels tractaments, es pot determinar quin és el tractament de COVs amb menys càrrega ambiental i per tant el tractament més viable ambientalment.

S'ha elaborat una taula resum (Taula 35) per poder visualitzar d'una forma més clara els resultats obtinguts en l'estudi de l'avaluació ambiental.

---

<sup>4</sup> Es considera un 20% del catalitzador òxid de Titani (sobre base de silici) per realitzar els càlculs, segons "l'Instituto de desarrollo tecnológico para la industria química.

Quantitat de CO<sub>2</sub> (en Kg) emès a l'atmosfera depenent de cada sistema d'incineració estudiat i en funció de la recuperació percentual de l'energia.

	Adsorció	Oxidació tèrmica				Oxidació catalítica (llit fix)				Oxidació catalítica (llit fluïditzat)			
		0%	35%	50%	75%	0%	35%	50%	75%	0%	35%	50%	75%
<b>Electricitat</b>	827	1.730	3.460	5.195	8.230	2.580	4.305	6.025	9.035	3.445	6.075	6.880	9.895
<b>Gas natural</b>	-	314.915				74.100							
<b>Carbó actiu</b>	560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	-	-	-	820							
<b>Kg CO<sub>2</sub></b>													
<b>TOTALS</b>	<b>1.387</b>	<b>316.645</b>	<b>318.375</b>	<b>320.110</b>	<b>323.145</b>	<b>77.500</b>	<b>79.225</b>	<b>80.945</b>	<b>83.955</b>	<b>78.365</b>	<b>80.995</b>	<b>81.800</b>	<b>84.815</b>

Taula 35. Càrregues ambientals en Kg de CO<sub>2</sub> anuals per als tractaments avaluats





## 9. Sensibilitat dels paràmetres de disseny

### 9.1. Paràmetres del tractament d'adsorció

Com s'esmenta en l'apartat de la metodologia de càlcul per a sistemes de tractament amb carbó actiu, els costos i requeriments de material vénen determinats principalment per cinc paràmetres: el cabal volumètric de gas carregat de COV que passa a través del llit de carbó, les càrregues de massa d'entrada i sortida de COV del corrent de gas, el temps d'adsorció, la capacitat de treball i/o la capacitat d'equilibri del carbó i la humitat del corrent de gas. Un cop s'ha treballat amb els diferents paràmetres s'estudia la sensibilitat d'aquests en el disseny del tractament d'adsorció per llits de carbó actiu.

Si es considera que les característiques del corrent d'entrada (cabal volumètric, càrrega de massa i humitat) són constants en l'estudi, és a dir no hi ha fluctuacions d'aquests paràmetres, es pot determinar la sensibilitat de paràmetres com la capacitat d'equilibri del carbó, el temps d'adsorció i la velocitat superficial del corrent en el llit en el disseny del tractament .

#### 9.1.1. Capacitat d'equilibri

Tal com s'observa en els gràfics següents (fig. 27 – 30), la sensibilitat dels paràmetres en la capacitat d'equilibri s'ha resolt en funció dels requeriments de carbó, el consum energètic anual, la inversió total i els costos anuals.

Es defineix la capacitat d'equilibri del carbó com la quantitat màxima d'adsorbat (COV) que el carbó pot retenir a una temperatura i pressió parcial de COV determinada.

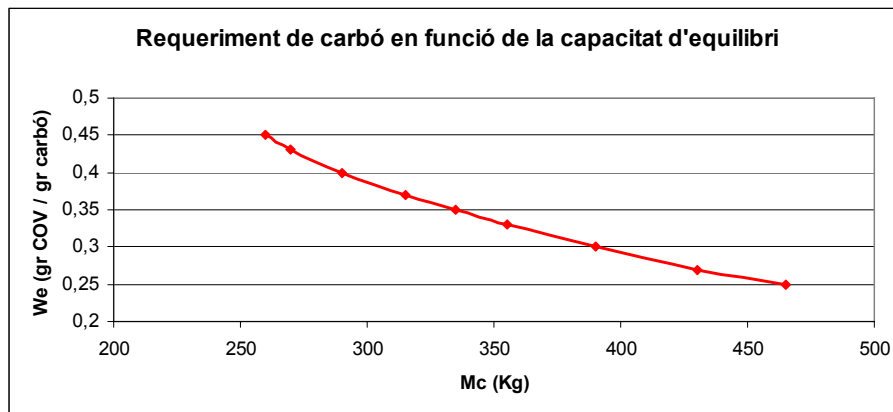


Fig. 27. Requeriment de carbó en funció de la capacitat d'equilibri

S'observa que a valors de  $W_e$  més alts, els requeriments de carbó en el llit són menors ja que per una mateixa eficiència del sistema, el carbó amb aquestes característiques necessita menor quantitat.

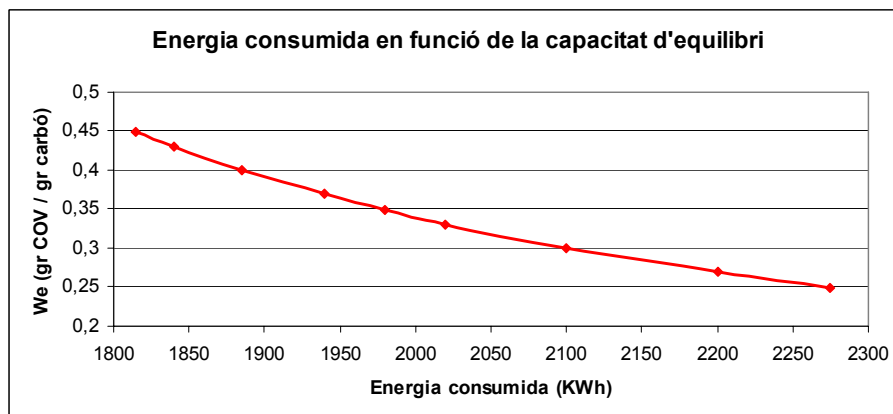


Fig. 28. Energia consumida en funció de la capacitat d'equilibri

Pel que fa al consum energètic, quant més elevada és la capacitat d'equilibri del carbó, menor és el consum energètic anual del ventilador del sistema, del ventilador d'assecat/refredament i de la bomba d'aigua de refredament.



