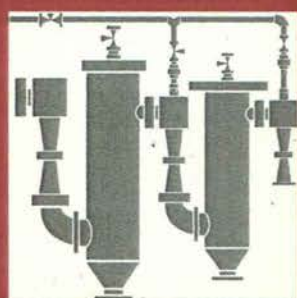


**operacions  
unitàries  
de la  
indústria  
alimentària**



*A cura de*  
**Joaquim Casal**  
**Ramon Clotet**











OPERACIONS UNITÀRIES  
DE LA  
INDÚSTRIA ALIMENTÀRIA

This One



A6D5-ZTN-5Z2F





SOCIETAT CATALANA DE TECNOLOGIA  
Filial de l'Institut d'Estudis Catalans  
MONOGRAFIES DE TECNOLOGIA, III

OPERACIONS UNITÀRIES  
DE LA  
INDÚSTRIA ALIMENTÀRIA

A cura de  
JOAQUIM CASAL  
RAMON CLOTET

BARCELONA  
1995

Biblioteca de Catalunya. Dades CIP:

**Operacions unitàries de la indústria alimentària**

Bibliografia

ISBN 84-7283-280-5

I. Casal i Fàbrega, Joaquim, ed. II. Clotet, Ramon, ed. III. Societat Catalana de Tecnologia IV. Col·lecció 1. Aliments — Indústria i comerç

2. Fabricació 3. Enginyeria química

664

Disseny gràfic de la coberta: Glòria Escoruela i Roca

© Els autors dels articles

© 1995, Institut d'Estudis Catalans

Editat per la Societat Catalana de Tecnologia

(filial de l'Institut d'Estudis Catalans)

Carme, 47. 08001 Barcelona

Primera edició: febrer de 1995

Tiratge: 600 exemplars

Compost i imprès per Romargraf, SA

Joventut, 55. 08904 L'Hospitalet de Llobregat

ISBN: 84-7283-280-5

Dipòsit Legal: B. 5379-1995

## PREFACI

Pot semblar fàcil, i alguns han caigut en el parany, fer un planteig de les operacions unitàries en la indústria alimentària per simple transposició de les corresponents a la indústria química.

És evident que hi ha un cert tipus d'operacions unitàries en aquesta indústria que en són específicament característiques. Ens referim, per exemple, a la pasteurització i esterilització del producte contingut en envasos, l'emmotllament de la xocolata, la fregida, el blanqueig, etc., però la resta té una primera similitud física amb la corresponent operació unitària química (filtració, assecament, extracció, fermentació, extrusió, etc.) que explica, si no justifica, l'error de la simple transposició de què parlàvem.

¿On hi ha la diferència i, en general, les característiques específiques de l'operació unitària en la indústria alimentària que la distingeixin de la seva homòloga de la indústria química? En el planteig teòric de l'operació química, els paràmetres acostumen a ésser limitats i, en general, químicament -o físicament- clars de determinar (aigua evaporada, coeficient d'extracció, concentracions, etc.). En la indústria alimentària s'hi afegeixen dos grans grups de variables que canvien o poden canviar en l'operació i que cal quantificar adientment, ja que certs canvis possibles poden portar a no realitzar una operació correcta. Ambdós grups són fruit de la identitat complexa dels aliments com a material biològic que són.

El primer gran grup de variables fa referència als aspectes de l'operació que poden afectar la seguretat del producte alimentari en procés en relació amb la salut del consumidor. La possibilitat de creixements microbiològics o de contaminacions (material biològic o elements químics) és un aspecte crític en aquest grup. La preocupació per aquests temes ha originat el desenvolupament de certes tecnologies complementàries com ara el control de riscos crítics i el disseny higiènic que cal aplicar, en l'extensió que pertoqui, a cada operació a fi d'assegurar aquests trets diferencials. Són tan fonamentals aquests aspectes que, a causa de la seva amplitud i al fet d'afectar totes les operacions, el disseny higiènic pot considerar-se una funció tecnològica cons-

tant i, per tant, universal. Així, doncs, en el nostre planteig s'ha considerat, si no com una operació unitària en el sentit estricte, sí com un conjunt de criteris sistemàtics que cal tenir en compte en cada operació.

El segon gran grup de variables correspon a la possibilitat de produir-se reaccions que en una operació unitària química es podrien considerar secundàries i negligibles pels resultats, però que en un producte alimentari poden afectar aspectes de percepció sensorial (físics com el color, o químics com l'olor i el gust). La possibilitat d'aquestes reaccions secundàries és àmplia, tenint en compte la complexitat en la composició dels aliments, i a més, la majoria dels compostos aromàtics són eficaços sobre les nostres terminals neurològiques en proporcions de ppt i ppb. Per això és evident que una operació unitària alimentària ha de tenir en consideració aquestes possibles variables i la seva regulació. Nogensmenys, aquestes reaccions depenen de la composició, per la qual cosa aquesta tindrà una influència en la manipulació o en el tipus d'operació unitària escollida.

Conscients d'aquesta especificitat de les operacions unitàries en enginyeria alimentària, la Universitat Politècnica de Catalunya ja fa anys que desenvolupa un mòdul específic sobre aquest tema en el Màster de Biotecnologia Alimentària, organitzat pel Departament d'Enginyeria Química i l'Escola Superior d'Agricultura de Barcelona. La col·laboració de professors universitaris i de professionals de la indústria ha permès preparar uns textos que, tot tenint un cert caire acadèmic, presenten una visió de les operacions unitàries amb els criteris de la indústria alimentària.

Desitgem que siguin útils als estudiants d'aquesta especialitat. Esperem publicar un altre volum en un futur proper, a fi de disposar d'una revisió completa de les operacions d'aquesta indústria.

Joaquim Casal i Fàbrega  
*Professor d'Enginyeria Química  
a la Universitat Politècnica de Catalunya  
Membre de la Societat Catalana  
de Tecnologia*

Ramon Clotet i Ballús  
*Professor de Bioquímica  
d'Aliments a l'Escola Superior  
d'Agricultura de Barcelona  
Membre de l'Associació  
Catalana de Ciències de  
l'Alimentació*

Barcelona, gener de 1995

# EVAPORACIÓ

*Joaquim Casal i Fàbrega\**

## 1. INTRODUCCIÓ

Un dels sistemes més emprats per a concentrar una dissolució d'un sòlid és la vaporització del dissolvent –sovint aigua– per ebullició. L'evaporació és una tècnica relativament freqüent a la indústria alimentària: concentració de llet, de gelatines, de suc de fruites, de melasses, d'extractes, etc. Serveix per a millorar la conservació de determinats productes, o com a pas previ a d'altres transformacions (assecament, cristallització).

Alguns aspectes importants d'aquesta operació són:

- velocitat de transmissió de calor
- capacitat d'evaporació
- economia
- pressió i temperatura d'operació
- elevació del punt d'ebullició.

A més, en la indústria alimentària poden ésser importants els següents aspectes:

- degradació del producte (canvi del color, olor, gust o d'altres propietats)
- increment de la viscositat
- formació d'escuma
- formació d'incrustacions.

Per a dissenyar o seleccionar un evaporador, doncs, cal tenir en compte no només el càlcul de la velocitat de transmissió de calor i el consum de

---

\* *Societat Catalana de Tecnologia.*

*Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya*

vapor adequats, sinó també totes les possibles transformacions del producte i l'estructura de l'aparell adient per a l'eventual eliminació dels problemes esmentats.

En aquest capítol es fa una presentació general de l'evaporació. Després de revisar algunes característiques fonamentals relatives a la transmissió de calor en un evaporador i als balanços de matèria i d'energia, es comenten els tipus d'evaporadors més correntment emprats. A continuació es revisen els diversos mètodes existents per a millorar l'operació des del punt de vista energètic, i es comenten després els principals aspectes de l'operació discontinua. Finalment es fa referència a alguns problemes de tipus pràctic que poden aparèixer en la concentració de dissolucions en la indústria alimentària.

## 2. FUNCIONAMENT D'UN EVAPORADOR

En la pràctica industrial hom troba evaporadors de forma molt variada. Quasi tots, però, responen essencialment a la mateixa estructura: un element calefactor, un espai per a separar el vapor format de la dissolució concentrada, i eventualment una recirculació d'aquesta.

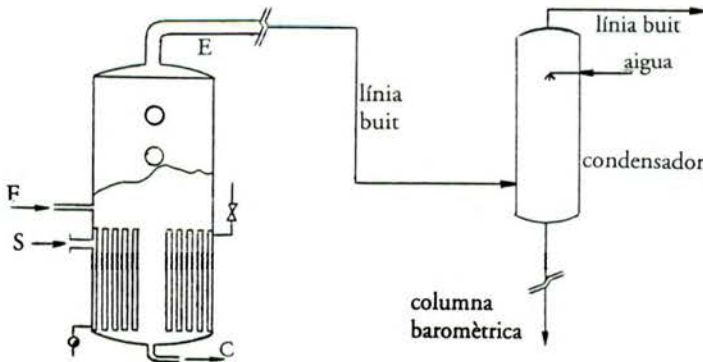


FIGURA 1. Esquema d'un evaporador

Un esquema típic pot veure's a la fig. 1. Correspon a un aparell de tubs curts verticals, no pas gaire corrent, però molt adequat per a entendre el funcionament d'un evaporador.

En aquest aparell, l'element calefactor consisteix en un feix de tubs subjectats pels extrems per dues plaques suport. El vapor de calefacció entra a l'espai existent entre els tubs i condensa sobre la superfície exterior d'aquests;

el líquid posteriorment condensat surt per un purgador. El correcte funcionament d'aquest purgador (termodinàmic, de boia, etc.) és necessari per a assegurar que el condensat és eliminat contínuament; en cas contrari, l'espai de calefacció s'inundaria, no entraria vapor i l'evaporador deixaria de funcionar (no hi hauria transmissió de calor). Una petita vàlvula permet eliminar l'aire existent en començar l'operació (*purgador d'aire*). La purga d'aquest aire és necessària per a mantenir una bona velocitat de transmissió de calor; si s'acumula aire, el coeficient global de transmissió de calor –vegeu l'apartat següent– disminuirà i la capacitat de l'evaporador baixarà notablement. La dissolució, que ocupa l'interior dels tubs, és escalfada i bull; de cada tub en surt un doll de líquid i vapor, i el líquid descendeix novament pel tub central, més gran. El vapor és separat del líquid en l'espai de la part superior de l'evaporador i abandona posteriorment l'aparell.

Els evaporadors solen treballar en continu, hi entra un corrent d'alimentació (F) i en surt el concentrat (C); altres vegades, però, es treballa en discontinu o a calderades: s'introdueix de cop una determinada massa d'alimentació, i es va concentrant –sense retirar concentrat– fins que la dissolució ha assolit la concentració desitjada.

En el funcionament d'un evaporador hi ha dues variables molt importants:

*Capacitat* : massa d'aigua evaporada per unitat de temps.

*Economia* : massa d'aigua evaporada per unitat de massa del vapor de calefacció.

La capacitat i l'economia indiquen quina feina fa l'evaporador i amb quina eficàcia.

### 3. VELOCITAT DE TRANSMISSIÓ DE CALOR

En el càlcul de les velocitats de transferència de calor, els següents aspectes són molt importants:

- diferència útil de temperatures
- elevació del punt d'ebullició
- coeficient global de transmissió de calor

En un evaporador, la velocitat de transmissió de calor és directament proporcional a la superfície calefactora i a l'increment de temperatures:

$$Q = U A \Delta t$$

on U és el coeficient de proporcionalitat, denominat *coeficient global de*

*transmissió de calor*;  $A$  és l'àrea de la superfície calefactora i  $\Delta t$  és la diferència de temperatures entre el líquid que bull en l'evaporador i el vapor condensant de calefacció; cal tenir en compte que:

- la dissolució es troba a una concentració superior a la d'entrada; en els evaporadors de tubs curts verticals pot considerar-se que la concentració global de la dissolució és la final o de sortida,  $x_c$ . En altres aparells, la concentració varia contínuament al llarg dels tubs;

- la temperatura d'ebullició pot variar dins l'evaporador, a causa de l'eventual existència d'una columna hidrostàtica; normalment la temperatura d'ebullició de la dissolució es pren arbitràriament igual a la del vapor que es desprèn del líquid en ebullició;

- el vapor de calefacció, fins i tot si és rescalfat, cedeix pràcticament tota la calor a la seva temperatura de saturació, excepte, evidentment, la petita calor de rescalfament. Per tant, l'increment de temperatura útil és:

$$\Delta t = t_{\text{saturació vapor calefacció}} - t_{\text{ebullició dissolució}}$$

El coeficient global de transmissió de calor comprèn cinc resistències individuals en sèrie: les corresponents a la pel·lícula de líquid condensat, les dues capes d'incrustació sobre la superfície calefactora, la paret del tub, i la corresponent a la transferència de calor a la massa de líquid en ebullició. És funció de diversos factors: propietats del líquid,  $\Delta t$ , disposició de la superfície calefactora, existència de capes d'incrustació, etc. Existeixen algunes correlacions per a estimar-ne el valor, bé que la seva fiabilitat no és gaire bona; també pot obtenir-se de la bibliografia, o d'un aparell del mateix tipus que operi amb una dissolució semblant a la que hom vol tractar. Cal tenir en compte que el coeficient  $U$  pot tenir diversos valors sobre diferents punts de la superfície calefactora; cal adoptar doncs un valor mitjà. La precisió en l'estimació d'aquest coeficient no pot ésser molt alta –llevat que es disposi de dades experimentals– i aquest és, generalment, el factor que limita la fiabilitat dels càlculs. Si hom disposa de dades experimentals, generalment seran millors que les calculades.

#### 4. ELEVACIÓ DEL PUNT D'EBULLICIÓ

Moltes vegades les dissolucions aquoses d'un sòlid bullen a una temperatura superior a la de l'aigua. Això cal tenir-ho en compte per dues raons:

- perquè afecta al valor de  $\Delta t$  de l'evaporador,



– perquè el vapor després d'una dissolució amb increment ebulloscòpic és vapor rescalfat; si s'utilitza posteriorment, la seva temperatura no coincidirà amb la de condensació.

El valor de l'elevació del punt d'ebullició (EPE) de dissolucions de productes alimenticis no sempre pot ésser trobat a la bibliografia. Pot determinar-se experimentalment o estimar-se mitjançant la regla de Dühring:

$$\frac{t_1 - t_2}{\tau_1 - \tau_2} = \text{constant}$$

on  $t_1$  i  $t_2$  = temperatures d'ebullició de la dissolució a dues pressions diferents, i

$\tau_1$  i  $\tau_2$  = temperatures d'ebullició del dissolvent a les mateixes pressions.

Aquesta regla pot trobar-se en forma de diagrama per a les substàncies més corrents (fig. 2).

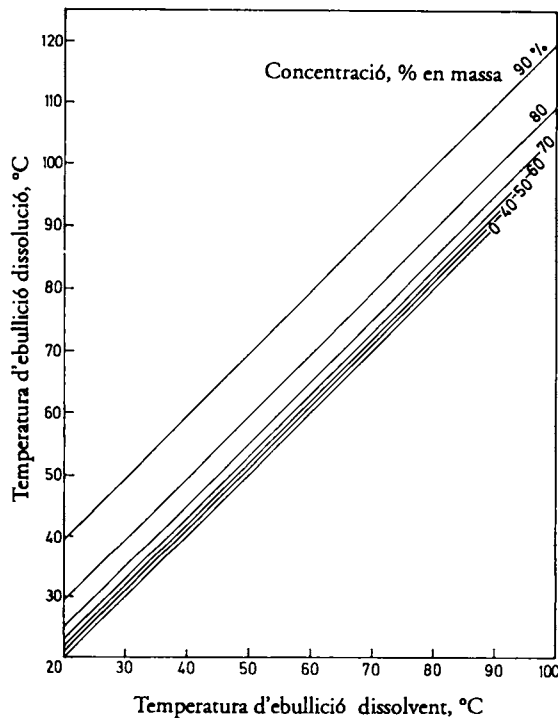


FIGURA 2. Diagrama de Dühring (dissolució aquosa de sacarosa)

Per a aplicar aquesta regla cal doncs conèixer la temperatura d'ebullició de la dissolució a dues pressions diferents. Si només es coneix a una pressió (per exemple, l'atmosfèrica), la temperatura d'ebullició a una altra pressió pot estimar-se utilitzant la següent relació (regla de Babo):

$$\frac{P}{P_0} = \text{constant}$$

on  $p$  = pressió de vapor de la dissolució, i

$p_0$  = pressió de vapor del dissolvent a la mateixa temperatura.

Els valors obtinguts així han de modificar-se en el cas de dissolucions que bullen a buit, segons la correcció mostrada en la taula següent:

$p/p_0$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	Correcció $\pm \Delta t, ^\circ\text{C}$
$p, \text{ mm Hg}$	100	200	400	450	500	550	650	0,9
	-	50	200	350	450	500	550	1,8
	-	-	100	275	300	350	400	2,6
	-	-	-	150	200	250	300	3,6

## 5. BALANÇOS DE MATÈRIA I D'ENERGIA

Per a un evaporador funcionant en règim continu (fig. 1) poden establir-se els següents balanços:  
global de matèria:

$$F = C + E$$

del solut:

$$F x_F = C x_c$$

entàlpic:

$$F h_F + S H_S = E H_E + C h_C + S h_S + P$$

Per altra part, cal tenir en compte que la calor transferida en l'aparell és la cedida pel vapor de calefacció en condensar. Per tant,

$$Q = S (H_S - h_S)$$

(amb temperatura de referència = 0 °C per a les entalpies). P són les pèrdues de calor a l'ambient.

## 6. UTILITZACIÓ DEL BUIT

Sovint els evaporadors funcionen a pressions inferiors a l'atmosfèrica. Això és degut a diferents motius. En primer lloc, el buit provoca l'ebullició a menor temperatura i fa augmentar així el valor de  $\Delta t$ ; això evita haver d'augmentar la pressió del vapor de calefacció, mesura que incrementaria el cost de l'operació. D'altra part, l'operació a buit –i, per tant, a temperatura més baixa– afavoreix la concentració de substàncies termosensibles, aspecte molt important en la indústria alimentària.

Com a inconvenient, cal tenir en compte que el fet d'operar a temperatura més baixa implica un augment de la viscositat de la dissolució, amb la consegüent disminució d'U.

### *Exemple 1.*

*Es volen concentrar 1000 kg/h de suc de tomàquet en un evaporador de convecció forçada, del 10% al 30% (en massa) de sòlids. Es treballarà a una pressió tal que la temperatura d'ebullició serà de 56 °C. La calefacció s'efectuarà amb vapor saturat a 2 atm abs ( $t_s = 120$  °C). El coeficient global de transmissió de calor s'estima en 3000 kcal/(h m<sup>2</sup> °C). Calculi's la superfície calefactorsa necessària i la quantitat de vapor viu consumit, si l'alimentació entra a 15 °C.*

*Dades:  $c_{p, suc} = 0,95$  kcal/kg °C;  $\lambda_{56\text{ °C}} = 567$  kcal/kg;  $\lambda_{120\text{ °C}} = 527$  kcal/kg; consideri's que no hi ha increment ebulloscòpic ni pèrdues a l'ambient.*

### **Solució:**

$$\begin{aligned} \text{Balanz de matèria: } 1000 &= E + C \\ 1000 \cdot 0,1 &= C \cdot 0,3 \end{aligned}$$

$$\text{d'on} \quad E = 667 \text{ kg/h}, \quad C = 333 \text{ kg/h.}$$

$$\begin{aligned} \text{Càrrega calorífica: } Q &= 1000 \cdot 0,95 \cdot (56 - 15) + 667 \cdot 567 = 417139 \text{ kcal/h} \\ Q &= U A (t_s - t_p) = 3000 A (120 - 56) = 192000 A \\ A &= 2,2 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Consum de vapor: } \frac{417139}{527} = 791 \text{ kg/h}$$

Suposant unes pèrdues a l'ambient del 5% de la calor "útil", el consum de vapor seria:

$$Q' = 417139 \times 1,05 = 437996 \text{ kcal/h}$$

$$S' = \frac{437996}{527} = 831 \text{ kg/h}$$

### Exemple 2

En un evaporador es concentren 890 kg/h d'una dissolució d'àcid tartàric del 20% (en massa) al 50%. L'alimentació entra a 18 °C. L'aparell treballa a un buit tal (0,1 atm abs) que la dissolució bull a 74 °C (increment ebulloscòpic = 29 °C). La calefacció s'efectua amb un serpenti de plom (la dissolució té inicialment un 3,5 % d'àcid sulfúric) amb una superfície de 14 m<sup>2</sup>; el vapor de calefacció és saturat a 1,7 atm abs. Les pèrdues són d'aproximadament el 5% de la calor transferida.

Calculi's la capacitat de l'aparell si la pressió del vapor de calefacció s'augmenta a 2 atm abs.

Dades:  $c_p$  àcid tartàric = 0,3 kcal/kg °C;  $C_p$  aigua = 1 kcal/kg °C;  $C_p$  vapor = 0,46 kcal/kg °C.

Calor latent del vapor:	$P$ , atm abs.	$t_s$ , °C	$\lambda$ , kcal/kg
	0,1	45	573
	1,7	114	530
	2	120	527

**Solució:**

Balanç de matèria:

$$890 = E + C$$

$$890 \cdot 0,2 = 0,5 C; C (=0,4 F) = 356 \text{ kg/h}, E (=0,6 \cdot F) = 534 \text{ kg/h}$$

Balanç d'energia:

$$890 \cdot 18 \cdot [(1-0,2) \cdot 1 + 0,2 \cdot 0,3] + S(530 + 1 \cdot 114) = 534[573 + 45 \cdot 1 + (29 \cdot 0,46)] + S \cdot 114 \cdot 1 + 356 \cdot 74 \cdot (0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 0,3) + 0,05 \cdot S \cdot 530$$

$$S = 676 \text{ kg/h}$$

$$Q = 676 \cdot 530 = 358280 \text{ kcal/h}$$

Càlcul del coeficient global de transmissió de calor:

$$358280 = U \cdot 14 \cdot (114 - 74); U = 640 \text{ kcal/(h m}^2 \text{ °C)}$$

*Amb vapor a 2 atm abs.:*

$$Q' = 640 \cdot 14 \cdot (120 - 74) = 412160 \text{ kcal/h.}$$

$$S' = 412160/527 = 782 \text{ kg/h.}$$

*Nou balanç d'energia:*

$$F \cdot 18 \cdot 0,86 + 782(527 + 1 \cdot 120) = 0,6 \cdot F \cdot (573 + 45 \cdot 1 + 29 \cdot 0,46) +$$

$$+ 0,4 \cdot F (74 \cdot 0,65) + 782 \cdot 120 + 0,05 \cdot 782 \cdot 527$$

$$F = 1023 \text{ kg/h;} \quad E = 614 \text{ kg/h}$$

*(Les calor especifices de les dissolucions s'han calculat com a mitjana ponderada de les de solut i aigua).*

## 7. TIPUS D'EVAPORADORS

Els diferents evaporadors poden ésser classificats de diverses maneres: de superfície submergida i de pel·lícula, de convecció natural i de convecció forçada, etc., atenent al seu disseny i a la forma d'operació. La classificació en les dues categories de superfície submergida i de pel·lícula és una de les més racionals.

Els primers tenen la superfície calefactora totalment submergida en la dissolució. La calor és transferida al líquid, que bull sobre la mateixa superfície o en un altre punt de l'aparell. En els aparells de convecció natural els coeficients de transmissió de calor són baixos, de manera que es requereixen diferències de temperatura ( $\Delta t$ ) elevades per compensar aquest fet. Si la convecció és forçada, la velocitat de transmissió de calor és considerablement més elevada.

En els evaporadors de pel·lícula, la superfície calefactora no pot considerar-se submergida en el líquid, sino que està recoberta d'una prima pel·lícula que es desplaça a una considerable velocitat (arrossegada pel vapor) i en un règim hidrodinàmic molt turbulent. Això fa que els coeficients de transmissió de calor siguin molt alts.

A continuació es descriuen breument alguns dels aparells més utilitzats en la indústria alimentària; a la taula 1 es presenta un criteri de pre-selecció segons les propietats de la dissolució.

### 7.1. Evaporador de tubs curts verticals

Aquest aparell, esquematitzat a la fig. 1, havia estat molt utilitzat, però la seva baixa transmissió de calor ha fet que s'hagi anat substituint per altres

dissenys; s'empra encara en la concentració de melasses i de sal. Els tubs tenen un diàmetre de 5 a 10 cm, amb una relació diàmetre/longitud compresa entre 1/12 i 1/15; el tub central ocupa del 40 al 100% de l'àrea transversal dels altres. El conjunt de tubs es troba submergit totalment en el líquid.

## 7.2. Evaporador de serpenti

És constituït essencialment per un serpenti calefactor situat dins un recipient de grans dimensions. La seva velocitat de transmissió de calor, no gaire elevada, fa que sigui poc emprat; s'utilitza en la concentració final de melasses.

## 7.3. Evaporador de canviador extern

En aquest aparell l'element calefactor és exterior al cos del separador (fig. 3). La dissolució ascendeix pels tubs, i l'ebullició pot tenir lloc en aquests o en un punt més alt; la posició del canviador respecte al cos de l'evaporador permet establir una determinada columna hidrostàtica sobre la superfície calefactors. És adequat per a líquids de baixa viscositat, sense sòlids en suspensió.

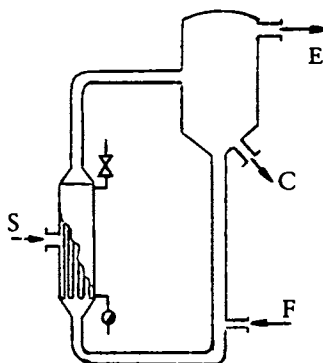


FIGURA 3. Evaporador de canviador extern

## 7.4. Evaporador de circulació forçada

En aquest tipus d'evaporador (fig. 4) una bomba proporciona una elevada velocitat (de 2 a 5 m/s) de circulació del líquid per l'element calefactor, que sol ésser un canviador tubular vertical o horitzontal de dos passos. Això permet obtenir elevats coeficients de transmissió de calor, i es redueix al mateix temps la deposició d'incrustacions. Evidentment, el bombament

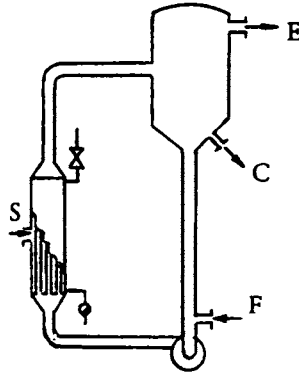


FIGURA 4. Evaporador de circulació forçada

suposa un cost addicional. Solen treballar amb una certa columna hidrostàtica sobre la superfície calefactors; la pressió impedeix així l'ebullició sobre la superfície del canviador de calor, i s'evita la formació d'incrustacions.

És un aparell adequat per a dissolucions amb sòlids en suspensió o amb problemes d'incrustació (per exemple, suc de tomàquet), i per a dissolucions amb una certa viscositat o que formen escuma; és també aconsellable quan cal construir-lo amb material car (monel, titani), a causa de la seva menor grandària.

### 7.5. Evaporadors de pel·lícula

Els aparells esmentats en els paràgrafs anteriors presenten com a característiques comunes el tenir la superfície calefactors submergida continuament en la dissolució, i la retenció d'un volum considerable de líquid durant temps relativament llargs, moltes vegades superiors a una hora.

Tot i treballar al buit, això pot constituir una prova excessiva per a substàncies tèrmicament molt delicades. A continuació es presenten uns altres tipus d'evaporadors, els de pel·lícula, en els quals el temps de retenció pot reduir-se fins a pocs segons.

### 7.6. Evaporador de pel·lícula ascendent

L'element calefactors és un feix de tubs molt llargs (de 3 a 6 m) i de diàmetre relativament petit (de 3 a 6 cm) (fig. 5). El líquid, preferentment

escalfat prèviament fins a una certa temperatura, entra per la part inferior i a una determinada alçada comença a bullir. Les bombolles de vapor, actuant com a pistons, fan ascendir el líquid a gran velocitat; de fet, en un règim correcte d'operació, aquestes bombolles arriben a ocupar tota la part central dels tubs, i originen una pel·lícula anular sobre la superfície d'aquests que ascendeix a gran velocitat. Hom aconsegueix així temps d'estada molt curts (5 a 10 segons) i bons coeficients de transmissió de calor. La barreja de líquid i vapor és separada usualment en un aparell de tipus ciclònic, aprofitant la força centrífuga deguda a l'elevada velocitat de circulació.

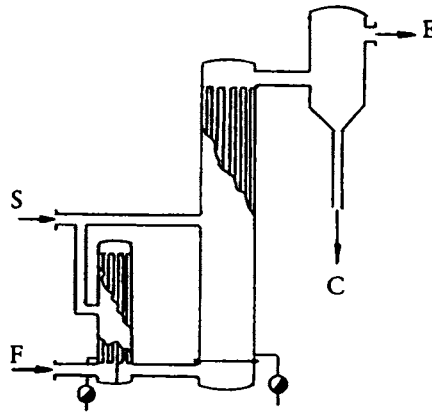


FIGURA 5. Esquema d'un evaporador de pel·lícula ascendent amb pre-escalfament de l'alimentació

S'utilitzen per a líquids preferentment sense sòlids, de viscositat moderada (llet, suc de fruita, extractes).

### 7.7. Evaporador de pel·lícula descendent

L'alimentació, preferentment pre-escalfada, entra en els tubs —de dimensions semblants als de pel·lícula ascendent, però amb un diàmetre lleugerament més gran— per l'extrem superior, i hi descendeix en forma de pel·lícula anular (fig. 6). La temperatura és pràcticament constant sobre tota l'alçada dels tubs —en els evaporadors de pel·lícula ascendent sol haver-hi un petit gradient en la part inferior— i hi ha poca pèrdua de càrrega. És possible treballar amb  $\Delta t$  excepcionalment petits, fins i tot de 2 °C. La velocitat de transmissió de calor sol ésser més elevada que en els



de pel·lícula ascendent, car hi ha més turbulència i la pel·lícula és més prima, però presenten l'inconvenient d'una distribució del líquid més difícil. La barreja de líquid i de vapor és separada, aprofitant la força centrífuga, en un recipient extern.

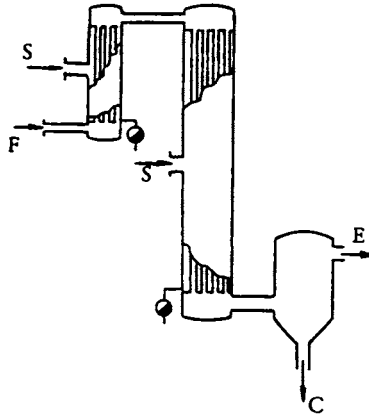


FIGURA 6. Evaporador de pel·lícula descendent amb pre-escalfament d'alimentació

L'evaporador de pel·lícula descendent presenta coeficients de transmissió de calor encara més elevats que els de pel·lícula ascendent, per la major turbulència i perquè la pel·lícula de líquid és més prima. En canvi, té l'inconvenient de presentar algunes dificultats en la distribució del líquid sobre la superfície calefactors de tot el feix de tubs.

Poden utilitzar-se per a la concentració de líquids de viscositat mitjana (sucs de fruita, llet).

### 7.8. Evaporador de pel·lícula agitada

Aquest aparell és del tipus de pel·lícula, però aquesta és creada sobre la superfície calefactors mitjançant les paletes d'un rotor central (fig. 7). El sistema de paletes rotatives provoca la formació d'una pel·lícula molt prima, amb un grau d'agitació elevat; d'aquesta manera s'aconsegueixen bons coeficients de transmissió de calor, fins i tot amb líquids de gran viscositat. El líquid flueix cap avall, en espiral.

Les paletes poden ésser rígides, amb una certa separació de la paret, o bé escombrant-la (grafit, cautxú), o bé articulades. Aquest evaporador pot tractar també líquids amb sòlids en suspensió, i evita la formació d'incrus-

tacions. És molt adequat per a la concentració de productes termosensibles, gràcies als temps d'estada molt curts, i permet tractar dissolucions de gran viscositat. Sol tenir, però, alt preu i baixa capacitat; presenta també els inconvenients inherents als sistemes que tenen peces en moviment.

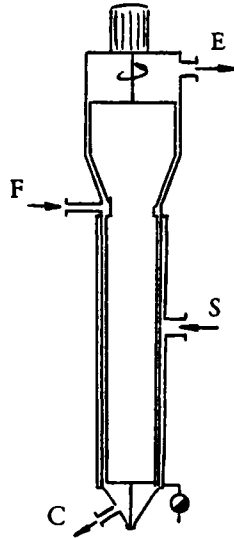


FIGURA 7. Evaporador de pel·lícula agitada

### 7.9. Evaporador de plaques

El canviador de calor d'aquest evaporador té una certa semblança amb un filtre premsa de plaques i marcs. Una sèrie de plaques són premsades formant un bloc; les juntes d'estanqueïtat provoquen l'aparició d'una cambra entre cada dues plaques (fig. 8). En aquests espais hi circulen, alternativament, el vapor de calefacció i la dissolució –aquesta, normalment primer en sentit ascendent i després descendent– i es transfereix la calor a través de les plaques. Aquestes estan proveïdes d'unes ondulacions que proporcionen una bona resistència mecànica malgrat el seu poc gruix, i que augmenten la turbulència per a millorar la transmissió de calor. La dissolució, que circula en convecció forçada, bull normalment a l'interior del canviador; si hi ha problemes d'incrustació, un disseny adient (estrangulament a la sortida) augmenta la pressió i impedeix l'ebullició sobre la superfície calefactorsa.

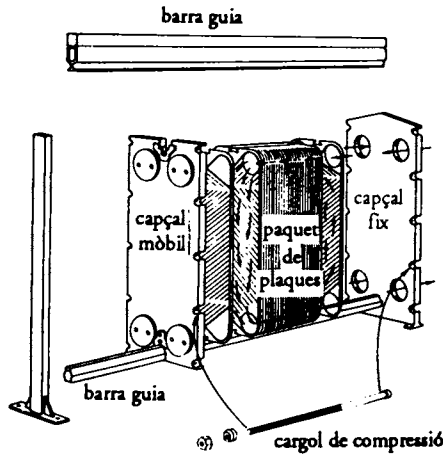


FIGURA. 8. Bescanviador de plaques; després de circular-hi, la dissolució entra en una cambra en la que el vapor és separat del concentrat

Aquest evaporador ofereix velocitats elevades de transmissió de calor, temps de residència molt curts, i possibilitat de variar la superfície calefactors –i, per tant, la capacitat– afegint o retirant plaques; requereix poca alçada

TAULA 1. Pre-selecció de l'evaporador segons les propietats de la dissolució

evaporador líquid	tubs curts verticals	circulació natural (canv. extern)	circulació forçada (canv. extern)	pel·lícula ascendent	pel·lícula descendent	pel·lícula agitada	plaques
Baixa viscositat (fins a 150 cP)	⊙*	●	⊙*	●	●	●	●
Viscositat mitjana (fins a 1500 cP)	●	—	●	—	●	●	●
Alta viscositat (més de 2000 cP)	—	—	—	—	—	●	—
Inorgànics solubilitat inversa, o normal amb problemes incrustació o crist.	—	—	●	—	—	●	●
Termosensibles	—	—	—	●	●	●	●
Amb sòlids en suspensió	—	—	●	—	—	●	—
Amb molta escuma	⊙	⊙	●	●	●	●	⊙

\* sovint és car;

⊙ amb dispositiu especial

i ofereix una gran facilitat de neteja, ja que tota la superfície de les plaques és accessible de manera còmoda. Per tot això, és molt utilitzat en la concentració de materials termosensibles o en aquells casos en què una bona neteja és essencial per a evitar contaminacions, fermentacions, etc.

## 8. APROFITAMENT DEL VAPOR

El corrent de vapor produït en un evaporador té una gran quantitat d'energia; el seu aprofitament implicarà doncs una millora en l'economia de l'operació.

La utilització d'aquest vapor presenta com a inconvenient, respecte al vapor viu (procedent de la caldera) consumit en l'evaporador, el fet de tenir una temperatura de saturació inferior; en canvi, gràcies a la seva baixa pressió, cada kg d'aquest vapor cedirà en condensar una quantitat de calor superior a la cedida pel vapor de calefacció.

Existeixen diversos mètodes d'aprofitament, que s'exposen a continuació.

### 8.1. Evaporació en múltiple efecte

El vapor  $E_1$  produït en un evaporador, a temperatura  $t_1$  i pressió  $P_1$ , pot ésser utilitzat com a medi calefactor en un segon evaporador semblant al primer; per què això sigui possible, és necessari, evidentment, que aquest segon evaporador –segon “efecte”– treballi a una pressió tal que la temperatura d'ebullició del líquid hi sigui inferior a la temperatura de saturació del vapor  $E_1$  (fig. 9). Això s'aconsegueix gràcies a una gradual reducció de

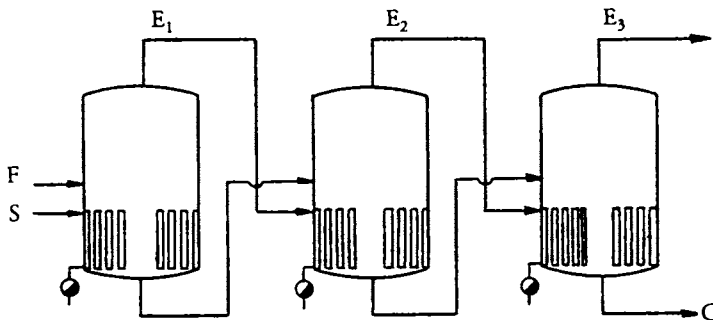


FIGURA 9. Esquema d'un evaporador de triple efecte

la pressió d'operació en els diferents aparells (o "efectes"), des del valor més alt (corresponent a la pressió del vapor de calefacció provinent de la caldera) fins a la pressió existent en el darrer efecte, que és el que està connectat a la instal·lació de buit.

El vapor  $E_2$  produït en el segon efecte pot ésser encara utilitzat en un tercer evaporador, i així successivament; el nombre d'efectes que es poden instal·lar en sèrie té, però, limitacions d'ordre pràctic —increment de temperatura global, dificultat d'aconseguir un bon funcionament si aquest nombre és massa elevat— i d'ordre econòmic —optimització, cost del conjunt.

És interessant observar que en l'operació d'un múltiple efecte hom fixa només la màxima temperatura del sistema (la de saturació del vapor viu de calefacció al primer efecte) i la mínima (la d'ebullició en el darrer efecte, que depèn de la instal·lació de buit); les temperatures d'ebullició dels efectes intermedis, però, és la mateixa unitat la que les estableix, repartint l'increment total entre els diversos efectes, segons les condicions d'operació i el coeficient de transmissió de calor de cada aparell.