Aquest menor consum del sistema amb carbons amb altes capacitats d'equilibri és degut a que amb menors quantitats de carbó no es necessita tant consum per remoure, assecar i refredar el COV dins del llit.

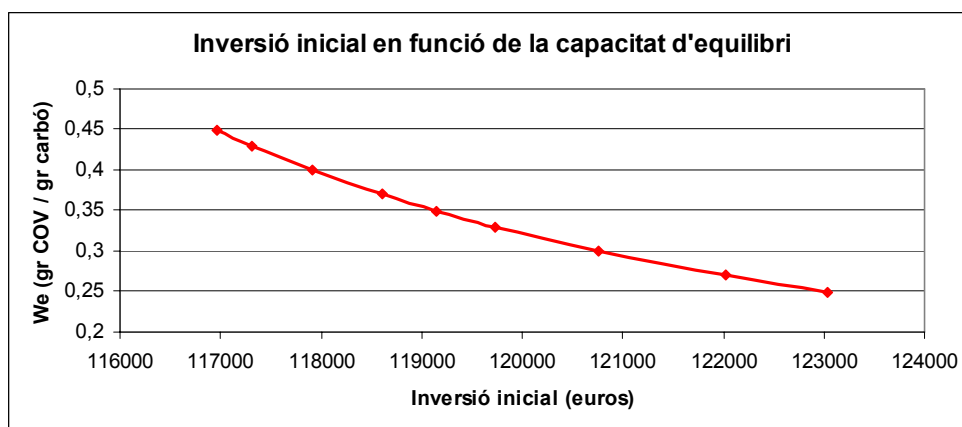


Fig. 29. Inversió inicial en funció de la capacitat d'equilibri

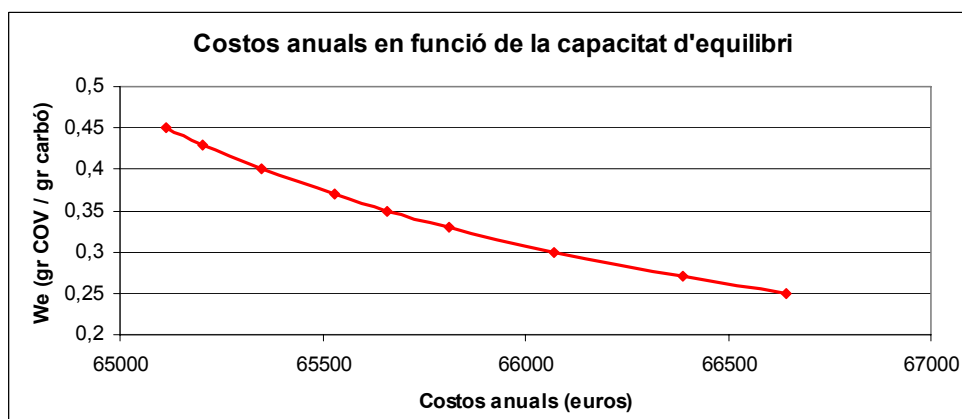


Fig. 30. Costos anuals en funció de la capacitat d'equilibri

Els costos d'inversió inicial i els costos anuals disminueixen a mesura que augmenta la capacitat d'equilibri, degut a que la major part de la inversió ve determinada pels requeriments de carbó i dimensionament del llit i, per tant, a requeriment de carbó i dimensionaments de llits més petits, les inversions i costos anuals seran menors.



### 9.1.2. Temps d'adsorció del sistema

Al fixar el cabal volumètric de gas carregat de COV que passa a través del llit de carbó, les càrregues de massa d'entrada i sortida de COV del corrent de gas, la capacitat de treball i la capacitat d'equilibri del carbó i la humitat del corrent de gas, l'únic paràmetre que pot variar és el temps d'adsorció.

Lògicament, un increment del temps d'adsorció comporta un increment dels requeriments de carbó actiu.