### *Capacitat i economia d'un múltiple efecte*

En un aparell com el de la figura 9, les velocitats de transmissió de calor a cada efecte són:

$$\begin{aligned} Q_1 &= U_1 A_1 (\Delta t)_1 \\ Q_2 &= U_2 A_2 (\Delta t)_2 \\ Q_3 &= U_3 A_3 (\Delta t)_3 \end{aligned}$$

Els evaporadors d'un múltiple efecte solen construir-se tots ells exactament iguals; així,  $A_1 = A_2 = A_3$ . D'altra part, suposant que el coeficient de transmissió de calor és el mateix en tots els efectes (això no és cert a la pràctica, però pot acceptar-se en una primera aproximació), els diversos coeficients globals  $U_i$  poden ésser substituïts per un de mitjà  $U_m$ . En aquest cas,

$$\begin{aligned} Q &= \sum Q_i = A U_m \{ (\Delta t)_1 + (\Delta t)_2 + (\Delta t)_3 \} = \\ &= A U_m \Delta t_{\text{global}} \end{aligned}$$

Aquesta expressió mostra doncs que la capacitat d'un múltiple efecte és aproximadament igual a la d'un evaporador d'efecte simple que tingui la mateixa àrea i que treballi amb el mateix increment de temperatures global.

L'economia, en canvi, varia segons el nombre d'efectes. Si bé, en principi, millora a mesura que s'incrementa aquest nombre, a partir d'un cert valor l'addició de més efectes provocarà una disminució de l'economia. A mesura que augmenta el nombre d'efectes utilitzats per a una determinada concentració (fig. 10) disminueix el cost de l'aigua i del vapor consumits; simultàniament, però, augmenta el cost de l'aparell. Aquest cost augmenta de manera gairebé lineal, però el cost d'aigua i energia varia de manera diferent: inicialment (en passar d'un a dos efectes) es redueix notablement, però a mesura que augmenta el nombre d'efectes aquesta reducció és cada vegada menor (lleï dels rendiments decreixents). Aquest comportament implica clarament l'existència d'un nombre òptim d'efectes (mínim cost) al qual correspondrà, en cada cas, la màxima economia.

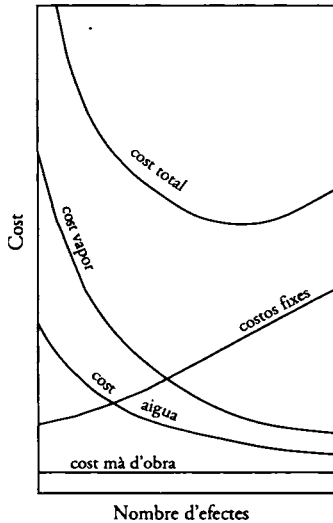


FIGURA 10. Variació del cost en funció del nombre d'efectes

### *Sistemes d'alimentació en un evaporador de múltiple efecte*

Hi ha diverses formes d'introduir i fer circular la dissolució en un efecte múltiple. A la fig. 9 pot veure's el sistema d'alimentació en "corrent directe". Es caracteritza perquè el vapor i el líquid avancen en el mateix sentit; ofereix l'avantatge de no requerir bombes per a fer passar el líquid d'un efecte al següent, car cada efecte opera a una pressió inferior a la de l'anterior i és

aquesta diferència de pressions la que fa circular el líquid. En canvi, té l'inconvenient que a mesura que el líquid es concentra la seva temperatura va baixant; en el darrer efecte, el líquid més concentrat es troba a la temperatura més baixa, augmenta la seva viscositat i disminueix doncs el valor d'U. A més, si el líquid d'alimentació és fred, el rendiment serà baix, car part del vapor viu consumit en el primer efecte s'utilitzarà per a escalfar l'alimentació fins a la temperatura d'ebullició, i disminuirà la quantitat de vapor  $E_1$  produïda.

Per a alimentació freda i líquids viscosos, és millor doncs l'alimentació a "contracorrent" (fig. 11-a), en la qual el vapor i el líquid circulen en direccions oposades; d'aquesta manera el líquid més viscos es troba a la màxima temperatura, i tot el vapor consumit en el primer efecte s'empra en la generació de més vapor. Es requereixen, però, bombes entre cada dos efectes per a fer circular el líquid.

Un sistema que presenta alhora els avantatges de les alimentacions en corrent directe i en contracorrent és el d'alimentació "mixta" (fig. 11-b). És adequat en aquells casos en què el problema de la viscositat sorgeix pràcticament només en la darrera fase de la concentració.

Finalment, en el sistema d'alimentació "en paral·lel" (fig. 11-c) el líquid no circula d'un efecte a l'altre, sinó que l'alimentació diluïda és introduïda directament en tots els efectes. S'utilitza en alguns casos en què es concentra fins a la cristallització.

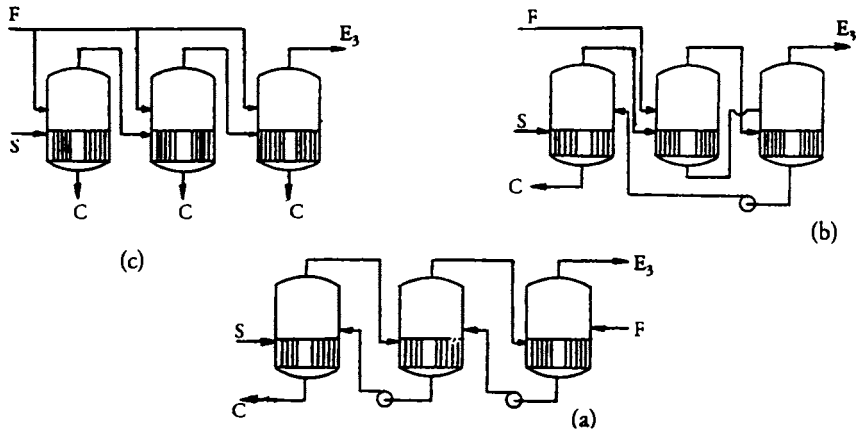


FIGURA 11. Sistemes d'alimentació en un evaporador de múltiple efecte:  
 a) contracorrent, b) mixta, c) en paral·lel.

## 8.2. Bomba de calor

L'aprofitament del vapor pot efectuar-se mitjançant un fluid auxiliar; aquest fluid, per exemple amoníac, és evaporat en un bescanviador de calor en el qual condensa el vapor procedent de la dissolució. Posteriorment, el vapor del fluid auxiliar, a baixa pressió, és comprimit per a elevar la seva temperatura de condensació, i és introduït com a medi calefactor en el bescanviador de calor de l'evaporador. Una vegada condensat, és expansionat a través d'una vàlvula i torna a ésser evaporat.

Aquest procediment permet treballar a temperatures molt baixes, i ha estat aplicat a la concentració de suc de cítrics, proteïnes, etc. Actualment resulta, però, força car a causa de la inversió inicial.

## 8.3. Compensió del vapor

Existeix també la possibilitat d'utilitzar el vapor sortint d'un evaporador en el mateix aparell. Evidentment, per a fer això serà necessari elevar la seva temperatura de saturació, és a dir, comprimir-lo.

Hi ha dues formes per a realitzar això: la compressió mecànica i la compressió tèrmica. En la primera (fig. 12), el vapor produït per l'evaporador passa per un compressor, usualment de tipus rotatiu, en el qual és comprimit fins a la pressió adequada perquè la seva temperatura de condensació sigui la requerida perquè l'evaporador funcioni amb un  $\Delta t$  adient; del compressor en surt, evidentment, vapor rescalfat. En aquest procés, el compressor consumeix una certa quantitat d'energia mecànica, funció del seu rendiment (fig. 12).

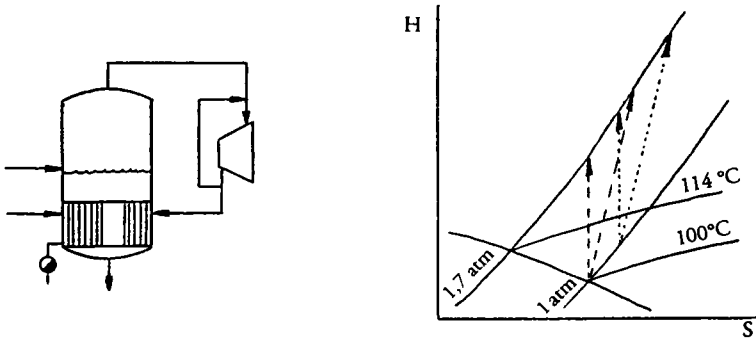


FIGURA 12. Compensió mecànica del vapor



Aquest sistema ofereix l'avantatge de no consumir aigua de refrigeració, car es comprimeix tot el vapor produït, i a més a més ocupa poc espai. Presenta en canvi limitacions degudes a l'eventual corrosivitat del líquid concentrat i, sobretot, degudes a la necessitat que l'evaporador funcioni a pressions properes a l'atmosfèrica, perquè resulti econòmic: el volum específic del vapor creix ràpidament si disminueix la pressió, i es requereix llavors un compressor de gran capacitat; això limita l'aplicació en el cas de productes sensibles a la calor.

En la compressió tèrmica, una part del vapor sortint és comprimit ("barrejat") amb vapor viu a alta pressió (fig. 13). Aquesta operació té lloc en un ejector, on s'aprofita l'efecte Venturi per a barrejar íntimament ambdós vapors, que després són comprimits fins a la pressió final mitjançant un conducte de secció creixent denominat "difusor".

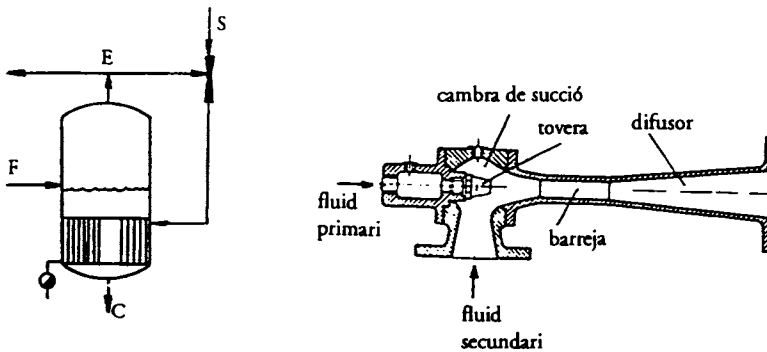


FIGURA 13. Compressió tèrmica

D'aquesta manera s'augmenta l'economia en una quantitat equivalent a aproximadament un efecte més, però amb una inversió molt petita. Aquesta tècnica, que també requereix poc espai, és aplicable a una àmplia gamma de condicions de treball en l'evaporador, des d'alt buit fins a pressions relativament altes; és doncs adequat per a la concentració de productes termosensibles. Té en canvi poca flexibilitat, car els ejectors estan dissenyats per a unes condicions determinades de funcionament, amb poc marge de variació, i presenta una limitació: el vapor viu ha de tenir una pressió mínima d'aproximadament 9 atm abs.

Tant si l'evaporador utilitza compressió mecànica com tèrmica, l'engedada —fins a arribar a règim estacionari— s'ha de fer amb vapor viu (caldera),

i en ambdós casos hi ha contaminació dels condensats ( no poden retornar-se a la caldera ).

L'elecció del sistema d'aprofitament de vapor —múltiple efecte, bomba de calor, compressió tèrmica o compressió mecànica— depèn de consideracions diverses: naturalesa del producte, inversió possible, i, sobretot, balanç global de vapor —existències i disponibilitat— a la fàbrica.

## 9. EVAPORACIÓ DISCONTÍNUA

En general, els evaporadors operen en continu, aprofitant els diversos avantatges que aquest sistema ofereix. Nogensmenys, quan cal concentrar quantitats relativament petites, o bé en aquells casos en què l'addició dosificada de determinats productes complicaria massa l'operació, hom utilitza l'evaporació per càrregues o discontinua.

La característica de l'evaporació discontinua és la variació de la composició del líquid —i de la temperatura d'ebullició, si hi ha increment ebulloscòpic— en funció del temps; normalment es treballa a pressió constant.

Cal distingir dues etapes clarament diferenciades: escalfament de la dissolució fins a la temperatura inicial d'ebullició, i posteriorment concentració per ebullició; a cada etapa li correspondrà un mecanisme de transmissió de calor diferent. La primera etapa presenta un coeficient global de transmissió de calor baix; la velocitat de transmissió de calor disminueix lleugerament amb el temps, a causa de la reducció gradual de la diferència de temperatures entre la superfície calefactora i la dissolució (bé que aquest efecte és parcialment compensat per la disminució de la viscositat de la dissolució). En canvi, la velocitat de transmissió de calor augmenta considerablement quan comença l'ebullició (fig. 14). La variació del mecanisme de transmissió de calor introdueix un nou valor del coeficient global  $U$ , considerablement superior al primer. A partir d'aquest moment, l'augment de la viscositat i probablement de la temperatura d'ebullició de la dissolució provocaran una disminució gradual de la velocitat de transmissió de calor a mesura que té lloc l'evaporació; novament, un altre factor, la disminució del nivell de líquid en l'evaporador, pot compensar parcialment aquest efecte.

A continuació hom presenta un mètode simplificat per al càlcul del temps d'evaporació en aquests casos d'operació discontinua.

En el període d'escalfament pot plantejar-se la següent equació:

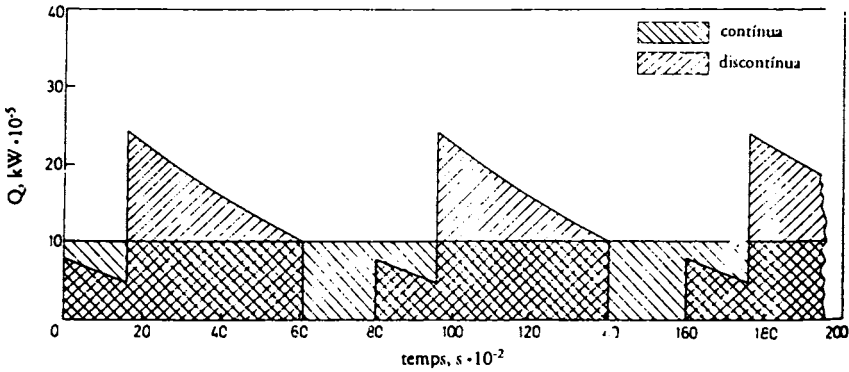


FIGURA 14. Evaporació discontinua: evolució de la velocitat de transmissió de calor

$$Q = m c_p \frac{dt}{d\theta} = U A (t_s - t)$$

Separant variables,

$$\int_{t_i}^{t_f} \frac{dt}{t_s - t} = \frac{U A}{m c_p} \int_0^{\theta} d\theta$$

Integrant, hom obté el temps d'escalfament:

$$\theta = \frac{m c_p}{U A} \ln \frac{t_s - t_i}{t_s - t_f}$$

període d'ebullició:

$$\frac{dq}{d\theta} = U A \Delta t = U A (t_s - t)$$

En aquesta expressió hi ha dos paràmetres constants: A i  $t_s$ . Per tant,

$$\theta = \frac{1}{A} \int_0^q \frac{dq}{U (t_s - t)}$$

Aquesta integració pot resoldre's gràficament (vegeu l'exemple).

**Exemple 3.**

Cal concentrar 10000 kg d'una dissolució de sucre, a 20 °C, del 50% (en massa) fins al 75%. Calculeu el temps necessari.

Dades:

$A = 40 \text{ m}^2$ ; vapor de calefacció:  $t_s = 120 \text{ °C}$ ;  $P_e = 0,13 \text{ atm}$ . ( $t_s = 50 \text{ °C}$ )  
 $U_{\text{calef.inicial}} = 0,38 \text{ kW/m}^2 \text{ K}$ ;  $c_{p \text{ diss.inicial}} = 3 \text{ kJ/kg K}$ .

Dades per a l'etapa d'ebullició:

$x$ , kg/kg diss.	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$U$ , kW/m <sup>2</sup> K	0,90	0,81	0,67	0,58	0,50	0,41
EPE, °C	2	2,5	3,3	4,3	5,8	7,5
$t$ , °C	52	52,5	53,3	54,3	55,8	57,5

Solució:

Etapa de calefacció inicial:

$$Q_h = 10000 \cdot 3 \cdot (52 - 20) = 96 \cdot 10^4 \text{ kJ}$$

$$\text{temps} = \frac{10.000 \cdot 3}{0,38 \cdot 40} \ln \frac{120 - 20}{120 - 52} = 756 \text{ s (0,21 h)}$$

Etapa d'ebullició. Els càlculs s'han resumit en la taula següent:

$x$ , kg/kg	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
$\Delta t$ , °C	68	67,5	66,7	65,7	64,2	62,5
$U$ , kW/m <sup>2</sup> °C	0,90	0,81	0,67	0,58	0,50	0,41
aigua evaporada, kg	0	909	1667	2308	2857	3333
calor de vaporització, kJ/kg	-	2390	2392	2397	2400	2404
$q$ , kJ	0	$2,17 \cdot 10^6$	$3,99 \cdot 10^6$	$5,53 \cdot 10^6$	$6,86 \cdot 10^6$	$8,01 \cdot 10^6$
$\frac{1}{U \Delta t}$ , m <sup>2</sup> /kW	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,82 \cdot 10^{-2}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$2,62 \cdot 10^{-2}$	$3,15 \cdot 10^{-2}$	$3,90 \cdot 10^{-2}$

La integració gràfica pot veure's en la figura adjunta (fig. 15). D'aquesta figura, el temps d'ebullició resulta de 4675 s (1,3 h). Per tant, el temps total és de 1,5 h.

(En aquest exemple no s'han tingut en compte les pèrdues a l'ambient; aquestes solen ésser de l'ordre de 3 – 5%).

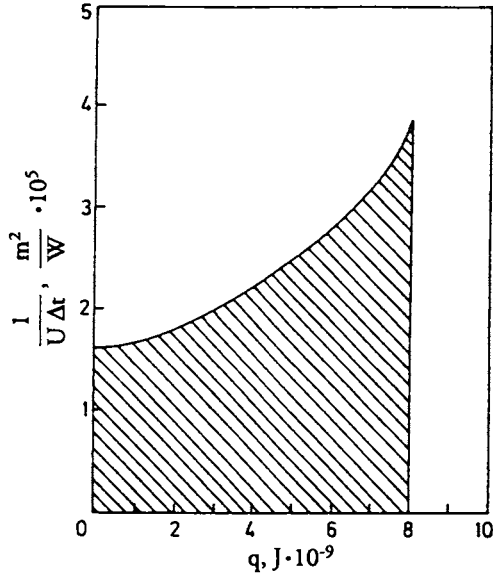


FIGURA 15. Càlcul de temps d'evaporació per integració gràfica

## 10. PROBLEMES POTENCIALS EN L'EVAPORACIÓ

En la pràctica de l'evaporació apareixen eventualment una sèrie de problemes, a vegades de solució difícil, que poden complicar considerablement l'operació. Sovint, aquests inconvenients poden eliminar-se amb una selecció adequada de l'equip i de les condicions d'operació. A continuació hom comenta breument els més importants.

### 10.1. Degradació tèrmica del producte

Aquest és un aspecte molt important, en general, en la indústria alimentària. Normalment, la degradació tèrmica en un evaporador és deguda a l'estada del producte —o d'una part del producte— durant un temps excessivament llarg a una certa temperatura. Això sol passar en els evaporadors

que tenen un gran volum de retenció; en aquests sol haver-hi a més una bona barreja, de manera que una part del líquid pot estar en l'aparell un temps molt superior al temps d'estada mitjà.

La concentració de productes termosensibles ha d'efectuar-se doncs a un buit elevat, que proporcioni baixes temperatures d'operació, i en aparells de temps d'estada del producte molt curts i en els quals no hi hagi pràcticament barreja —evaporadors de pel·lícula o de plaques—, per a poder conèixer així amb força precisió el temps durant el qual el producte es troba a la temperatura d'operació. En general, la tendència actual consisteix sobretot a reduir el temps d'estada, més que no pas la temperatura.

## 10.2. Formació d'incrustacions

L'aparició de crostes o "incrustacions" sobre la superfície calefactora ha d'evitar-se sempre que sigui possible, car ocasiona els següents efectes:

- disminució de la capacitat d'evaporació, a causa de la resistència tèrmica addicional;
- probable degradació del material dipositat en les incrustacions, deguda a la llarga exposició a la temperatura existent sobre la superfície calefactora (molt propera a la de saturació del vapor de calefacció). Aquest material pot comunicar mal gust, olor o color a la resta del producte concentrat;
- possible contaminació, sobretot durant les parades, a causa de fermentacions, aparició de fongs, etc.

La formació d'incrustacions pot ésser deguda a la precipitació de sals de solubilitat invertida, a increments locals de la concentració fins a la sobresaturació, o a l'aparició de substàncies insolubles per degradació del producte; les suspensions de sòlids poden també provocar-la. Entre els productes termolàbils pot citar-se el cas d'algunes proteïnes solubles que passen a ésser insolubles en cas d'un excessiu escalfament.

Les incrustacions poden evitar-se utilitzant evaporadors de superfície submergida amb una certa columna hidrostàtica sobre aquesta, de manera que l'ebullició no tingui lloc sobre la superfície calefactora; una ràpida circulació del líquid contribueix a evitar la deposició de sòlids.

Una tècnica utilitzada en alguns casos consisteix a fer circular l'alimentació per un camp magnètic de forta intensitat; la crosta dipositada és llavors poc consistent, i la circulació del líquid és capaç d'anar-la arrencant.

Evidentment, en el cas de no poder evitar les incrustacions, l'evaporador ha d'estar dissenyat de manera que permeti una fàcil neteja.

### 10.3. Formació d'escuma

Molts líquids orgànics (la llet, per exemple) formen escuma quan bullen, sobretot si l'ebullició té lloc a buit. Si aquesta escuma és persistent i no s'elimina, pot estendre's per tota la línia de buit cap al condensador, amb la consegüent pèrdua de producte i contaminació de l'aigua de condensació.

L'escuma pot eliminar-se de diferents maneres: impedit-ne la formació mitjançant l'addició de substàncies antiescumants, o bé trencant-la mecànicament o tèrmicament.

L'addició d'antiescumants no és, en general, adequada en la indústria alimentària.

La destrucció mecànica pot aconseguir-se dirigint el corrent de vapor contra una superfície deflectora, o en alguns casos amb separadors de tipus centrífug –cicló– en els quals el vapor entra tangencialment, a una certa velocitat, en un recipient. Pot instal·lar-se també un trencaescumes rotatiu, però aquesta solució és millor reservar-la per a casos especials.

Tèrmicament, l'escuma pot destruir-se instal·lant en la part superior de l'espai de separació una placa calefactora escalfada amb vapor.

### 10.4. Arrossegament de gotes

L'arrossegament de petites gotes de líquid pel vapor de sortida ha d'evitar-se tant com sigui possible, car implica pèrdua de producte i contaminació de l'aigua de condensació.

En principi, l'arrossegament ha d'ésser petit si l'espai de separació està ben dissenyat. Moltes vegades, però, serà necessari instal·lar un separador. Els més corrents són els d'impacte, utilitzats freqüentment, i els ciclònics o centrífugs, instal·lats usualment en els evaporadors de pel·lícula ascendent o descendent.

### 10.5. Corrosió

Més que un problema específic de l'evaporació, és un problema comú a qualsevol operació, agreujat en aquest cas per la temperatura d'operació.

Pel costat del vapor, la corrosió pot ésser deguda a l'acumulació d'aire; això pot solucionar-se amb una bona purga automàtica. Pel costat del líquid, la corrosió pot ésser deguda a la presència d'àcids, medis oxidants, etc; cal tenir en compte també les eventuais altes concentracions en espais morts o sota capes d'incrustació (piles de concentració). En el cas dels acers inoxidable, molt utilitzats en la indústria alimentària, són especialment perillosos els clorurs, que poden provocar corrosions localitzades –picadures– que arriben a perforar la superfície calefactora; d'altra part, alguns àcids orgànics són capaços de solubilitzar la capa protectora dels acers inoxidable, i provocar així una ràpida corrosió, moltes vegades també localitzada. Cal tenir en compte que fins i tot taxes de corrosió molt baixes poden implicar una contaminació excessiva del producte.

La corrosió cal resoldre-la amb una selecció adient del material de construcció i amb un disseny encertat.

## 10.6. Pèrdua d'aroma

En la concentració de determinades substàncies, l'ebullició provoca la pèrdua d'aromàtics, moltes vegades més volàtils que l'aigua, amb el consegüent canvi de les propietats del producte. En aquests casos cal afegir-hi les essències adequades, que poden ésser recuperades, per un procés de separació, del vapor procedent de l'evaporació.

## 11. ESPECIFICACIONS BÀSIQUES D'UNA PLANTA D'EVAPORACIÓ

En l'adquisició d'una planta d'evaporació hi ha alguns aspectes que cal deixar clars per a evitar l'aparició de posteriors problemes i en els quals intervé l'experiència tant del comprador com del venedor (constructor):

- Tasca que ha de desenvolupar la planta: cabals i concentracions d'entrada i de sortida, tant actuals com futures; substàncies que ha de tractar.
- Serveis necessaris: calefacció, refrigeració, energia elèctrica, mà d'obra; pressions i temperatures necessàries i disponibles (actualment i en el futur).
- Lloc on s'ha d'instal·lar l'equip: espai disponible (superfície i alçada).
- Integració de la planta en la resta del procés; grau d'automatització.
- Disseny mecànic: cal efectuar-lo segons normes; d'aquesta manera serà més econòmic i els terminis més curts.



## NOTACIÓ

A	àrea de la superfície calefactora, $m^2$
C	cabal màssic de concentrat, $kg/h$
$c_p$	calor específica, $kcal/kg\ ^\circ C$ o $kJ/(kg\ K)$
E	velocitat d'evaporació, $kg/h$
F	cabal màssic d'alimentació, $kg/h$
H	entalpia del vapor, $kcal/kg$ o $kJ/kg$
h	entalpia del líquid, $kcal/kg$ o $kJ/kg$
P	pèrdues de calor, $kcal/h$ o $kW$
$P_e$	pressió en l'evaporador, atm
p	pressió de vapor de la dissolució a la temperatura t, mm Hg
$p_o$	pressió de vapor del dissolvent a la temperatura t, mm Hg
Q	velocitat de transmissió de calor, $kcal/h$ o $kW$
q	calor transferida, $kJ$
S	cabal màssic de vapor de calefacció, $kg/h$
t	temperatura de la dissolució en les etapes d'escalfament i ebullició, $^\circ C$
$\Delta t$	diferència de temperatures, $^\circ C$
U	coeficient global de transmissió de calor, $kcal/(h\ m^2\ ^\circ C)$ o $kW/(m^2\ K)$
x	concentració, $kg\ solut/kg\ dissolució$

*Lletres gregues*

$\lambda$	calor latent de condensació de l'aigua, $kcal/kg$ o $kJ/kg$
$\theta$	temps, h o s
$\tau$	temperatura, $^\circ C$

**BIBLIOGRAFIA**

- BADGER, W.L., BANCHERO, J.T.: "Introducción a la Ingeniería Química". Del Castillo. Madrid (1974).
- BLACKADDER, D.A., NEDDERMAN, R.M.: "A Handbook of Unit Operations". Academic Press. Nova York (1971).
- KERN, D.O.: "Process Heat Transfer". McGraw-Hill Book Co. Nova York (1980).
- MARQUEZ, M., CASAL, J.: "Evaporación por cargas: características y métodos de cálculo". Ingeniería Química, nº 221, p. 121, (1987).
- PAVLOV, K.F., ROMANKOV, P.G., NOSKOV, A.A.: "Examples and Problems to the Course of Unit Operations of Chemical Engineering". MIR. Moscú (1979).
- PERRY, R.H., GREEN, D. (eds.): "Perry's Chemical Engineering Handbook". 6ª ed. McGraw-Hill. Nova York (1984).

# PASTEURITZACIÓ I ESTERILITZACIÓ

*Enric Riera\**

## 1. INTRODUCCIÓ

### 1.1. Descripció dels principis de les operacions

La conservació dels aliments per la calor comprèn operacions com la cuita (amb totes les seves variants de fornejar, fregir, bullir, coure a la brasa, etc.), el blanqueig, la pasteurització i l'esterilització.

Els objectius que es busquen amb cada tipus d'operació són diferents. En coure volem fonamentalment preparar els aliments per fer-los més fàcils d'utilitzar i més digeribles. Al mateix temps, en coure els aliments destruïm microorganismes i enzims que podrien alterar-los i, de vegades, substàncies tòxiques, tant contingudes en els aliments com incorporades en el seu conreu o en la seva manipulació. Per tant, el coure, juntament amb la refrigeració posterior, poden veure's com processos de conservació dels aliments; però, en general, l'objectiu primari en coure els aliments no és tant conservar-los com millorar-los organolèpticament i fer-los més fàcils d'assimilar. En canvi, com a procés per a garantir la seguretat dels aliments, la seva variabilitat el fa inadequat llevat que s'especifiquin clarament les condicions en què es durà a terme. Així, la temperatura interior de la carn poc feta pot assolir només 60-65 °C, mentre que en la carn feta sol arribar-se a 80-85 °C. Precisament el fet de donar per bona la seguretat d'operacions de cuita o de torrat, sense comprovar si en la realitat la tenien, ha estat la causa de nombrosos casos de toxoinfeccions alimentàries. Aliments cuits a un grau de poc fets han estat els vehicles implicats més sovint però s'han donat casos, fins i tot, de supervivència de *Salmonella* en la torrefacció del cacao.

---

\* Llicenciat en Ciències Químiques. Consultor.

El blanqueig s'empra gairebé sempre com a preparació per a altres operacions de conservació com ara la congelació o l'esterilització. Consisteix a escalfar un temps, en general d'uns quants minuts, a una temperatura que depèn del producte i del tractament posterior, però que sol ésser de 80 a 100 °C, en vapor o en aigua calenta. Els objectius del blanqueig poden ésser diversos: inactivar enzims; dissoldre i arrossegar components solubles perjudicials (nutricionalment, toxicològicament o bé tecnològica); eliminar gasos dissolts; reduir el volum dels productes, etc. És sobretot una operació de preparació.

Els dos processos que es basen en l'aplicació de la calor, i que tenen com a objectiu fonamental la conservació dels aliments, són la pasteurització i l'esterilització. En principi cal dir que com més gran sigui la quantitat de calor que es doni al producte més llarga serà la seva conservació, menys condicions coadjuvants caldran durant aquesta conservació i ... més qualitat haurà perdut el producte, nutricionalment i sensorial.

Els processos tèrmics de conservació dels aliments es recolzen sempre en la combinació de dos principis:

a) Donar, en tots i cadascun dels punts del producte, la quantitat d'energia necessària per a inactivar una proporció suficient dels microorganismes que podrien alterar-lo, en unes circumstàncies determinades. Els microorganismes que cal inactivar depenen del tipus d'aliment i de les condicions en les quals es mantindrà després. Per exemple, el tractament que necessita una fruita com la pera és diferent del que necessiten els espinacs, atès que en els espinacs, després del tractament tèrmic, poden créixer un tipus de microorganismes que no poden fer-ho, en condicions normals, en les peres, fonamentalment perquè aquestes són més àcides. En el cas per exemple de la llet, si el producte es ven després del tractament, en un període de cinc o sis dies, tot mantenint-se mentrestant refrigerat, amb un tractament de pasteurització, per exemple a 71 °C i una durada de 15 s, n'hi haurà prou. Ara bé, si es vol que el producte duri sis o vuit mesos, i a més sense refredament, el tractament haurà d'ésser de l'ordre de 140 °C durant els mateixos 15 s.

b) Mantenir-los en unes condicions en què no puguin recontaminar-se ni puguin multiplicar-se els microorganismes que el tractament no hagi inactivat. Per a productes esterilitzats, això vol dir fonamentalment envasos completament estancs als microorganismes, als líquids i als gasos. En el cas de productes pasteuritzats, a més d'aquestes qualitats en els envasos caldrà, moltes vegades, algun tipus de precaució que podríem anomenar coadjuvant, com ara el fred en la llet o l'eliminació de l'oxigen en els envasos de cervesa.

Cal fixar-se en dues coses:

a) Que en el que portem esmentat no s'ha pressuposat en quin ordre s'han de fer les dues operacions: envasament i escalfament. Segons quin sigui aquest ordre, tindrem d'una part les operacions clàssiques com l'enllaunat seguit d'esterilització, o bé els processos asèptics, en els quals primer s'escalfa el producte i després se'l situa, en condicions asèptiques, dins d'uns envasos dels quals prèviament també s'ha eliminat la proporció necessària de microorganismes, ja sigui per procediments químics, tèrmics o amb radiacions.

b) S'ha evitat amb cura, fins ara, de parlar de destrucció de microorganismes en termes absoluts. Al contrari, s'ha parlat d'inactivar una proporció de microorganismes i s'ha parlat dels microorganismes que queden, la qual cosa pot semblar fins i tot que es contradiu amb el terme esterilització. S'ha anat amb aquesta cura per a introduir, des del primer moment, el concepte del que després anomenarem destrucció logarítmica o cinètica de primer ordre: que la destrucció no és absoluta, sinó que un tractament sempre inactiva una certa proporció dels microorganismes presents al començament, mai tots. La proporció dels que resten pot ésser tan petita com d'un de cada bilió ( $1/10^{12}$ ) en el cas de tractaments per productes de baixa acidesa, però mai zero. En endavant, encara que moltes vegades farem servir termes com destrucció dels microorganismes o temps de destrucció tèrmica, s'ha d'entendre el caràcter logarítmic, no absolut, d'aquest terme destrucció. D'altra banda, s'ha parlat d'impedir la reproducció dels microorganismes que sobreviuen al tractament. Això és especialment aplicable a la pasteurització, però també en l'esterilització que s'anomena comercial, en què es dissenya el tractament amb la finalitat de destruir les espores dels microorganismes patògens, però se sap que hi ha altres microorganismes no patògens, amb espores més resistents, que no pot pensar-se a destruir-los en la mateixa proporció, perquè aleshores hauria d'aplicar-se un tractament tan sever que la pèrdua de nutrients i de qualitat organolèptica del producte seria massa gran.

En la pasteurització es fa servir un tractament suficient per a inactivar una proporció pre-establerta *de les formes vegetatives* presents dels microorganismes perjudicials. Com a tals, entenem en primer lloc els patògens, però la pasteurització pot fer-se també per a eliminar microorganismes no patògens però perjudicials econòmicament. La pasteurització, doncs, no és un tractament que inactivi les espores ni tampoc formes vegetatives de microorganismes més resistents que els que siguin l'objectiu del procés. És per això que els productes pasteuritzats:

a) Requereixen després unes condicions coadjuvants, com poden ésser per exemple el fred, l'acidesa, o l'absència d'aire, que impedeixin o retardin el creixement dels microorganismes no inactivats, i

b) en general, tenen el temps de conservació més limitat que els esterilitzats.

En l'esterilització, en canvi, el procés es dissenya per a destruir no només les formes vegetatives sinó també les espores dels microorganismes patògens. Les espores estan considerades com les formes de vida més resistents a les agressions exteriors, ja siguin en forma d'agents químics, de calor, de radiacions ionitzants, etc. (encara que les resistències relatives de diferents espècies enfront de diferents agents són variables). La intensitat dels tractaments d'esterilització haurà d'ésser, doncs, en general, més gran que la dels tractaments de pasteurització. Això representarà un efecte més acusat sobre les característiques nutricionals i organolèptiques dels productes que hagin sofert l'esterilització, comparats amb els que hagin estat sotmesos a pasteurització. Per exemple, recordem la diferència de gust i de color que hi ha entre la llet pasteuritzada, venuda moltes vegades amb el nom de fresca, i la llet esterilitzada. Recordem també que les llets pasteuritzades s'han de guardar a la nevera i tot i així només duren uns cinc o sis dies en lloc dels sis mesos o més, i sense refrigeració, que poden durar les llets esterilitzades.

## 1.2. Productes que es consideren

Els tipus de productes que es tracten tèrmicament més sovint, a Espanya, són els de la taula 1, treta de l'Informe RA 73 bis del projecte SPRINT, de la CEE (Rodrigo i col., 1991).

Taula 1. Percentatge de cada tipus de producte

Verdures .....	29
Fruites .....	16
Sucs de fruites .....	16
Cremogenats .....	11
Plats preparats .....	9
Carns .....	5
Derivats làctics .....	4
Altres productes .....	5
Total .....	100

Pel que respecta als processos més emprats, el mateix treball dóna les dades següents:

Taula 2. Processos emprats

Pasteurització en continu .....	18
Pasteurització estàtica .....	8
Processat asèptic:	
Canviadors tubulars .....	16
Canviadors de plaques .....	11
Canviadors superf. rascada .....	10
Injecció de vapor .....	<u>7</u>
	44
Esterilització post-embussament:	
Autoclaus estàtics .....	13
Autoclaus continus .....	<u>11</u>
	24
Altres .....	<u>6</u>
Total .....	100

I els materials d'embussament que es fan servir més, són:

Taula 3. Tipus d'embussament

Pot de llauna .....	23
Pot de vidre .....	18
Bidó metàl·lic .....	18
Complexes laminats .....	14
Plàstic flexible .....	13
Plàstic rígid.....	10
Altres .....	<u>6</u>
Total .....	100

### 1.3. Organització del capítol

El disseny d'operacions de processament tèrmic pot dividir-se en dues parts fonamentals (Lundt, 1987):

- a) *Uns aspectes que podríem considerar científics*

1) Conèixer els MO que poden créixer i alterar l'aliment en qüestió, la cinètica de la destrucció d'aquests MO, i les especificacions que cal establir respecte als nivells de destrucció, ja sigui per a assegurar la protecció de la salut pública o la viabilitat econòmica del producte, en el cas de MO no patògens.

2) Conèixer les lleis que determinen la transmissió de la calor des del medi calefactor fins a l'anomenat punt crític del producte, travessant:

- a) La capa estacionària entre el fluid calefactor i la cara externa de l'envàs,
- b) la paret de l'envàs,
- c) la capa estacionària entre la cara interna de l'envàs i el producte,
- d) el propi producte, fins a arribar al punt crític.

(El punt crític és la zona dins el producte que rep la mínima quantitat de calor).

3) Conèixer la cinètica dels canvis de les propietats que determinen la qualitat del producte, per a poder dissenyar processos que donin la seguretat necessària amb una reducció mínima de les qualitats organolèptiques i nutricionals del producte.

#### b) *Uns aspectes d'enginyeria*

Dissenyar, amb les dades que proporciona el coneixement científic, unes condicions d'operació i unes mesures de prevenció i control que garanteixin que els requisits de seguretat es compleixen, amb els marges necessaris i en totes i cadascuna de les operacions industrials. I tot plegat en unes condicions d'eficiència que garanteixin la viabilitat econòmica dels productes.

Els fonaments científics, sobretot els que es refereixen als microorganismes i a llur destrucció, són relativament comuns a les dues formes en què poden fer-se els tractaments: el processament tradicional i el processament asèptic. En canvi, els aspectes d'enginyeria depenen fortament de la solució adoptada.

Des del punt de vista didàctic, pot ésser útil concentrar l'explicació en el cas del tractament tradicional, i en concret en els productes de baixa acidesa, que són els que poden presentar els riscos més importants per a la salut pública en cas de fallides en els processos. Com veurem, els principis desenvolupats en aquest cas poden estendre's amb facilitat al tractament asèptic, i els principis de la pasteurització són en essència els mateixos que els de l'esterilització. Així, doncs, farem servir l'esterilització de productes de baixa acidesa pel procediment tradicional de tractament tèrmic després de l'envasament com a fil de les explicacions, tot fent les referències oportunes als altres tipus de tractament.



## 2. MICROORGANISMES A INACTIVAR

### 2.1. Enumeració general

Els microorganismes a inactivar depenen en primer lloc del tipus de tractament.

En el cas de la pasteurització, els motius poden ésser fonamentalment tres:

a) Protegir la salut pública, destruint els microorganismes (MO) patògens que hi pot haver en el producte que es tracti.

Així, el tractament de pasteurització que es dona a la llet ha d'ésser suficient per a destruir una rickètsia, *Coxiella burnetti*, productora de la febre Q, que es considera com el MO patògen no esporulat més resistent entre els que és probable de trobar com a contaminants de la llet. (La destrucció de *C. burnetti* assegura també la destrucció del *M. tuberculosis*, que havia estat el MO-objectiu en la pasteurització de la llet). Els ous, tant sencers com la clara o el rovell per separat, s'han de pasteuritzar per a destruir la *Salmonella*.

b) En altres casos, la pasteurització té una finalitat tecnològica o econòmica; es tracta d'eliminar uns MO que podrien competir amb els MO que han de realitzar les transformacions que es desitgen en el producte. Aquest és el cas, per exemple, dels vins, i de la llet per a fabricar alguns formatges i iogurt.

c) Altres vegades, la pasteurització només es fa per a allargar la durabilitat del producte sense que tingui una finalitat higiènica ni tecnològica. És el cas, per exemple, de la cervesa, dels suc de fruites o de les mermelades.

En els productes que se sotmeten a esterilització, la característica més important per a diferenciar els MO que poden alterar-los, i que cal inactivar en el tractament tèrmic, és el pH de l'aliment.

Segons el pH, els aliments poden classificar-se en:

- de baixa acidesa: amb  $\text{pH} > 4.5$
- àcids: amb  $\text{pH}$  entre 4 i 4.5
- molts àcids: amb  $\text{pH} < 4$

A la taula 4 es donen exemples d'aliments característics de cadascun dels grups.

Microorganismes (MO) típics com a causa d'alteració d'aliments i que es tracta d'inactivar amb els tractaments tèrmics són els de la taula 5.

Taula 4. Exemples de pH d'alguns aliments.

Aliment		pH	
Tipus	Nom	De:	Fins:
Fruïtes	Poma	3.0	3.3
Fruïtes	Maduixes	3.0	3.9
Fruïtes	Taronja	3.3	3.8
Fruïtes	Préssec	3.4	3.6
Fruïtes	Albercocs	3.4	4.4
Fruïtes	Suc de pinya	3.4	3.5
Fruïtes	Panses	3.6	4.2
Fruïtes	Suc de taronja	3.9	3.9
Fruïtes	Figues	5.0	5.0
Verdures	Tomàquets	4.1	4.6
Verdures	Pastanagues	5.0	5.4
Verdures	Remolatxa	5.0	5.8
Verdures	Col	5.1	5.3
Verdures	Espinacs	5.1	5.9
Verdures	Mongetes tendres	5.2	5.7
Verdures	Patates	5.4	5.8
Verdures	Espàrrecs	5.6	5.7
Verdures	Xampinyons	5.8	5.9
Verdures	Olives, madures	5.9	8.0
Verdures	Mongetes seques	6.0	6.3
Verdures	Pèsols	6.1	6.3
Verdures	Moresc	6.3	6.5
Carns/Peixos	Vacú	5.6	6.5
Carns/Peixos	Peix blanc	6.0	6.0
Carns/Peixos	Salmó	6.2	6.4
Carns/Peixos	Aus	6.4	6.6
Varis	Iogurt	4.0	4.5
Varis	Cervesa	4.1	4.3
Varis	Mongetes estofades	5.6	5.9
Varis	Llet	6.5	6.7

En aquesta taula es donen els paràmetres (valor D i valor z) relacionats amb els càlculs de letalitat que s'expliquen més endavant (vegeu els apartats 3.2 i 3.3).

Taula 5. Microorganismes típics i paràmetres de resistència.

Els valors d'aquesta taula són orientatius. Valors exactes o més amplis han de trobar-se en la literatura específica.

A més, cal tenir en compte que les condicions de resistència solen estar molt influïdes pel producte o el mitjà en què s'ha fet l'assaig.

MICROORGANISMES	Zona de creixem. (C)	Temperatura de referència		D (min)	Z		Aliments en els quals és típic	Senyals d'alteració		
		C	F		C	F				
<i>Espores bacterianes</i>										
Clostridium botulinum A	+10 a 40	121.1	250	0.1 a 0.3	8 a 10	14 a 18	Poc àcids. Terra Poc àcids. Aquàtics	Gas, mala olor (no sempre) Gas, mala olor (no sempre)		
Clostridium botulinum E i alguns B i F	+3.5 a 40									
Clostridium sporogenes	+10 a 45	121.1	250	0.8 a 1.5	9 a 11	16 a 20	pH 4.2 a 4.5 pH 4.2 a 4.5	Desdoblen les proteïnes i fan SH2. Patògens		
Clostridium perfringens	+5 a 50	121.1	250		10	18				
Bacillus subtilis		121.1	250	0.5 a 0.8	7 a 13					
Bacillus cereus		121.1	250	0.0065	9.7	17.5				
Bacillus megaterium		121.1	250	0.04	8.8	15.8				
Bacillus coagulans		121.1	250	.01 a .07	10	18				
Bacillus pasteurianum		100	212	0.1 a 0.5	8.3	15				
<i>Rickètsies</i>										
Coxiella burnetti (1)		72	162	TDT = 0.25	4.4	8	Llet. MO-objectiu en pasteurització	Patògen. Febre Q		
<i>Bacteris termòfils</i>										
Bacillus stearothermophilus	+30 a 75	121.1	250	4 a 5	9.5 a 10	17 a 18	Verdures	Inflament Agre, sense inflament		
Clostridium nigrificans	+30 a 75									
C. thermosacchariticum	+43 a 71	121.1	250	3 a 4	7.1 a 10.5	13 a 19				
B. thermoacidurans	+25 a 60									
<i>Bacteris no esporulats</i>										
Lactobacillus sp.	5 a 53	65.6	150	.5 a 1	4.5 a 5.5	8 a 10	Càrnics	Patògen Patògen Patògen Patògen		
Streptococcus faecalis var. z		67	153	0.5	2.9	5				
Streptococcus D sp.		70	158	2.95	10	18				
Staphylococcus aureus	5 a 48	65.6	150	.2 a 2	4.4 a 6.6	8 a 12				
Moraxella-Acinetobacter	2 a 50	70	158	4.6	7.3 a 8.1	13 a 15				
Salmonella sp.	5 a 46	65.6	150	.02 a .25	4.4 a 6.6	8 a 12				
Salmonella senftenberg		65.6	150	0.8 a 1.0	10	18				
Listeria monocytogenes		71.7	161	0.015	6.3	11				
Vidrio parahemoliticus	10 a 37	55	131	.023	a .24					
<i>Fongs i llevats</i>										
Saccharomyces cerevisiae	0 a 40	60	140	15.5	5.5	10			Suc de fruita	
Saccharomyces uvarum		55	131	0.30	5 a 5.5	9 a 10				
Aspergillus flavus		60	140	0.1 a 1	3.3 a 4.1	6 a 7				
Byssoclamys fulva		87.7	190	11.3						
Xeromyces bisporus		80	176	2.7 a 3.6						
Zygosaccharomyces Lailii										
- Cèl·lules vegetatives		60	140	0.1 a 0.3	4	7				
- Ascospores		60	140	8.1 a 11	4.5 a 5	8 a 9				

(1) Els valors de resistència tèrmica de *C. burnetti* solen trobar-se a la literatura expressats com temps de destrucció, sense indicar el nombre de reduccions logarítmiques. Això és molt corrent en els treballs sobre resistència a la cocció o a la pasteurització, tractaments en què el tractament matemàtic rigorós que s'aplica a l'esterilització no és freqüent.

## 2.2. El clostridium botulinum

Per a preservar mitjançant la calor els productes de baixa acidesa cal donar-los un tractament tèrmic que asseguri la destrucció (entenen sempre la paraula destrucció en el sentit que s'ha explicat a 1.1) del *Clostridium botulinum*.

El botulisme és la intoxicació causada per la ingestió de la toxina que ha produït el *C. botulinum* si s'ha multiplicat en l'aliment. Aquesta toxina és extremadament potent: s'estima que la dosi letal per a una persona és de  $5 \times 10^{-8}$  g, o sigui que un sol gram, adequadament distribuït, podria matar 20 milions de persones (Sofos i col., 1979). La intoxicació és sovint mortal i la mort es produeix per paràlisi muscular que impedeix la respiració fins a produir l'asfíxia.

El primer brot de botulisme ben documentat va registrar-se el 1793, a Wildbad, Württemberg (Alemanya), amb tretze persones afectades de les quals en moriren sis. El producte fou un embotit típic de la localitat, fet de sang de porc i altres ingredients, bullit, fumat i emmagatzemat diverses setmanes. Precisament el nom botulisme ve del llatí *botulus* (salsetxa) i fou proposat per Muller el 1870 (Wallen, 1983).

Cal entendre:

a) La gravetat de la intoxicació per *C. Botulinum*, o botulisme, sovint fatal.

b) Que per a evitar que els casos arribin a donar-se, les úniques mesures possibles són les preventives.

### *Algunes dades epidemiològiques*

a) EUA, de 1899 a 1973: es registraren 688 brots de botulisme, que afectaren 1784 persones, amb 978 morts. Fins a l'any 1950, la taxa de mortalitat era del 60%. A partir del 1950, la proporció anà baixant, fins a una mitjana del 23,5% en el període 1970-73. Un 72% dels brots foren deguts a conserves casolanes, un 9% a conserves processades industrialment, i en un 19% no es pogué saber quin aliment havia estat implicat (Sofos i col., 1979).

b) EUA, de 1973 a 1976: es registraren 34 brots de botulisme. 30 originats per conserves processades per particulars i 4 per productes d'establiments industrials (Bryan, 1978).

c) EUA el 1982: de 21 brots de botulisme, que afectaren 30 persones, en resultaren mortes 5 (17%). Tots els casos es produïren per con-

serveis preparades en cases particulars (MacDonald, K.F. i Griffin, P.F., 1986).

Cal ésser conscients, doncs, que les conserves de productes de baixa acidesa són potencialment molt perilloses, i que el risc de botulisme ha d'ésser totalment eliminat de qualsevol fabricació d'aquest tipus de productes.

### *Revisions d'envasos defectuosos d'enllaunats, en el mercat*

a) En un estudi fet en l'àrea de Minnesota es comprovà que al llarg de 17 mesos, sobre unes vendes de 4.970.000 unitats, la proporció d'envasos defectuosos que s'havien de retirar dels supermercats era de 182 per cada milió (0,018%) (Pflug i col., 1982). Suposem que un fabricant pensés a controlar a posteriori, per mostreig després del procés, una proporció de defectes com aquesta. En mostres de 100 unitats, el 98% de les vegades no en trobaria cap de defectuosa i encara que la proporció de defectes es doblés, passant a ésser del 0,036%, amb la mateixa mostra de 100 envasos tindria un 96% de probabilitats de no detectar-se cap de defectuós. Si en lloc de 100 agafés mostres de 1000 envasos, les probabilitats de no trobar-ne cap de defectuós passarien a ésser de 84% i 70% respectivament. És evident que pensar en un pla de control sobre la base de la inspecció de mostres a posteriori és impracticable i que els defectes han d'évitar-se preventivament.

b) Un total de 790 llaunes inflades, tretes en el mateix estudi, foren analitzades per a trobar l'origen de l'alteració (Davidson i col., 1982). En el 47% de les mostres es recuperaren microorganismes. Un altre 47% no tenien MO viables, però consideracions com els intervals de pH suggerien que l'alteració havia estat causada per microorganismes que després havien sofert una auto-esterilització i ja no eren recuperables. L'altre 6% dels envasos inflats ho estaven per causes físiques o químiques. De les mostres en què es recuperaren microorganismes, el 91,6% eren típics de contaminacions post-esterilització, el 0,5% eren termòfils i el 7,9% cultius d'esporelats purs, indicant sub-esterilització. Els autors comparen aquest 7,9% amb dades més antigues, d'altres autors, i en conclouen que hi ha hagut una millora significativa en la seguretat dels tractaments tèrmics aplicats.

El *C. botulinum* és un microorganisme anaeròbic esporulat de distribució bastant ubiqua i que pot estar present en qualsevol aliment. En l'anàlisi de 260 mostres de terra als EUA, el 23,5% tenien espores de *C.*

*botulinum* (Smith, 1978 citat a Roberts i Gibson, 1979). Com que és freqüent trobar espores de *C. botulinum* a la terra, les verdures han de considerar-se'n fonts habituals. El seu rentat previ és important per a reduir la població inicial.

Es coneixen set tipus de *C. botulinum*, anomenats A, B, C, D, E, F i G. Cadascun d'ells produeix una neurotoxina distingible antigènicament de les altres i anomenada igualment A, B, C, D, E, F o G. Els casos d'intoxicació han de tractar-se amb antitoxina del tipus corresponent, ja que les dels altres tipus són inefectives.

El tipus A és proteolític, així com algunes soques del tipus B i algunes del tipus F. El tipus G es considera proteolític dèbil. En canvi, els altres tipus no són proteolítics. Això vol dir que poden créixer en un producte sense provocar canvis evidents d'olor o de gust que posin de manifest l'alteració pel MO. Dit d'una altra manera, el fet que un envàs no estigui inflat ni faci mala olor no garanteix que no pugui estar alterat per *C. botulinum*.

La resistència tèrmica es tractarà amb més profunditat als apartats 3.2 i 3.3, però avancem que els tipus A i B i algunes soques del tipus F són els més termo-resistents. Els C i D són de resistència intermèdia i els E, algunes soques del B i algunes de les F són poc resistents a la calor. Cal no confondre la resistència tèrmica de les espores amb la resistència tèrmica de la toxina. Mentre que amb les espores dels tipus A caldrien pràcticament 6 hores d'ebullició per a destruir-les en una proporció suficient, la toxina, en estat pur, es destrueix en pocs minuts a 50 °C i la toxina, dintre dels aliments, s'inactiva en 6 min a 90 °C o en 90 min a 65 °C (Sofos i col., 1979).

Las temperatures mínimes de creixement estan relacionades amb el caràcter proteolític i la resistència tèrmica. Així, mentre els tipus A, B i algunes soques d'F creixen només per damunt de 10 °C, algunes soques de B, el tipus E i algunes soques d'F poden créixer per damunt dels 3,3 °C (Sperber, 1982).

Els casos d'intoxicació més freqüents en l'espècie humana són pels tipus A, B, E i F. Els tipus A i B són típics del terra continental, mentre que l'E es troba típicament en els llots dels rius i l'F en les costes i en els fons marins (Harrison, 1989). El tipus C ha produït intoxicacions en aus salvatges i de granja i també en altres animals, mentre que el tipus D ha produït casos d'intoxicació en la ramaderia. Malgrat això, s'han descrit alguns casos d'intoxicacions per tipus C i D en persones. El tipus G ha estat isolat a Argentina, però no es coneixen casos d'intoxicació causats per ell (Solomon i Kautter, 1979).

Per créixer i generar toxina, al MO li calen diverses condicions:

– Un medi anaeròbic; encara que també pot créixer en presència d’oxigen sempre que el potencial d’oxidació-reducció sigui baix, Eh inferior a + 250 mV. A la taula 6, “Potencials d’oxidació-reducció d’alguns aliments”, s’especifiquen alguns valors típics d’aquest paràmetre. Es pot observar que els aliments en els quals el potencial d’oxidació-reducció és suficient per a inhibir el creixement del *C. botulinum* són relativament pocs.

Taula 6. Potencials d’oxidació-reducció d’alguns aliments.

Aliment		Accés de l'aire	Eh (mV)	pH
Llet		+	+200 fins +340	
Formatges:	Holandès	+	-20 fins -310	4.9-5.2
	Emmenthal	+	-50 fins -200	
Sèrum de mantega Ou (infèrtil, 14 dies)		-	+290 – +350	6.5
		+	+500	
Menuts:	Fetge, cru, picat	-	-200	~7
Carns:	Crua, post-rigor	-	-60 fins -150	5.7
	Crua, picada	+	+225	5.9
	Picada, cuita	+	+300	7.5
Butifarres cuites i carns enllaunades		-	-20 fins -150	~6.5
Cereals	Blat (gra sencer)	-	-320 fins -360	6.0
	Blat (germ)	-	-470	
	Sègol (gra mòlt)	+	+225	7
Patata	tubèrcul	-	~ - 150	~6
Sucs vegetals	Raïm	-	+409	3.9
	Llimona	-	+383	2.2
	Pera	-	+436	4.2
	Espinacs	-	+74	6.2

– Un pH més gran o igual que 4,6 (en rigor, el pH mínim per a produir toxina és una mica més alt que el mínim per a germinar o per a reproduir-se, però, com a requisit de seguretat, parlem del pH mínim per al creixement de les espores).

– Una activitat d'aigua per damunt de 0,95 (Sperber, 1982).

– Una temperatura mínima que depèn del tipus de *C. botulinum* però que pot ésser tan baixa com 3,3 °C.

– Absència de microorganismes competidors que inhibeixen el creixement del *C. botulinum*. Aquesta és una situació que es dóna en productes tractats tèrmicament, puix que el tractament ha eliminat la major part dels altres MO.

Cal dir que s'han donat casos d'intoxicació per botulisme en nadons i que s'han atribuït a la ingestió de substàncies portadores d'espores però no de toxina. Les espores han germinat i s'han multiplicat en el propi intestí de l'afectat i hi han produït la toxina, en un mecanisme que s'ha anomenat toxo-infecció, perquè l'intestí no estava encara colonitzat per altres MO que haguessin inhibit el creixement del *C. botulinum*. La mel és un aliment que ha estat implicat en aquests casos (Huhtanen, 1981; Kautter, 1982).

Respecte al requisit de pH igual o més gran que 4,6 per a créixer, cal esmentar dos mecanismes pels quals el *C. botulinum* pot créixer en aliments de pH clarament per sota de 4,6:

a) L'anomenada metabiosi, en què un producte, normalment àcid i que per tant es processa amb un tractament suau, en realitat una pasteurització, resulta sub-pasteuritzat i hi queden formes viables de fongs. En les àrees on creixen aquests microorganismes pot haver-hi un augment local del pH i la germinació i multiplicació del *C. botulinum*. Se n'han donat casos en tomàquet (Mundt i Norman, 1982).

b) En productes amb concentracions altes de proteïnes o amb precipitats de proteïnes, encara que estiguin en proporcions relativament baixes, es pot donar la circumstància que dins la matriu del precipitat de proteïnes es facin bosses de pH més alt respecte al pH de la resta del producte. La presència de determinats microorganismes, com *Bacillus subtilis* o *Bacillus licheniformis* pot ajudar aquest mecanisme, ja que eliminen les petites quantitats d'oxigen que d'altra manera inhibirien el creixement de *C. botulinum* (Montville i Sapers, 1981; Tanaka, 1982).



### 3. INACTIVACIÓ DELS MICROORGANISMES. OBJECTIU

#### 3.1. Consideracions generals

L'estudi de la cinètica de la inactivació dels microorganismes es divideix en dues parts:

- a) El de la cinètica a temperatura constant i
- b) El de l'efecte de la temperatura sobre la velocitat de destrucció.

Potser el concepte més important en aquest camp és que, a una temperatura donada, la reducció del nombre de MO segueix una cinètica de primer ordre. Això vol dir que el logaritme del quocient entre el nombre de MO que queden i els que hi havia al començament és proporcional al temps de tractament. Com a conseqüència, el nombre de MO arribarà a ésser una proporció tan petita com vulguem respecte als que hi havia en començar, sempre que allarguem prou el tractament, però mai a ésser zero. El concepte de destrucció dels microorganismes no s'ha d'entendre com una eliminació de tots els que hi hagi sinó com una reducció proporcional, com per exemple deixar-ne un per cada bilió que n'hi hagués.

L'efecte de la temperatura sobre la velocitat de reacció pot enfocar-se de dues maneres diferents:

- a) Amb l'orientació tradicional en cinètica química, a través de l'equació d'Arrhenius, que suposa una relació exponencial entre la constant de la velocitat de reacció i el recíproc de la temperatura absoluta, o
- b) Considerant una relació semi-logarítmica entre el temps necessari per a la destrucció del microorganisme i la temperatura.

Aquest darrer enfocament ha estat el procediment habitual dels microbiòlegs que han treballat en el camp dels processos tèrmics. Els dos procediments porten a conclusions teòricament incompatibles, però en els intervals de temperatures que es fan servir a la pràctica les diferències són mínimes. Els càlculs amb aquest segon procediment són més senzills i la utilització del primer no representa avantatges pràctics (Hayakawa, 1977, citat a Rodrigo i Safón, 1982).

#### 3.2. Destrucció tèrmica a temperatura constant

##### *Cinètica de primer ordre*

Potser el concepte més important per a la comprensió dels fonaments dels tractaments tèrmics és el de "reducció logarítmica del nombre

de microorganismes". Segons aquest concepte, quan una població microbiana en la qual hi ha un nombre  $N_0$  de microorganismes (aquest nombre estarà sempre referit a una quantitat determinada de producte, ja sigui, per exemple, 1 ml, o el contingut d'un envàs de mides determinades) és sotmesa durant un interval de temps a una temperatura determinada, prou alta perquè tingui un cert efecte letal, el nombre de microorganismes supervivents passa a ésser una determinada proporció, diguem  $N_1 = k \cdot N_0$ . ( $k < 1$ ). Si passa un altre interval de temps, de la mateixa durada que l'anterior, el nombre de supervivents serà de  $N_2 = k \cdot N_1 = k \cdot k \cdot N_0$ , i així successivament. Conseqüències d'aquest fet son:

a) Que el nombre de microorganismes no arribarà mai a ésser de zero per més que allarguem el tractament. És doncs cert que si per exemple hi ha 1000 MO en un envàs i el tractament que hi donem redueix els supervivents, per exemple, a una milionèsima part, haurien de quedar 0,001 MO en l'envàs. Aquest nombre ha d'interpretar-se d'una manera probabilística, en el sentit que la probabilitat que hi hagi un MO en un envàs és de 0,001 o, dit d'altra manera, pot quedar un MO per cada 1000 envasos.

b) Que un tractament determinat deixarà o no MO viables en un envàs en funció de quina fos la quantitat que n'hi havia abans del tractament.

Aquest comportament correspon a una cinètica de reacció de primer ordre, que s'expressa matemàticament:

$$\frac{dN}{dt} = -k N \quad (1)$$

(El signe menys de la constant reflecteix que es tracta d'una reducció de  $N$  amb un augment del temps)

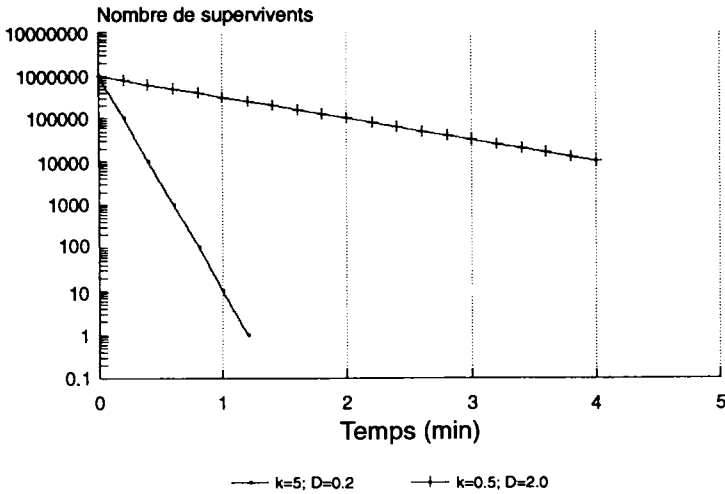
I en forma integrada, després de passar els logaritmes a base decimal:

$$N = N_0 \cdot 10^{\frac{-k}{2,303} \cdot t} = N_0 \cdot 10^{-k \cdot t} \quad (2)$$

(havent fet, per a simplificar,  $k = k/2,303 = k \cdot 0,4343$ ).

A la figura 1 s'han representat els casos en què  $k = 0,5$  i  $k = 5$ , suposant una quantitat inicial de MO,  $N_0 = 1.000.000$ .

Així, la representació del nombre de MO que resten després d'un cert temps de tractament, en una escala semi-logarítmica, és una recta de pendent  $0,4343 \cdot k$ . La constant  $k$  representa la velocitat de destrucció dels MO a una temperatura determinada.



Dades per a *C. botulinum* a 232 F (D=2) i a 250 F (D=0.2) respectivament

FIGURA 1. Destrucció a temperatura constant

El model semi-logarítmic, però, no s'ha de prendre com una llei universal sinó més aviat com un model matemàtic, el més útil entre els que es coneixen fins ara. Segons Lund (Lund, 1987), aproximadament el 40% de les dades publicades sobre destrucció tèrmica s'ajusten totalment al model d'una cinètica de primer ordre i un altre 40% s'hi ajusten després d'una primera fase en la qual en lloc de recta la gràfica és unes vegades convexa i altres còncava.

Mossel (1977) proposà el concepte de MPED(n) (Most probable effective dose) per a assolir una reducció de n cicles logarítmics, considerant la fase inicial que no té una forma necessàriament recta.

A la taula 7, "Classificació dels MO segons llur resistència tèrmica", hi trobem una classificació segons el criteri MPED 6, essent 6 el nombre de cicles logarítmics (n) considerats. Aquesta taula pot ésser emprada per a tenir una visió general dels nivells de resistència tèrmica dels MO que intervenen més sovint en l'alteració dels aliments.

#### *Temps de reducció decimal (D)*

En la nomenclatura utilitzada més sovint als treballs sobre tractament tèrmic, en comptes de fer servir k com a paràmetre de la velocitat

Taula 7. Classificació aproximada dels MO segons la seva resistència tèrmica.

Organismens		MPED <sub>6</sub> màxima Combinació de temps i temperatura (1)		Tipus o soques que resisteixen el tractament en la seva fila, però no el següent de la llista
Forma	Grup	Temperat. (°C)	Temps (min)	
Vegetativa	Fongs i llevats	65	39	Byssoschlamys sp. Penicillium sp. Aspergillus sp.
	Bacteris			Alcaligenes tolerans Streptococcus faecalis i relacionats
	Bacteris	80	1	Corynebacterium sp. Microbacterium sp.
Espores de resistència a la calor:	Baixa	90	10	Clostridium botulinum, tipus E Bacillus macerans Bacillus megaterium Bacillus mycoides
	Mitjana	100	30	Clostridium botulinum, tipus A i B Algunes soques de Bacillus
		120	3	
	Alta	115	10	Bacillus stearothermophilus Clostridium nigrificans Clostridium sporogenes
		120	4	
Molt alta	120	45	Clostridium thermosaccharolyticum	

(1) MPED<sub>6</sub> = Combinació de temps i temperatura per reduir el nombre de microorganismes en sis cicles logarítmics, amb un pH de 6,8 i l'activitat de l'aigua al voltant de 0,98.

de desaparició o de reducció del nombre dels MO s'empra més sovint un altre paràmetre, D, anomenat temps de reducció decimal. D és el temps, en general en minuts, que cal perquè el nombre de MO es redueixi a una desena part dels que hi havia en un moment donat. També pot definir-se com el temps perquè es traspassi un cicle logarítmic, o com el recíproc del pendent de la corba de reducció tèrmica.

Com que  $\log(10N/N) = \log 10 = 1$ , entre k i D hi ha la relació:

$$k \cdot D = 1$$

L'equació 2 pot expressar-se també així:

$$N = N_i \cdot 10^{-kt} \tag{3}$$

o bé:

$$N = N_i \cdot 10^{-t/D} \tag{4}$$

si aïllem t:

$$t = D \cdot \log \frac{N_i}{N} \tag{5}$$

Les dades de la figura 1 corresponen a dos valors de D, sigui d'un mateix MO a dues temperatures diferents, o de dos MO diferents. Juntament amb les equacions (3) a (5), poden servir per a il·lustrar el significat de D, com pot veure's en l'exemple de la taula següent:

		Nombre de MO que sobreviuen quan els paràmetres són:					
		0.5			5		
		2.0			0.2		
		t/D	N			t/D	N
Temps (min):	0	0	1	000 000 000 000	0	1	000 000 000 000
	0,2	0,1		794 328 000 000	1		100 000 000 000
	1,2	0,6		251 189 000 000	6		1 000 000
	2,0	1		100 000 000 000	10		100
	2,4	1,2		63 095 734 450	12		1
	12	6		1 000 000	60		1 E-48
	24	12		1	120		1 E-108

### *Temps de destrucció tèrmica (TDT)*

El concepte de temps de destrucció tèrmica per a un microorganisme, o TDT, a una temperatura determinada, consisteix en un múltiple de D escollit per a assegurar la destrucció d'una proporció de MO suficient. En uns casos, com en els dels microorganismes patògens, aquesta reducció suficient s'estableix en funció del nivell de seguretat que es desitja amb el tractament; en el cas de MO no patògens però d'incidència econòmica, en funció de l'equilibri entre la proporció d'envasos alterats que es consideren econòmicament suportables i els perjudicis derivats de les pèrdues nutricionals i organolèptiques que comportaria un tractament més intens.

En el cas del *Clostridium botulinum*, el MO patògen de resistència tèrmica més alta que pot créixer en conserves d'acidesa baixa, l'experiència de molts anys ha demostrat que un TDT de 12D és el marge de seguretat aconsellable per a garantir la salubritat dels productes.

Tornant a la gràfica 1, el concepte de 12D vol dir recórrer la recta de reducció del nombre de MO fins a travessar dotze cicles logarítmics, o sigui, reduir el nombre de MO en una proporció d'un bilió ( $10^{12}$ ) a 1.

Cal recordar que el valor de D, i per tant el de TDT, depenen del MO al qual s'apliquen; i per un MO determinat, de la temperatura del producte i de les condicions de creixement del MO.

En el cas del *C. botulinum*, i a una temperatura de 121,1 °C (250 °F), el valor de D que s'emptra habitualment val 0,20 min, i si es pren TDT = 12D, el temps de destrucció tèrmica a 121,1 °C serà de 2,4 min.

A la pràctica, però, no totes les soques de *C. botulinum* tenen exactament la mateixa resistència tèrmica. Thomson i col. compilaren dades de TDT i z (el concepte de z s'explica a l'apartat 3.3) obtingudes per diferents investigadors, per a *C. botulinum* tipus A i B. Els valors de D a 121,1 °C anaven des de 0,03 fins a 0,25 min (Thomson i col., 1979), i és molt recomanable prendre uns marges addicionals de seguretat (que seran esmentats posteriorment en desenvolupar l'efecte de la temperatura sobre el TDT).

### **3.3. Efecte de la temperatura**

#### *Relació fonamental*

L'exposició que segueix està basada en el concepte de coeficient letal de temperatura, o valor z. Alguns autors desenvolupen la relació entre la

velocitat de destrucció i la temperatura per un camí diferent basat en l'equació d'Arrhenius (per exemple, Cheftel i col., 1977). En una exposició elemental, com la que estem fent, el concepte de  $z$  té l'avantatge que és més intuïtiu i que el seu coneixement permet de seguir sense dificultat pràcticament tota la literatura sobre tractaments tèrmics.

Si, per a un MO donat, es van determinant els temps de destrucció decimal a diferents temperatures i es representen els logaritmes dels valors de  $D$  en funció d'aquestes temperatures ( $T$ ), la gràfica que en surt és una línia recta com la de la figura 2.

L'equació d'aquesta recta, cospada entre dos punts ( $T_1, D_1$ ) i ( $T_r, D_r$ ), és:

$$\frac{\log D - \log D_r}{\log D_1 - \log D_r} = \frac{T_r - T}{T_r - T_1} \quad (6)$$

Dues transformacions d'aquesta equació ens introduiran a dos conceptes importants:

a) Concepte de factor de resposta a la temperatura o valor  $z$

Suposem que la diferència de temperatura  $T_r - T_1$  és precisament la que correspon a  $\log D_1 - \log D_r = 1$ , o sigui, a  $D_1/D_r = 10$ . Llavors, si anomenem  $z$  aquesta diferència de temperatura:

$$\frac{\log D - \log D_r}{1} = \frac{T_r - T}{z} \quad (7)$$

o bé:

$$\log (D/D_r) = (T_r - T) / z \quad (8)$$

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T) / z} \quad (9)$$

expressió que permet de calcular el temps de reducció decimal a una temperatura determinada sempre que es conegui el temps de reducció decimal a una temperatura de referència i el paràmetre  $z$ , o coeficient letal de temperatura.

b) Relativitat del temps de destrucció tèrmica

Suposem que el MO a qui apliquem l'equació és el *C. botulinum* i





Recordem que  $z$  és el canvi de temperatura que cal per tal que el TDT es multipliqui o es divideixi per 10. En altres termes, és la diferència que cal a fi que la recta dels valors de  $D$  o de TDT travessi un cicle logarítmic, i també, el recíproc del pendent de la línia del TDT en funció de la temperatura, en escala semi-logarítmica. És un paràmetre que es mesura en unitats de temperatura, el més sovint en °F, i que depèn del MO objecte de l'estudi.

Es pot veure que, com més gran sigui  $z$ , més canvi en la temperatura cal per a assolir un canvi determinat en la velocitat de destrucció, mesurada per  $D$  o pel TDT. Inversament, si el valor  $z$  és petit, canvis més petits en la temperatura tindran una influència més gran en el temps de destrucció tèrmica.

A la pràctica, les poblacions que solen trobar-se, fins i tot del mateix MO, són barreges de soques, que poden tenir valors de  $z$  més o menys diferents dels que es donen a la literatura per a un MO determinat. D'altra banda, la resistència tèrmica depèn de factors com el medi en el qual està inclòs el MO, de la fase de creixement en què es troba, de les condicions en què s'ha multiplicat, etc. Precisament, el veritable valor de  $z$  per al producte que estem fabricant serà una de les incògnites que ens obligaran a prendre uns marges de seguretat en les operacions respecte als barems calculats i a comprovar l'eficàcia real dels tractaments amb un tipus o altre d'indicador, el més sovint mitjançant envasos inoculats.

### *Exemple 1*

El valor més alt que s'ha trobat per al temps de reducció decimal ( $D$ ) del *C. botulinum*, a una temperatura de referència de 250 °F, és de 0,25 min, i el valor de  $z$  que es considera més corrent és de 18 °F. Considerant que el TDT per a aquest MO és 12D, quin seria el TDT a 248 °F?

$$\text{TDT}_r = 12 \cdot D_r = 12 \cdot 0,25 = 3,0$$

$$\text{TDT}(248) = \text{TDT}_r \cdot 10^{(T_r - T) / z} = 3 \cdot 10^{(250 - 248) / 18} = 3,87 \text{ min}$$

(Cal observar que disminuir la temperatura 2 °F, o sigui aproximadament 1 °C, augmenta el TDT gairebé un 30%).

### *Exemple 2*

Si la soca del Mo tingués en realitat un valor  $z$  de 14 °F, el TDT a 248 °F seria:

$$\text{TDT}(248) = 3 \cdot 10^{(250-248)/14} = 3 \cdot 1,39 = 4,17$$

Els mateixos 2 °F de diferència de temperatura provoquen un augment del 39% en el TDT, si z és 14 °F (30% quan era z = 18 °F).

### Exemple 3

Si el temps de destrucció tèrmica a 240 °F és 10 min, per a un cert MO, que té un valor z de 18 °F, quin serà el TDT a 250 °F?

Podem considerar ara com a temperatura de referència els 240 °F o bé continuar considerant  $T_r = 250$  °F i aïllar  $\text{TDT}_r$  de l'equació (13), que dóna:

$$\text{TDT}_r = \text{TDT}(T) \cdot 10^{(T - T_r)/z} \quad (14)$$

per l'un o l'altre camí s'arriba a:

$$\text{TDT}(250) = 10 \cdot 10^{(240-250)/18} = 10^{-10/18} = 10 \cdot 0,28 = 2,8 \text{ min}$$

### Additivitat dels efectes letals

El càlcul de la letalitat dels processos es recolza en el principi de l'additivitat dels efectes del temps a les diferents temperatures amb un cert efecte letal al llarg del tractament.

Considerem dos tractaments, a temperatures T i  $T_r$ , que tinguin el mateix efecte letal, o sigui, que tots dos redueixin el nombre de MO de  $N_0$  a N.

A la temperatura T:  $t / D = \log N_0/N$

A la temperatura  $T_r$ :  $tr / D_r = \log N_0/N$

O sigui:  $t/D = tr/D_r$  que equival a:  $tr = t \cdot D_r/D$

i com que  $D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/z}$

$tr = t \cdot D_r / D_r / 10^{(T_r - T)/z}$

$tr = t \cdot 10^{(T - T_r)/z} \quad (15)$

Un temps t, multiplicat pel coeficient letal,  $10^{(T - T_r)/z}$ , dóna el temps tr que, a la temperatura de referència  $T_r$ , té el mateix efecte letal que el temps

t a la temperatura T. O sigui, permet calcular l'equivalència d'un temps a una certa temperatura amb el temps a una temperatura de referència.

A la pràctica dels tractaments tèrmics, l'equivalència de qualsevol tractament en minuts a la temperatura de referència, sol anomenar-se amb la lletra F, amb un subíndex que indica la temperatura de referència i un superíndex que indica el valor z considerat en el càlcul de l'equivalència. Quan la temperatura de referència és 250 °F, s'omet el subíndex. Si, a més d'una temperatura de referència de 250 °F, el MO que es considera té un valor z de 18 °F (10°C), l'equivalència d'un tractament en minuts a 250 °F es designa per Fo. cal tenir present que la notació Fo només ha d'utilitzar-se si la temperatura de referència és 250 °F i les equivalències es calculen fent servir un valor z de 18°F.

El coeficient exponencial s'ha fet servir tradicionalment en forma tabulada, en la major part dels casos per a Tr = 250 °F i z = 18 °F. La disponibilitat de calculadores de butxaca que poden fer aquest càlcul de manera molt senzilla fa poc necessàries aquestes taules, però es dona una versió reduïda, amb valors que poden ésser útils per a processos de pasteurització, d'esterilització i per a calcular l'efecte del tractament tèrmic sobre nutrients i factors de qualitat (taula 8).

La taula 8 està calculada en funció de les temperatures reduïdes,  $\delta T/z$ , o sigui:

$$\delta T/z = \frac{T - T_r}{z}$$

El coeficient de letalitat, donat en la segona columna, només depèn de  $\delta T/z$ . A les columnes de la tercera endavant es donen les temperatures que corresponen a cada temperatura reduïda, en funció de la temperatura de referència i del valor z. Aquesta presentació de la taula permet d'ajuntar tot un ventall de possibilitats per a Tr i z en una taula de mides reduïdes. A canvi, es té la incomoditat que la major part de les temperatures no tenen valors enters i això pot obligar a fer interpolacions. A la taula pot observar-se molt fàcilment l'efecte que tenen els diferents valors de z sobre el coeficient letal a una temperatura determinada.