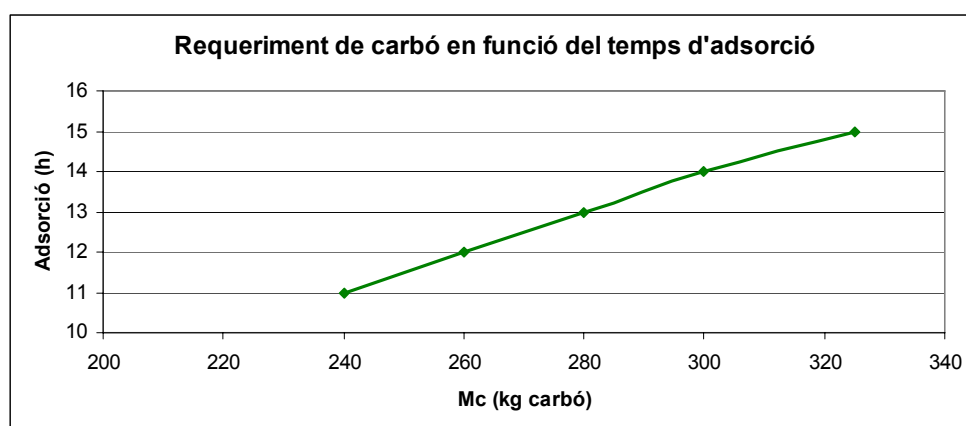


Fig.31. Requeriment de carbó en funció del temps d'adsorció

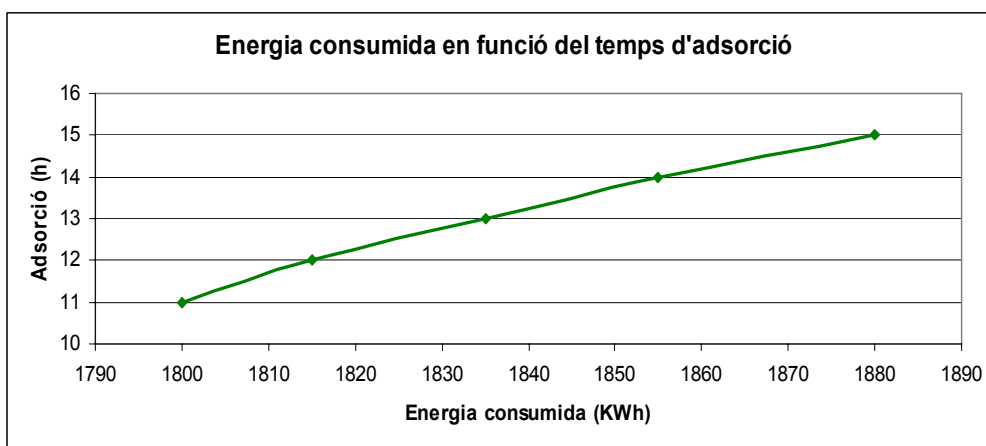


Fig. 32. Energia consumida en funció del temps d'adsorció



El fet que el sistema d'adsorció treballi més hores dóna lloc a un consum energètic major. Aleshores, els costos també es veuen incrementats.

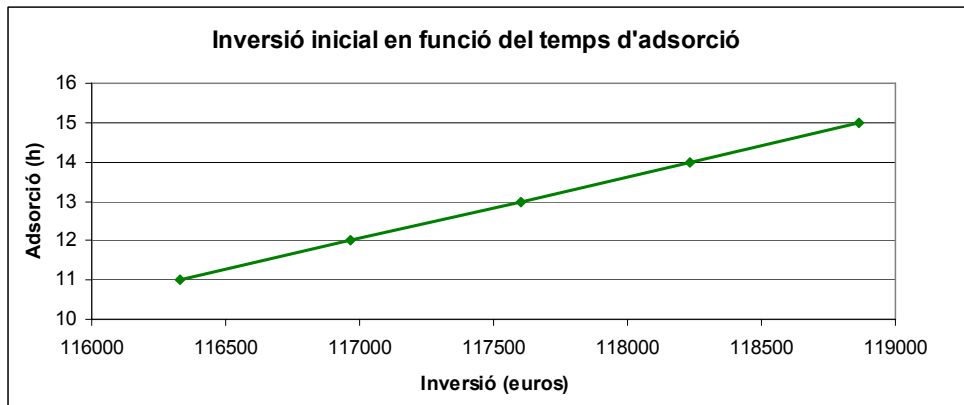


Fig. 33. Inversió inicial en funció del temps d'adsorció

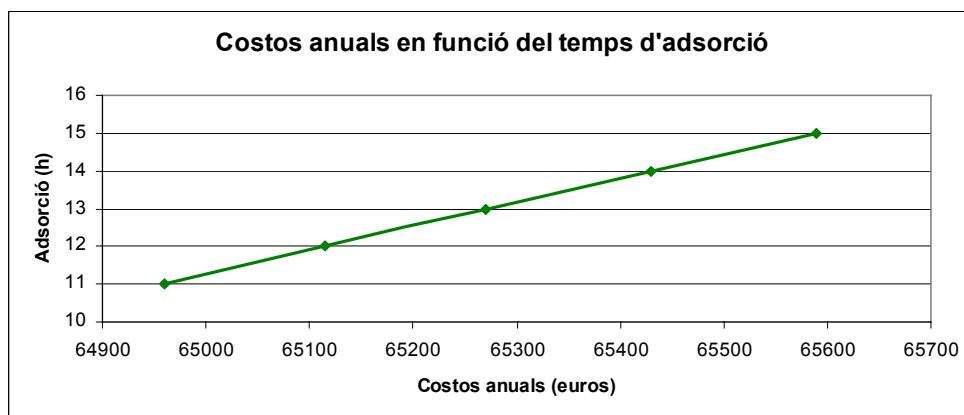


Fig. 34. Costos anuals en funció del temps d'adsorció

S'observa que fixant un temps de desorció de cinc hores i augmentant les hores de treball dels adsorbidors hi ha un increment tant d'energia consumida com dels costos d'inversió i anuals.



### 9.1.3. Velocitat superficial del corrent

El cost total de l'equip d'adsorció suposa, aproximadament, el 50 % de la inversió inicial del procés. Aquest cost depèn principalment de l'àrea superficial, que és una funció de la seva longitud i el diàmetre i alhora aquests depenen de la velocitat superficial.

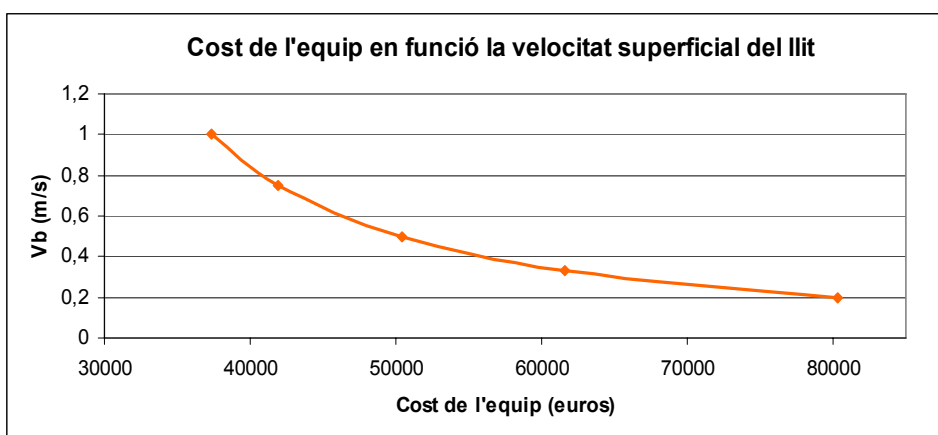


Fig. 35. Cost de l'equip en funció de la velocitat superficial del llit

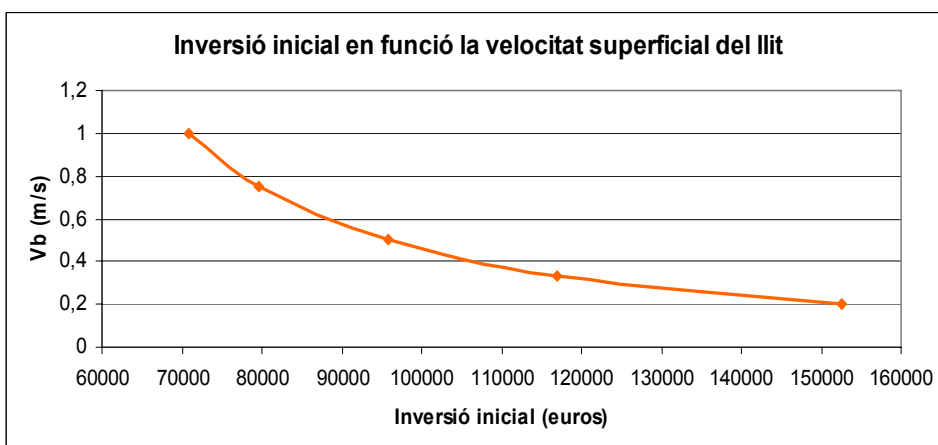


Fig. 36. Inversió inicial en funció de la velocitat superficial del llit

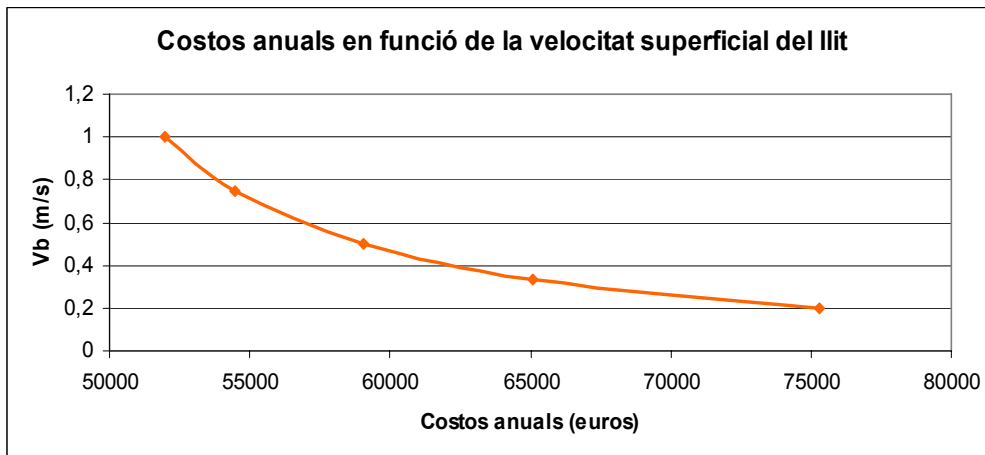


Fig. 37. Costos anuals en funció de la velocitat superficial del llit

S'observa que un augment en la velocitat superficial del llit comporta una disminució del cost de l'equip i per tant de la inversió i els costos anuals.

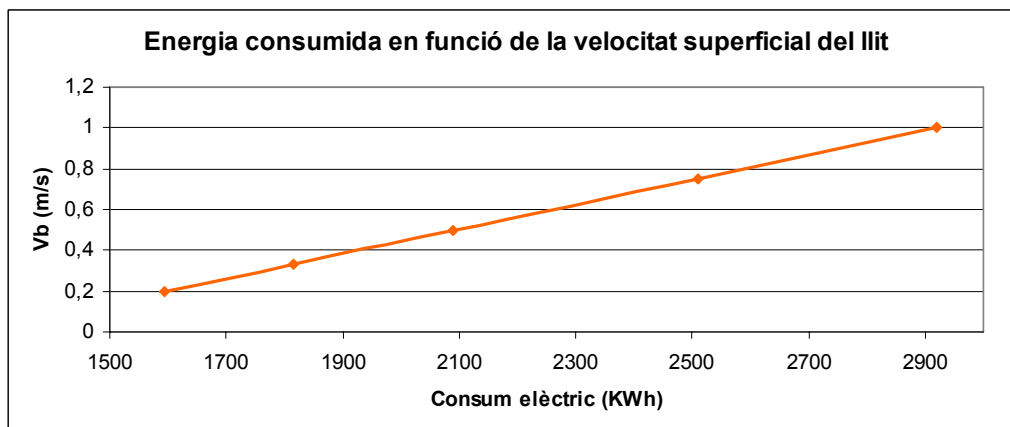


Fig. 38. Energia consumida en funció de la velocitat superficial del llit

Cal dir però, que un augment en la velocitat comporta també un augment del consum energètic ja que serà necessari més potència aplicada sobre el corrent a tractar.



## 9.2. Paràmetres del tractament d'oxidació

En la metodologia emprada en l'avaluació econòmica per als incineradors tèrmics i catalítics s'ha tingut en compte el percentatge de recuperació energètica com a variable característica del procés. A les taules de resultats (veure 7.2.3 i 7.2.4) es pot observar com varien els costos anuals i les inversions inicials del capital en funció d'aquesta variable.