#### *Exemple 4*

Considerem un MO que té un temps de reducció decimal D = 0,25 min a 250 °F, i un valor z de 18 °F. El compte inicial és de 10<sup>4</sup> espores/

Taula 8. Temperatures (°C) corresponents per  $\delta T/z$ 

$\delta T/z$	COEFIC. LETAL.	Tr(F)	160	200	212	212	212	212	250	250	250	250	250	250	250	250	
		Tr(C)	z(F)	z(C)	71.1	93.3	100.0	100.0	100.0	100.0	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1
			18.0	16.0	18.0	30.0	36.0	50.0	14.0	18.0	20.0	22.0	30.0	40.0	60.0	80.0	100.0
			10.0	8.8	10.0	16.7	20.0	27.8	7.8	10.0	11.1	12.2	16.7	22.2	33.3	44.4	55.5
-2.500	.003		46.1	71.3	75.0	58.3	50.0	30.5	101.6	96.1	93.4	90.6	79.4	65.6	37.9	10.1	-17.7
-2.400	.004		47.1	72.2	76.0	59.9	52.0	33.3	102.4	97.1	94.5	91.8	81.0	67.8	41.2	14.5	-12.1
-2.300	.005		48.1	73.1	77.0	61.6	54.0	36.1	103.2	98.1	95.6	93.0	82.7	70.0	44.5	19.0	-6.6
-2.200	.006		49.1	73.9	78.0	63.3	56.0	38.8	103.9	99.1	96.7	94.3	84.4	72.3	47.8	23.4	-1.0
-2.100	.008		50.1	74.8	79.0	64.9	58.0	41.6	104.7	100.1	97.8	95.5	86.0	74.5	51.2	27.9	4.6
-2.000	.010		51.1	75.7	80.0	66.6	60.0	44.4	105.5	101.1	98.9	96.7	87.7	76.7	54.5	32.3	10.1
-1.900	.013		52.1	76.6	81.0	68.3	62.0	47.2	106.3	102.1	100.0	97.9	89.4	78.9	57.8	36.7	15.7
-1.800	.016		53.1	77.5	82.0	69.9	64.0	50.0	107.1	103.1	101.1	99.1	91.0	81.1	61.2	41.2	21.2
-1.700	.020		54.1	78.3	83.0	71.6	66.0	52.7	107.8	104.1	102.2	100.4	92.7	83.4	64.5	45.6	26.8
-1.600	.025		55.1	79.2	84.0	73.3	68.0	55.5	108.6	105.1	103.3	101.6	94.4	85.6	67.8	50.1	32.3
-1.500	.032		56.1	80.1	85.0	75.0	70.0	58.3	109.4	106.1	104.5	102.8	96.1	87.8	71.2	54.5	37.9
-1.400	.040		57.1	81.0	86.0	76.6	72.0	61.1	110.2	107.1	105.6	104.0	97.7	90.0	74.5	58.9	43.4
-1.300	.50		58.1	81.9	87.0	78.3	74.0	63.9	111.0	108.1	106.7	105.2	99.4	92.2	77.8	63.4	49.0
-1.200	.063		59.1	82.7	88.0	80.0	76.0	66.6	111.7	109.1	107.8	106.5	101.1	94.5	81.1	67.8	54.5
-1.100	.079		60.1	83.6	89.0	81.6	78.0	69.4	112.5	110.1	108.9	107.7	102.7	96.7	84.5	72.3	60.1
-1.000	.100		61.1	84.5	90.0	83.3	80.0	72.2	113.3	111.1	110.0	108.9	104.4	98.9	87.8	76.7	65.6
-.900	.126		62.1	85.4	91.0	85.0	82.0	75.0	114.1	112.1	111.1	110.1	106.1	101.1	91.1	81.1	71.2
-.800	.158		63.1	86.3	92.0	86.6	84.0	77.8	114.9	113.1	112.2	111.3	107.7	103.3	94.5	85.6	76.7
-.700	.200		64.1	87.1	93.0	88.3	86.0	80.5	115.6	114.1	113.3	112.6	109.4	105.6	97.8	90.0	82.3
-.600	.251		65.1	88.0	94.0	90.0	88.0	83.3	116.4	115.1	114.4	113.8	111.1	107.8	101.1	94.5	87.8
-.500	.316		66.1	88.9	95.0	91.7	90.0	86.1	117.2	116.1	115.6	115.0	112.8	110.0	104.5	98.9	93.4
-.400	.398		67.1	89.8	96.0	93.3	92.0	88.9	118.0	117.1	116.7	116.2	114.4	112.2	107.8	103.3	98.9
-.300	.501		68.1	90.7	97.0	95.0	94.0	91.7	118.8	118.1	117.8	117.4	116.1	114.4	111.1	107.8	104.5
-.200	.631		69.1	91.5	98.0	96.7	96.0	94.4	119.5	119.1	118.9	118.7	117.8	116.7	114.4	112.2	110.0
-.100	.794		70.1	92.4	99.0	98.3	98.0	97.2	120.3	120.1	120.0	119.9	118.9	118.9	117.8	116.7	115.6
.000	1.000		71.1	93.3	100.0	100.0	100.0	100.0	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1	121.1
.100	1.259		72.1	94.2	101.0	101.7	102.0	102.8	121.9	122.1	122.2	122.3	122.8	123.3	124.4	125.5	126.7

.200	1.585	73.1	95.1	102.0	103.3	104.0	105.6	122.7	123.1	123.3	123.5	124.4	125.5	127.8	130.0	132.2
.300	1.995	74.1	95.9	103.0	105.0	106.0	108.3	123.4	124.1	124.4	124.8	126.1	127.8	131.1	134.4	137.8
.400	2.512	75.1	96.8	104.0	106.7	108.0	111.1	124.2	125.1	125.5	126.0	127.8	130.0	134.4	138.9	143.3
.500	3.162	76.1	97.7	105.0	108.4	110.0	113.9	125.0	126.1	126.7	127.2	129.5	132.2	137.8	143.3	148.9
.600	3.981	77.1	98.6	106.0	110.0	112.0	116.7	125.8	127.1	127.8	128.4	131.1	134.4	141.1	147.7	154.4
.700	5.012	78.1	99.5	107.0	111.7	114.0	119.5	126.6	128.1	128.9	129.6	132.8	136.6	144.4	152.2	160.0
.800	6.310	79.1	100.3	108.0	113.4	116.0	122.2	127.3	129.1	130.0	130.9	134.5	138.9	147.7	156.6	165.5
.900	7.943	80.1	101.2	109.0	115.0	118.0	125.0	128.1	130.1	131.1	132.1	136.1	141.1	151.1	161.1	171.1
1.000	10.000	81.1	102.1	110.0	116.7	120.0	127.8	128.9	131.1	132.2	133.3	137.8	143.3	154.4	165.5	176.6
1.100	12.589	82.1	103.0	111.0	118.4	122.0	130.6	129.7	132.1	133.3	134.5	139.5	145.5	157.7	169.9	182.2
1.200	15.849	83.1	103.9	112.0	120.0	124.0	133.4	130.5	133.1	134.4	135.7	141.1	147.7	161.1	174.4	187.7
1.300	19.953	84.1	104.7	113.0	121.7	126.0	136.1	131.2	134.1	135.5	137.0	142.8	150.0	164.4	178.8	193.3
1.400	25.119	85.1	105.6	114.0	123.4	128.0	138.9	132.0	135.1	136.6	138.2	144.5	152.2	167.7	183.3	198.8
1.500	31.623	86.1	106.5	115.0	125.1	130.0	141.7	132.8	136.1	137.8	139.4	146.2	154.4	171.1	187.7	204.4
1.600	39.811	87.1	107.4	116.0	126.7	132.0	144.5	133.6	137.1	138.9	140.6	147.8	156.6	174.4	192.1	209.9
1.700	50.119	88.1	108.3	117.0	128.4	134.0	147.3	134.4	138.1	140.0	141.8	149.5	158.8	177.7	196.6	215.5
1.800	63.096	89.1	109.1	118.0	130.1	136.0	150.0	135.1	139.1	141.1	143.1	151.2	161.1	181.0	201.0	221.0
1.900	79.433	90.1	110.0	119.0	131.7	138.0	152.8	135.9	140.1	142.2	144.3	152.8	163.3	184.4	205.5	226.6
2.000	100.00	91.1	110.9	120.0	133.4	140.0	155.6	136.7	141.1	143.3	145.5	154.5	165.5	187.7	209.9	232.1
2.100	125.89	92.1	111.8	121.0	135.1	142.0	158.4	137.5	142.1	144.4	146.7	156.2	167.7	191.0	214.3	237.7
2.200	158.49	93.1	112.7	122.0	136.7	144.0	161.2	138.3	143.1	145.5	147.9	157.8	169.9	194.4	218.8	243.2
2.300	199.53	94.1	113.5	123.0	138.4	146.0	163.9	139.0	144.1	146.6	149.2	159.5	172.2	197.7	223.2	248.8
2.400	251.19	95.1	114.4	124.0	140.1	148.0	166.7	139.8	145.1	147.7	150.4	161.2	174.4	201.0	227.7	254.3
2.500	316.23	96.1	115.3	125.0	141.8	150.0	169.5	140.6	146.1	148.9	151.6	162.9	176.6	204.4	232.1	259.9
2.600	398.11	97.1	116.2	126.0	143.4	152.0	172.3	141.4	147.1	150.0	152.8	164.5	178.8	207.7	236.5	265.4
2.700	501.19	98.1	117.1	127.0	145.1	154.0	175.1	142.2	148.1	151.1	154.0	166.2	181.0	211.0	241.0	271.0
2.800	630.96	99.1	117.9	128.0	146.8	156.0	177.8	142.9	149.1	152.2	155.3	167.9	183.3	214.3	245.4	276.5
2.900	794.33	100.1	118.8	129.0	148.4	158.0	180.6	143.7	150.1	153.3	156.5	169.5	185.5	217.7	249.9	282.1
3.000	1000.0	101.1	119.7	130.0	150.1	160.0	183.4	144.5	151.4	154.4	157.7	171.2	187.7	221.0	254.3	287.6
3.100	1258.9	102.1	120.6	131.0	151.8	162.0	186.2	145.3	152.1	155.5	158.9	172.9	189.9	224.3	258.7	293.2
3.200	1584.9	103.1	121.5	132.0	153.4	164.0	189.0	146.1	153.1	156.6	160.1	174.5	192.1	227.7	263.2	298.7
3.300	1995.3	104.1	122.3	133.0	155.1	166.0	191.7	146.8	154.1	157.7	161.4	176.2	194.4	231.0	267.6	304.3
3.400	2511.9	105.1	123.2	134.0	156.8	168.0	194.5	147.6	155.1	158.8	162.6	177.9	196.6	234.3	272.1	309.8

envàs. Quin serà el nombre d'espores que quedaran després de cadascun dels tractaments següents:

- a) 0,50 min a 255 °F
- b) 0,95 min a 250 °F      $(0.95 = 0.50 \cdot 10^{(255-250)/18})$
- c) 3,41 min a 240 °F      $(3.41 = 0.50 \cdot 10^{(255-240)/18})$

Fem servir l'equació (4) :  $N = N_i \cdot 10^{-t/D}$  per a calcular  $N_1$  i l'equació (9)

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/z}$$

per a calcular el temps de reducció decimal (D) a cada temperatura:

a) A 255 °F:

$$D(255) = 0,25 \cdot 10^{(250-255)/18} = 0,13 \text{ min}$$

$$N = 10^4 \cdot 10^{-0,50/0,13} = 1,6 \text{ espores/envàs}$$

b) A 250 °F:

$$D(250) = 0,25 \text{ min}$$

$$N = 10^4 \cdot 10^{-0,95/0,25} = 1,6 \text{ espores/envàs}$$

c) A 240 °F:

$$D(240) = 0,25 \cdot 10^{(250-240)/18} = 0,90 \text{ min}$$

$$N = 10^4 \cdot 10^{-3,41/0,90} = 1,6 \text{ espores/envàs}$$

### Exemple 5

Quina és l'equivalència en minuts a 121,1 °C (250 °F), d'un tractament de 12 min a 116 °C, si el MO a considerar té un valor z de 14 °F?

a) Resolució per càlcul:

$$z = 14 \text{ °F} = 14 \cdot 5/9 = 7,8 \text{ °C}$$

$$F_{7,8 \text{ °C}} = 12 \cdot 10^{(116-121,1)/7,8} = 12 \cdot 0,221 = 2,21 \text{ min}$$

b) Amb la taula, a la columna que comença amb 250 °F i amb  $z = 14$  °F, hom troba la temperatura 116 °C, i seguint cap a l'esquerra per la mateixa filera en la segona columna, hom troba el coeficient letal de 0,224. L'efecte de 10 min a 116 °C serà doncs:

$$F_{116}^{7.8} = 10 \cdot 0,224 = 2,24 \text{ min}$$

### Exemple 6

Expressió del tractament en termes d'F.

Per al tractament de l'exemple 5 tindríem:

$$F_{121.1}^{7.8} \text{ o, com és més corrent: } F^{14} = 2,24 \text{ min}$$

(No es posa el subíndex perquè la temperatura és 250 °F).

### Exemple 7

El valor  $F_0$  corresponent al tractament de 12 min a 116 °C del cas a) de l'exemple 5 seria:

$$F_0 = 12 \cdot 10^{(116-121.1)/10} = 12 \cdot 0,31 = 3,71 \text{ min}$$

Quina és la diferència que hi ha entre dir que per al mateix tractament de 12 min a 116 °C,  $F^{14} = 2,2$  min i dir que  $F_0 = 3,71$  min? Doncs que els 12 min a 116 °C equivalen a 2,24 min a 250 °F (121.1 °C) si el MO té un valor  $z$  de 14 °F (7,8 °C), per exemple quan parlem de *Bacillus subtilis*, però equivalen a 3,71 min a 121,1 °C si es tracta d'un MO que tingui un valor  $z$  de 18 °F (10 °C), com per exemple *C. botulinum* o *C. sporogenes*.

Segons el principi de l'additivitat: si en un tractament la temperatura  $T$  va canviant podem determinar l'efecte de tot el procés calculant l'equivalència dels temps amb cadascun dels intervals de temperatura respecte a la temperatura de referència i sumant els valors obtinguts.

### Exemple 8

Suposem un tractament imaginari, com el de la taula següent. A la mateixa taula s'han anotat les equivalències de cada interval, en minuts a 250 °F, suposant  $z = 18$  °F.

T ( °F)	T ( °C)	temps (min)	coeficient	Contribució a Fo
212	100	1	0.0077	1 · 0.0077 = 0.0077 mn
215	101.7	2	0.011	2 · 0.011 = 0.022 mn
220	104.4	2	0.022	2 · 0.022 = 0.044 mn
230	110	3	0.077	3 · 0.077 = 0.232 mn
240	115.6	2	0.278	2 · 0.278 = 0.556 mn
250	121.1	3	1.000	3 · 1.000 = 3.000 mn
255	123.9	2	1.896	2 · 1.896 = 3.792 mn
260	126.7	2	3.594	2 · 3.594 = 7.188 mn
Suma				14.842 mn

### Exemple 9

Al tractament de l'exemple 8, la temperatura del cinquè interval és de 238 °F, en lloc de 240 °F, i la de l'últim interval de 258 °F, en lloc de 260 °F; quins són els efectes sobre Fo?

a) a 238 °F :  $Fo = 2 \cdot 10^{(238-250)/18} = 2 \cdot 0,215 = 0,430$  min,  
o sigui, una reducció de  $0,556 - 0,430 = 0,126$  min

b) a 258 °F :  $Fo = 2 \cdot 10^{(258-250)/18} = 2 \cdot 2,783 = 5,566$  min,  
o sigui, una reducció de  $7,188 - 5,566 = 1,622$  min

Observeu la diferència de l'efecte d'una disminució de temperatura a una o altra temperatura de tractament.

## 4. TRANSMISSIÓ I UTILITZACIÓ DE LA CALOR APLICADA

### 4.1. Introducció

La velocitat de transmissió de la calor des del medi calefactor a la paret de l'envàs és un dels factors crítics en el procés d'esterilització.

Recordem l'equació de transmissió de la calor a través de la capa estacionària en una superfície escalfada per convecció:

$$dq/dt = h A dT$$

La velocitat de transmissió depèn de dues magnituds:

De la diferència de temperatura entre el fluid i la superfície, dT.



Del coeficient de transmissió superficial,  $h$ , que al seu torn depèn del fluid calefactor, del material de l'envàs, de la forma, i de si la convecció és natural o forçada.

#### 4.2. Temperatura del medi de calefacció

A la dècada dels anys 40, als Estats Units es produïren diferents brots d'alteracions degudes a sub-esterilització. En investigar les possibles causes es constatà que les condicions de procés enregistrades estaven d'acord amb els procediments recomanables; però en aprofundir més, hom observà que en alguns punts dels autoclaus romani- en bosses d'aire, que es mantenien durant una part del tractament, i on la temperatura no era la que s'havia establert en dissenyar el procés sinó més baixa (Kimball i Heyliger, 1990). És possible que els envasos que havien estat dins una d'aquestes bosses d'aire haguessin rebut un tractament menys intens que l'establert i fossin la causa de la sub-esterilització.

Aquests incidents posaren de manifest que la uniformitat de les condicions en els diferents punts dins l'autoclaú és crítica per a garantir la seguretat del producte.

L'efecte de les diferències de temperatura sobre la letalitat del procés depèn del tipus de producte i de la temperatura del medi de calefacció. En línies generals, aquest efecte és més acusat quan més alta és la temperatura màxima a la qual arriba el producte en el tractament tèrmic. Tant l'escalfament ràpid, circumstància que sol donar-se en l'escalfament per convecció, com la temperatura del fluid calefactor en el procés a temperatura alta són condicions que ho afavoreixen (Wang i col., 1991).

Encara que no hi ha normes definides sobre les diferències màximes admissibles per a garantir la seguretat dels productes es considera, en general, que un autoclaú estàtic, escalfat amb vapor condensant, no ha de donar diferències entre el valor mitjà i el punt més fred superiors a 1,5 °C en començar el tractament ni a 0,5 °C després de tres minuts de tractament (Sommer, 1943, citat a Kimball i Heyliger, 1990). Altres autors recomanen una diferència màxima d'1 °C, sense distingir en quin moment del tractament (Eisner, 1988).

El procediment més satisfactori per a conèixer les diferències de temperatura dins els autoclaus és, quan es pot, la col·locació de sondes termomètriques en diferents posicions i el registre de les temperatures en cadascuna d'elles. Quan hom comença a treballar amb cada autoclaú no

és exagerat fer centenars d'aquestes corbes de registre de temperatura per tal de localitzar els punts on tendeixen a fer-se bosses d'aire o a trobar-se escuts tèrmics i així conèixer amb precisió quins són els punts crítics de l'aparell i les temperatures mínimes que s'hi registren.

En el cas dels autoclaus que funcionen amb vapor condensant, les causes més freqüents d'aquestes irregularitats són:

a) Una possible eliminació incompleta de l'aire que hi havia dins, abans d'omplir-lo de vapor.

b) Un purgat insuficient durant l'operació, tant per a eliminar l'aire que hagués quedat en començar com el que pugui portar el vapor emprat.

c) Una purga ineficaç dels condensats del vapor, que poden acumular-se al fons de l'autoclau i cobrir una part dels envasos amb aigua líquida, a temperatures fins i tot de 55 °C, quan la de la resta de l'autoclau és de 121 °C. Els autoclaus sense separadors i que es carreguin deixant caure les llaunes dins l'autoclau ple d'aigua i es descarreguin pel fons, després del tractament, són especialment delicats en aquest sentit. A més de respectar el temps mínim de purga de l'aire s'ha de comprovar visualment, abans de tancar la purga del fons, que ja no surt aigua, sinó vapor amb una petita proporció de condensat.

Es considera que l'eliminació de l'aire ha de menar-se fins que la proporció d'oxigen en el vapor que surt de la purga no sigui de més de l'1% (5% d'aire, aproximadament). Aquesta proporció pot controlar-se mitjançant la mesura de l'oxigen en el vapor de la purga. En el cas d'autoclaus que funcionin amb vapor saturat, la proporció d'aire s'ha de determinar també a través de la diferència entre la pressió real dins l'autoclau i la pressió del vapor pur a la temperatura de procés. Aquesta diferència no ha d'ésser de més de 0,8 psi (55 mbar) (Kimball i Heyliger, 1990). Cal tenir en compte que la mesura de la pressió amb la precisió que cal per a assegurar diferències d'aquest ordre de magnitud no pot fer-se amb els manòmetres amb què van equipats habitualment els autoclaus, sinó que calen transductors adients. Precisament la correspondència entre la pressió en l'autoclau i la pressió del vapor saturat a la temperatura de treball havia constituït un índex del nivell de purga que s'havia emprat fins als anys 40, però que demostrà que era una garantia ineficaç amb la precisió dels instruments que s'hi feien servir.

Als autoclaus per càrregues, tant horitzontals com verticals, els envasos poden col·locar-se en ordre, en cistelles o en separadors, o bé a munts, sense cistelles ni separadors. El temps de purga de l'aire és més llarg en el primer cas, i cistelles o separadors han de tenir forats de mides i separació determinades per a garantir la circulació del vapor.

El temps de purga que cal per a eliminar l'aire és molt variable. Depèn del disseny de l'autoclau, però també de la mida i de la col·locació dels envasos. Mentre en unes condicions, un minut de purga pot ésser suficient, en altres condicions poden caldre 10 min, i fins i tot pot ésser que no es puguin eliminar les diferències de temperatura. En tal cas, cal canviar la col·locació dels envasos, el disseny dels separadors o de les cistelles, etc. En autoclaus hidrostàtics, el temps de purga pot anar des de 15 minuts fins a 1 hora. D'altra banda, la purga de l'aire no és l'única mesura que cal prendre. El vapor mateix ha de circular amb regularitat per tot el volum de l'autoclau. Cal tenir en compte aquestes circumstàncies, per exemple, quan es dissenyen els barems d'esterilització per a una mida d'envàs, per a calcular en base als barems d'una mida diferent.

### 4.3. Transmissió de calor

Quan un envàs que conté un producte a temperatura  $T_0$  se sotmet a un escalfament amb un fluid calefactor que té una temperatura  $T_1$ , més alta, la calor es transmet dins l'envàs, segons mecanismes que varien des de la conducció pura, en la qual l'energia es propaga sense moviment d'unes molècules respecte a les altres, fins a la convecció pura, en la qual la calor es transmet perquè les molècules calentes canvien de posició respecte a les que estan més fredes. A la pràctica es donen comportaments de característiques intermèdies entre l'un i l'altre tipus. Reichert descriu un procediment per a estimar el percentatge de cada tipus de transmissió que es dona en un producte determinat; aquest procediment està basat en la relació entre les velocitats reals d'escalfament del mateix producte en envasos de dues mides diferents, i la comparació de la relació de velocitats amb les calculades en els casos de conducció pura i de convecció pura (Reichert, 1988).

El coneixement del mecanisme de transmissió de calor pot ésser important, per exemple, per a saber si són aplicables determinats procediments de càlcul de barems que només són vàlids si l'escalfament és per conducció.

La transmissió per conducció és pròpia de productes sòlids o líquids pastosos o espessos. En general, és més lenta que la transmissió per convecció, típica de líquids de menys viscositat.

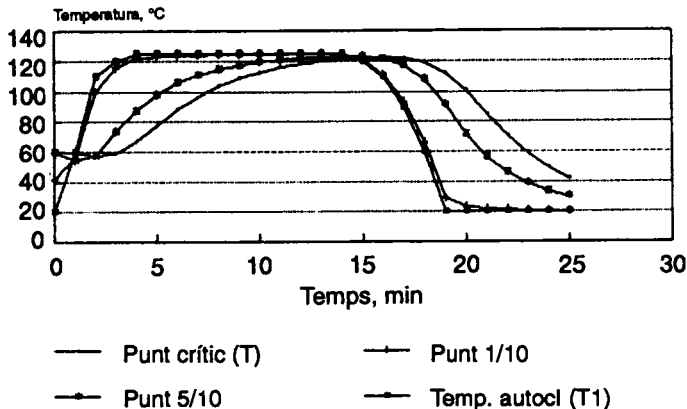
Al llarg d'un tractament, però, el mecanisme de transmissió pot canviar; bé sigui de convecció a conducció, si per exemple es donen gelatinitzacions de midons o coagulacions de proteïnes; o de conducció a convecció, si es

donen fenòmens de despolimerització. Quan s'esdevé alguna d'aquestes circumstàncies, en la línia que representa la temperatura del producte en funció del temps s'observa un canvi més o menys acusat en el pendent, a partir d'un cert moment.

En l'escalfament hi ha una força impulsora, definida com la diferència entre la temperatura del medi calefactor i la del producte (sempre en el punt crític). Si es representa el logaritme d'aquesta diferència en funció del temps, en la majoria dels casos s'observa que, després d'un període inicial en què la velocitat de pujada és més lenta i progressivament creixent, la línia agafa una forma recta (decreixent, tal com hem considerat l'escala de temperatures), excepte en els casos de canvi de mecanisme de transmissió esmentats abans, els quals provoquen un canvi de pendent en un moment donat.

De la mateixa manera, quan es produeix el refredament, la força impulsora és la diferència entre la temperatura del producte (T) i la temperatura del medi de refredament (T<sub>2</sub>) i en representar el logaritme de T-T<sub>2</sub> en funció del temps també s'obté una recta, després d'un retard inicial.

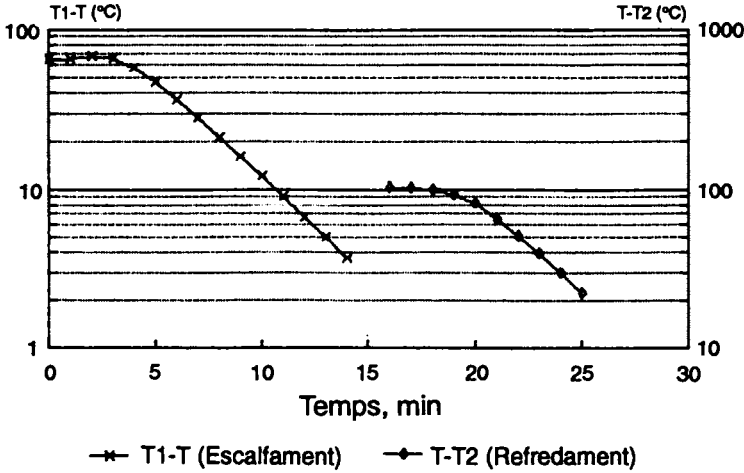
A la figura 3 s'han representat unes línies típiques d'escalfament i refredament per a diferents posicions dels punts en un envàs cilíndric (1 = tocant paret, 5 = centre). Es pot veure que com més a prop de la superfície de l'envàs està el punt que es considera, més de pressa s'escalfa i més de pressa es refreda. En canvi el punt central és el de resposta més lenta.



Envasos cilíndrics 100x76

FIGURA 3. Temperatures en punts diferents (°C)

A la figura 4 es representen en escala semilogarítmica les diferències de temperatura T1-T entre el fluid calefactor i el producte en la fase d'escalfament. També s'hi representen les diferències T-T2 entre la temperatura del producte i la temperatura del fluid de refredament en la fase de refredament.



Mides (mm) 100x76

FIGURA 4. Variació de la temperatura en l'escalfament i en el refredament

El temps que cal perquè la part recta de la corba d'escalfament travessi un cicle logarítmic s'anomena fh (h indica que es tracta d'una corba d'escalfament). Quan els mateixos raonaments s'apliquen a refredament, la magnitud s'anomenarà fc.

El pendent de la recta, considerant dos punts separats per un cicle logarítmic, és:

$$\frac{\log_{10}(T1-T) - \log(T1-T)}{-fh} = - \frac{1}{fh} \tag{16}$$

(El signe negatiu de fh és perquè el pendent és negatiu).

Si allarguem la part recta fins al temps zero, la recta es creua amb l'eix vertical en una temperatura que anomenarem Tp (pseudo-inicial). L'equació de la recta serà llavors, considerant aquest punt pseudo-inicial (0, log(T1-Tp)) i un punt (t, log(T1-T)):

$$\log(T_1 - T) = \log(T_1 - T_p) - \frac{1}{f_h} \cdot t \quad (17)$$

la magnitud del període no logarítmic de l'escalfament sol mesurar-se pel paràmetre  $j_h$ , que es defineix com:

$$j_h = \frac{T_1 - T_p}{T_1 - T_o} \quad (18)$$

d'on:  $T_1 - T_p = j_h \cdot (T_1 - T_o)$  (19)  
que, substituït en l'equació (17), dóna:

$$\log(T_1 - T) = - \frac{1}{f_h} \cdot t + \log(j_h \cdot (T_1 - T_o)) \quad (20)$$

Amb aquesta expressió es pot calcular la temperatura a què s'arriba després d'un temps  $t$ , amb escalfament logarítmic. Cal tenir en compte que malgrat que teòricament tot el temps d'escalfament segueix aquest model, a la pràctica no sempre és així. Si s'allarga molt el tractament, val més considerar que des d'un cert moment deixa d'ésser vàlid el model logarítmic i que la temperatura del producte ja es manté constant. És aconsellable aplicar aquesta regla quan la diferència entre la temperatura del producte i la temperatura del fluid d'escalfament sigui més petita que 0,1 °F (0,06 °C). Des d'aquest moment fins al començament del refredament, la temperatura del producte s'ha de considerar igual que la del fluid calefactor.

També és important tenir en compte que si la temperatura inicial de l'autoclau (no la del producte) no és la temperatura de règim, a efectes del càlcul de letalitat pel procediment matemàtic el temps que triga l'autoclau a arribar fins a la temperatura del tractament només compta per un 40% de la seva durada. És a dir, que si es triguen 5 min a arribar a la temperatura de tractament, per a calcular l'efecte letal s'ha de comptar el temps de procés des del minut 3.

A vegades, cal saber el temps que cal perquè la temperatura del punt crític arribi a diferir de la del fluid calefactor en un cert valor. Llavors, s'ha de resoldre l'equació (20) per a trobar  $t$  i s'arriba a:

$$t = f_h \cdot \log(jh \cdot \frac{T_1 - T_0}{T_1 - T}) \tag{21}$$

**Exemple 10**

Calculem els paràmetres  $f_h$  i  $j_h$  pel tractament següent:  
 Les dades estan representades a la fig. 5.

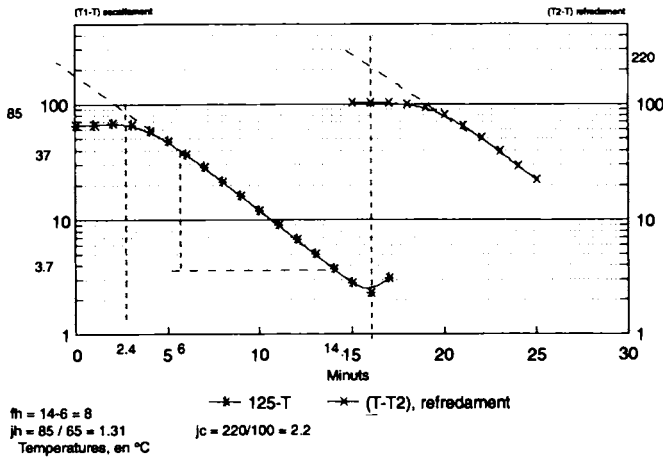


FIGURA 5. Penetració de la calor

a) Càlcul de  $f_h$ : prenent el tros recte que va de 37 °C, als 6 min, a 3,7 °C als 14 min, resulta que el temps que cal per a travessar aquest cicle logarítmic és de 14 – 6 = 8 min.  $f_h = 8$  min. Un procediment més correcte és fer servir el pendent de la recta de regressió de la part recta. Fet d'aquesta manera, el valor de  $f_h$  és de 8,15 min. Aquest és el valor que emprarem per a  $f_h$  en exemples posteriors (vegeu exemples 16 a 18).

b) Càlcul de  $j_h$ : l'autoclau triga 4 min a arribar a la temperatura de tractament (125 °C). Per tant, el moment inicial s'ha d'agafar a  $0,6 \times 4 = 2,4$  min. L'allargament de la part recta de la corba assenyala una diferència de temperatures,  $T_1 - T$ , de 85 °C als 2,4 min. Com que  $T_0$  és 60 °C,  $T_1 - T_0$  és 125 – 60 = 65 i el valor de  $j_h$  és:

$$j_h = \frac{85}{65} = 1,31$$

## Dades de l'escalfament

$t$ (min)	T1 (°F)	T (°F)	125-T	log(125-T)
0	20.0	60.0	65.00	1.81
1	60.0	59.7	65.30	1.81
2	110.0	57.3	67.70	1.83
3	120.0	59.2	65.80	1.82
4	125.0	67.3	57.70	1.76
5	125.0	77.6	47.40	1.68
6	125.0	88.3	36.70	1.56
7	125.0	96.7	28.30	1.45
8	125.0	103.8	21.20	1.33
9	125.0	108.9	16.10	1.21
10	125.0	112.9	12.10	1.08
11	125.0	116.0	9.00	.95
12	125.0	118.3	6.70	.83
13	125.0	120.0	5.00	.70
14	125.0	121.3	3.70	.57
15	120.0	122.2	2.80	.45
16	110.0	122.7	2.30	.36
17	90.0	121.9	3.10	.49
18	70.0	119.0	6.00	.78
19	20.0	112.2	12.80	1.11
20	20.0	100.8	24.20	1.38
21	20.0	85.0	40.00	1.60
22	20.0	70.9	54.10	1.73
23	20.0	59.1	65.90	1.82
24	20.0	49.3	75.70	1.88
25	20.0	49.2	75.80	1.88

#### 4.4. Utilització de la calor dins el producte

##### *Concepte de punt crític i la seva localització*

Atès que la calor no es transmet instantàniament des de l'exterior de l'envàs, els diferents punts del producte tenen històries tèrmiques diferents. El punt crític és el punt que rep un tractament tèrmic menys intens. A primera vista hom pot pensar que el punt crític és el centre geomètric de l'envàs però la realitat ens mostra que moltes vegades no és així. De fet, la localització del punt crític dels envasos pot ésser una tasca força entretinguda que demani nombroses provatures.

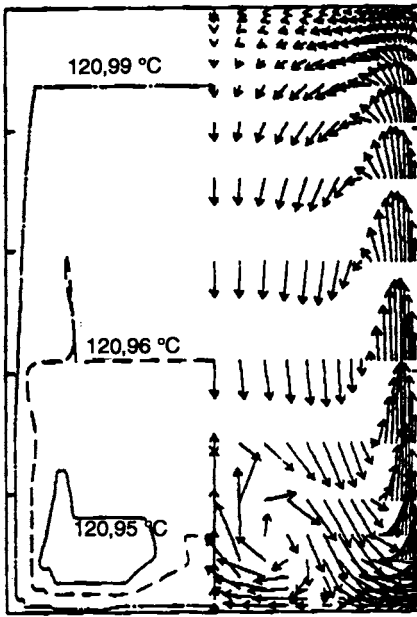
Mulvaney i Hsieh (1991) han fet servir un procediment matemàtic d'optimització per a localitzar el punt crític en base a les lectures de cinc sondes situades a l'eix de simetria axial de l'envàs. El procediment és adient per a productes homogenis però en productes heterogenis els



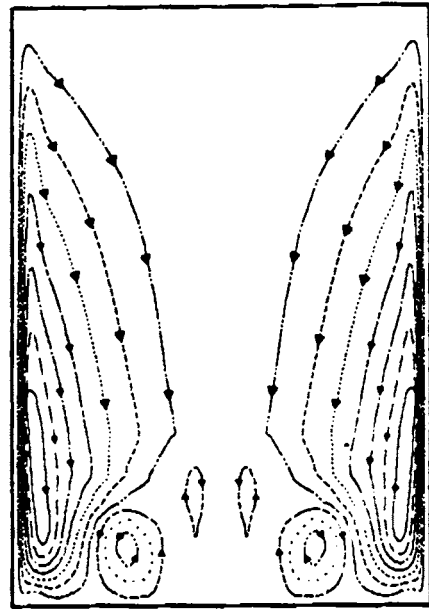
mateixos autors recorregueren al tempteig calculant Fo en cada punt mitjançant el procediment general (vegeu 5.3).

### Escalfament per convecció

L'estudi matemàtic del fenomen de la convecció és de gran complexitat i només s'han desenvolupat models més o menys precisos en el cas d'envàs cilíndrics en posició vertical (per exemple, Datta i Teixeira, 1988). Segons aquests models, l'escalfament als punts que toquen la paret de l'envàs fa que el producte en aquestes zones, per la seva densitat menor, doni lloc a un corrent cap amunt. El producte situat cap a l'eix de l'envàs, en canvi, segueix un moviment descendent. Prop del fons, però, el producte calent puja per tota la secció de l'envàs i en trobar-se amb el que baixa produeix uns remolins, els quals atrapen una part del producte, que s'escalfa més poc a poc que la resta. Aquests remolins defineixen una zona anular al voltant de l'eix de simetria radial de l'envàs que és la zona on l'escalfament és més lent, o sigui, la zona crítica (fig. 6).



Isotermes i vectors de velocitat



Moviment del fluid als 2,5 min

FIGURA 6. Moviments del fluid, en un envàs cilíndric que s'escalfa per convecció

### Escalfament per conducció

En el cas de la conducció no hi ha moviment de molècules dins el producte. En principi, per raó de la simetria del sistema, podria pensar-se que el punt crític ha d'estar al centre geomètric de l'envàs. En realitat, com que en els productes alimentaris que s'escalfen per conducció la transmissió de la calor és lenta, sol donar-se la circumstància que quan comença el refredament a les parets de l'envàs, el centre geomètric encara continua escalfant-se i triga a començar a refredar-se. Pot ésser que algun punt diferent d'aquest centre geomètric, atès que comença a refredar-se abans, tingui un tractament menys intens que el mateix centre. La situació del punt o la zona crítica dependran de la geometria de l'envàs i de la difusivitat tèrmica del producte. En el cas d'envasos cilíndrics pot estar situat a diferents alçades en l'eix de simetria de l'envàs o en una zona anular al voltant de l'eix de simetria radial, com es resumeix a la taula següent (Rodrigo i Safón, 1982).

Relació H/D	Posició del punt crític
<0.3	Centre geomètric.
0.35 a 0.90	Dues àrees a l'eix de simetria radial i per damunt i per davall del centre geomètric, respectivament.
0.95	Centre geomètric.
0.95 a 1.90	Zona anular al voltant de l'eix de simetria axial.
> 1.9	Centre geomètric.

H = altura de l'envàs    D = diàmetre de l'envàs

Per tant, la localització del punt crític és una qüestió delicada que pot exigir un cert nombre d'assaigs.

### *Calor sensible*

Quan es dóna calor a un producte, aquesta calor pot produir dos menes de fenòmens:

a) Una pujada de la temperatura. La calor que s'empra en aquesta pujada és la que s'anomena calor sensible.

b) Un canvi de l'estat físic del producte, com ara de sòlid a líquid, de líquid a gas, o un canvi de forma cristal·lina o de la disposició molecular, com pot ésser la gelatinització dels midons. La calor que s'empra en aquests canvis d'estat és la que s'anomena calor latent.

La calor sensible, doncs, és la que s'inverteix a augmentar la temperatura del producte.