A continuació es realitza un estudi gràfic per observar, d'una forma més visual, la sensibilitat dels costos i consums respecte dels nivells de recuperació energètics, per a cada un dels sistemes de tractament avaluats.

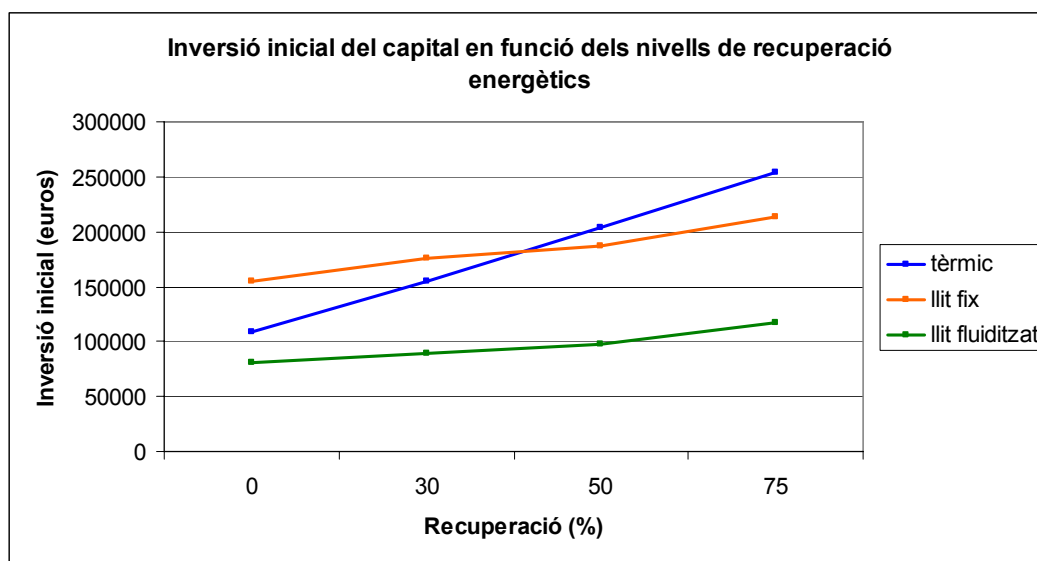


Fig. 39. Inversió inicial de capital en funció dels nivells de recuperació energètics

Les inversions inicials del capital en els incineradors de llit fix és, sempre, uns 70.000€ superior als de llit fluïditzat per a un mateix nivell de recuperació energètica, i segueixen un mateix perfil que tendeix a incrementar lleugerament la inversió inicial al incrementar-se el nivell de recuperació energètica.





L'incinerador tèrmic és el sistema de tractament que més incrementa la inversió inicial del capital amb la variació del percentatge de recuperació. L'incinerador tèrmic de flama directa (0 % recuperació) es troba en una posició intermèdia del cost d'inversió, tot i que amb un 70% de recuperació pràcticament triplica el cost d'inversió inicial de capital pel llit fluiditzat.

Per aquest motiu, com més s'incrementin els percentatges de recuperació, més s'incrementa el cost de la inversió inicial de capital. En els incineradors catalítics de llit fluiditzat aquest cost es manté sempre inferior al dels altres dos sistemes de tractament de COVs.

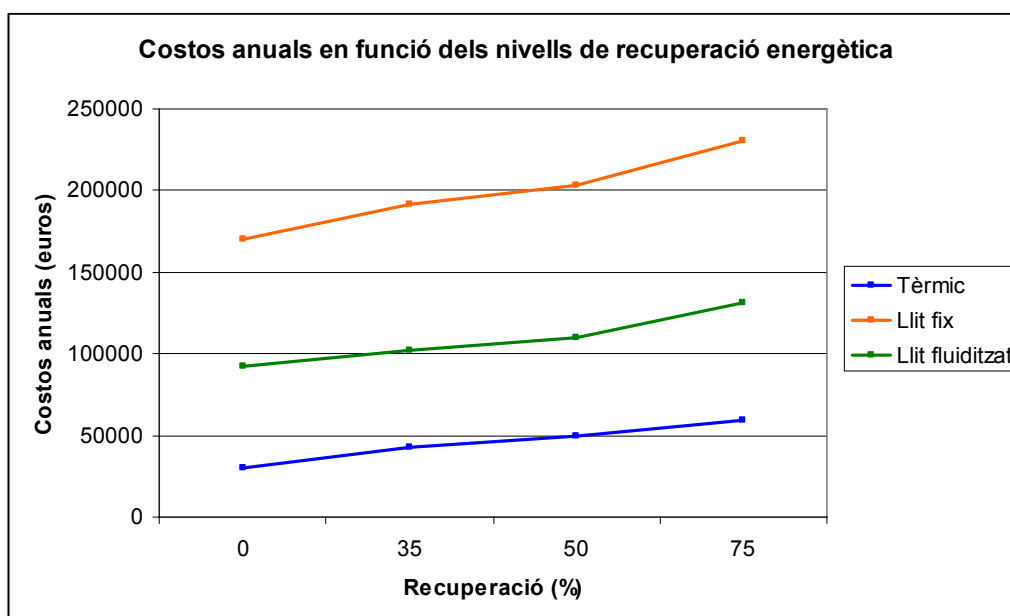


Fig. 40. Costos anuals en funció dels nivells de recuperació energètics

En la figura 40 s'observa clarament que els costos anuals s'incrementen a mesura que creix el percentatge de recuperació energètica, de la mateixa manera que també s'incrementen en funció del sistema de tractament utilitzat. Segueixen un ordre ascendent començant per l'incinerador tèrmic, l'incinerador de llit fluiditzat i acabant amb el de llit fix. S'observa com aquest últim pràcticament quadruplica el preu del primer.



Finalment es compara la sensibilitat del consum energètic en funció del nivell de recuperació energètica i del sistema de tractament.

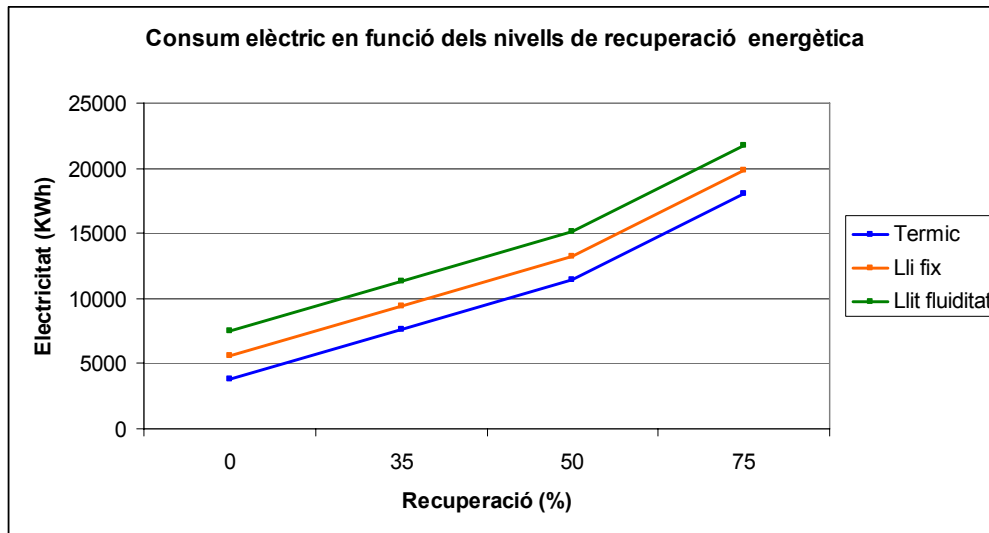


Fig. 41. Consum elèctric en funció dels nivells de recuperació energètics

La gràfica segueix el mateix perfil per cada tipus d'incinerador cosa que indica que el consum de l'electricitat s'incrementa per igual en els tres incineradors quan s'augmenta el percentatge de recuperació.

Per altra banda, el tractament amb menor consum elèctric és l'incinerador tèrmic, seguit pel catalític de lli fix, i acabant amb el catalític de lli fluiditzat.



## 10. Resultats i elecció de la millor alternativa

### 10.1. Anàlisi de l'avaluació econòmica

En la taula 36 es comparen els costos (tant el de la inversió inicial, com el cost total anual) dels quatre tractaments avaluats, sotmesos a un mateix cabal.

Tractament		Cabal (m <sup>3</sup> /h)	Cost de la inversió (€)	Cost total Anual (€)
<b>Adsorció</b>	<b>Carbó actiu</b>	7008	130.060	68.500
			139.910	39.204
	<b>tèrmic</b>		220.327	55.153
	0%		261.056	63.230
	35%		325.585	76.028
<b>Incineració</b>	<b>fix</b>		199.187	218.611
	0%		225.779	246.267
	<b>catalític llit</b>		239.945	261.000
	35%		273.291	295.680
	<b>fix</b>		103.093	118.674
	0%		115.303	131.372
	<b>catalític llit</b>	124.450	140.885	
	<b>fluiditzat</b>	150.719	168.205	
35%				
50%				
75%				

Taula 36. Comparativa dels costos dels tres tractaments estudiats.

En l'avaluació econòmica es determina que el tractament amb els menors costos d'inversió inicial és el procés d'oxidació catalítica per llit fluiditzat amb un percentatge de recuperació del 0%, tot i que no és el procés amb menor cost total anual.

El tractament que comporta les menors despeses anuals després de la seva implementació és l'incinerador tèrmic amb un percentatge de recuperació, també, del 0%.



Cal dir, però, que a mesura que el sistema incrementa el seu percentatge de recuperació energètica, els seus costos, tant d'inversió com costos anuals totals, es veuen incrementats degut principalment a l'ús de major energia per dur a terme el procés.

Així doncs, si es considera un percentatge de recuperació energètica del 75% en els tractaments incineradors, aleshores el tractament que presenta menors costos, tant d'inversió inicial com el total anual, és el procediment d'adsorció per carbó actiu.

Finalment, si es considera un termini d'amortització de 10 anys, amb un increment anual constant del 4%, el cost total al final dels 10 anys, i el cost promig anual de cada tractament es mostra en la taula 37.

Tractament		Cabal (m³/h)	Cost total en 10 anys (€)	Cost mig Anual (€)	
<b>Adsorció</b>	<b>Carbó actiu</b>	7008	952.478	95.247	
	<b>tèrmic</b>		0%	610.597	61.060
			35%	882.500	88.250
			50%	1.020.202	102.020
			75%	1.238.385	123.839
<b>Incineració</b>	<b>catalític llit fix</b>		0%	2.823.854	282.385
			35%	3.182.487	318.249
			50%	3.373.539	337.354
			75%	3.823.257	382.326
	<b>catalític llit fluïditzat</b>		0%	1.527.906	152.791
			35%	1.692.569	169.257
			50%	1.815.930	181.593
			75%	2.170.206	217.021

Taula 37. Comparativa dels costos finals dels tres tractaments estudiats, en un període de 10 anys.

Es pot veure que, dels tres tractaments d'oxidació, el més econòmic és el tèrmic, seguit pel catalític de llit fluïditzat i, com a més costós, el catalític de llit fix. Es dona la circumstància que el procediment tèrmic amb un percentatge de recuperació del 75% (el més car entre els tèrmics) és més econòmic que el més barat dels catalítics de llit fluïditzat que venen a continuació. El mateix passa amb el més car dels catalítics de llit fluïditzat, i tots els catalítics de llit fix.