Per a un increment de temperatura,  $dT$ , prou petit perquè la capacitat calorífica del producte romangui constant, la quantitat de calor que cal donar a una massa  $m$  del producte per tal que la seva temperatura passi de  $T$  fins a  $T + dT$ , és:

$$q = m \cdot C_p \cdot dT \quad (22)$$

$C_p$  és la capacitat calorífica, la qual és una constant pròpia del producte. Una compilació força completa de capacitats calorífiques d'aliments és la de Polley i col·laboradors (Polley i col., 1980). La majoria de textos sobre enginyeria dels aliments solen incloure també taules amb les propietats tèrmiques de productes.

La capacitat calorífica dels productes és força diversa. Mentre l'aigua pot tenir una  $C_p$  de 4,18 kJ/(kg °C), un producte com la carn de porc pot tenir de 2,8 a 3,2 kJ/(kg °C), mentre una margarina la pot tenir de 1,8 a 2,1 kJ/(kg °C) i les nous, de 0,8 a 1,2 kJ/(kg °C).

Aquestes diferències tenen una importància pràctica considerable, car si un tractament es calcula per a un producte d'una certa composició, per exemple amb una proporció alta de greix, si algun envàs es dosifica malament i porta una quantitat d'aigua més gran que la que s'havia suposat, el producte d'aquell envàs tindrà una capacitat calorífica més alta i cal pensar que s'escalfarà amb una velocitat diferent.

El tractament matemàtic de la velocitat d'escalfament es realitza però (en productes que s'escalfen per conducció) amb l'anomenada difusivitat tèrmica, que es defineix com:

$$\alpha = \frac{\text{Conductivitat tèrmica}}{\text{Densitat} \cdot \text{Capacitat calorífica}} \quad (23)$$

que es mesura en  $m^2/s$ .

En envasos cilíndrics, de radi  $R$  i semi-alçada  $l$ , i amb temps d'escalfament llargs, com el que dura una esterilització pel procediment convencional, la difusivitat tèrmica està relacionada amb el paràmetre  $f_h$ , que mesura la velocitat d'escalfament, i que s'ha definit a l'apartat 4.3:

$$f_h = \frac{2,303}{a \cdot (5,784/R^2 + 9,870/l^2)} \quad (24)$$

*Exemple 11*

Admetem una conserva que porta carn i patates, en una petita quantitat de líquid de govern, de manera que la barreja pot suposar-se que té una difusivitat tèrmica d' $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ . L'esterilització es practica en envasos de mides (imperials) 211 x 400 o sigui 65 x 102 mm ( $R = 32,5 \text{ mm}$ ; semi-alçada,  $l = 51 \text{ mm}$ ).

a) Quin paràmetre  $f_h$  té l'operació?

b) Si en algun envàs, per equivocació, només s'hi posa líquid de govern, que té una difusivitat tèrmica mitjana al llarg del tractament d' $1,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ; quin paràmetre  $f_h$  pot suposar-se en l'escalfament, suposant que sigui aplicable l'equació (24)?

a) Per a simplificar, passem la difusivitat a  $\text{mm}^2/\text{s}$ :  $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} = 0,13 \text{ mm}^2/\text{s}$

$$f_h = \frac{2,303}{0,13 \cdot (5,784/32,5^2 + 9,870/51^2)} = 1911 \text{ s} = 31,8 \text{ min}$$

b) La nova difusivitat és:  $1,50 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} = 0,15 \text{ mm}^2/\text{s}$

$$f_h = \frac{2,303}{0,15 \cdot (5,784/32,5^2 + 9,870/51^2)} = 1656 \text{ s} = 27,6 \text{ min}$$

*Calor latent*

La calor latent és aquella que en lloc d'invertir-se en l'augment de temperatura del producte, produeix canvis en l'estat físic (canvis de fase) dels components. Aquests canvis poden ésser:

- Fusió, per exemple de productes congelats o de greixos en estat sòlid.
- Gelatinizació de midons. A més de consumir calor latent, aquest mecanisme sol augmentar la viscositat del producte. Aquest fet pot alterar la velocitat de transmissió de la calor.
- Vaporització.

La quantitat de calor que cal per a canviar de fase una quantitat  $m$  de producte depèn de la calor de canvi de fase referida a la unitat de massa. En la fusió, és tracta de la calor de fusió. En la gelatinizació, de la calor de gelatinizació.

Mentre hi ha producte canviant de fase, la temperatura no augmenta. És aquest canvi el que absorbeix la calor que subministrem des del fluid calefactor.

Els incidents més greus que s'han originat en l'absorció de l'energia en forma de calor latent han estat relacionats amb la fusió de productes congelats. Productes en els quals, en un moment donat, es canviaren els components frescos per altres de congelats sense corregir el barem d'esterilització.

Així, doncs, cal tenir molt en compte que pot esdevenir algun fenomen d'aquests quan fem qualsevol canvi en la formulació del producte, per exemple introduir ingredients congelats, midons, greixos sòlids en lloc d'olis, etc. Si es produeix aquest fet, s'han de re-calcular els barems del tractament.

## 5. CÀLCUL DELS TRACTAMENTS

### 5.1. Introducció

El càlcul de la letalitat té per objecte determinar quines són les condicions operatives que calen per a assegurar que el punt crític o la partícula crítica reben el tractament temperatura/temps necessari per a inactivar els microorganismes-objectiu. Cal recordar que en la pràctica habitual, els paràmetres que poden controlar-se són exteriors a l'envàs o al producte i consisteixen en temperatures i composició del medi calefactor, temps de tractament i composició i temperatura del medi de refredament. Aquests són els paràmetres que haurem d'establir, fixant, per exemple, un determinat temps de purga de l'autoclau, una temperatura del vapor determinada, un temps de tractament també determinat, una velocitat de rotació donada, etc. I hem de suposar que si es compleix aquesta sèrie de condicions exteriors, el punt o la partícula crítica hauran rebut el tractament pre-fixat. Encara que actualment es disposa de sondes radiomètriques, que situades dins els envasos permeten de seguir la temperatura del producte, així com de registradors miniaturitzats, que es posen dins l'envàs connectats a un ordinador després de l'operació, i que permeten de tenir un registre fidel de la temperatura del producte a cada moment, cal remarcar que són procediments sofisticats, cars de moment i que, de fet, la seva presència introdueix una pertorbació en el fenomen que s'estudia. Per tant, el càlcul de la letalitat dels processos és un pas essencial en el disseny de qualsevol tractament tèrmic.

Aquest càlcul consisteix a aplicar els conceptes de cinètica de la destrucció dels microorganismes a diferents temperatures, els quals s'han

desenvolupat en els apartats anteriors. Si coneguéssim tot el desenvolupament tèrmic en el punt crític podríem dividir el tractament en intervals de temps prou petits perquè, en cadascun d'ells, la temperatura es mantingués constant. A cada interval de temps li calcularíem la letalitat, tenint en compte la seva durada i la temperatura i emprant els procediments que s'han explicat a l'apartat 3.2. Després sumariem les letalitats de tots els intervals i obtindríem la letalitat total. En altres termes, allò que ens cal és trobar la integral:

$$L = \int_{t=0}^t 10^{(T_r - T)/z} dt \quad (25)$$

estesa a les temperatures del producte a les quals hi ha destrucció dels microorganismes. Cal esmentar que el temps final de la integració no coincideix necessàriament amb el començament del refredament, vist que a vegades, en la fase de refredament, que té una primera part a temperatures altes, és quan es produeix la major part de l'efecte letal del procés.

El càlcul de la letalitat pot fer-se a diferents nivells de complexitat matemàtica, des de procediments gairebé empírics, amb unes necessitats de càlcul molt petites, com l'anomenat general millorat, fins a procediments altament sofisticats que requereixen utilitzar ordinadors molt potents i programes molt especialitzats, com el dels elements finits. En la taula següent es comparen els principals procediments, amb els avantatges i desavantatges de cadascun d'ells.

### Procediment i descripció

#### *General millorat*

(Bigelow) mesurament de la temperatura en el punt crític, fet amb sondes al llarg de tot el procés, en operacions pilot, en condicions exactament iguals a les que es faran servir industrialment. Mesura a intervals de temps prou petits per a poder considerar la temperatura constant en cada interval. Suma dels efectes letals dels diferents períodes de temps.

#### *Avantatges*

- a) Senzill de càlcul.
- b) No cal fer cap suposició sobre els mecanismes de transmissió de la calor.

#### *Desavantatges*

- a) No es pot aplicar als autoclaus continus ni a processos asèptics.
- b) L'efecte de les desviacions que es donin en la realitat no pot ésser calculat.

*Matemàtic o de la fórmula (Ball)*

Amb els paràmetres de velocitat de penetració de calor i de retard en la pujada de temperatura, es calcula la diferència entre el producte i el medi calefactor, en començar el refredament. Amb aquesta dada, es troba, en taules, el valor letal a la temperatura del medi calefactor, i amb aquest, es calcula el valor letal a la temperatura de referència.

Aquest procediment ha estat objecte d'adaptacions en forma de nomogrames i també s'han desenvolupat equacions per a substituir les taules per programes d'ordinador.

*Avantatges*

- a) Permet el càlcul de l'efecte de desviacions en el procés.
- b) Permet calcular barems per unes mides d'envàs diferents.
- c) Pot aplicar-se, amb certes limitacions, al càlcul de procés asèptic de productes amb partícules.

*Desavantatges*

- a) No tan senzill de càlcul.
- b) Diverses limitacions en velocitat de refredament, temperatura de refredament.
- c) Una part del procediment de càlcul és arbitrària i ha estat criticada per altres autors.

*Diferències finites (només transmissió de la calor per conducció)*

Desenvolupament de les equacions diferencials de la transmissió de calor pels procediments de diferències finites.

*Avantatges*

- a) Poden adaptar-se a diferents formes dels envasos o de les partícules.
- b) Permet simulacions força flexibles de les condicions de procés.
- c) No requereix gaire potència de càlcul.

*Desavantatges*

- a) No totes les formes dels envasos.

*Elements finits*

Divisió de l'espai de l'envàs o de la partícula en espais elementals aproximadors.

*Avantatge*

Adaptable a qualsevol forma geomètrica.

*Desavantatges*

Càlcul complex. Requereix grans ordinadors.

En aquest apartat, el càlcul dels tractaments s'aplica només al processament convencional. La problemàtica del processament asèptic és prou diferent per a tractar-la en un altre capítol, encara que emprant els principis que es desenvolupen en aquest per al tractament després de l'envasament.

## 5.2. Especificació del punt final

Una de les dades d'entrada que són necessàries per a dissenyar les condicions d'un tractament tèrmic és l'especificació del punt final, o sigui les reduccions que volen assolir-se en el nombre dels MO-objectiu del producte de què es tracti. Les condicions d'una especificació són:

a) Ha d'establir-se en funció no solament dels valors mitjans dels diferents paràmetres que determinen el resultat final sinó també de les oscil·lacions que puguin tenir:

- 1) Els recomptes inicials dels MO-objectiu.
- 2) Els paràmetres de la cinètica de destrucció dels MO, o sigui  $D$  i  $Z$ .
- 3) Les característiques del producte i de la penetració de calor, mesurades pels paràmetres  $f_h$ ,  $j_h$ ,  $f_c$ , i  $j_c$ , que s'expliquen a l'apartat 5.3.
- 4) Les condicions de procés, com  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $t_B$ .

b) Ha de traduir la seguretat i la qualitat comercial (nutricional i organolèptica) necessàries per al producte de què es tracti, fins i tot quan es donin les combinacions més desfavorables dels valors dels paràmetres.

c) Definicions qualitatives o descriptives, com "esterilitat comercial" o bé "...essencialment lliure de risc d'alteració per *Clostridium botulinum*" són de molt poca utilitat a l'hora d'establir el punt final. Han d'ésser substituïdes per termes quantitius.

El concepte quantitius més utilitzat és el de  $12D$ , que vol dir que la durada del tractament ha d'ésser la necessària per a reduir el nombre d'espores de *C. botulinum*, per exemple de  $10^{15}$  fins a  $10^3$ , o de  $10^{12}$  a  $10^0$ , o sigui, dotze cicles logarítmics. Com que a una temperatura donada cada cicle logarítmic de reducció requereix una durada  $D$ , la reducció de dotze cicles requerirà un temps de  $12D$  (en general, expressat en minuts).

Una confusió que sol aparèixer en relació amb el concepte  $12D$  és que a vegades no s'aclareix si el nombre de MO és per gram o per envàs. En realitat, la durada necessària per a la reducció és la mateixa en un cas com en l'altre, a condició que referim el nombre de MO a la mateixa



unitat de massa o de volum, tant per al nombre inicial com per al final. En canvi, des d'un punt de vista conceptual, és més clar que en el cas de procés tradicional pensem sempre en l'envàs com a unitat de referència.

L'altra confusió que es troba a vegades en la literatura és considerar que 12D vol dir que després del procés ha de haver-hi una probabilitat de  $10^{-12}$  que algun envàs tingui alguna espóra viable.

### Exemple 12

El valor de D a 250 °F (121,1 °C), per a les espores més resistents de *C. botulinum*, és de 0,25 min. Per tant, el concepte 12D, aplicat a 250 °F vol dir un tractament que equivalgui a  $12 \cdot 0,25 = 3,0$  min a 250 °F.

El concepte 12D ha funcionat bé durant molt anys i ha demostrat a la pràctica la seva adequació a través dels milions i milions d'unitats que s'han fabricat d'acord amb ell. Tot i així, cal recordar que el resultat final de la reducció depèn de la contaminació inicial, i això no es considera en el concepte 12D. Per exemple, els nivells de contaminació inicial,  $N_0$ , que poden esperar-se en dos productes i en un material d'envàs, i el nombre final,  $N_f$ , després d'aplicar un tractament tèrmic equivalent a 12D, poden ésser:

Producte/material	$N_0$ per envàs	$N_f$ per envàs
Xampinyons	$10^4$	$10^{-8}$
Carn	$10^{-1}$	$10^{-13}$
Material d'envàs asèptic	$10^{-5}$	$10^{-17}$

El nivell de seguretat resultant en cadascun dels casos és diferent. Convé, per tant, que una especificació del punt final tingui en compte el nombre inicial de microorganismes.

Com es veurà més endavant, els procediments d'esterilització dels envasos dels quals es disposa fins ara no poden assolir més enllà d'unes quatre a sis reduccions logarítmiques. En canvi, atenent al fet que la probabilitat que hi hagi una espóra en un envàs confeccionat en condicions higiènicament correctes sol ésser de l'ordre de  $10^{-3}$  a  $10^{-5}$ , la reducció de 4 a sis cicles logarítmics dona una probabilitat final de  $10^{-7}$  a  $10^{-11}$ , comparable a la probabilitat d'una espóra viable després d'aplicar un tractament 12D a uns xampinyons amb  $10^4$  espores/envàs.

Lund (Lund, 1987) ha fet les recomanacions següents per a l'especificació del punt final del tractament:

a) *Seguretat del producte*

La probabilitat que una espora de *C. botulinum* sobrevisqui en un envàs ha d'ésser de l'ordre de  $10^{-9}$ .

b) *Alteració per MO no patògens*

1) *Microorganismes mesòfils esporulats*

La probabilitat que un MO d'aquest tipus sobrevisqui després del tractament ha d'ésser de l'ordre de  $10^{-6}$ .

2) *Microorganismes termòfils*

a) *Si el producte s'ha de mantenir en climes freds o temperats.*

La probabilitat que un MO d'aquest tipus sobrevisqui després del tractament ha d'ésser més petita o igual que  $10^{-2}$ .

b) *Si el producte s'ha de mantenir en climes tropicals, a temperatures en què poden créixer els MO termòfils.*

La probabilitat que un MO d'aquest tipus sobrevisqui després del tractament ha d'ésser de l'ordre de  $10^{-6}$ .

El plantejament en aquests termes implica necessàriament conèixer i tenir en compte el nivell de contaminació inicial abans de dissenyar el tractament. Els nivells de contaminació inicial que poden considerar-se corrents depenen del tipus de producte i de les oportunitats de contaminar-se que hagi pogut tenir. En principi, essent les espores més resistents del *C. botulinum* freqüents al terra, cal pensar que alguns vegetals, com els espàrrecs o els xampinyons, poden tenir recomptes alts. Productes com les carns, si no han estat manipulats, o ho han estat en condicions higièniques adients, tindran, en general, recomptes més baixos. En canvi, productes amb carn picada, com mandonguilles, o emulsionada, com les salsitxes tipus Frankfurt, han de considerar-se com de contaminació potencialment alta. Matèries primeres que hagin sofert tractaments a temperatures altes, com per exemple els midons, o les pastes de sopa, poden tenir recomptes alts de MO termòfils si no han estat elaborades en condicions que no afavorissin el creixement.

Alguns recomptes inicials que el mateix Pflug recomana considerar, en combinació amb les seves recomanacions per als punts finals i els valors de D corresponents, són (Pflug, 1987, citat a Toledo, 1990):

Factor	Nf	No		D	Fo
Salut pública (destrucció de <i>C. botulinum</i> )	10 <sup>-9</sup>	General	10	0.2	2.0
		Carns	10 <sup>2</sup>		2.2
		Xampinyons	10 <sup>4</sup>		2.6
		Envasos	10 <sup>-5</sup>		0.8
Mesòfils esporulats no patògens	10 <sup>-6</sup>	General	10	0.5	3.5
		Carns	10 <sup>2</sup>		4.0
Termòfils	10 <sup>-2</sup>	General	10 <sup>2</sup>	1.5	6.6

(D, en minuts a 250 °F; Fo en minuts)

Els valors de la columna Fo s'han afegit a les dades de Pflug tot calculant-los amb l'expressió:

$$Fo(\text{mínim}) = D \cdot (\log No - \log Nf)$$

Per exemple, per al factor salut pública en carns:

$$Fo = 0,2 \cdot (\log (10^2) - \log (10^{-9})) = 0,2 \cdot (2 - (-9)) = 0,2 \cdot 11 = 2,2$$

Aquestes recomanacions s'han d'interpretar amb molta cura. Uns Fo de 2,0 o de 2,2 min són inferiors al criteri 12D i només s'han de fer servir quan es té la seguretat que la contaminació inicial és tan baixa com en els supòsits de la taula (10 o 10<sup>2</sup> espores/envàs). De tota manera, com que el criteri a seguir és el d'utilitzar el valor d'Fo més alt entre els que siguin aplicables, i els necessaris per a eliminar els mesòfils esporulats no patògens o els termòfils seran en general més grans que els corresponents a la destrucció de *C. botulinum*, els valors que s'aplicaran seran més grans que els mínims necessaris per a la protecció de la salut pública. Així, per exemple, si el producte i les seves condicions d'emmagatzematge i de distribució el fan sensible al creixement de MO termòfils, el Fo que cal aplicar és el de 6,6, encara que sigui, per exemple, un producte càrnic, en el qual, per a assegurar-ne la salubritat, n'hi hauria prou amb Fo = 2,2. Com que és aconsellable suposar sempre presents els mesòfils esporulats no patògens, l'Fo ha d'ésser, com a mínim, de 3,5 i amb això, els valors d'Fo seran en tots els casos compatibles amb els que resulten d'aplicar el criteri 12D.

Altres autors han fet recomanacions diferents. Stumbo, per exemple, és més estricte amb la destrucció de *C. botulinum* i menys en el nivell final de termòfils

(Stumbo, 1975), però els criteris anteriors tenen l'avantatge que s'hi diferencia clarament la severitat del tractament segons el nivell de reducció veritablement necessari.

A vegades, els nivells de seguretat indicats fan, no només recomanable com a bona pràctica de fabricació, sinó imprescindible, actuar no solament sobre el tractament tèrmic sinó també sobre els ingredients i sobre les altres operacions del procés global. Així, en el grup b2) hi ha MO d'una resistència tan gran que no se'n pot reduir el nombre als nivells recomanats llevat que la quantitat inicial sigui molt baixa. Això implica, d'una banda, en el cas de matèries primeres com per exemple sucres, midons o vegetals deshidratats, fer servir qualitats certificades pels proveïdors com a baixes en MO termòfils i aptes per l'elaboració de productes esterilitzats. A més, en el procés de preparació s'ha de mantenir el producte, i els seus ingredients, a temperatures més baixes de 20 °C o més altes de 75 °C, o sigui fora de la franja de temperatures en la qual creixen els MO termòfils.

Des d'un punt de vista pràctic, però:

a) Pot no conèixer-se el nivell inicial de contaminació.

Això, en general, pot succeir en el desenvolupament de productes nous.

b) Una especificació en termes d'Fo és més directament aplicable que una especificació en termes d'Nf.

D'aquesta manera, resulten més útils recomanacions expressades, no en forma de reduccions en els recomptes, sinó en forma dels barems d'esterilització que cal aplicar per a un producte determinat.

Hi ha llistes de recomanacions d'aquest tipus, com per exemple les de l'NCA (National Canners Association) dels EUA, o les de l'Institut Appert, de París.

Stumbo, recollint nombroses pràctiques d'esterilització de seguretat demostrada, preparà unes taules amb els barems d'esterilització, expressats amb Fo, per a diferents mides d'envasos, a diferents temperatures del medi calefactor i diferenciant si la transmissió de la calor es feia per conducció o per convecció (Stumbo, 1975). En el seu treball es donen unes taules amb els valors mínims d'Fo per a garantir la seguretat del producte, anomenats Fs, i altres taules amb els valors recomanats per a obtenir una qualitat comercial adient (Fc).

Fent servir aquestes taules, Castaigne i Lacroix han desenvolupat equacions de regressió per a calcular els valors d'Fc (qualitat comercial, no seguretat del producte), que són (Castaigne i Lacroix, 1986):

– *Escalfament per conducció*

$$Fc = 29,76446 + 1,43214 \cdot \log H + 1,98807 \cdot \log D - 0,41076 \cdot \log D \cdot \log H - 0,44095 \cdot T1 + 0,0016009 \cdot T1^2$$

Vàlida per:  $54 \leq D \leq 157$ ,  
 $57 \leq H \leq 184$ ,  
 $110 \leq T1 \leq 127$

D = Diàmetre (mm); H = Alçada (mm); T1 = Temperatura del medi calefactor (°C).

– Escalfament per convecció

$$F_c = 2 \cdot \log D + \log H + 0,89509$$

Vàlida sense limitacions en les mides de l'envàs i per a qualsevol temperatura del medi calefactor.

*Exemple 13*

Els valors d'Fc que hi ha a les taules de Stumbo i els calculats amb les equacions de Castaigne i Lacroix, així com els valors d'Fs de Stumbo, per a tres mides d'envàs, són:

Mides de l'envàs (1)	T1	Mode de transmissió de la calor	Fc, segons		Fs, segons Stumbo
			Stumbo	Castaigne	
211x400 (65x102)	230 °F (110 °C)	Conducció	5.63	5.61	5.86
		Convecció	6.49	6.53	6.16
	240 °F (116 °C)	Conducció	5.23	5.14	4.65
		Convecció	6.49	6.53	4.44
	250 °F (121 °C)	Conducció	4.82	4.83	4.08
		Convecció	6.49	6.53	3.78
401x411 (99x119)	230 °F (110 °C)	Conducció	5.79	5.87	6.48
		Convecció	6.93	6.96	6.38
	240 °F (116 °C)	Conducció	5.40	5.43	5.21
		Convecció	6.93	6.96	4.68
	250 °F (121 °C)	Conducció	5.10	5.08	4.82
		Convecció	6.93	6.96	4.17
606x700 (153x178)	230 °F (110 °C)	Conducció	6.09	6.18	7.15
		Convecció	7.50	7.51	6.66
	240 °F (116 °C)	Conducció	5.72	5.73	6.20
		Convecció	7.50	7.51	4.97
	250 °F (121 °C)	Conducció	5.49	5.39	5.81
		Convecció	7.50	7.51	4.67

(1) La primera notació de la mida de l'envàs està en notació imperial (vegeu apartat 8.2). Entre parèntesis, el diàmetre i l'alçada en mm.

Pot observar-se que per a envasos més grans i per a temperatures més baixes, els marges de seguretat són més grans. Això està d'acord amb les observacions dels autors que han estudiat els efectes de la variabilitat dels paràmetres sobre el valor  $F_0$  de les operacions. En general, com més llarg ha d'ésser el procés (envasos més grans, temperatura del medi més baixa, penetració de la calor més lenta, o sigui,  $f_h$  més gran), més influeixen en  $F_0$  les variacions de les condicions de transmissió de la calor (Walsh i Bates, 1978, Thompson i col., 1979, Patino i Heil, 1985).

A pH per sobre de sis, la resistència de les espores de *C. botulinum* es pot prendre com a constant i considerar-la donada per un valor  $D_{250}$  de 0,25 min. En conseqüència, tal com s'ha vist, amb aquests valors del pH, si s'aplica el concepte 12D, el valor mínim d' $F_0$  és de  $12 \cdot 0,25 = 3,0$ .

En canvi, a pH entre 4,6 i 6, s'ha comprovat que  $D$  depèn del pH del producte i que el valor letal mínim,  $F_s$  en minuts a la temperatura de tractament, per a assegurar-ne la destrucció suficient, segons el criteri 12D, és dona per l'equació següent, on  $T$  és la temperatura del producte en el tractament, en °F (Pflug i col., 1985):

$$\log F_s(T) = 11,544 + 0,897 \cdot \text{pH} - 0,0573 \cdot \text{pH}^2 - 0,0586 \cdot T + 0,264$$

#### Exemple 14

El barem mínim necessari per a una conserva de col, que té un pH de 5,2, i un tractament a 240 °F (115,6 °C) seria, segons aquesta fórmula:

$$\begin{aligned} \log F_s(240) &= 11,544 + 0,897 \cdot 5,2 - 0,0573 \cdot 5,2^2 - 0,0586 \cdot 240 + \\ &\quad + 0,264 = 0,86 \\ F_s(240) &= 7,2 \end{aligned}$$

I l'equivalència en minuts necessaris a 250 °F (Suposat  $z = 18$  °F)  $F_0 = 7,2 \cdot 10^{(240 - 250)/18} = 2,0$

En canvi, el barem mínim necessari per a una conserva d'espàrrecs, que té un pH de 5,7, amb un tractament també a 240 °F (115,6 °C) seria:

$$\begin{aligned} \log F_s(240) &= 11,544 + 0,897 \cdot 5,7 - 0,0573 \cdot 5,7^2 - 0,0586 \cdot 240 + \\ &\quad + 0,264 = 1,00 \\ F_s(240) &= 10 \end{aligned}$$

I l'equivalència en minuts necessaris a 250 °F (Suposat  $z = 18$  °F)  $F_0 = 10 \cdot 10^{(240 - 250)/18} = 2,8$  min.

Cal tenir en compte que aquests valors d' $F_0$  són mínims absoluts i que en general, i sobretot quan s'està en la fase de desenvolupament d'un producte, cal aplicar factors de seguretat, en funció de la tecnologia que s'apliqui i de la seguretat amb què es puguin mantenir les condicions operatives dissenyades.

Segons el mecanisme de transmissió de la calor en el producte i segons el mitjà de calefacció i la tecnologia (per exemple, rotació o no dels envasos), Pflug recomana aplicar uns factors de seguretat que van d'1,0 en escalfament per conducció pura o per convecció pura, en autoclau estàtic escalfat amb vapor condensant, fins a factors de tres quan la transmissió de calor sigui mixta (conducció més convecció), el medi calefactor barreja d'aire i vapor i l'autoclau rotatori (Pflug, 1987).

### 5.3. Tractament post-ensament

#### *Procediment general, millorat*

En aquest procediment, la integral (25), que dona l'efecte letal, s'avalua mesurant la temperatura amb una freqüència prou gran per a poder suposar que la temperatura es manté constant entre cada dues mesures. Per a fer-ho, es col·loca una sonda termomètrica en el punt crític de l'envàs i mentre el producte rep el tractament tèrmic, es van llegint les temperatures a intervals de temps prou curts per tal que l'error que es faci en suposar la temperatura constant entre cada dues lectures sigui menyspreable. A l'hora de fer els càlculs, com a mesura de precaució, es pren, com a temperatura per a cada interval, la més baixa. En tractaments fets a uns 115-120 °C (239-248 °F), intervals d'un minut entre mesures són suficients. A temperatures clarament més altes, les lectures s'hauran de fer més sovint.

La determinació de la posició del punt crític és probablement la part més entretinguda del procediment, ja que s'han de sospesar diferents posicions de la sonda fins a estar segurs d'haver trobat la que proporciona el valor d' $F_0$  més baix per a un procés determinat.

El procediment general té l'avantatge que els càlculs són molt senzills, o gairebé no cal fer-ne, si es fan servir coeficients letals tabulats. En canvi, té l'inconvenient que no permet avaluar l'efecte de possibles desviacions en les temperatures, el temps, la velocitat de pujada de la temperatura, etc.

*Exemple 15*

A la taula següent es donen les temperatures del fluid calefactor i del producte, per un cert tractament, a intervals d'un minut. Per cada temperatura, es dona el coeficient letal corresponent, i l'acumulat en cada moment. També es donen els coeficients letals i els acumulats, segons els valors de la taula 8.

La taula s'ha fet servir sense interpolar, i de forma conservadora, emprant en cada cas el valor de temperatura tabulat més proper, però sempre inferior al del producte.

Pot observar-se que en començar el refredament, al minut 17, el valor Fo acumulat és 6,83, que representa el 90% del valor final (7,58). Per tant, un 10% de l'efecte letal es produeix quan l'exterior dels envasos ja s'està refredant.

t (min)	T1 (°C)	T (°C)	Fo (a)		Fo (b)	
			Calcul.	Acumul.	Tabul.	Tab. ac.
0	20.0	60.0	.000	.000	.000	.000
1	60.0	59.7	.000	.000	.000	.000
2	110.0	57.3	.000	.000	.000	.000
3	120.0	59.2	.000	.000	.000	.000
4	125.0	67.3	.000	.000	.000	.000
5	125.0	77.6	.000	.000	.000	.000
6	125.0	88.3	.001	.001	.000	.000
7	125.0	96.7	.004	.004	.004	.004
8	125.0	103.8	.019	.023	.017	.021
9	125.0	108.9	.060	.083	.056	.077
10	125.0	112.9	.151	.234	.141	.218
11	125.0	116.0	.309	.543	.295	.513
12	125.0	118.3	.525	1.068	.513	1.026
13	125.0	120.0	.776	1.845	.759	1.785
14	125.0	121.3	1.047	2.892	1.000	2.785
15	120.0	122.2	1.288	4.180	1.202	3.987
16	110.0	122.7	1.445	5.625	1.318	5.305
17	90.0	121.9	1.202	6.828	1.096	6.402
18	60.0	119.0	.617	7.444	.562	6.964
19	20.0	112.2	.129	7.573	.117	7.081
20	20.0	100.8	.009	7.582	.009	7.090
21	20.0	85.0	.000	7.583	.009	7.099
22	20.0	70.9	.000	7.583	.009	7.108
23	20.0	59.1	.000	7.583	.009	7.117
24	20.0	49.3	.000	7.583	.009	7.126
25	20.0	49.2	.000	7.583	.009	7.135
SUMES:			7.58		7.13	

(a) Calculada amb l'expressió (15)

(b) Tretes de la Taula 8 (columna  $T_r = 250$  °F,  $z(^{\circ}\text{F}) = 18$ ) per interpolació



*Procediment de la fórmula (Ball) i variants*

Ja hem vist que la letalitat d'un tractament s'avalua com:

$$L = \int_{t=0}^t 10^{(T_r - T)/z} dt$$

que, expressada en forma d'exponents de e, seria:

$$L = \int_{t=0}^{t_g} \exp (\mu(T_r - T)/z) dt \tag{26}$$

amb  $\mu = \ln 10 = 2,303$

Ball calculà aquesta integral, dividint-la en tres parts:

- a) Escalfament logarítmic (h)
- b) Primera part del refredament, hiperbòlic (ch)
- c) Refredament logarítmic (cl)

i arribà a una expressió de la forma:

$$F = f_h \cdot L_g \cdot C \tag{27}$$

en la qual la constant C és la suma de les constants corresponents a cada fase del tractament:

$$C = (Ch + Cch + Ccl)/\mu \tag{28}$$

i  $L_g$  és la letalitat a la temperatura del producte quan comença el refredament:

$$L_g = 10^{(T_g - T_r)/z}$$

En el càlcul de les diferents constants intervenen els paràmetres:

Constant	Paràmetres
Ch	g, z
Cch	m, z
Ccl	g, m, z

El càlcul condueix a integrals que han de calcular-se per procediments numèrics. Ball féu aquests càlculs i tabulà la constant C, en funció de la diferència de temperatures (g) entre el fluid calefactor (T1) i el producte, en el moment de començar el refredament (Tg), per a diferents valors de m i de z (m = temperatura del medi calefactor, menys la temperatura del medi de refredament).

L'expressió (27), però, només resulta adient per al càlcul directe, o sigui per a trobar el valor letal d'un tractament de durada determinada. En canvi, el càlcul invers, del temps que cal per a obtenir una letalitat determinada, no resulta pràctic a través de C, ja que hi ha dos paràmetres, Lg i C, que depenen de la durada del tractament fins a començar el refredament. Per aquest motiu, Ball féu el canvi de variable:

$$f_h/U = (\exp(\mu \cdot g/z))/C = 10^{(T1 - Tg)/z/C} \quad (29)$$

Aïllant C i substituint en l'expressió (27), queda:

$$F = \frac{fh}{fh/U} \cdot 10^{(Tg - Ti)/z} \cdot 10^{(T1 - Tg)/z}$$

o sigui:

$$F = \frac{fh}{fh/U} \cdot 10^{(T1 - Ti)/z} \quad (30)$$

En aquesta expressió, només fh/U està tabulat en funció de la temperatura final, i això resol el problema que tenia la utilització de C.

El procediment de Ball té diverses limitacions, com:

1) El tractament de la fase b) (refredament hiperbòlic) no té un fonament matemàticament rigorós, com el mateix Ball indicà, però la seva solució fou corroborada per l'experiència com una aproximació suficient.

2) El mètode només és vàlid mentre la temperatura del producte en el punt crític no arriba a igualar-se amb la del medi calefactor. Per bé que teòricament això no arribaria a passar mai (la funció és logarítmica), a la pràctica sí que es dona aquest cas. Llavors, és recomanable fer servir el mètode de Ball mentre:

$$g = T1 - T \geq 0,1 \text{ } ^\circ\text{F}$$

En l'interval de temperatura del producte constant, la letalitat es calcula amb l'expressió ja coneguda:

$$F' = t \cdot \exp (\mu(T - T_b)/z)$$

Aquesta letalitat  $F'$  s'afegeix a la que s'ha obtingut segons el mètode de Ball per a la resta del tractament.

3) Ball féu dues sèries de càlculs per a uns valors de  $m$  (diferència entre la temperatura  $T_1$ , del medi calefactor, i la temperatura  $T_2$ , del medi de refredament) de 130 °F i 180 °F (72,2 °C i 100 °C respectivament). Aquesta és una limitació de poca importància en els procediments clàssics, d'enllaunat, on són habituals temperatures al voltant dels 120 °C en el fluid calefactor i d'uns 20 °C en el fluid de refredament. En canvi, si es desitja estendre el procediment de Ball a l'envasament asèptic, on són habituals temperatures d'esterilització de 135 a 145 °C, mentre la temperatura de refredament continua situada al voltant dels 20 °C, el valor de  $m$  és més gran de 100 °C. Posteriorment, Stumbo determinà que cada 10 °F (5,6 °C) de diferència en el valor de  $m$  representen un increment (si la diferència és més petita) o una reducció (si la diferència és més gran) de l'1% en el valor d' $F'$ . Aquesta regla permet una correcció aproximada de l'efecte de les desviacions de  $m$ .

4) Ball féu servir un factor de retard del refredament,  $jc$ , d'1,41 en tots els casos. En canvi, com que el començament del refredament es fa a temperatura alta, qualsevol canvi en aquest moment és molt important per al resultat de l'operació. Per aquest motiu, Stumbo amplià les taules de Ball incloent-hi diferents valors de  $jc$ .

5) Tot i així, diferents autors han publicat que les taules de Ball-Stumbo poden donar errors fins i tot del 40% (Reichert, 1988; Steele i col., 1979).

Diferents autors han desenvolupat programes d'ordinador i fins i tot de calculadores programables a fi de substituir les taules de Ball-Stumbo i al mateix temps reduir-ne les inexactituds (Kao i col., 1981, Steele i col., 1979, Castaigne i Lacroix, 1986).

La taula 9, que proporciona els valors de  $g = (T_1 - T_g)$  en funció de  $fh/U$ , per a diferents valors de  $jc$  i per a  $z = 10$  °C (18 °F), ha estat calculada per l'autor amb les equacions de Kao i col.