Respecte al tractament d'adsorció per carbó actiu, el seu cost només es veu superat (en economia) pels tèrmics amb un 0% i amb un 35% de percentatge de recuperació.

## 10.2. Anàlisi de l'avaluació ambiental

En la pàgina següent es torna a presentar la taula 35, on es mostra una comparativa de les càrregues ambientals en Kg de CO<sub>2</sub> anuals per als quatre tractaments avaluats.

Considerant els resultats de l'avaluació ambiental, es pot observar que els tractaments d'adsorció per carbó actiu tenen una quantitat de CO<sub>2</sub> equivalent associada molt més baixa que els tractaments d'oxidació considerats en l'estudi.

La baixa càrrega ambiental que proporciona l'adsorbidor es deu, principalment, a la no utilització del gas natural com a principal font energètica, ja que és el consum d'aquest combustible el que fa incrementar notòriament les càrregues ambientals de les alternatives portades en l'estudi.

Es pot determinar, també, que el percentatge de recuperació energètica dins els sistemes oxidatius incrementa fins a un 8% les càrregues ambientals. A mesura que el percentatge de recuperació és major, les emissions de CO<sub>2</sub> associades al procés també es veuen incrementades.



	Adsorció	Oxidació tèrmica				Oxidació catalítica (llit fix)				Oxidació catalítica (llit fluïditzat)			
		0%	35%	50%	75%	0%	35%	50%	75%	0%	35%	50%	75%
<b>Electricitat</b>	827	1.730	3.460	5.195	8.230	2.580	4.305	6.025	9.035	3.445	6.075	6.880	9.895
<b>Gas natural</b>	-	314.915				74.100							
<b>Carbó actiu</b>	560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>TiO<sub>2</sub></b>	-	-	-	-	-	820							
<b>Kg CO<sub>2</sub></b>													
<b>TOTALS</b>	<b>1.387</b>	<b>316.645</b>	<b>318.375</b>	<b>320.110</b>	<b>323.145</b>	<b>77.500</b>	<b>79.225</b>	<b>80.945</b>	<b>83.955</b>	<b>78.365</b>	<b>80.995</b>	<b>81.800</b>	<b>84.815</b>

Taula 35 . Càrregues ambientals en Kg de CO<sub>2</sub> anuals per els tractaments avaluats



### 10.3. Elecció de la millor alternativa

L'objectiu principal del projecte és estudiar la millor alternativa dels quatre tractaments que es consideren en l'estudi.

Una vegada analitzades les avaluacions econòmica i ambiental, es conclou que no existeix un tractament que sigui, alhora, el millor en les dues avaluacions.

Tanmateix, la poca diferència desfavorable entre el cost del tractament d'adsorció per carbó actiu i el del tractament per oxidació tèrmica (amb un 0% o un 35% de percentatge de recuperació energètica) es veu àmpliament compensada per una càrrega ambiental molt menor del tractament d'adsorció respecte de tots els altres.

Així doncs, es determina el tractament d'adsorció per carbó actiu com la millor alternativa a aplicar en el nostre cas d'estudi.

Tot i que el tractament d'adsorció per carbó actiu no és el tractament amb menor cost, ni el tractament amb major eficiència de destrucció de COVs, es dóna una importància rellevant al fet que tot el tractament d'adsorció comporta unes càrregues ambientals notablement molt més baixes que els tractaments oxidatius considerats en l'estudi.

S'ha de recalcar, també, que s'escull el tractament d'adsorció perquè és el més adient per les característiques del nostre cas d'estudi. Ja s'ha fet notar que es tracta d'un cas amb un baix corrent de gas. Si fos més elevat, segurament s'arribaria a un altre resultat. Així doncs, es tracta d'una alternativa escollida específicament pel cas d'estudi i les seves característiques particulars.



## 11. Glossari

*Condicions confinades:* condicions de funcionament d'una instal·lació on els compostos orgànics volàtils alliberats durant l'activitat es recullen i es descarreguen de manera controlada, mitjançant l'ús de xemeneies o un equip de reducció.

*Emissió difusa:* tota emissió, no continguda en gasos residuals, de compostos orgànics volàtils en l'aire, sòl o aigua. Queden incloses les emissions no capturades alliberades a l'ambient exterior per les finestres, portes, conductes de ventilació i obertures similars.

*Emissió total:* suma de les emissions difuses i les emissions de gasos residuals.

*Gasos residuals:* tota descarrega gasosa final al aire que contingui compostos orgànics volàtils o altres contaminants procedents d'una xemeneia o equip de reducció.

*Millors tècniques disponibles:* la fase més eficaç i avançada de desenvolupament de les activitats i de les seves modalitats d'explotació, que demostrin la capacitat pràctica de determinades tècniques per constituir en un principi la base dels valors líndars d'emissió destinats a evitar o, quan no sigui possible, reduir en general les emissions i el impacte en el conjunt del medi ambient i de la salut de les persones.

Nòlit: Cost del transport de mercaderies





## 12. Bibliografia

### ■ Referent a la contaminació atmosfèrica

- Antonio López López. IES Joan Oró. Lleida  
Última *visita*: 19 de Març del 2006. Disponible a internet:  
<http://www.xtec.es/aulanet/ud/ciencies/atmosfera/contam.htm>
  
- Compostos orgànics volàtils. SAM (Suport a la gestió ambiental d'activitats en el municipi) Diputació de Barcelona, 1ra edició. Barcelona. Setembre 2004.
  