Taula 9. Valors de fh/U en funció de g (diferents jc)

Relació entre g i fh/U (m + g = 180 °F) z = 18 °F

La taula dona els valors de fh/U en funció de jc i de la diferència de temperatura g = T1-Tb

log(g)	g(°F)	jc										
		1.25	1.38	1.50	1.63	1.75	1.88	2.00	2.13	2.25	2.38	2.50
-1.40	.040	.475	.472	.470	.467	.465	.463	.460	.458	.456	.453	.451
-1.35	.045	.486	.484	.481	.479	.476	.474	.471	.469	.466	.464	.461
-1.30	.050	.498	.496	.493	.490	.488	.485	.482	.480	.477	.475	.472
-1.25	.056	.511	.508	.505	.503	.500	.497	.494	.492	.489	.486	.484
-1.20	.063	.525	.522	.519	.516	.513	.510	.507	.504	.501	.499	.496
-1.15	.071	.539	.536	.532	.529	.526	.523	.520	.517	.514	.511	.508
-1.10	.079	.554	.550	.547	.544	.540	.537	.534	.531	.528	.525	.522
-1.05	.089	.569	.566	.562	.559	.555	.552	.549	.545	.542	.539	.536
-1.00	.100	.581	.576	.572	.569	.566	.563	.560	.558	.556	.555	.554
-.95	.112	.597	.593	.588	.585	.582	.579	.576	.574	.572	.571	.570
-.90	.126	.615	.610	.606	.602	.598	.595	.593	.590	.588	.588	.587
-.85	.141	.634	.629	.624	.620	.617	.613	.611	.608	.606	.605	.605
-.80	.158	.654	.649	.644	.639	.636	.632	.630	.627	.625	.624	.624
-.75	.178	.676	.670	.665	.660	.656	.653	.650	.647	.645	.644	.644
-.70	.200	.699	.692	.687	.682	.678	.674	.671	.668	.666	.666	.665
-.65	.224	.724	.717	.711	.706	.701	.698	.694	.691	.689	.688	.688
-.60	.251	.750	.743	.736	.731	.726	.722	.719	.716	.713	.713	.712
-.55	.282	.779	.770	.764	.758	.753	.749	.745	.742	.739	.738	.738
-.50	.316	.809	.800	.793	.787	.782	.777	.773	.769	.766	.766	.766
-.45	.355	.842	.833	.825	.818	.812	.807	.803	.799	.796	.796	.796
-.40	.398	.878	.867	.859	.852	.846	.840	.836	.832	.828	.828	.828
-.35	.447	.916	.905	.896	.888	.881	.876	.871	.866	.862	.862	.862
-.30	.501	.958	.946	.936	.928	.920	.914	.909	.904	.900	.900	.900

-.25	.562	1.004	.991	.980	.971	.963	.956	.950	.945	.941	.941	.941
-.20	.631	1.054	1.039	1.027	1.017	1.009	1.002	.995	.990	.985	.985	.985
-.15	.708	1.108	1.093	1.080	1.069	1.059	1.051	1.045	1.038	1.033	1.033	1.033
-.10	.794	1.169	1.151	1.137	1.125	1.115	1.106	1.099	1.092	1.086	1.086	1.086
-.05	.891	1.235	1.216	1.200	1.187	1.176	1.166	1.158	1.151	1.144	1.144	1.144
.00	1.000	1.309	1.287	1.270	1.256	1.243	1.233	1.224	1.215	1.208	1.208	1.208
.05	1.122	1.391	1.367	1.348	1.332	1.318	1.306	1.296	1.287	1.279	1.279	1.279
.10	1.259	1.482	1.456	1.434	1.416	1.401	1.388	1.377	1.367	1.358	1.358	1.358
.15	1.413	1.585	1.555	1.531	1.511	1.494	1.480	1.467	1.456	1.447	1.447	1.447
.20	1.585	1.700	1.667	1.640	1.618	1.599	1.583	1.569	1.556	1.545	1.545	1.545
.25	1.778	1.832	1.794	1.763	1.738	1.717	1.699	1.683	1.669	1.657	1.657	1.657
.30	1.995	1.981	1.938	1.904	1.875	1.851	1.830	1.812	1.797	1.783	1.783	1.783
.35	2.239	2.152	2.103	2.064	2.031	2.003	1.980	1.960	1.942	1.927	1.927	1.927
.40	2.512	2.349	2.293	2.248	2.210	2.179	2.152	2.129	2.109	2.091	2.091	2.091
.45	2.818	2.579	2.514	2.461	2.418	2.382	2.351	2.314	2.301	2.281	2.281	2.281
.50	3.162	2.847	2.771	2.710	2.660	2.618	2.582	2.551	2.525	2.501	2.501	2.501
.55	3.548	3.163	3.074	3.003	2.944	2.895	2.853	2.818	2.786	2.759	2.759	2.758
.60	3.981	3.540	3.434	3.350	3.281	3.223	3.174	3.132	3.095	3.063	3.063	3.062
.65	4.467	3.991	3.866	3.766	3.683	3.615	3.556	3.506	3.463	3.425	3.424	3.423
.70	5.012	4.539	4.388	4.268	4.169	4.087	4.017	3.957	3.905	3.860	3.858	3.857
.75	5.623	5.211	5.028	4.881	4.761	4.662	4.577	4.505	4.443	4.388	4.385	4.383
.80	6.310	6.045	5.819	5.639	5.492	5.370	5.267	5.179	5.103	5.036	5.032	5.029
.85	7.079	7.091	6.810	6.587	6.405	6.254	6.127	6.018	5.923	5.840	5.835	5.830
.90	7.943	8.425	8.070	7.789	7.561	7.372	7.212	7.075	6.957	6.853	6.845	6.838
.95	8.913	10.147	9.694	9.336	9.045	8.804	8.601	8.427	8.277	8.145	8.134	8.122
1.00	10.000	12.410	11.822	11.357	10.981	10.669	10.407	10.183	9.989	9.819	9.802	9.786
1.05	11.220	15.434	14.657	14.044	13.549	13.140	12.795	12.501	12.246	12.024	11.998	11.974
1.10	12.589	19.552	18.505	17.683	17.019	16.471	16.011	15.617	15.277	14.980	14.941	14.904
1.15	14.125	25.275	23.838	22.711	21.803	21.055	20.426	19.889	19.426	19.021	18.962	18.906
1.20	15.849	33.411	31.391	29.812	28.542	27.497	26.620	25.872	25.226	24.662	24.572	24.485
1.25	17.783	45.258	42.350	40.083	38.263	36.768	35.515	34.447	33.526	32.722	32.581	32.445

Tot i aquestes deficiències del mètode, val a dir que aquest té una utilitat evident respecte a procediments totalment empírics, perquè ofereix un model matemàtic proper a la realitat i emprant-lo poden calcular-se els efectes de desviacions en el procés i els barems que s'han d'aplicar quan el mateix producte es processa en un envàs diferent.

La dificultat de determinar el punt crític és comuna a qualsevol mètode. En el procediment matemàtic, un altre dels punts delicats és la determinació dels paràmetres  $f_h$ ,  $j_h$  i  $j_c$ . Durant anys, la pràctica habitual ha estat escollir el resultat més desfavorable d'una sèrie d'assaigs. El procediment més adient, però, és el càlcul estadístic dels paràmetres, fet amb el nombre d'assaigs que calguin per a reduir el risc d'error a un límit preestablert.

Els avantatges del mètode no ens han de fer oblidar que es tracta d'una aproximació matemàtica i que les deduccions que fem amb ell han d'ésser comprovades experimentalment.

#### – Aplicacions corrents

A més del càlcul directe de letalitats i el càlcul invers dels temps per a aconseguir una letalitat preestablerta, el procediment de la fórmula té dues grans aplicacions més:

a) Calcular l'efecte de desviacions que poden produir-se en les operacions reals. Per exemple, la temperatura inicial del producte pot ésser més baixa que l'emprada en el càlcul. La durada del tractament pot ésser accidentalment més curta del previst, o la temperatura del fluid d'escalfament pot ésser més baixa.

b) Calcular les condicions de tractament quan el mateix producte s'hagi de processar en uns envasos diferents.

L'explicació detallada d'aquestes possibilitats cau fora de l'abast d'aquesta obra, però en essència els procediments consisteixen a recalculer els efectes letals o els temps, per les noves condicions, tenint en compte uns principis fonamentals, que són:

a) Els paràmetres  $f_h$  i  $f_c$  depenen tant del producte com de les mides de l'envàs, però són constants per a un producte i envàs determinats encara que es modifiquin les condicions del procés. Entre dos envasos diferents, es pot calcular un factor de conversió,  $FC$ , que proporciona la relació entre els valors de  $f$  per a un envàs i l'altre. Aquesta relació no depèn només de les mides i de les característiques d'un envàs i de l'altre

sinó també de si l'escalfament és per conducció o per convecció. L'equivalència es pot calcular entre envasos del mateix material, entre envasos de llauna i envasos de vidre o a l'inrevés (Reichert, 1988, i Kopelman i col., 1981).

b) Els paràmetres  $j_h$  i  $j_c$  només depenen del producte i són independents de l'envàs i de les seves mides.

#### – Exemples de càlculs

##### *Exemple 16. Càlcul directe de letalitat*

Suposem el producte de l'exemple 10 (en el qual es fa servir l'historial tèrmic donat en l'exemple 15). Es tracta d'aplicar el procediment de la fórmula o matemàtic per a calcular la letalitat del tractament, expressada en  $F_0$ .

En primer lloc, per a trobar el valor de  $f_h/U$  a les taules, es calcula la temperatura en el moment de començar el refredament, amb la fórmula (20).

Els paràmetres de l'escalfament, calculats en l'exemple 10, eren:  $f_h = 8,15$  min i  $j_h = 1,31$ . D'altra banda, atès que l'autoclau triga 4 min a arribar a la temperatura de règim i, des d'aquest moment, 12 min a començar el refredament, el temps de tractament efectiu és:

$$t = 0,4 \cdot 4 + 12 = 13,6 \text{ min}$$

llavors:

$$\log(g) = \log(T_1 - T_g) = -\frac{1}{8,15} \cdot 13,6 + \log(1,31 \cdot (125-60)) = 0,2615$$

$$g = T_1 - T_g = 1,83 \text{ }^\circ\text{C} = 3,29 \text{ }^\circ\text{F}$$

Per a trobar  $f_h/U$  a la taula 9 cal també saber  $j_c$ , que pot calcular-se amb les dades de refredament. Amb la mateixa fig. 5 es pot veure que en el moment de començar el refredament la diferència entre la temperatura pseudo-inicial del refredament i la temperatura del fluid de refredament (perllongament de la part recta de la corba de refredament) és  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ . Com que la diferència entre la temperatura inicial del refredament i la temperatura del fluid de refredament és  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $j_c$  és  $220/100 = 2,20$ .

Per a  $g = 3,29$  °F i  $jc = 2,20$ , el valor tabulat de  $fh/u$  és 2,60 (interpolant).

$$F = \frac{fh}{fh/U} \cdot 10^{(T_1 - T_r)/z} = \frac{8,15}{2,60} \cdot 10^{(125 - 121,1)/10} = 7,69 \text{ min}$$

Aquest resultat no és significativament diferent del que sortia a l'exemple 15 calculant  $F_0$  amb el procediment general millorat (7,58 min). S'han emprat però els paràmetres calculats només amb dades d'una operació. A la pràctica, com es mencionava anteriorment, s'ha de vigilar amb molta cura l'exactitud del càlcul dels paràmetres. Els resultats poden ésser molt equivocats, si els paràmetres ho estan.

#### *Exemple 17. Càlcul del temps per a una certa letalitat*

Suposem que en l'exemple anterior la qualitat organolèptica del producte queda excessivament malmesa pel tractament. D'altra banda, l'experiència de nombroses anàlisis ha demostrat que pot descartar-se la presència de MO mesòfils més resistents que el *C. botulinum*. A més, el control de les pràctiques industrials és prou segur per a poder descartar desviacions en el procés que passessin desapercebudes. Amb tot això s'arriba a la decisió que un valor  $F_0$  de 5 min seria suficient. Si les condicions de producte, envàs, escalament i refredament es mantenen sense canvis, quin temps de tractament caldrà?

El primer pas és calcular  $fh/U$ , deduint-lo de l'equació (30):

$$fh/U = \frac{fh}{F} \cdot 10^{(T_1 - T_r)/z} \quad (31)$$

En el nostre cas:

$$fh/U = \frac{8,15}{5} \cdot 10^{(125 - 121,1)/10} = 4,00$$

Com que  $jc$  és 2,20, a les taules podem trobar el valor de la diferència  $g = T_1 - T_g$  al final del tractament: aquest valor és 5,19 °F (interpolant), equivalents a 2,88 °C.

Fent servir aquest valor en l'equació (21):



$$t = f_h \cdot \log \left( j_h \cdot \frac{T_1 - T_o}{T_1 - T} \right)$$

$$t = 8,15 \cdot \log \left( 1,31 \cdot \frac{125-60}{2,88} \right) = 11,99 \text{ min}$$

Aquest ha d'ésser el temps de tractament efectiu. Com que el temps de posar a règim l'autoclau és 4 min, el temps des que l'autoclau hagi arribat a la temperatura de règim ha d'ésser:

$$11,99 - 0,4 \cdot 4 = 11,99 - 1,60 = 10,4 \text{ min}$$

*Exemple 18. Correcció de desviacions*

Si en un lot del producte que es processa segons el barem establert a l'exemple anterior hi ha una baixada de la pressió, i la temperatura del fluid d'escalfament baixa a 122 °C en lloc dels 125 °C previstos, quin serà el Fo per al mateix temps de tractament?.

Ni  $f_h$ , ni  $j_h$  ni  $j_c$  canvien i, per tant, com que

$$\log (T_1 - T_g) = - \frac{1}{f_h} \cdot t + \log (j_h \cdot (T_1 - T_o))$$

$$\log (122 - T_g) = - \frac{1}{8,15} \cdot 9,90 + \log (1,31 \cdot (122 - 60)) = 0,6949$$

$$g = 122 - T_g = 4,95 \text{ °C} = 8,92 \text{ °F}$$

A la taula, per a  $g = 8,92 \text{ °F}$  i  $j_c = 2,20$ , es troba:

$$f_h/U = 8,17 \text{ (interpolant)}$$

$$F_o = \frac{f_h}{f_h/U} \cdot 10^{(T_1 - T_g)z} = \frac{8,15}{8,17} \cdot 10^{(122-121.1)/10} = 1,22 \text{ min}$$

Hom pot veure que l'efecte dels tres graus de menys en la temperatura del fluid d'escalfament és força evident, i que si aquest fos un cas real, no seria prudent comercialitzar el lot afectat.

(Tot i el que s'ha dit a l'apartat 2.5 sobre l'efecte del pH sobre D, perquè un  $F_0$  d'1,22 fos prou segur, caldria que el producte tingués un pH entre 4,6 i 4,7.)

### *Procediments de càlcul numèric*

Els procediments de càlcul numèric s'han aplicat al cas de l'escalfament per conducció. Tot i que el seu desenvolupament cau fora de l'abast d'aquesta obra els lectors interessats en poden trobar aplicacions a les següents referències:

a) *Per al procediment de les diferències finites:*

Teixeira i col., 1969a; Teixeira i col., 1969b; Teixeira i Manson, 1982; Enamorado i col., 1988; Tandon i Bhowmik, 1986.

b) *Per al procediment dels elements finits:*

Naveh i col., 1983.

## **5.4. Comprovació de l'eficàcia del tractament**

Tal com ja s'ha mencionat en parlar del procediment matemàtic, els procediments de càlcul no són més que models matemàtics i llur validesa s'ha de comprovar experimentalment.

Amb els productes esterilitzats, el procediment habitual és el dels envasos inoculats. Aquest procediment consisteix a inocular uns envasos amb una quantitat coneguda de MO, dels quals coneixem els paràmetres de destrucció tèrmica. Aquests envasos se sotmeten a les condicions d'esterilització i posteriorment es comprova que els MO que s'havien inoculat han estat destruïts pel tractament. Els MO que s'empren en aquests assaigs depenen del producte. En el cas de productes de baixa acidesa es fa servir, molt sovint, la soca anomenada *Clostridium sporogenes* PA 3679 (PA = *Putrefactive Anaerobe*), que té una resistència tèrmica (D) més gran que el *C. botulinum* però un coeficient letal de temperatura (z) semblant al del *C. botulinum*. També es fa servir la soca anomenada *Bacillus sterothermophilus* FS 1518, que és un termòfil molt més resistent que el *C. botulinum* i que fa agres els productes, sense inflar els envasos.

En cap cas s'han de fer inoculacions amb *Clostridium botulinum* si no es disposa de totes les mesures de seguretat necessàries, tant per al personal que treballi en el laboratori, com per a l'eliminació dels microorganismes i les toxines. Els laboratoris on es treballi amb aquest microorganisme han d'estar separats de les plantes industrials on es fabriquin els productes.

En tractaments a altres temperatures es fan servir MO com el llevat *Zygosaccharomyces bacilii*, a 60/65 °C o el *Clostridium butyricum*, a 95/100 °C (Weng i col., 1991).

En la pasteurització es pot fer servir la destrucció de determinats enzims com a indicador de l'eficàcia del tractament. La peroxidasa és emprada amb aquesta finalitat, sobretot per a verificar el blanqueig de vegetals. La destrucció de la fosfatasa alcalina s'utilitza com a indicador de la pasteurització de la llet (Belitz i Grosch, 1988).

## 6. EFECTES DE LA CALOR SOBRE COMPONENTS DIFERENTS DELS MICROORGANISMES

### 6.1. Destrucció de nutrients i de factors de qualitat

La calor que s'aplica per a la destrucció dels MO també té efecte sobre determinats components del producte i aquest efecte incideix negativament sobre la qualitat de l'aliment. Com més potent és el tractament tèrmic, o sigui, més temperatura o més temps o les dues coses alhora, més es malmet el producte. Vitamines i pigments es poden descompondre, les proteïnes es poden desnaturalitzar, la protopectina es pot solubilitzar, etc. El resultat és una alteració de les propietats de l'aliment que pot afectar el gust, el color, la viscositat, la textura, etc.

Moltes d'aquestes reaccions segueixen una cinètica de primer ordre, igual que la destrucció dels MO, i es pot seguir un tractament quantitatiu semblant al que s'ha emprat anteriorment. A la pràctica, pel que fa a aquestes reaccions de degradació, les desviacions respecte al model de la cinètica de primer ordre no tenen gaire importància. Les reaccions només progressen fins a la destrucció d'una part reduïda dels components, o fins a la formació d'una part també reduïda de les substàncies de degradació i, en aquests intervals, les desviacions possibles són prou petites perquè el model de primer ordre es pugui prendre com a vàlid en la majoria dels casos (Labuza, 1982). De fet, fins que la degradació del component no s'acosta al 50%, l'ordre de la reacció no es pot determinar amb precisió (Kessler i Fink, 1986).

Així, es pot definir un valor D, a una certa temperatura, que representa el temps que cal per tal que es destrueixi el 90% de la quantitat d'un cert nutrient o del valor d'un cert paràmetre de qualitat que hi hagués al començament.

Igual que per a la destrucció de MO, la quantitat de nutrient que resta en el producte, després d'un tractament de durada  $t$ , es pot calcular amb l'expressió:

$$C_f = C_o \cdot 10^{-t/D} \quad (32)$$

En la destrucció dels nutrients, la representació del valor  $D$  en funció de la temperatura, en escala semi-logarítmica, també és una recta. Es pot definir un valor  $z$ , que constitueix el canvi de temperatura que cal per tal que el valor  $D$  travessi un cicle logarítmic.

Els valors de  $D$  i de  $z$  per a la destrucció d'un nutrient depenen del producte. Així, per a la destrucció de la tiamina s'han donat els valors següents:

	T(°F)	T(°C)	D (min)	z (°F)	z (°C)
Pèsols sencers	250	121.1	164	47	26
Pèsols, puré	250	121.1	247	48	27
Pastanaga, puré	250	121.1	158	45	25
Llet	250	121.1	367	49	27

A través del valor  $z$  pot calcular-se el valor de  $D$  per a qualsevol temperatura:

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/z} \quad (33)$$

### Exemple 19

L'esterilització d'un puré de pastanagues es fa a 120 °C i un temps de 15 min (suposem escalfament instantani). Fent servir els paràmetres de la taula anterior, quina proporció de la tiamina inicial romandrà després del tractament?

a) Valor  $D$  per la destrucció de la tiamina de la pastanaga, a 120 °C:

$$D = D_r \cdot 10^{(T_r - T)/z} = 158 \cdot 10^{(121.1 - 120)/25} = 174,8 \text{ min}$$

b) Proporció de tiamina que roman al producte (suposem un 100% en començar):

$$C_f = C_o \cdot 10^{-t/D} = 100 \cdot 10^{-15/174.8} = 82\%$$

**Exemple 20**

El tractament anterior es canvia per un procés asèptic a 140 °C i de 9 s de durada. Es vol saber si aquest procés té la mateixa seguretat que el de l'exemple 19, i quina proporció de tiamina deixa en el producte.

a) Seguretat del procés.

El temps de tractament a 140 °C que fa la mateixa reducció respecte a *C. botulinum* que un tractament a 120 °C durant 15 min és:

$$t_2 = t_1 \cdot 10^{(T_1 - T_2)/z} = 15 \cdot 10^{(120 - 140)/10} = 0,15 \text{ min} = 9 \text{ s}$$

per tant, el nou procés té la mateixa seguretat que l'anterior.

b) Destrucció de tiamina.

1) Valor D a 140 °C, per la destrucció de tiamina:

$$D = 158 \cdot 10^{(121,1 - 140)/25} = 27,7 \text{ min}$$

2) Proporció de tiamina que queda (en 9 s = 0,15 min):

$$C = 100 \cdot 10^{-0,15/27,7} = 98,8\%$$

Es pot veure que el tractament a temperatura més alta i amb un temps més curt preserva molt més la tiamina que si es feia un tractament amb la mateixa seguretat, però a temperatura més baixa.

L'efecte del tractament pot no expressar-se com a destrucció d'un component sinó com a formació d'algun compost. Aquest pot ésser el cas, per exemple, de la formació d'HMF (hidroxi-metil-furfural) en la mel o en la llet esterilitzada. Els tractaments matemàtics que es troben a la literatura per a aquests casos no són mitjançant D i z, sinó mitjançant els conceptes de constant de la velocitat de reacció i de l'equació d'Arrhenius i l'energia d'activació. El lector interessat en aquest plantejament, ja sigui en el cas de formació de compostos o com a model matemàtic general, alternatiu al que s'ha exposat, trobarà introduccions força clares a Cheftel i Cheftel (1983) i a Kessler i Fink (1986).

**6.2. Inactivació dels enzims**

A més de la destrucció dels MO, el tractament tèrmic ha d'inactivar els enzims. Com que les reaccions enzimàtiques són reaccions químiques, l'esterilitat del producte no garanteix que no experimenti alteracions com

esfosquiments, enranciaments o canvis de gust o de textura, llevat que els enzims s'hagin inactivat.

La resistència dels enzims a la calor depèn de nombrosos factors, igual que la dels MO. Per això, quan es parla de la resistència, s'ha de mencionar en quin substrat i en quines condicions.

Els models que descriuen els comportaments dels enzims amb la temperatura són semblants als que es fan servir amb els MO i amb els nutrients i els factors de qualitat.

Per a un enzim donat, en un producte donat, es defineixen uns valors  $D$  i  $z$ , amb els mateixos significats que tenien en el cas dels MO.

És important recordar que enzims que catalitzen reaccions equivalents, però en substrats diferents, poden tenir comportaments tèrmics molt diferents. Així, per exemple, la peroxidasa de la llet té un valor  $D$  a 212 °F (100 °C) de 0,015 min, mentre que la peroxidasa a la patata, a la mateixa temperatura, té un valor  $D$  d'uns 3 minuts, i en els pèsols sencers d'uns 11 minuts.

Aquest comportament és bastant general. Els enzims en els aliments d'origen animal són més termolàbils que en els aliments d'origen vegetal. En l'esterilització de carns i peixos, la destrucció dels enzims no sol consistir un motiu de preocupació. Però si es tracta de fruites o verdures, ja sigui com a tals, o bé si acompanyen la carn, per exemple en plats preparats, cal assegurar-se que el tractament tèrmic que es dona és suficient per a inactivar els enzims que hi hagi.

Els enzims més termoresistents solen tenir valors de  $z$  clarament més grans que els dels MO. És a dir, que la seva velocitat de destrucció és menys afectada pels canvis en la temperatura dels tractaments.

Així, la peroxidasa en llet té un valor  $z$  de 14 °F (8 °C), la peroxidasa en patates té un valor  $z$  de 63 °F (35 °C), i la peroxidasa en pèsols té un valor  $z$  de 67 °F (37 °C).

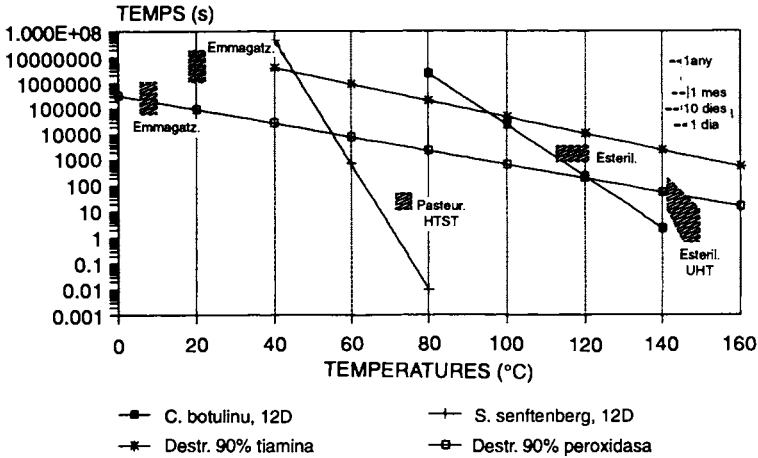
De la mateixa manera que per a quantificar l'efecte del tractament sobre els MO es fa servir el concepte de valor  $F$ , s'ha proposat un valor  $E$  per a quantificar l'efecte sobre els enzims. La temperatura de referència seria de 100 °C (212 °F) i l'equivalència d'un temps  $t$  a la temperatura  $T$ , en minuts a 100 °C, per un enzim amb un factor de resposta de temperatura  $z$ , es calcularia com:

$$E = t \cdot 10^{(T-212)/z} \quad (34)$$

En el cas dels nutrients i dels factors de qualitat, el fet que els seus valors  $z$  siguin més grans que els  $z$  dels MO permet, com ja hem vist, assolir les mateixes destruccions de MO, amb menys destrucció de nu-

trients, si augmentem la temperatura i reduïm el temps, i es manté constant l'efecte letal del tractament.

En canvi, en el cas dels enzims, l'efecte d'augmentar la temperatura i reduir el temps sol ésser perjudicial ja que s'assoleixen nivells de reducció més petits, com podem veure en l'exemple que segueix.



S. senftenberg, en llet  
 Destruc. tiamina i peroxidasa en pèsols

FIGURA 7. Destrucció de MO i factors de qualitat. Temps a diferents temperatures

*Exemple 21*

Suposem un puré de pèsols que volem esterilitzar, amb un valor Fo de 8 min; tenim les opcions d'un tractament convencional, a 116 °C (241 °F), o d'un tractament asèptic, a 140 °C (248 °F). Prenem com a paràmetres de destrucció tèrmica de la peroxidasa els mateixos que s'han donat abans per als pèsols sencers (D a 212 °F = 11 min; z = 67 °F); volem saber quina proporció de peroxidasa queda després del tractament, en un cas i en l'altre. Per a simplificar, suposem que l'escalfament i el refredament són instantanis.

a) Tractament a 116 °C:

El temps de tractament a 241 °F, per Fo = 8 ha d'ésser:

$$t = 8 \cdot 10^{(250-241)/18} = 25,3 \text{ min}$$

El valor D per la peroxidasa, a 241 °F, és:

$$D = 11 \cdot 10^{(212-241)/67} = 4,1 \text{ min}$$

i la concentració, després de 25,3 min, prenent la concentració inicial com el 100%:

$$C = C_0 \cdot 10^{-t/D} = 100 \cdot 10^{-25,3/4,1} = 6 \text{ E-5\%}$$

b) Tractament a 140 °C (284 °F):

Temps de tractament a 284 °F, car  $F_0 = 8$  min:

$$\tau = 8 \cdot 10^{(250-284)/18} = 0,10 \text{ min}$$

Valor D per la peroxidasa a 284 °F:

$$D = 11 \cdot 10^{(212-284)/67} = 0,93 \text{ min}$$

Concentració de peroxidasa, després de 0,10 min

$$C = C_0 \cdot 10^{-t/D} = 100 \cdot 10^{-0,10/0,93} = 78,1\%$$

És a dir, que mentre el tractament a 116 °C destruïa pràcticament tota la peroxidasa, el tractament a 140 °C, amb la mateixa seguretat respecte a *C. botulinum*, deixa un 78% de la peroxidasa inicial.

## 7. PROCESSAMENT ASÈPTIC

### 7.1. Introducció

#### *Condicions generals*

En el processament asèptic, en lloc de processar el producte dins l'envàs, producte i envàs s'esterilitzen o pasteuritzen separadament i l'envassament i tancament hermètic es fan en unes condicions asèptiques, en les quals no pot haver-hi recontaminació del producte ni de l'envàs.

Les condicions que ha complir el processament asèptic són:

a) Un procés tèrmic de seguretat demostrable i econòmicament eficient.



- b) Un material d'envàs adequat al producte.
- c) Un procediment adequat per a esterilitzar el material d'envàs.
- d) Un procediment satisfactori per a posar el producte a l'envàs i tancar-lo en condicions asèptiques.

El processament asèptic consta, doncs, de quatre operacions fonamentals:

- Tractament tèrmic del producte.
- Tractament del material d'envasament, que pot ésser per calor, per radiacions o per productes químics.
- Envasament en condicions asèptiques.
- Neteja i esterilització de les superfícies en contacte amb el producte.

Amb el processament asèptic es busquen tres avantatges respecte als tractaments tradicionals (Toledo i col., 1990):

- Poder treballar a temperatures més altes i amb temps més curts i així mantenir millor les qualitats nutricionals i organolèptiques dels productes.
- Presentacions més atractives i/o més barates i/o més còmodes per als consumidors que els envasos tradicionals de llauna o vidre.

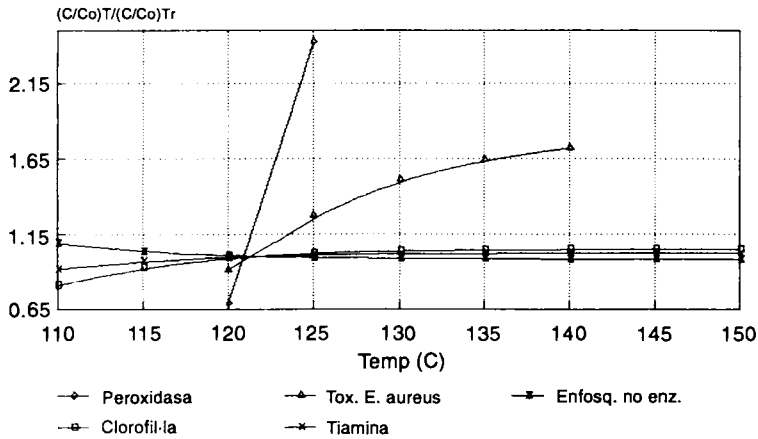
– Encara que el processament asèptic sol representar un estalvi d'energia tèrmica respecte al procés tradicional, el consum d'energia elèctrica és més alt i els costos globals d'energia poden ésser més elevats en el processament asèptic. No obstant això, els estalvis en material d'envàs poden inclinar el balanç econòmic a favor de l'envasament asèptic.

– El cost de la mà d'obra també ha estat tradicionalment més reduït en el cas de l'envasament asèptic; ara bé, darrerament s'han dissenyat i construït plantes amb autoclaus per a càrregues amb un grau d'automatització altíssim i en les quals el cost de la mà d'obra pot ésser comparable al d'una instal·lació de processament asèptic.

Els avantatges del processament a altes temperatures i temps curts, respecte als procediments tradicionals, pel que fa a retenció de nutrients i a factors de qualitat, ja s'han tractat a l'apartat 6.1. Aquests avantatges, però, no poden augmentar-se de manera indefinida, en el sentit de cercar temperatures més i més altes i temps més i més curts. Per damunt de 135-145 °C les millores que se'n treuen són comparativament petites, com pot apreciar-se fàcilment al gràfic 8, "Canvis relatius de la retenció de nutrients", i per això a la pràctica no sol treballar-se mai per damunt d'aquestes temperatures.

El gràfic 8 s'ha dibuixat de la manera següent:

Hom ha pres com a condicions de referència una temperatura de 121,1 °C i un temps de 3 min (tractament 12D per a *C. botulinum*).



Purè de pèsols. Quocients  
(C/Co) a T proc./ (C/Co) a T refer (121C)  
Per reducció 12D en C. botulinum

FIGURA 8. Esterilització productes baixa acidesa, efecte de la temperatura de procés sobre enzims, nutrients i qualitat

Per a cadascun dels factors de qualitat que es donen a la taula, hom ha calculat la proporció que en quedava després d'aquest tractament.

Per a cadascuna de les altres temperatures s'ha calculat el temps que era necessari per a obtenir un tractament de la mateixa seguretat respecte a la destrucció de *C. botulinum*. Per a cadascuna de les condicions que n'han resultat i per a cadascun dels factors de qualitat s'ha calculat la retenció. El quocient entre aquesta retenció i la retenció en les condicions de referència és el que s'ha representat a la gràfica (observeu els comportaments de la peroxidasa i de la toxina d'E. aureus).

### Temps de tractament

En el processament convencional, el tractament tèrmic real que es dona a cada envàs depèn de nombrosos factors, com per exemple, el fluid calefactor i les condicions en què es fa servir, la geometria de l'envàs, les característiques termodinàmiques del producte, o el disseny de l'autoclau.

En el processament asèptic, els paràmetres que governen el tractament tèrmic com a tal són la temperatura del producte a la cambra o canonada de manteniment de temperatura i el temps que roman cada partícula en aquesta cambra.

En productes fluids o amb partícules prou petites perquè hagin pogut assolir la temperatura de tractament d'una manera uniforme en tot el seu interior abans d'entrar a la cambra o canonada de manteniment, la temperatura del producte pot considerar-se constant mentre està dins aquesta canonada. Els problemes fonamentals són el temps de permanència de cada partícula i les mesures de seguretat per a assegurar no només aquest temps sinó també que el producte es desviarà del flux normal amb la rapidesa suficient així que la temperatura baixi per sota del valor establert.

El temps mitjà de permanència és el que habitualment es determina experimentalment. Es calcula com a quocient entre el volum de la cambra de manteniment de temperatura i el cabal del fluid.

Si el fluid és newtonià, i el règim de circulació és laminar, les velocitats amb què es mou el fluid a diferents distàncies de la paret es distribueixen amb la forma parabòlica que es representa a la fig. 9, amb una velocitat nul·la en els punts que toquen a la paret i un màxim de velocitat al centre de la canonada. En aquestes condicions, la velocitat mitjana dels diferents punts, precisament, és la meitat del màxim de la distribució de velocitats.

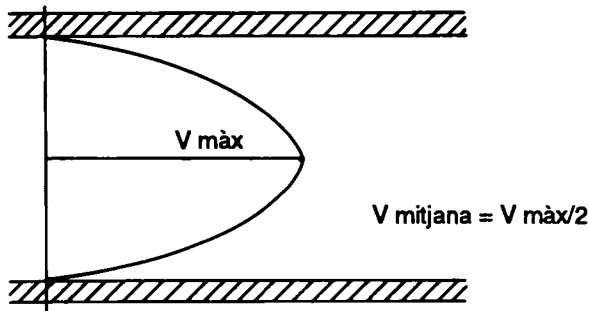


FIGURA 9. Distribució de velocitats en un fluid newtonià circulant en règim laminar

Cal distingir el temps mitjà de permanència, calculat en base al cabal del fluid i les mides de la canonada, del temps de permanència de la partícula més ràpida. Aquest darrer és el quocient entre la llargada de la cambra o canonada i la velocitat màxima deduïda de la distribució de velocitats dins el corrent del producte.

El temps a considerar per als càlculs de letalitat és el d'aquesta partícula més ràpida.

*Exemple 22*

Una bomba que dóna un volum de 50 l en 2,5 min es fa servir per a impulsar llet (fluit newtonià) per una canonada de manteniment de temperatura, que té un diàmetre de 50 mm. La temperatura és 72 °C (162 °F) i es vol un temps de tractament de 15 s. Quina llargada ha de tenir la canonada?

a) Àrea de la secció de la canonada, en mm<sup>2</sup>:

$$A = \pi \cdot d^{2/4} = 1963,5 \text{ mm}^2$$

b) Cabal, en mm<sup>3</sup>/s:

$$q = 50 \text{ l} / 2,5 \text{ min} \cdot 1 \text{ min} / 60 \text{ s} \cdot 10^6 \text{ mm}^3 / \text{l} = 333333 \text{ mm}^3 / \text{s}$$

c) Velocitat mitjana de les partícules:

$$v \text{ mitj} = q / A = 333333 \text{ mm}^3 / \text{s} / 1963,3 \text{ mm}^2 = 169,8 \text{ mm} / \text{s}$$

d) Velocitat màxima:

$$v \text{ max} = v \text{ mitj} \cdot 2 = 339,6 \text{ mm} / \text{s}$$

e) Llargada de la canonada:

$$l = t \cdot v \text{ max} = 15 \text{ s} \cdot 339,6 \text{ mm} / \text{s} = 5093 \text{ mm} = 5,1 \text{ m}$$

En els fluids no newtonians, la consistència, a temperatura constant, depèn de les condicions del flux i la relació entre velocitat mitjana i velocitat màxima no és tan senzilla com la que s'ha mencionat per a fluids newtonians. En la majoria dels fluids alimentaris no newtonians, el comportament és del tipus anomenat pseudoplàstic, en el qual la consistència disminueix en augmentar la velocitat. En aquests, la relació entre les velocitats màxima i mitjana és més petita que 2 i si s'aplica la relació 2:1, pròpia dels fluids newtonians, el producte pot rebre un tractament innecessàriament intens (Rao i Anantheswaran, 1982). Exemples de fluids d'aquest tipus són els purés de fruites com la pera o el préssec. Cal no confondre el fet que un producte sigui espès amb el fet que sigui pseudoplàstic, car productes espessos, com els xarops de moresc, la nata del 35% de greix, olis com el d'oliva o el de soia i fins i tot la mel, es comporten com fluids newtonians.

### *Seguretat del tractament*

Aconseguir un processament tèrmic del producte, en condicions de seguretat equivalents a les que s'han explicat en el cas del procés convencional, es pot considerar resolt per a productes líquids de viscositat baixa, com la llet o els suc, o de viscositats altes, com cremes i postres, i també per als productes que tenen partícules de mides petites, fins a uns sis mm. En canvi, els productes amb partícules de mides més grans resulten problemàtics, bàsicament per tres motius:

a) La penetració de la calor dins les partícules sol ésser lenta i el temps de tractament que cal porta a sobretretractaments molt acusats de les fases líquides.

b) Per a millorar la transmissió de calor entre la fase líquida i els sòlids cal augmentar la turbulència del líquid, però això castiga les partícules i les pot trencar en una certa proporció. En les partícules trencades, el refredament és més ràpid. A causa de la incertesa en l'efecte letal durant el refredament que en resulta, no es pot fer servir la part de refredament com a component en el càlcul de l'efecte tèrmic total. En canvi, ja s'ha dit que en el tractament convencional, i sobretot en els productes que s'escalfen i es refreden per conducció, el temps del refredament pot ésser precisament la contribució més important al valor letal.

c) Les partícules tendeixen a sedimentar-se i, si es desitja augmentar la turbulència per a evitar-ho, s'esdevé el trencament de partícules esmentat abans.

Una manera de resoldre aquesta problemàtica, que s'ha aplicat industrialment, és l'esterilització per separat de la fase líquida en una instal·lació asèptica, contínua, i la de les partícules, en suspensió en un suc espès, en un procés per càrregues.

En els processos asèptics, la seguretat del producte no tan sols depèn del tractament tèrmic. Entre les altres operacions que resulten crítiques per a la seguretat del producte cal esmentar:

a) La seguretat de la neteja i de l'esterilització de les instal·lacions.

b) L'asèpsia de la zona d'envasament, que sol ésser la més difícil de dissenyar i la més propensa a contaminar-se.

c) L'estanqueïtat de les vàlvules de retorn, en els casos de baixada de temperatura.

d) La velocitat de resposta de les esmentades vàlvules de retorn perquè garanteixin que quan la temperatura del producte baixa per sota de l'establerta, el desviïn immediatament cap a la zona del producte que podem dir-ne cru.

e) L'existència i efectivitat de barreres de vapor o d'aire estèril entre les zones de producte asèptic i les zones potencialment contaminades.

Aquestes barreres han d'incloure's per exemple en els eixos de les bombes i de les vàlvules, així com en els punts d'entrada del material d'envàs buit i dels envasos ja plens i tancats.

f) Una pressió positiva, de les zones asèptiques respecte a les no asèptiques. Per exemple, en els canviadors de calor, si el producte ja pasteuritzat o esterilitzat es fa servir per pre-escalfar el cru, el primer ha de tenir una pressió més gran que el producte cru a l'altre cantó de la placa.

g) Que l'aire que se suposa estèril no resulti contaminat.

h) Els instruments de mesura han d'ésser exactes i estar situats als llocs adients per a detectar diferències respecte a les condicions establertes, no només en el processament tèrmic sinó també en la neteja i l'esterilització dels equips. Cal fer referència especial a la necessitat que hi hagi un termòmetre de mercuri en vidre a la sortida de la canonada de retenció o tractament.

### *Eficiència de les operacions*

L'eficiència de les plantes depèn de dos aspectes:

- a) La durada dels cicles de funcionament entre neteges.
- b) L'eficiència de la recuperació de calor.

Fins i tot en productes fluids, sense partícules, a fi d'aconseguir una transmissió de calor eficient, l'ideal seria treballar a temperatures molt altes en les superfícies dels canviadors de calor i amb una turbulència alta en el fluid que s'està tractant. A la pràctica, la majoria dels productes tenen tendència a recremar-se i a incrustar-se als punts de transmissió de la calor. Això és cert a la superfície de les plaques i de les canonades en els procediments indirectes, però també a les boques dels injectors de vapor quan es fa servir l'escalfament directe, i limita el gradient de temperatura utilitzable i la durada dels cicles de funcionament de les plantes entre operacions de neteja.

## **7.2. Productes líquids**

### *Procediments d'escalfament*

#### – Directe

En l'escalfament directe, el líquid rep la calor directament del fluid, que es barreja amb el producte a tractar. Per tant, l'únic fluid que pot emprar-se per a l'escalfament és el vapor d'aigua, obtingut en unes condicions higièniques molt estrictes.

Hi ha dues maneres d'incorporar el vapor al producte:

a) *Injecció del vapor:*

El vapor s'introdueix a través d'una vàlvula i els dos fluids es barregen enèrgicament. Aquest procediment s'anomena uperització.

b) *Infusió de vapor:*

El producte flueix poc a poc en gotes o com un film que cau lliurement dins una cambra amb vapor sobreescalfat.

En el cas, per exemple, de la llet esterilitzada, el producte es pre-escalfa fins a una temperatura d'uns 80 °C. Després s'injecta el vapor, i quan el producte ja té la temperatura màxima, passa pel tub de manteniment de temperatura, on es manté durant el temps de tractament establert. A continuació, ve una cambra de buit, on la llet bull, i s'evapora l'excés d'aigua incorporat en la injecció del vapor. D'aquesta cambra de buit, la llet en surt a una temperatura uns 2 °C més alta que la que tenia després del pre-escalfament, abans d'injectar-li el vapor.

Les velocitats d'escalfament,  $dT/dt$ , són les més altes que es donen en els processos industrials d'esterilització d'aliments i poden estimar-se entre 100 i 200 °C/s. L'esterilització en llaunes, pel procediment més ràpid que es coneix de moment, l'esterilitzador de flama, pot donar velocitats d'escalfament al voltant d'1 °C/s (Reuter, 1988).

El vapor de la cambra de buit, o la llet calenta que surt, però no totes dues coses, es poden fer servir per al pre-escalfament. Això fa que els procediments d'escalfament directe siguin menys eficients que els d'escalfament indirecte des del punt de vista del consum d'energia. Així, és típic que en una planta d'escalfament directe s'aprofiti el 50-55% de l'energia del producte tractat calent, mentre que en els darrers dissenys de plantes d'escalfament indirecte, aquest aprofitament supera el 80%.

La formació d'incrustacions, que limita la durada dels cicles de funcionament de la planta, pràcticament només es produeix en la filera d'injecció del vapor i en la canonada de manteniment de temperatura. És típic que les plantes d'escalfament directe tinguin cicles de treball de 20 hores entre neteges.

– Indirecte

En l'escalfament indirecte, el producte és escalfat en un bescanviador de calor, en general, primer pel propi producte que s'ha tractat abans i després per un fluid calefactor, que en general és vapor saturat o aigua calenta. Un cop ha arribat a la temperatura desitjada, el producte es fa passar pel tub de temperatura constant i després al refredament, que en





b) Major aprofitament de la calor, que arriba fins a més del 85%.

Això ha portat a la pràctica a diferències més petites entre les temperatures del fluid calefactor i del producte i a majors superfícies d'intercanvi de calor. Resultat d'això és una velocitat d'augment de la temperatura més petita.

A la gràfica 11 es poden veure els cicles típics de temperatura del producte en una planta d'escalfament directe, en una planta d'escalfament indirecte de disseny inicial i en una planta d'escalfament indirecte de disseny actual.

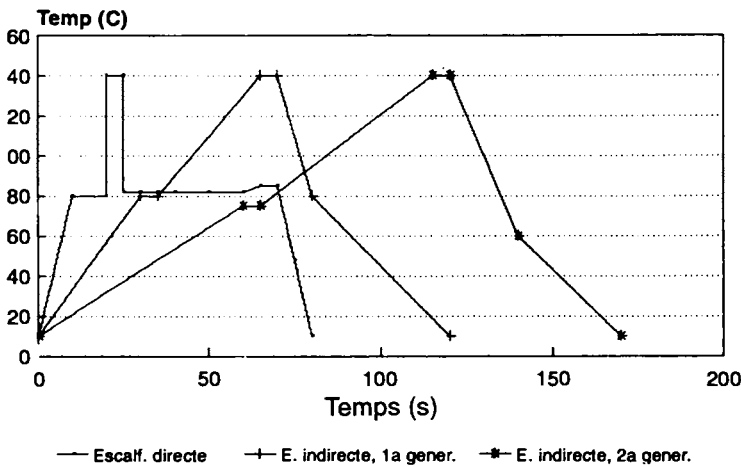


FIGURA 11. Processament asèptic de llet. Perfils de temperatura típics

En general, la conservació de les propietats organolèptiques i nutricionals dels productes és millor en l'escalfament directe i ha empitjorat lleugerament en les plantes d'escalfament indirecte amb l'evolució de les condicions de tractament esmentades. Tot i així, les qualitats nutricionals i organolèptiques del producte solen ésser millors que en productes equivalents tractats per procediments convencionals. Tecnologies com els autoclaus rotatius, però, aplicables a la llet, poden proporcionar productes de qualitat semblant a la dels tractaments asèptics en aquestes condicions més recents.

### 7.3. Productes amb partícules

El tractament tèrmic d'aquests tipus de productes pot presentar dificultats considerables ja que la transmissió de calor dins les partícules

sòlides sol ésser molt més lenta que en el líquid de govern, quan n'hi ha. Llavors, el temps que cal perquè les partícules rebin el tractament necessari és excessiu per al líquid. Aquesta diferència es troba agreujada quan les partícules són de mides relativament grans. Per exemple, segons dades citades per Reuter (Reuter, 1988), mentre que en una partícula de 3 mm de diàmetre s'arriba a la temperatura del líquid en un temps de 20 s, en una partícula de 10 mm calen 150 s i en una partícula de 15 mm calen 1000 s (16,7 min).

D'altra banda, el disseny de l'equip que ha de manipular aquestes partícules ha d'ésser adient per a no sotmetre-les a esforços que les trenquin en una proporció gaire gran.

#### **7.4. Esterilització dels materials d'envàs**

##### *Introducció*

L'esterilització prèvia dels materials d'envàs, abans d'omplir-los amb el producte ja tractat, és una operació delicada, sobretot per a obtenir unes condicions de seguretat com les que s'exigeixen en els productes de baixa acidesa. En aquest cas, cal recórrer a una combinació de tractament mecànic, químic i tèrmic, amb tot el que això comporta de nombre de paràmetres a controlar, per tal d'assegurar la salubritat de tots i cadascun dels envasos.

##### *Procediments físics*

###### **– Calor**

L'esterilització per la calor té l'avantatge, respecte als tractaments químics, que no deixa residus a la superfície tractada i que no implica risc de toxicitat en l'ambient per als treballadors. El cost de l'operació no és més car que el del tractament químic. Ara bé, l'inconvenient que té és que, fins i tot fent servir vapor saturat, que és el fluid amb el coeficient de transmissió de la calor més favorable, les condicions de temperatura i temps que calen per a obtenir una reducció suficient del nombre d'espores estoven alguns dels materials plàstics (per exemple, 135 °C per 1,5 s en la superfície d'envasos de poliestirè per a obtenir reduccions de 5 a 6 cicles logarítmics).

Si s'empra vapor saturat, cal assegurar-se que no hi ha aire en el vapor ni en l'atmosfera en què es duu a terme el tractament, car possibles bombolles d'aire aïllarien algunes àrees de la superfície a tractar.

També pot fer-se el tractament amb vapor rescalfat. La temperatura de tractament és més alta, de l'ordre dels 220-225 °C i només es fa servir per a envasos metàl·lics, tot considerant que si es fa servir estany en les soldadures, aquest fon a 232 °C.

L'aire calent a 315 °C, que proporciona una temperatura superficial a l'envàs de 180 °C, també es fa servir en alguns casos. També es fan servir barreges d'aire i vapor.

Cal esmentar l'extrusió dels materials plàstics perquè, moltes vegades, es troben en la literatura afirmacions com que el producte resultant d'aquest tipus d'operacions és estèril. Encara que en l'extrusió els materials es mantenen a temperatures entre 180 i 230 °C, amb temps d'entre 3 i 7 minuts, s'ha comprovat que aquesta operació no sempre assegura l'esterilitat del material. Cal recordar que es tracta d'un tractament amb calor seca, molt menys efectiva que la calor humida. Malgrat haver-hi treballs amb resultats contradictoris, diferents investigadors han comprovat la supervivència d'espores microbianes després d'operacions d'extrusió de materials plàstics. Una estimació prudent de l'efecte de l'extrusió sobre les espores podria ésser una reducció dels recomptes en uns 3 a 4 cicles logarítmics.

#### – Radiacions

L'avantatge fonamental de les radiacions és, com en els tractaments tèrmics, que no deixen cap mena de residu en el material tractat ni en l'ambient.

Es fan servir tres tipus de radiacions:

##### a) *Ultraviolades*

Són germicides en l'interval de longituds d'ona entre 200 i 315 nm, encara que l'interval en el qual són més efectives és el de 250 a 280 nm. La dosi letal depèn del tipus de microorganisme. Per a les espores, pot ésser necessària una energia de radiació i un temps de 10 a 60 mW x s x cm<sup>-2</sup>. Cal remarcar que els microorganismes acolorits o que poden desenvolupar colors són molt més resistents a la radiació ultraviolada. Així, alguns fongs amb espores de color fosc, com *Aspergillus niger*, poden tenir resistències de 40 a 600 mW x s x cm<sup>-2</sup>.

Un dels factors que poden influir en l'eficàcia de l'esterilització dels envasos amb radiació UV és la possible ombra projectada per:

a) Partícules de pols.

b) Agregats de MO, quan el recompte és gran. Els exteriors fan un efecte d'ombra respecte als interiors, que queden protegits. De tota manera, en materials que acaben d'és-

ser extrusionats, els recomptes són baixos i aquest efecte és poc probable.

- c) Les condicions geomètriques del sistema, incloent-hi la distància de les superfícies a la font de radiació, l'angle d'incidència de la radiació per a cada punt de l'envàs i l'efecte de petites esclatxes on els MO puguin quedar protegits de la radiació.
- d) La humitat ambient. En aire molt sec (menys de 32% HR) la dosi de radiació necessària és de l'ordre del doble que en aire humit (70% HR); ara bé, a humitat més alta (80% HR) l'eficàcia es fa altra vegada més baixa, potser per l'efecte protector d'una pel·lícula d'humitat o perquè l'aire humit absorbeix més la radiació UV.

L'efecte de la radiació UV sol ésser una reducció de 2 a 3 cicles logarítmics en els recomptes i amb una especial dificultat a inactivar els fongs. En general, aquest tipus de tractament no pot garantir, per ell mateix, l'esterilitat que cal a un envasament asèptic.

#### b) *Infraroges*

Comprenen la banda de longituds d'ona de 0,8 a 15 micrometres. El seu efecte germicida depèn exclusivament de l'absorció d'energia per part de la superfície tractada i de l'escalfament d'aquesta. És doncs un efecte només tèrmic i té les mateixes limitacions en la temperatura d'estovament dels materials plàstics i de laques i recobriments. Els factors d'ombra i geomètrics, que influeixen en l'efectivitat de les radiacions UV, condicionen també l'efecte de les radiacions IR, encara que si s'aplica a materials conductors, com l'alumini, l'efecte de les esclatxes pot reduir-se per la conducció de calor cap al seu interior.

Les reduccions del nombre de MO que poden assolir-se són del mateix ordre de magnitud que en el tractament amb radiació UV.

#### c) *Ionitzants*

En l'esterilització d'instrumental mèdic, es fan servir, entre altres procediments, radiacions ionitzants, en general raigs gamma, produïts amb Co 60. En el cas de l'esterilització d'envasos pel processament asèptic, aquestes radiacions s'han emprat per a esterilitzar bosses en el procediment de *bag-in-box*. La quantitat de radiació que cal aplicar és alta, de 10 kGy o més, i pot produir alteracions indesitjables en el material tractat. De moment, les aplicacions comercials son limitades.

### *Procediments químics*

Els únics productes que tenen una aplicació corrent per a esterilitzar envasos en el processament asèptic dels aliments són el peròxid d'hidrogen i l'àcid peracètic. El primer sol utilitzar-se a una concentració del 30 al 33% i a una temperatura d'uns 80 °C, perquè a temperatures més baixes no poden aconseguir-se els efectes germicides necessaris en el temps disponible en una línia d'envasament. L'àcid peracètic es fa servir molt menys sovint i a vegades en combinació amb el peròxid d'hidrogen.

Els procediments utilitzats per a posar la solució d' $\text{H}_2\text{O}_2$  en contacte amb el material a esterilitzar són:

a) Submergint-lo

El film es fa passar per la solució calenta i després l'excés d'aquesta s'elimina en dues fases: una primera, mecànica, amb corrons, o bé arrossegant amb aire calent, i una segona en què la pel·lícula de líquid adherida al film s'asseca amb aire calent. Si l'operació es realitza correctament no queden residus en el film ni es contamina l'ambient de treball. La reducció dels recomptes sol ésser de 4 a 5 cicles logarítmics. Si el tractament químic va precedit d'una neteja prèvia amb raspalls, aire comprimit estèril, o ultrasons, la reducció en el recompte de MO pot ésser de 6 a 8 cicles.

b) Polvorització

En el cas que el material d'envàs no es presenti en forma de film, el procés per immersió no és convenient i cal recórrer a polvoritzar l' $\text{H}_2\text{O}_2$  en les superfícies a tractar. La polvorització és una operació problemàtica, ja que la dispersió de les mides de les gotes (que sol anar de 2 a 80  $\mu\text{m}$ ) i la distribució de les gotes en la superfície de l'envàs, que en general és hidròfob, fan que la solució no toqui tota la superfície (al voltant del 60% queda sense cobrir). L'efecte letal depèn de la quantitat de solució polvoritzada, però els excessos de solució allarguen el temps d'assecamment. Cal estudiar el volum òptim de solució en funció de la superfície i de la forma geomètrica de l'envàs. En tot cas, la fase d'assecamment, amb l' $\text{H}_2\text{O}_2$  en fase de vapor, aporta una contribució decisiva al resultat. Per a reduir la mida de les gotes i augmentar la cobertura de la superfície es fan servir polvoritzadors per ultrasons, que donen gotes de 2 a 4  $\mu\text{m}$  i arriben a una cobertura del 60% amb quantitats petites de solució. Una altra millora és la vaporització prèvia de l' $\text{H}_2\text{O}_2$  en contacte amb

aire calent, a 130 °C, i polvoritzar aquesta barreja d'aire calent i vapor d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Amb aquests procediments s'aconsegueixen reduccions dels recomptes d'uns 6 cicles logarítmics.

#### c) Esbandida

Si la forma geomètrica de l'envàs fa inefectius els dos procediments anteriors, cal recórrer a una esbandida de l'envàs, a temperatura ambient, amb la solució esterilitzant. Aquesta s'elimina després amb aire calent.

## 8. L'ENVASAMENT EN EL TRACTAMENT TÈRMIC

### 8.1. Introducció

Totes les precaucions que hom pren per a garantir la seguretat del tractament tèrmic poden quedar invalidades si l'envasament no es fa correctament o el producte es recontamina després del tractament. L'envàs, la seva fabricació i la seva manipulació, tant abans del tractament com després, són precaucions tan importants com el propi tractament del producte.

### 8.2. L'envàs metàl·lic

#### *Nomenclatura*

És corrent denominar els envasos metàl·lics amb l'anomenat sistema imperial, per dues sèries de tres xifres cadascuna, la primera sèrie del diàmetre i la segona de l'alçada. En cada sèrie, la primera xifra són polzades i la segona, junt amb la tercera, setzens de polzada. (1" = 25,4 mm; 1/16" = 1,588 mm).

Així, una mida expressada com 301x410, traduïda a nomenclatura mètrica és:

Diàmetre:  $3 \cdot 25,4 + 1 \cdot 1,588 = 78 \text{ mm}$

Alçada:  $4 \cdot 25,4 + 10 \cdot 1,588 = 117 \text{ mm}$

o sigui: 78x117

A part d'aquesta forma d'identificació, hi ha denominacions comercials, que es fan servir sovint per a productes determinats, com per exemple les següentes:

Denominació	Sistema imperial	Sistema mètric	Capacitat (ml)	Productes típics
5 oz	211x200	65x 54	155	Olives, pebrots
Picnic	211x300	65x 78	235	Mongetes seques, salsa de tomàquet
A 1	211x400	65x102	315	Mongetes seques, salsa de tomàquet, productes càrnics, verdures
A 2	307x409	83x114	580	Mongetes seques, fruita, moresc, sucs, verdures
A10	603x700	153x178	3110	Qualsevol aliment

### *Característiques i precaucions*

La major part dels envasos metàl·lics encara són de llauna amb recobriments d'estany, encara que en alguns sectors la llauna ha estat substituïda per altres materials com l'alumini o l'acer sense estany.

El mecanisme pel qual l'estany protegeix l'acer a les llaunes no és senzillament la presència d'una barrera d'estany entre el ferro i l'aire o el producte. El gruix de l'estany en una llauna és molt petit. Sol variar entre 0,4  $\mu$  i 1,5  $\mu$ . La naturalesa de la protecció també és en realitat electro-lítica i a la pràctica cal que quedin desprotegides àrees relativament extenses d'acer perquè comenci la seva corrosió.

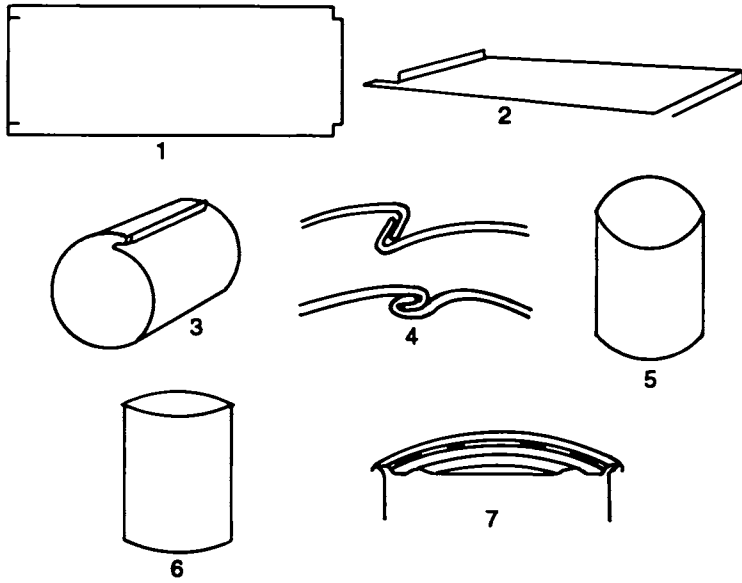
La quantitat d'estany a les llaunes s'ha expressat tradicionalment en lliures per caixa-base, o sigui en lliures avoirdupois total d'estany (les dues cares) per cada 112 fulls de llauna, de 14x20 polzades quadrades. L'Euronorma de la fulla de llauna defineix els gramatges amb la nomenclatura següent:

E1 vol dir una lliura per caixa base, entre les dues cares, o sigui, 5,6 g/m<sup>2</sup> i si les dues cares tenen el mateix recobriments, 2,8 g/m<sup>2</sup> a cada cara. Una denominació E1.4 voldria dir 2,8 g/m<sup>2</sup> en una cara i quatre vegades més a l'altra cara, o sigui 11,2 g/m<sup>2</sup>.

Els cops, les rascades, i la manipulació dels envasos fan saltar fàcilment unes capes tan minses d'estany i això desprotegeix la superfície del ferro. Per això és important que els envasos siguin tractats amb cura al llarg de tota la seva vida.

Els envasos metàl·lics poden ésser de dues peces o de tres peces. L'envàs de tres peces és la llauna més tradicional, formada per un cos cilíndric i dues tapes, una col·locada pel fabricant de l'envàs i l'altra per l'envasador del producte.

La figura 12 és un esquema de la construcció d'un envàs de llauna, de tres peces.



- 1 Cos de la llauna, tallat i marcat  
 2 Cos amb les pestanyes doblades  
 3 Cos ja format  
 4 Costures laterals

- 5 Cos amb la costura lateral soldada  
 6 Cos amb les pestanyes  
 7 Aplicació del fons

FIGURA 12. Esquema de la construcció d'un envàs de llauna de tres components

En l'envàs de dues peces, el cos és fet per embotiment sorgint d'un full de metall que va essent embotit i aprimat per motllos successius. Amb aquesta tècnica s'estalvien la tanca del fons i la soldadura lateral, que són punts amb risc de fuites.

La soldadura lateral ha constituït un punt problemàtic en els envasos de tres peces. No només per les possibles fuites sinó també perquè, quan la soldadura s'ha fet amb un aliatge de plom i estany, se l'ha considerada com una font de contaminació dels productes amb plom. L'aplicació d'una banda de vernís és una solució en envasos que no vagin totalment envernissats.

L'envernissatge de l'interior dels envasos és obligatori i en els productes que resultin agressius per la llauna, o en productes que són molt sensibles fins i tot a quantitats petitíssimes d'estany, com fóra el cas de la



cervesa, o de conserves de fruites i verdures fortament acolorides, les quals tenen pigments molt sensibles a la presència d'estany.

L'envernissatge no és sempre efectiu. Si s'ha fet en les fulles de llauna, les operacions de fabricació de l'envàs l'hauran trencat i la part que en roman pot ésser fins i tot perjudicial en privar el ferro de la protecció electrolítica de l'estany. Per això, sempre s'ha de comprovar l'eficàcia de l'envernissatge i, si cal, fer servir vernís en esprai a l'envàs ja format.

Els productes més agressius per a la llauna estanyada no són necessàriament els més àcids, sinó els més oxidants, començant per l'oxigen de l'aire que hagi quedat a l'envàs en tancar-lo. Els nitrats també són molt corrosius i cal comprovar que no n'hi ha en proporció excessiva en els productes vegetals (pels adobs nitrogenats que s'hagin pogut emprar en el seu conreu) ni en l'aigua que s'utilitza per a preparar begudes carbòniques. Els productes que desprenen compostos de sofre, com algunes fruites i productes de carn o de peix, poden ésser especialment corrosius i obligar a fer servir vernissos especials, amb òxid de zenc, per tal d'absorbir els compostos de sofre. L'òxid de trimetilamina que pot trobar-se en el peix i el caramel, ja sigui emprat en la formulació dels productes, o generat per sobreescalfaments en el procés tèrmic, constitueixen dos productes més entre els que resulten especialment corrosius per als envasos de llauna.

Les temperatures i les humitats altes en l'emmagatzematge acceleren la velocitat de la corrosió exterior i són circumstàncies que cal evitar tant com es pugui.

Els envasos metàl·lics són, doncs, materials delicats, malgrat la seva fermesa aparent. Cal tractar-los amb cura evitant totes les circumstàncies que en poden provocar o accelerar la corrosió.

### 8.3. L'envàs de vidre

L'envàs de vidre té els avantatges següents:

- És pràcticament inert químicament. De fet, en les condicions d'esterilització, el vidre cedeix quantitats petitíssimes de sodi als aliments aquosos; ara bé, això no sol ésser un problema per a la majoria dels productes, excepte en alguns casos extremadament delicats de productes d'alimentació parenteral.

- És transparent (si es vol així).

- És rígid. Això fa que els envasos de vidre no tinguin els possibles problemes de pannelització per efecte del buit interior i que poden presentar-se en els envasos metàl·lics. D'altra banda, els embalatges de dis-

tribució poden ésser menys resistents ja que la rigidesa del vidre suporta una part considerable del pes en l'apilament.

– És resistent a les pressions internes. Aquesta resistència està condicionada al fet que no hi hagi defectes com ara bombolles o diferències de gruix, o rascades relativament fondes a les parets.

– És resistent a les temperatures altes, fins a 500 °C, sempre que no es donin els anomenats xocs tèrmics, o sigui, canvis de temperatura sobtats en una de les cares mentre l'altra cara es manté a la temperatura inicial. Els efectes dels xocs tèrmics depenen del gruix de les parets i del disseny de les formes, sobretot en la juntura de la paret vertical amb el fons. Actuant sobre aquests factors, els canvis sobtats de temperatura que pot aguantar un envàs poden ser de només 25 °C o bé arribar fins a 80 °C.

– És barat.

– És fàcil de reciclar.

I els desavantatges:

– És fràgil. Aquest és l'inconvenient més greu dels envasos de vidre. Té efectes econòmics per les pèrdues que comporten els trencaments, tant d'envasos, com de producte, com en aturades de les línies. També comporta riscos per als consumidors, pel perill dels trossets de vidre que poden resultar de cops que no arriben a trencar tot l'envàs, però que fan petites estelles. És imprescindible que immediatament abans de l'ompliment hi hagi una operació de rentat, amb aigua líquida a pressió, amb els pots en posició invertida, que garanteixi l'eliminació de tota matèria estranya que pugui haver-hi dins els pots.

Per a reduir al mínim els efectes d'aquesta fragilitat han de prendre's un cert nombre de precaucions:

- a) La resistència de l'envàs depèn de la seva forma. La forma més resistent seria l'esfèrica i com a aproximació la secció circular. És important evitar canvis sobtats de forma i procurar que totes les transicions siguin arrodonides i amb angles al més oberts que es pugui. Per exemple, en la unió del lateral amb el fons, del lateral amb el coll, en els rebaixos dels panells per a les etiquetes, etc.
- b) Com que la facilitat per a trencar-se està molt relacionada amb l'existència de petites ratllades a la superfície, s'ha de procurar que l'envàs tingui el menor nombre possible de frecs i de cops al llarg de la seva vida. És important el propi disseny de l'envàs, evitant formes quadrades i ovalades, que d'una banda tenen resistències intrínseques més petites que les formes circulars, i

d'altra banda tendeixen a embussar les línies, amb els frecs i cops que això comporta. També és important el disseny de les línies de transport, que no han de tenir superfícies dures en contacte amb els envasos en moviment.

- c) Quan els envasos ja estan plens, l'efecte dels cops és més gran, perquè el moment d'inèrcia del producte se suma al del vidre i fa que impactes que no tindrien efecte en els envasos buits arribin a trencar-los si estan plens.

– És pesant. Aquest inconvenient s'ha reduït molt en millorar la uniformitat del gruix de les parets i amb recobriments de la superfície que redueixen les rascades i mantenen la resistència del vidre similar a la del vidre intacte. Tot i així, el pes de l'envàs de vidre per un contingut al voltant dels 300 o 400 g és de l'ordre de la meitat del pes del producte. En canvi, un envàs de plàstic per la mateixa quantitat pot pesar unes vint vegades menys que el producte.

Des d'alguns punts de vista, però, el pes pot ésser un avantatge. Per exemple, la velocitat de les línies d'envasament es beneficia del pes més gran dels envasos de vidre. D'altra banda, a molts consumidors els resulta més atractiu l'envàs de vidre i sembla que, almenys en part, això està relacionat amb el seu pes.

La tapa de l'envàs constitueix l'altra part fonamental del conjunt. Les tapes que es fan servir són gairebé sempre metàl·liques i del tipus de segellat sota buit. Això vol dir que l'efectivitat de la tanca està relacionada amb el fet que la pressió dins l'envàs és més petita que a l'exterior i si falla aquesta premissa pot fallar l'eficàcia de la tanca. Per això en l'esterilització en envasos de vidre és molt important la regulació de la contrapressió de l'autoclau, sobretot en començar el refredament. Com que les tapes no estan dissenyades per a aguantar pressions internes, cal mantenir a l'exterior una contrapressió que equilibri la que fa la barreja d'aire i vapor que hi ha dins l'espai de cap de l'envàs.

En decidir la utilització d'envasos de vidre cal establir les especificacions que han de complir. Hi ha característiques dels envasos de vidre que estan normalitzades, com per exemple el disseny i les toleràncies dels colls i les boques. Altres característiques han d'ésser fruit de l'acord entre el fabricant de l'envàs i l'utilitzador. És normal que aquests acords es reflecteixin en esquemes o plànols detallats, amb toleràncies per aquelles mides que son crítiques. A més, s'han d'establir, per exemple, el volum interior, el pes de vidre i les condicions en què es faran els assaigs de resistència al xoc tèrmic. Tampoc no s'ha d'oblidar d'establir les condi-

cions de l'embalatge i la protecció que ha de donar contra els trencaments i contra les contaminacions al llarg del transport i l'emmagatzematge.

#### 8.4. Altres envasos

Les primeres propostes d'envàs diferent del metàl·lic o del de vidre foren la bossa flexible esterilitzable (*Retort-pouch*) de materials compostos o laminats, adients per a resistir les condicions de tractament.

Posteriorment, ha sorgit el concepte d'envàs semirígid, el qual té un cos termoformat i una tapa que se solda al cos, de material flexible, en general un laminat de diferents components. La composició del laminat ha d'ésser adient al producte que s'ha d'envasar i sobretot a les condicions tèrmiques del procés.

En general, en aquest laminat, cada component té una funció més o menys específica, mitjançant la qual contribueix a les característiques globals del laminat:

a) Resistència mecànica a factors com la compressió, l'estripament, els frecs, etc. Materials de característiques mecàniques altes, com els polièsters i les poliamides poden satisfer aquestes exigències. La resistència contra el frec pot ésser necessària per a protegir les impressions al llarg del procés de fabricació i de la distribució comercial. Es pot recórrer a impressions anomenades *sandwich*, en què la tinta queda sota de la capa externa del laminat. Si aquesta capa externa no és transparent, com en el cas que es faci servir full d'alumini, es pot posar una laca protectora damunt la impressió.

b) Impermeabilitat al vapor d'aigua i als gasos, que assegurï la durabilitat del producte, protegint-lo d'oxidacions o d'augmentos o disminucions de la humitat. Molt sovint cal també que el material sigui opac, per a retardar les reaccions d'alteració que la llum pot catalitzar, com ara les oxidacions. Els materials que cal utilitzar per a aquesta funció han d'estudiar-se amb cura. Hi ha una varietat de materials d'alta impermeabilitat, o d'alta barrera, com se'ls anomena en la nomenclatura especialitzada.

c) Que l'envàs es pugui tancar hermèticament. Aquest tancament es fa gairebé sempre per soldadura. Per aquest motiu, la capa interior ha de ser sempre d'un material termoplàstic.

Per a tractaments fins a 100 °C, es poden fer servir el polietilè o copolímers de l'etilè, que són materials econòmics en general i de bona soldabilitat. Per a temperatures de tractament més altes, cal recórrer al polipropilè, material més car i que sol tenir unes condicions de soldadura més crítiques.

Els avantatges dels envasos flexibles i semirígid són:

a) Tecnològics. El perfil estret de l'envàs permet que la separació entre el punt crític i la superfície de l'envàs sigui més petita que en els envasos cilíndrics. El tractament tèrmic pot aconseguir-se amb un escalfament més curt. Això castiga menys el producte nutricionalment i organolèptica.

b) Economia del processament. A més de l'avantatge nutricional, aquest temps d'escalfament més curt també pot resultar més econòmic tant per l'estalvi d'energia com de temps d'operació efectiva de la fàbrica. De tota manera, cal pensar que per raó de la necessitat d'un bon control de la contrapressió, poden haver-se d'emprar tecnologies, com l'aigua líquida o les barreges d'aire i vapor, que proporcionen una transmissió de calor més lenta que el vapor condensant.

c) Preu dels materials. A més de l'economia del tractament, l'envàs flexible i el semirígid poden resultar més econòmics de compra que els metàl·lics i els de vidre. Això però, depèn dels materials que s'hagin de fer servir en cada cas. Cal tenir en compte que moltes vegades l'envàs flexible necessita posar-se en una capsa de cartolina, que pot encarir notablement el cost.

d) Economia d'emmagatzematge. L'espai que cal per a emmagatzemar i moure els envasos rígids és molt més gran que el que cal amb els materials flexibles.

e) Presentació. Sobretot en el cas dels envasos semirígid, es poden triar una gran varietat de formes i decoracions que permeten atraure els consumidors amb imatges adaptades a cada producte i a cada grup de possibles clients.

Al costat d'aquests avantatges, els envasos flexibles i semi-rígid tenen alguns inconvenients, com:

a) Velocitat més petita en les línies d'envasament.

b) Inversió inicial més gran, tant per l'equip de termoformació (quan és aquest el tipus d'envàs que es fa servir), com pel de tancament dels envasos, com pels tipus d'autoclau, que han d'emprar tecnologies sofisticades, com ara l'aigua líquida, la dutxa d'aigua o les barreges d'aire i vapor. Tot això per a assegurar un control prou acurat de la contrapressió, que és fonamental en el processament amb aquests envasos.

c) La manipulació dels envasos és molt delicada, sobretot en el moment de sortir de l'autoclau, moltes vegades a temperatures a les quals encara són sensibles a qualsevol forma de mal tracte.

d) Els procediments de comprovació de la perfecció de les tanques no estan tan ben desenvolupats com en el cas dels envasos metàl·lics.

S'han proposat procediments basats en l'emissió de raigs infraroigs per a la soldadura, l'observació de la soldadura amb llum polaritzada, i l'examen de la soldadura per microscopia d'ultrasons, per a detectar fases de cristal·linitat anòmala dins la seva estructura.

e) La quantitat d'aire que roman a l'envàs en tancar és crítica pel valor Fo del tractament. Sembla que, en aquest tipus d'envàs, la bombolla d'aire, que es dilata en escalfar-se, fa una capa aïllant en una de les cares, ja que els envasos solen posar-se horitzontals a l'autoclau. Aquesta bombolla té una importància relativa més gran que en un envàs metàl·lic per raó de l'estret que sol ésser l'envàs flexible o semi-rígid en la seva mida més petita (Berry i Khonhorst, 1983). D'altra banda, la pressió dins l'envàs al llarg del tractament també depèn molt de la quantitat d'aire que hi quedi en tancar.

No es fa cap intent de donar dades quantitatives per aquestes llistes, tot i que en la literatura hi ha alguns estudis comparatius (Steffe i col., 1980; Català, 1982). L'evolució dels materials, de les tecnologies i dels preus és molt ràpida i les necessitats concretes de cada producte són molt variables. És millor fer l'estudi en cada cas concret i en el moment de plantejar-se'n la necessitat.

## 9. REALITZACIÓ TECNOLÒGICA DELS PROCESSOS

### 9.1. Procés convencional

#### *Manipulació dels envasos buits*

##### a) Envasos metàl·lics

Cal no sotmetre'ls a condicions dures de manipulació, com ara cops o freqüències excessius, per a no fer malbé les pestanyes, ni abonyegar-los, ni trencar les àrees de soldadura, les quals són fràgils en comparació amb la resta de l'envàs. Si les condicions de transport han d'ésser inevitablement dures, cal pensar a protegir els envasos amb separadors de cartró o posar-los dins caixes.

L'emmagatzematge ha de fer-se en condicions de temperatura i humitat que no produeixin condensacions que podrien ésser causa de corrosions. Els envasos s'han de transportar i guardar en condicions que no contribueixin a fer que es contaminin, cosa que en faria més difícil o inefectiva la neteja abans d'omplir-los.

En el transport cap a la utilització, els transportadors de cables han d'estar recoberts amb material plàstic. Per a enlairar o fer baixar, o separar

en diferents corrents, els transportadors magnètics són adients, car eviten el pes d'uns envasos damunt els altres.

El disseny i la construcció dels separadors de comporta, que es fan servir sobretot per a alimentar les màquines dosificadores i per a desviar envasos d'una línia a una altra, ha d'ésser adequat al tipus d'envàs i a la velocitat de la línia.

b) Envasos de vidre

Les precaucions en el transport, en l'emmagatzematge i en la manipulació han d'extremar-se per a evitar una porció massa gran de trencats.

*Neteja/inspecció dels envasos buits*

Encara que els envasos es rebin i s'emmagatzemin en condicions de netedat aparentment suficients, s'han de rentar abans d'omplir-los.

El rentat ha de fer-se amb esprais d'aigua calenta, dissenyats per a arribar a tota la superfície interior de l'envàs, i amb els envasos en posició invertida. Ni el vapor ni l'aire a pressió poden considerar-se prou efectius.

La inspecció automàtica dels envasos pot eliminar matèries estranyes, envasos trencats o abonyegats, defectes en els vernissos, o pestanyes deformades. És una precaució aconsellable, encara que no cal considerar-la substitutiva del rentat, sinó complementària. S'han de considerar els possibles contaminants no detectables o no eliminables amb aquest procediment, i com eliminar-los.

*Preparació del producte*

Depèn del producte a processar, i les operacions poden ésser molt diferents. Uns principis generals, però, poden aplicar-se a tota mena de productes:

a) La necessitat de netejar les matèries primeres, per a reduir la càrrega microbiana inicial.

b) La tria i eliminació de peces o trossos defectuosos.

c) La possible necessitat d'operacions de preparació culinària.

d) Mantenir els productes, en qualsevol fase de la preparació, a temperatures allunyades de les temperatures de creixement dels MO termòfils, o sigui de la franja de 20 a 75 °C. Els productes s'han de mantenir o bé refrigerats, o bé a temperatures prou altes perquè no pugui haver-hi creixement. Cal recordar que la destrucció d'aquest tipus de MO pel procés tèrmic serà comparativament molt més petita que la del *C. botulinum* i, per tant, n'hem de mantenir el nombre inicial en valors baixos.

### *Ompliment dels envasos*

Els envasos s'han d'omplir de manera uniforme, fonamentalment en tres aspectes:

a) *Espai de cap* (distància de la superfície del producte a la de la tapa). Juntament amb la temperatura del producte en el moment de l'ompliment, determinarà la pressió interior que aguantarà l'envàs en el tractament, i el buit dins l'envàs després del tractament. Els valors habituals d'espai de cap estan entre els 5 i els 9 mm.

En el cas d'autoclaus rotatoris, el grau d'agitació del producte i per tant la velocitat de transmissió de la calor està relacionada amb les mides de la bombolla que es mou dins l'envàs, i aquestes mides depenen de l'espai de cap.

b) *Temperatura*. La temperatura en el moment de tancar l'envàs condiciona les proporcions d'aire i de vapor d'aigua en l'espai de cap i aquestes afecten:

- 1) La pressió dins l'envàs en el tractament tèrmic i el buit després del tractament.
- 2) La temperatura inicial del producte, si el tractament es fa de seguida després de l'ompliment i del tancament.
- 3) La durabilitat del producte, en productes sensibles a l'oxidació per l'oxigen de l'aire que hagi quedat dins l'envàs.
- 4) La corrosió de l'envàs per l'oxigen.