- Diputació de Barcelona, àrea de medi ambient  
Última visita: 20 de Maig de 2006.  
Disponible a internet: <http://www.diba.es/mediambient/coat.asp>
  
- Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge  
Última visita: 20 de Maig de 2006  
Disponible a internet: [http://mediambient.gencat.net/cat/el\\_medi/atmosfera/](http://mediambient.gencat.net/cat/el_medi/atmosfera/)  
<http://mediambient.gencat.net>
  
- ICICT Grup TÜV Rheinland: control d'emissions i immissions.  
Última *visita*: 19 de Març del 2006 . Disponible a internet:  
[http://www.ictsa.com/es/cat/servicios/control\\_emisiones\\_inmisiones.php](http://www.ictsa.com/es/cat/servicios/control_emisiones_inmisiones.php)



■ **Referent a la normativa**

- Guia pràctica para el cumplimiento del RD 117/2003 sobre limitación de emisiones de COVs debido al uso de disolventes en determinadas actividades. ASFAPI.

■ **Referent als tractaments de COVs**

- Lapeña, M. R. (Juny 2005). Prevenció de la contaminació en l'ús de dissolvents. Manual d'Ecogestió, núm. 22. Primera edició.
- Gaseous emission and control in waterwater treatment plants. Ming-Shean Chou and Wen-His Cheng/ Environmental Engineering science Volume 22 number 5 (2005)
- Carbó actiu. Disponible a internet: [www.activated-carbon.com/enviro.html](http://www.activated-carbon.com/enviro.html)  
*Última visita: 12 de març de 2006*
- "Asociación Española de Fabricantes de Pinturas y Tintas de Imprimir"  
*Última visita: 14 de març de 2006.* Disponible a internet: <http://www.asefapi.es>
- Disponible a internet:  
<http://www.estrucplan.com.ar/contenidos/EfluGas/tratamiento/EfluGas-indicevolatiles.asp>. *Última visita: 1 d'abril de 2006*
- "The Desorption Process" *Última visita: '12 de març de 2006*  
Disponible a internet: [Alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2\\_5.htm](http://Alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_5.htm)



- "PE Curves & Energetics of Adsorption". *Última visita: 12 de març de 2006*  
Disponible a internet: [Alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2\\_4.htm](http://Alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_4.htm)
- "Adsorption Kinetics – The Rate of Adsorption"  
*Última visita: 12 de març de 2006*  
Disponible a internet: [Alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2\\_3.htm](http://Alpha.qmw.ac.uk/~ugca000/surfaces/scc/scat2_3.htm)
- "Gas adsorption". *Última visita: 12 de març de 2006*  
Disponible a internet: [chem.ufl.edu/itl/4411L\\_f96/ads/ads\\_1.html](http://chem.ufl.edu/itl/4411L_f96/ads/ads_1.html)

■ **Referent a les característiques dels COVs**

- Fitxes de seguretat química "Ministerio de trabajo y asuntos sociales d'España"  
*Última visita: 9 de maig de 2006*  
Disponible a internet: <http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspnsynt.htm>
- "NIOSH: the national institute for occupational safety and health"  
*Última visita: 9 de maig de 2006*  
Disponible a internet: <http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>
- Dissolvents i característiques físiques químiques ambientals:  
"National center for manufacturing Sciences SOLV-DB". *Última visita: 9 de maig de 2006*. Disponible a internet: <http://solvdb.ncms.org/SOLV01.htm>
- "Espai Virtual de Recursos Curricular per a la Tecnologia"  
*Última visita: 13 d'Abril de 2006*. Disponible a internet:  
<http://biblioteca.upc.es/e-ambit/professor/ambits/CtantamVOC.html>



### ■ Referent a la metodologia

- Clean air technology center, Technical Bulletin "Choosing an adsorption system for VOC: Carbon, Zeolite or Polymers?". Office of Air Quality. EPA 456/F-99-004, Maig1999.
- Martin, M i altres. "Life cycle assessment of a coupled advancedoxidation-biological process for wastewater treatment. Comparison with granular activated carbon adsorption"(article)
- Muñoz Ortiz, Ivan "Life cycle assesment as a tool for green chemistry: aplicacion to different advances oxidation processes for wastewater". Bellaterra, març 2006  
Tesi doctoral
- Nevers, Noel "Air pollution control engineering". Edició segona (2000)  
McGraw-Hill
- Eco-efficiency Evaluation of waste gas purification Systems in the chemical industry. Marcus Andreas Meier. Zurich 1997 (es una tesi doctoral)
- <http://www.epa.gov/ttn/catc> "Environmental Protection Agency"  
Última visita: 3 de maig de 2006
- <http://epa.gov/ttn/catc/cica/cicaspa.html#zeo>  
Última visita: 4 de maig de 2006
- <http://www.epa.gov/ttn/catc/rblc/htm/rblcprod.html>  
"Technology Transfer Network Clean Air Technology Center"  
Última visita: 4 de maig de 2006



- <http://es.epa.gov/studies/cs593.html>:  
estudis EPA: "Common sense solutions to environmental problems"  
*Última visita: 4 de maig de 2006*
  
- [www.epa.gov/ttn/catc](http://www.epa.gov/ttn/catc). "CO\$T-AIR Spreadsheets"  
*Última visita: 11 de maig de 2006*
  
- Survey of control technologies for low concentration organic vapor gas streams  
May 1995 (EPA). *Última visita: 28 d'abril de 2006*
  
- <http://externe.jrc.es/es.pdf> "Externe Nacional Implementation"  
*Última visita: 12 de març de 2006*
  
- [www.cema-sa.org](http://www.cema-sa.org) "Centre per l'empresa i el medi ambient"  
*Última visita: 24 de Febrer de 2006*
  
- [www.aimme.es](http://www.aimme.es) "Instituto tecnológico metalmeccanico"  
*Última visita: 12 de maig de 2006*
  
- [www.ceneam.es](http://www.ceneam.es) "Centro Nacional de educación ambiental"  
*Última visita: 9 de Maig de 2006*
  
- [www.idae.es](http://www.idae.es) "Instituto para la diversificación y ahorro de la energia"  
*Última visita: 9 de Maig de 2006*