En envasos de mides relativament grans, un buit massa alt pot produir l'anomenada pannellització. En aquest cas, cal evitar una temperatura de tancament massa alta, o fer servir envasos amb parets ondulades, per a donar més resistència a la part cilíndrica.

c) *Proporcions dels components*. Sobretot en els casos en què es dosifiquen per separat diferents ingredients, cal mantenir les proporcions relatives dins els límits establerts en decidir el barem d'esterilització. Cal recordar que les propietats tèrmiques de diferents components poden variar àmpliament (per exemple, la calor específica de l'aigua i la dels greixos). Si es fan servir productes congelats, aquesta precaució encara és més important perquè pot afectar dramàticament la temperatura inicial del producte. Recordem que s'han donat casos de botulisme, de conseqüències fatals, deguts a la utilització d'ingredients congelats, amb barems calculats per a productes frescos.

### *Tancament dels envasos*

- Temperatura en tancar



La temperatura en tancar l'envàs és de gran importància, perquè segons quina sigui, la pressió de vapor del producte serà més o menys gran, i com més gran sigui la pressió de vapor, més petita serà la proporció d'aire a l'espai de cap. Ja s'han enumerat abans els possibles avantatges de deixar poc aire a l'espai de cap. A la taula que segueix es donen valors aproximatius de les pressions que es desenvolupen dins l'envàs en el cas de temperatures del producte de 115 i de 125 °C, així com la pressió que resulta en emmagatzemar el producte a uns 20 °C. Aquestes dades només són una aproximació grollera, per a clarificar el mecanisme pel qual la temperatura de tancament influeix en la pressió dins l'envàs. No inclouen factors com la solubilitat de l'aire en el producte ni la dilatació tèrmica de l'envàs i s'ha suposat que la pressió de vapor del producte és la de l'aigua pura. Per a un tractament més rigorós, el lector pot consultar el llibre de Reichert (1988).

Temperatura en tancar i pressions dins l'envàs

Condicions en tancar			Pressió en esterilitzar				En distribució	
Temp. (°C)	Pres. vap (KPa)		T = 115		T = 125		T = 20	
	Ptot = 101.4		Pw = 169.1		Pw = 232.1		Pw = 2.34	
	Pw	Pa	Pa	Ptot	Pa	Ptot	Pa	Ptot
50	7.4	94.0	216.1	385.2	234.9	467.0	37.6	39.9
60	19.9	81.5	156.1	325.2	169.7	401.8	27.2	29.5
70	31.2	70.2	115.2	284.3	125.3	357.4	20.0	22.4
80	47.4	54.0	77.6	246.7	84.3	316.4	13.5	15.8
90	70.1	31.3	39.9	209.0	43.4	275.5	6.9	9.3
100	101.4	0	0	169.1	0	232.1	0	2.3

Ptot = Pressió total

T = Temperatura del producte ( °C)

Pw = Pressió de vapor

Pa = Pressió parcial de l'aire

– Envasos metàl·lics

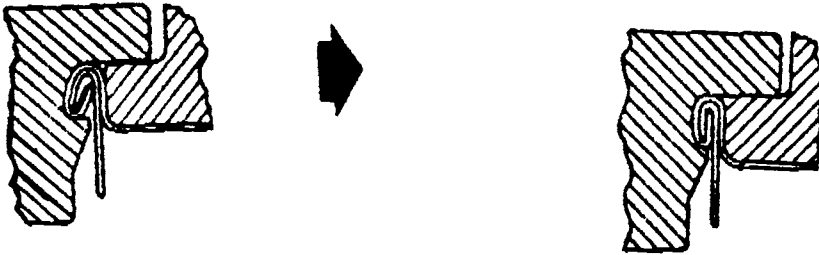
El tancament es fa en dues operacions, anomenades de preparació i de compressió.

Els dos rodets actuen un després de l'altre, girant al voltant de l'envàs i estrenyent gradualment la doble costura. Mentre els rodets estrenyen la solapa de la tapa contra la pestanya i contra la paret del cos, el pitó aguanta la tapa en posició, en general, a través de la pressió que li tramet el plat que aguanta la llauna, en aixecar-se mentre es fa l'operació. Un rodet i l'altre tenen perfils diferents per a aconseguir una estreta consistent, en dues operacions.

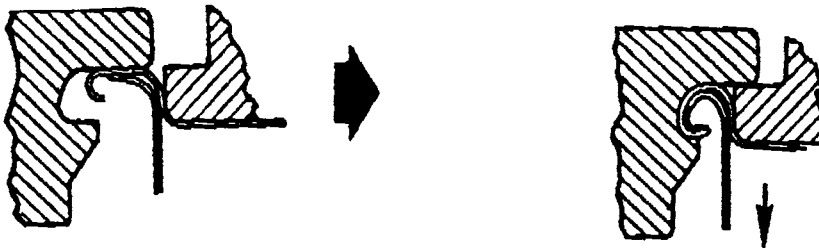
a) El primer rodet, anomenat preparador, doblega la solapa de la tapa i aquesta, al seu torn, comença a doblegar la pestanya del cos.

b) El segon rodet, anomenat compressor, aplanava el conjunt i el prem contra el cos de l'envàs. Les solapes de cos i de tapa, un cop doblegades, donen lloc a les pestanyes de cos i de tapa.

A la fig. 13 es pot veure la marxa d'una operació i l'altra.



La costura es fa en dues operacions: En la primera, el primer rodet gira al voltant de la tapa i doblega la pestanya d'aquesta, damunt la pestanya del cos, perquè després puguin encavalcar-se. El pitó manté el conjunt apretat.



En la segona operació, el segon rodet, de perfil menys profund, premia la tanca i aplanava el metall.

FIGURA 13. Construcció de la doble costura d'un envàs de llauna

Si els envasos abans de tancar, els rodets, el mandrí i la col·locació de les llaunes són correctes, la tanca també ho serà. Si falla algun d'aquests elements tindrem una forma o altra de defecte en la tanca.

El control de la bona realització de la tanca es fa a quatre nivells, encara que només els tres primers s'utilitzen rutinàriament mentre es van tancant els envasos en l'operació industrial:

a) Inspecció visual de l'exterior de les tanques. No cal fer-les malbé, i els possibles defectes que es troben més sovint són:

- Cantó tallant o esmolat.
  - Excés de fondària del fons de la tapa.
  - Doble tanca massa prima o massa gruixuda.
- b) Inspecció després de tallar transversalment les tanques per a poder examinar-les en secció. Els defectes que es poden veure són:
- Alçada de les pestanyes del cos i de la tapa.
  - Proporció de l'encavalcament d'una pestanya respecte a l'altra.
- c) Inspecció després de separar les pestanyes de cos i de tapa, amb ajut d'obrellaunes i de tenalles. Els defectes que es poden veure són:
- Deformacions o irregularitats en les mides de les pestanyes.
  - Separació de les dues fulles de llauna, en la pestanya de cos, en la zona de la soldadura.
  - Arrugues de la pestanya de tapa, massa pronunciades o bé massa poc, en relació al normal pel diàmetre d'envàs de què es tracti.
- d) Inspecció de possibles fuites, per aplicació d'aire a pressió o de buit exterior. Cal netejar bé les zones de les tanques perquè el possible producte enganxat no falsegi el resultat. Tot i així és una prova que dona una proporció alta de tanques falsament correctes.

Els fabricants d'envasos metàl·lics solen tenir una literatura més o menys completa, amb detalls de com fer els assaigs, descripcions dels diferents defectes i especificacions per a les mesures quantitatives. És una informació que convé que tingui qualsevol que treballi en el processament d'aliments en envasos metàl·lics.

#### – Envasos de vidre

El tancament dels envasos de vidre es pot fer per dos procediments fonamentals:

- a) Per rotació de la tapa contra el cos i prement les aletes de la tapa contra les del cos.
- b) Prement la tapa contra el cos. La tapa queda subjectada per aletes o prominències del coll, que poden ésser de dos dissenys bàsics:
  - 1) Els que permetran obrir després l'envàs, girant la tapa.
  - 2) Els que s'obren sense girar la tapa, aplicant pressió al cantó de la tapa.

Els procediments de comprovació de la qualitat de la tanca varien d'un tipus de tancament a l'altre. Cal dir que les comprovacions dels envasos de vidre no són tan precises com les dels envasos metàl·lics.

En molts casos, només poden fer-se comprovacions indirectes i qualitatives.

Comprovacions comunes a un tipus i altre de tancament són:

- Comprovació quantitativa del buit.
- Enfonsament del pannel de la tapa per efecte del buit interior.
- To sec que fa la tapa en colpejar-la amb un objecte dur, si el buit és alt. Si el buit és insuficient, el so és més greu.
- Marca pronunciada i uniforme de l'acabament del coll del cos de l'envàs en el segellant flexible de la tapa.

Comprovacions en envasos que es tanquen girant la tapa:

- Esforç de torsió que cal per a obrir la tapa.
- Seguretat de la tanca. Útil per les tanques de baioneta (conegudes com *twist-off* o *white cap*). Consisteix a marcar una ratlla longitudinal al coll de l'envàs i que es perllonga a la tapa. Llavors, s'obre l'envàs i es torna a tancar, però deixant de girar a la més petita resistència.

La separació que queda entre els dos trossos de la ratlla dóna una mesura de la deformació que la tanca havia fet en les aletes de la tapa.

#### - Envasos de materials plàstics

En la tanca de materials plàstics és fonamental un control acurat de la temperatura de les barres de soldadura, de la pressió i del temps de soldadura. Tant la temperatura com la pressió han de repartir-se uniformement, per a assolir una fusió homogènia dels materials que se solden en tota la superfície en què estan en contacte.

Ja s'ha dit a l'apartat 8.4 que un dels desavantatges dels materials plàstics és la dificultat (comuna també amb els envasos de vidre) d'obtenir un bon control de la seguretat de la soldadura.

Les comprovacions més corrents són:

a) Aspecte visual de la soldadura. En materials transparents, els canvis òptics derivats de la diferent cristal·linitat del material fos i el no fos poden donar indicacions sobre la qualitat de la soldadura, sobretot a un operari experimentat. Si es tracta de laminats amb algun component opac, la utilitat del procediment queda molt reduïda, ja que encara que s'eliminin aquests components amb reactius adients, l'aspecte de la soldadura queda també bastant emmascarat. L'observació visual pot completar-se amb lupa o microscopi, i es poden emprar líquids penetrants acolorits, de tensió superficial baixa, per a posar de manifest amb més facilitat les possibles línies de fuga. En alguns tipus de materials, l'observació de les soldadures amb llum polaritzada dóna indicacions sobre la perfecció de la fusió.

b) Gruix de la soldadura, que ha de diferir del gruix inicial dels components en la meitat del gruix de la capa soldable. De fet, és una comprovació poc fiable a causa de les diferències de gruix en els materials.

c) Assaigs de resistència a la tracció de la soldadura. Donen idea de la resistència de la soldadura en conjunt, però no de la possible existència de fuites localitzades.

d) Assaigs de pressió o de buit, sota aigua. Poden detectar les fuites, si no resulten tapades pel producte en fer l'assaig.

### *Processament tèrmic*

De les precaucions que cal prendre en el procés tèrmic unes són genèriques i altres depenen del tipus d'autoclaui que es faci servir.

#### 1. Precaucions genèriques

1) La temperatura inicial del producte ha d'ésser com a mínim l'establerta en el barem d'esterilització.

2) La temperatura en tancar els envasos ha d'assegurar el buit establert en el disseny de l'operació.

3) Excloure totalment l'aire, que és mal conductor de la calor. Excepte en els autoclaus que funcionen amb barreja de vapor i aire. En aquests, és fonamental regular la proporció d'aire i la uniformitat de la barreja entre l'aire i el vapor.

4) Ha d'haver-hi una alimentació adient de vapor.

5) La vàlvula principal de purga no ha de tancar-se fins que hagi transcorregut el temps de purga establert en el barem d'esterilització. Les purgues de sagnat de vapor han d'estar obertes al llarg de tota l'operació.

6) L'autoclaui ha de disposar d'un termòmetre de mercuri en vidre, d'exactitud contrastada i amb una escala de mesures adients perquè pugui llegir-se amb seguretat. En cada operació, les lectures dels instruments de regulació de temperatura s'han de comparar amb les d'aquest termòmetre i les diferències no han d'ésser superiors a 1 °C.

7) Ha d'haver-hi un registre acurat de la temperatura i del temps. Els registres de cada operació s'han de revisar per a assegurar-se que no hi ha diferències amb els barems establerts en dissenyar el procés.

8) Si es fan servir plaques divisores entre capes d'envasos, els forats de les plaques han d'ésser de 25 mm de diàmetre o més i amb els centres separats 50 mm com a màxim.

9) Si l'autoclaou és horitzontal, ha de disposar de repartidors del vapor al seu llarg.

10) Si l'autoclaou funciona amb vapor, les purgues de vapor no han de connectar-se a sistemes tancats, per impedir que es pugui acumular aigua líquida al fons.

11) Sigui quin sigui el procediment d'escalfament, la diferència de temperatura entre dos punts qualssevol de l'autoclaou no ha de ser de més d'1 °C.

## 2. Precaucions específiques per tipus d'autoclaus

Els autoclaus poden dividir-se en tres grans grups:

a) Per càrregues

b) Continus, rotatius

c) Hidrostàtics

a) Autoclaus per càrregues

Els autoclaus per càrregues poden ésser fixos o rotatius.

El medi calefactor pot ésser:

a) Vapor condensant.

b) Aigua en tot el volum lliure de l'autoclaou. Permet un estalvi d'energia i les regulacions independents de la pressió i de la temperatura.

c) Aigua, en forma de dutxa o cascada. Per a estalvi d'energia i regulació de la pressió amb independència de la temperatura.

d) Barreja de vapor i d'aire. Per a poder controlar independentment la pressió i la temperatura.

Els controls poden ésser des de totalment manuals fins a altament automatitzats. Els controls independents de pressió i temperatura són essencials per a processar envasos flexibles o semi-rígid, que són molt sensibles a les diferències de pressió entre l'interior i l'exterior mentre es fa el tractament.

Les precaucions específiques més importants són:

1) La viscositat màxima que arriba a assolir el producte no ha de superar la dels assaigs en què s'ha basat el barem d'esterilització. Per exemple, no s'han de canviar midons pre-gelatinitzats per midons no tractats.

2) Als autoclaus amb rotació, les diferències de velocitat de rotació i de les possibles durades dels intervals de rotació i de repòs, no han d'ésser de més del 10% dels valors establerts en el barem.

3) Als autoclaus amb rotació, les diferències en els espais de cap entre envasos no han d'ésser de més del 20% del valor establert.

b) Autoclaus continus rotatius

Les precaucions específiques més importants són:

1) La velocitat de rotació ha de controlar-se com en el cas d'autoclaus rotatius per càrregues.

2) També l'espai de cap i la viscositat màxima del producte.

3) Les mides dels envasos han d'ésser les especificades en el disseny de l'autoclau.

c) Autoclaus hidrostàtics

En essència, poden considerar-se com autoclaus estàtics, ja que els envasos no giren. El caràcter de continu els proporciona el fet que la pressió del vapor es manté per mitjà de dues columnes d'aigua. Els envasos a tractar entren a través d'una de les columnes i, després de travessar la cambra de tractament, surten a través de l'altra columna, que fa també la funció de refredar els envasos.

Precaucions essencials:

1) Les genèriques i les que s'han donat en els autoclaus continus rotatius.

2) Cal controlar atentament la velocitat de les cadenes de transport dels envasos.

### *Refredament*

En el refredament, els envasos estan sotmesos a tensions importants i poden fallar en aquest moment. D'una banda, si es redueix de sobte la pressió del vapor, la pressió a l'interior de l'envàs pot deformar-lo de manera irreversible. Això és especialment cert en els casos de les tapes dels envasos de vidre i en els envasos flexibles o semi-rígid.

Encara que es tingui la precaució de mantenir la sobrepressió que cal en el refredament, la diferència de temperatura entre l'aigua de refredament i l'envàs pot donar lloc a fenòmens de dilatació i contracció, que, per un mecanisme peristàltic en les tanques, bombegin aigua de refredament cap a dins de l'envàs. Això pot produir-se especialment a les tanques dels envasos metàl·lics i a les tapes dels envasos de vidre. En previsió d'aquest fenomen, l'aigua de refredament dels envasos ha d'estar fortament clorada. És aconsellable un mínim d'1 ppm de clor lliure residual perquè no puguin arrossegar-se MO fins a l'interior de l'envàs amb les petites quantitats d'aigua que hi puguin entrar. Cal considerar que aquesta proporció de clor és clarament més gran que la que sol haver-hi en el subministrament d'aigua potable.

Per a evitar que l'envàs quedi mullat durant temps llargs després del tractament, el refredament s'ha d'interrompre quan l'envàs encara disposa d'una temperatura que permeti una evaporació relativament ràpida de l'aigua que té a la superfície. Però, d'altra banda, això no ha de representar deixar el producte a una temperatura a la qual puguin créixer MO termòfils. La temperatura més aconsellable per a acabar el refredament és de 37 a 40 °C.

## NOTACIÓ

D	Temps de reducció decimal, igual al temps que cal, a una temperatura determinada, per a reduir el nombre de MO a la desena part (expressat d'altra manera, temps per a travessar un cicle logarítmic en la gràfica de supervivents en funció del temps)
fc	Recíproca del pendent de la recta de refredament (en coordenades semilogarítmiques)
fh	Recíproca del pendent de la recta d'escalfament (en coordenades semi-logarítmiques)
g	Diferència entre la temperatura del fluid calefactor i la temperatura del producte, en el moment de començar el refredament ( $g = T1 - Tg$ )
m	Diferència entre la temperatura del fluid calefactor i el fluid de refredament ( $m = T1 - T2$ )
t	Temps
$t_b$	Temps fins al començament del refredament
$T_0$	Temperatura inicial del producte
$T_1$	Temperatura del fluid calefactor
$T_2$	Temperatura del fluid de refredament
$T_r$	Temperatura de referència en els càlculs de letalitat
$T_g$	Temperatura del producte en començar el refredament
TD $T$	Temps de destrucció tèrmica
z	Coefficient letal de temperatura. Recíproca del pendent de la recta de variació del temps de destrucció tèrmica amb la temperatura (o canvi de temperatura de tractament que multiplica o divideix per deu el temps de destrucció tèrmica)
$F_{Tr}^z$	Equivalència d'un tractament en minuts a la temperatura de referència per un MO de coeficient letal de temperatura z (el subíndex s'omiteix quan $T_r = 250 \text{ °F} = 121,1 \text{ °C}$ )
Fo	Equivalència, quan la temperatura de referència és $250 \text{ °F}$ ( $121 \text{ °C}$ ) i el valor z es $18 \text{ °F}$ ( $10 \text{ °C}$ )
q	Quantitat de calor
h	Coefficient de transmissió superficial de la calor
A	Àrea per la que té lloc l'intercanvi de calor
jh	Paràmetre de retard de la corba de penetració de calor, en l'escalfament
jc	Paràmetre de retard, en el refredament
m	Massa del producte en el càlcul de la calor latent



Cp	Capacitat calorífica
$\alpha$ (alfa)	Difusivitat tèrmica = $\frac{k}{\rho \cdot Cp}$
k	Conductivitat tèrmica
$\rho$	Densitat
R	Radi de l'envàs
l	Semi-alçada de l'envàs
$\mu$	$\ln 10 = 2,303$
L	Letalitat d'un tractament en un nombre a la temperatura de referència (equival a F)
C	Concentració d'un nutrient, d'un enzim, etc.

**BIBLIOGRAFIA**

- ADAMS, H. W. i col. 1990. *Determining temperature distribution in cascading water retorts*. F. Technol. 44(12): 110-112.
- BANWARD, G.J. 1992. *Microbiología básica de los alimentos*. Ediciones Bellaterra S.A.
- BARREIRO, J. A. i col. 1984. *A manual method for predicting nutrient retention during thermal processing of conduction-heating foods in rectangular containers*. J. Food Sci. 49: 478-481, 492.
- BERNARD, D. T. i col. 1990. *Validation of aseptic processing and packaging*. F. Technol. 44(12): 119-122.
- BERRY, M. R. i KOHNHORST, A. L. 1983. *Critical factors for thermal processing of institutional pouches*. J. Food. Protection 46(6): 487-489.
- CASTAIGNE F. 1986. *Evaluation des traitements thermiques assurant la stérilité commerciale dans l'industrie de la conserve pour des aliments faiblement acides*. Ind. Alim. et Agricoles. 1149-1153.
- CASTILLO, P. F. i col. 1980. *Prediction of nutrient retention in thermally processed head conduction food packaged in retortable pouches*. J. Food Sci. 45: 1513.
- CATALA, R. 1982. *Bolsas flexibles esterilizables. Características y usos específicos*. Rev. Agr. y Tecnol. Alim. 22(2): 163.
- CHANDARANA, D. I. i GAVIN, A. 1989. *Establishing thermal processes for heterogeneous foods to be processed aseptically: A theoretical comparison of process development methods*. J. Food Sci. 54(1): 198-204.
- CHEFTEL, H. i THOMAS, G. 1963. *Principes et methodes pour l'établissement des barèmes d'estérilisation des conserves alimentaires*. G. Villars Boull. 14.
- DAIL, R. 1985. *Evaluation of required hold time of aseptically processed low acid foods containing particulates utilizing the Ball method*. J. Food Sci. 50: 1703-1706.
- DATTA, A. K. i TEIXEIRA, A. A. 1988. *Numerically predicted transient temperature and velocity profiles during natural convection heating of canned liquid foods*. J. Food Sci. 53(1): 191-195.
- DUQUENOY, A. 1988. *Heat transfer in cans: Conduction and convection*.
- EISNER, M. 1988. *Batch esterilization in full water immersion*. F. Marketing and Technol (Nov.): 18-25.
- ENAMORADO, R. i col. 1988. *Simulación y control del proceso de esterilización por ordenador personal, para la optimización de la calidad y la seguridad de conservas*. Alimentaria 25 (Mar.): 61-69.

- GRIEME, L. E. i BARBANO, D.M. 1983. *Method for use of a differential scanning calorimetry for determination of bacterial thermal death times.* J. Food. Protection 46(9): 797-801.
- HANLON, J. F. 1971. *Handbook of Packaging engineering.* Mc. Graw-Hill Book Company, Ed. New York.
- HAYAKAWA, K. 1970. *Experimental formular for accurate estimation of food temperatures and their application to thermal process evaluation.* F. Technol. 24: 1407.
- HAYAKAWA, K. I. 1977. *Mathematical methods for estimating proper thermal processes and their computer implementation.* Advandes in Food Tesearch 23: 75-141.
- HAYAKAWA, K. i col. 1988. *The statistical variability of thermal process lethality in conduction heating food.* J. Food Sci. 53: 1887.
- HAYES, G. D. 1992. *Manual de datos para ingenieria de los alimentos.* Editorial Acribia, Zaragoza.
- HEINTZ, D. A. 1980. *Marketing opportunities for the retort pouch.* F. Technol. 34(9): 32-38, 102.
- JAY, J. M. 1978. *Modern Food Microbiology (2nd. Ed.).* D. Van Nostrand Company Ed., New York.
- KAO, J. i col. 1981. *Thermal process calculation for different z and jc values using a hand-held calculator.* J. Food Sci. 47: 193-197.
- KESSLER, H. i FINK, R. 1986. *Changes in heated and stored milk with an interpretation by reaction kinetics.* J. Food Sci. 51(5): 1105-1111, 1155.
- KIMBALL, R. N. i HEYLIGER, T. L. 1990. *Verifying the operation of steam retorts.* F. Technol. 44(12): 100-103, 109.
- KOPELMAN, I. J i col. 1981. *On the conversion factors in thermal processes.* J. Fd. Technol. 16: 229-238.
- LENZ, M. K. i LUND, D. B. 1977b. *The lethality Fourier-number method. 3 Confidence intervals for calculated lethality and mass-average retention of conduction-heated canned fods.* J. Food Sci. 42(4): 1002.
- LEONARD, E. A. 1976. *Packaging Specifications Purchasing and Quality Control.* Modern Packaging/Morgan-Grampian Publishing Company.
- LUND, D. B. 1982. *Applications op optimization in heat processing.* F. Technol. 36(7): 97-100
- LU, Q., MULVANEY, S. J. i HSIEH, F. 1991. *Thermal processes for metal cans compared to retortable plastic containers.* J. Food Sci. 56(3): 835-837.
- MANSON, J. E. i col. 1970. *Evaluation of lethality and nutrient retention of conduction-heating foods in rectangular containers.* F. Technol. 24: 1297.

- MANSON, J. E. i CULLEN, J. F. 1974. *Thermal process simulation for aseptic processing of foods containing discrete particulate matter*. J. Food Sci. 39: 1084-1089.
- MARTÍNEZ PALAZÓN, R. 1985a. *Cálculo de los baremos de esterilización de conservas e influencia de la fase de enfriamiento. 1ª parte*. Alimentaria (Oct.): 43-54.
- MARTÍNEZ PALAZÓN, R. 1985b. *Cálculo de los baremos de esterilización de conservas e influencia de la fase de enfriamiento. 2ª parte. Mejoras de costos en la esterilización industrial de conservas por el calor*. Alimentaria (Nov.): 21-27.
- MICHIELS, L. 1982. *Las transferencias de calor en los productos alimenticios, en relación con el cálculo de los baremos de esterilización de las conservas*. Rev. Agr. y Tecnol. Alim. 22(1): 51-64.
- NAVEH, D. i col. 1983. *The finite element method in thermal processing of foods*. J. Food Sci. 48: 1086-1093.
- NAVED, D. i col. 1983. *Simplified procedure for estimating the effect of a change in heating rate on the change in sterilization value*. J. Food. Protection 46: 16.
- PAINE, F. A. i PAINE, H. Y. 1983. *A Handbook of Food Packaging*. Leonard Hill Ed.
- PAINE, F. A., Ed. 1977. *The Packaging Media*. Blackie & Son Ltd.
- PAULSSON, B. O. i TRAGARDH, C. 1988. *Calculation of sterilization effect distribution in heat exchangers in turbulent flow*.
- PELLÓN, J. R. i col. 1981. *Daños térmicos y viabilidad celular en bacterias*. Rev. Agr. y Tecnol. Alim. 21(2): 211-224.
- PFLUG, I. J. i col. 1963. *Sterilization of foods in flexible packages*. F. Technol. 17(9): 87-92.
- PFLUG, I. J. i col. 1985. *Computing a minimum public health sterilizing value for foods with pH values from 4.6 to 6.0*. J. Food. Protection 48(10): 843-850.
- PFLUG, I. J. i col. 1980. *Measuring sterilization values in containers for food using thermocouples and biological indicator units*. J. Food. Protection 43(2): 119-123.
- PFLUG, I. J. i ODLAUNG, T. E. 1978. *A review of z and f values used to ensure the safety of low acid canned foods*. F. Technol. 32(6): 63.
- PFLUG, I. V. 1987a. *Using the straight line semilogarithmic microbial destruction as an engineering model for determining F value for heat processes*. J. Food. Protection 50: 342.
- PFLUG, I. V. 1987b. *End point of a preservation process*. J. Food. Protection 50: 347.

- PFLUG, I. V. 1987c. *Factors important in determining the heat process value Ft for low-acid canned foods*. J. Food. Protection 50: 528.
- REICHERT, J. E. 1988. *Tratamiento térmico de los productos cárnicos*. Editorial Acribia, Zaragoza.
- REUTER, H. (Edit) 1988. *Aseptic packaging of food*. Technomic, Lancaster, Basel.
- RODRIGO, M. i SAFON, J. 1982. *Optimización del proceso de esterilización-cocción. Bases científicas*. Rev. Agr. y Tecnol. Alim. 22(1): 23-38.
- RODRIGO, M. i col. 1991. *Tecnología europea en alimentos de larga duración*. Proyecto SPRINT (CEE), RA 73 bis. Servicio de Publicaciones del Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos, Valencia.
- STEELE, R. J. i BOARD, P. W. 1979. *Thermal process calculations using sterilizing ratios*. J. Fd. Technol. 14: 227-235.
- STEELE, R. J. i col. 1979. *Revision of the formula method tables for thermal process evaluation*. J. Food Sci. 44: 954-957.
- STEFFE, J. F. i col. 1980. *Energy requirements and cost of retort pouch vs can packaging systems*. F. Technol. 34(9): 39-43, 75.
- STUMBO, C. R. i col. 1975. *Thermal process lethality guide for low-acid foods in metal containers*. J. Food Sci. 40: 1316.
- TANDON, S. i BHOWMIK, S., R. 1986. *Evaluation of thermal processing of retortable pouches filled with conduction heated foods considering their actual shapes*. J. Food Sci. 51(3): 709-714.
- TEIXEIRA i col. 1975b. *Experimental evaluation of mathematical and computer models for thermal process evaluation*. J. Food Sci. 40: 653-655.
- TEIXEIRA, A. A. i col. 1975. *Computer simulation of variable retort control and container geometry as a possible means of improving thiamine retention in thermally processed foods..* J. Food Sci. 40: 656-659.
- TEIXEIRA, A. A. i col. 1966b. *Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods*. F. Technol. 23(June): 137-142.
- TEIXEIRA, A. A. i col. 1966a. *Computer determination of spore survival distribution in thermally-processed conduction-heated foods*. F. Technol. 23(Mar.): 352-354.
- TEIXEIRA, A.A. i col. *Surface heat transfer considerations during immersion water cooling of retorted foods*. 23-31.
- TEIXEIRA, A. A. i MANSON, J. E. 1982. *Computer control of batch retort operations with on-line correction of process deviations*. F. Technol. 44(Apr.): 87-90.

- THOMSON, D. R. i col. 1979. *Home canning of food: Risks resulting from errors in processing*. J. Food Sci. 44(1): 226-233.
- TOLEDO, R. T. i CHANG, S. Y. 1990. *Advantages of aseptic processing of fruits and vegetables*. F. Technol. 44(2): 72-76.
- TUNG, M. A. i col. 1990. *Food esterilization in Steam/air retorts*. F. Technol. 44(12): 105-109.
- VINTERS, J. E. i col. 1975. *Thermal process evaluation by programmable computer calculator*. F. Technol. 29(3): 42.
- WALSH, B. V. i BATES, R. P. 1978. *Safety of home canning procedures for low-acid foods*. J. Food Sci. 43: 439-443.
- WANG, J. i col. 1991. *Thermal process lethality variability in conduction-heated foods*. J. Food Sci. 56(5): 1424-1428.

# EXTRACCIÓ

*Manuel Màrquez\**

## I. EXTRACCIÓ LÍQUID-SÒLID O LIXIVIACIÓ

### 1. INTRODUCCIÓ

L'operació té per objecte la separació de substàncies solubles contingudes en un sòlid mitjançant un dissolvent, sigui perquè el solut és el component desitjat (cas del sucre, de l'oli, etc), sigui perquè el sòlid inert es vol rentar traient-li el solut no desitjat.

Exemples de processos de substàncies biològiques i alimentàries són:

- Extracció del sucre de remolatxa amb aigua calenta.
- Extracció d'olis vegetals amb hexà, acetona i èter a partir de soia, girasol, cotó, ricí, fetge de peix, etc.
- Extracció d'olis essencials d'arrels, fulles, tiges, etc.
- Cafè i te extrets amb aigua.
- Taní de crostes d'arbre lixiviades amb aigua.
- En la indústria química i metal·lúrgica, en general, rentat de minerals, extracció de sals metàl·liques, etc.

### 2. PREPARACIÓ DELS SÒLIDS

El tractament previ que convé donar al sòlid depèn de la proporció de solut que conté i de com sigui la naturalesa del lligam del solut i del sòlid. Si aquell es troba envoltat per una matriu de material inert, com és el cas de molts minerals, serà convenient una reducció de dimensions prèvia a l'extracció. Si el solut es trobés adherit a la superfície de l'inert, no caldria triturar.

---

\* *Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

En el cas de substàncies biològiques el solut sol trobar-se dins les cèl·lules. Per tal de facilitar la difusió a través de la membrana cel·lular, com és el cas de les remolatxes, aquestes es tallen en cintes o "cossetes", la qual cosa trenca inevitablement un cert percentatge de membranes, malgrat que l'objectiu perseguit sigui deixar les cèl·lules intactes i permetre la difusió del sucre mentre que els components albuminoides i col·loïdals romanin a l'interior de la cèl·lula.

Si es tracta de lixiviar tiges, fulles, arrels, etc., un assecatge previ facilita el trencament de les parets cel·lulars, i permet la penetració del dissolvent i l'extracció del solut.

En el cas de la soia i altres llavors, les parets cel·lulars poden trencar-se fins a reduir-ne la mida a 0,1...0,5 mm.

### 3. MECANISMES DE LA LIXIVIACIÓ

#### 3.1. Generalitats

El procés global d'extracció d'un solut contingut en un sòlid mitjançant un dissolvent pot descriure's, en general, per la següent concatenació d'etapes elementals:

- (a) transferència de dissolvent de la solució a la superfície del sòlid
- (b) penetració o difusió del dissolvent pel sòlid
- (c) difusió del solut en el dissolvent
- (d) difusió del solut en la dissolució fins a la superfície del sòlid
- (e) transferència del solut a la dissolució exterior

L'etapa més lenta s'anomena etapa controlant. En molts casos és la (d), en altres, la (c). Tant la (a) com la (e) poden activar-se per agitació.

De vegades, la complexitat és més gran: quan es fabriquen les cossetes de remolatxa, el 20 per cent de les cèl·lules es trenquen i en elles l'extracció del sucre és com un rentat, mentre que en l'altre 80 per cent, l'extracció es fa per difusió.

Hi ha dos models simples que poden aplicar-se segons el cas: el model de dissolució i el model de difusió.

#### 3.2. Model de dissolució

Segui el cas d'un solut A que es dissol en un volum de  $V_m^3$  de líquid amb una velocitat de  $N_A$  kmol/s, a través d'una superfície d' $A$  m<sup>2</sup>. Si  $k_L$  és



el coeficient de transferència de massa, en m/s ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ s}$ );  $C_A$  la concentració d'A en  $\text{kmol}/\text{m}^3$  en la dissolució i  $C_{AS}$  la concentració de saturació en la superfície del sòlid, en un interval de temps, dt, es pot escriure:

$$i \quad \begin{aligned} V dC_A &= N_A dt \\ N_A &= k_L A (C_{AS} - C_A) \end{aligned}$$

$$\text{Integrant amb els límits} \quad \begin{aligned} t = 0, C_A &= C_{AO} \\ t = t, C_A &= C_A \end{aligned}$$

$$t = \frac{V}{Ak_L} \ln \frac{C_{AS} - C_{AO}}{C_{AS} - C_A} \quad (1)$$

O bé

$$\frac{C_{AS} - C_A}{C_{AS} - C_{AO}} = \exp [-(k_L A/V) t] \quad (2)$$

### **Exemple 1.**

*En un procés de fabricació, per tal de preparar una determinada dissolució s'agiten en aigua cristalls de solut d'1mm de diàmetre, i s'obté una concentració del 15 per cent en 30 minuts. Es vol modificar el procés, per tal d'arribar a una concentració del 20 per cent en el mateix temps. De quina mida hauran d'especificar-se els cristalls si la concentració de saturació és de 0,25?*

### **Solució:**

*En el procés habitual, amb  $C_{AO} = 0$ ,  $C_{AS} = 0,25$ ,  $C_A = 0,15$ . Amb (1),*

$$t = 30 \cdot 60 = \frac{V}{A K_L} \ln \frac{0,25}{0,25 - 0,15} = \frac{V}{A K_L} \ln 2,5$$

*En el nou procés el temps, el valor de V i de  $K_L$  són els mateixos, però el nou valor d'A es pot relacionar amb la mida.*

*La massa de cristalls en el primer procés és:*

$$V 0,15 = N \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p$$

*i l'àrea dels cristalls és*

$$A = N\pi d_p^2 = 6 \cdot V \cdot 0,15 \frac{1}{d_p \rho_p}$$

En el nou procés, es tindrà

$$A' = 6 \cdot V \cdot 0,2 \frac{1}{d'_p \rho_p}$$

Per tant,

$$A/A' = \frac{0,15}{0,2} \frac{d'_p}{d_p} = \frac{3}{4} \frac{d'_p}{d_p} = \frac{3}{4} d'_p$$

En el nou procés, aplicant (1), amb  $C_{AO} = 0$ ,  $C_{AS} = 0,25$ ,  $C_A = 0,2$

$$t = 30 \cdot 60 = \frac{V}{A' K_L} \ln \frac{0,25}{0,25 - 0,2} = \frac{V}{A' K_L} \ln 5$$

$$\frac{V}{A K_L} \ln 2,5 = \frac{V}{A' K_L} \ln 5 \quad \frac{A}{A'} = \frac{3}{4} d'_p = \frac{\ln 2,5}{\ln 5}$$

$$d'_p = \frac{4}{3} \frac{\ln 2,5}{\ln 5} = 0,76 \text{ mm}$$

### 3.3. Model de difusió

En aquest model s'aplica la llei de Fick que pot integrar-se per a diferents formes geomètriques del sòlid. En la pràctica pot ésser útil aplicar el gràfic de la figura 1, que permet trobar E en funció del grup adimensional (dit de FOURIER de massa)

$$\frac{D \cdot \theta}{a^2} \quad (3)$$

D és la difusivitat en  $m^2/s$  (es donen valors empírics a les taules 1 i 2)

$\theta$  és el temps en s

a és la dimensió característica del sòlid, en m; és el màxim recorregut que ha de fer el solut per a sortir a la superfície del sòlid: és la meitat de l'aresta, el radi de l'esfera i del cilindre, la meitat de l'altura del cilindre, etc.

Quant al valor de l'ordenada E, val

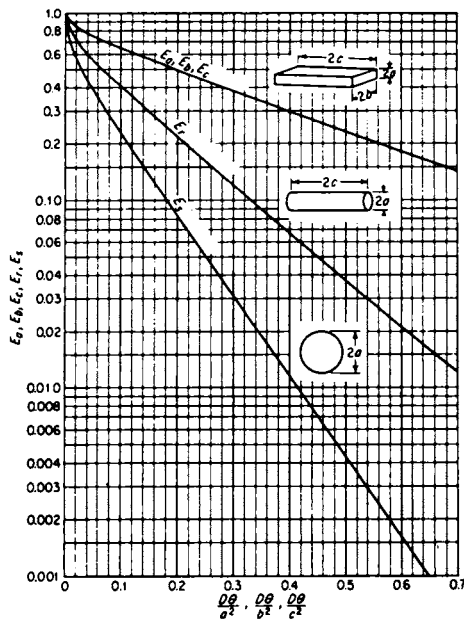
$$E = \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} \tag{4}$$

$C_0$  és la concentració inicial del sòlid.

$C_1$  és la concentració constant del fluid que l'envolta.

$C$  és la concentració de sòlid en l'instant  $\theta$ .

Per les diferents cares del sòlid es poden llegir els valors corresponents d'E. Aquests es combinen en un mateix sòlid per multiplicació, tal com s'indica a la figura 1.



$$E = \frac{C - C_1}{C_0 - C_1} = f\left(\frac{D \theta}{a^2}\right) = E_a \text{ (difusió per dues cares; esfera, cilindre lateral)}$$

$$= f\left(\frac{D \theta}{a^2}\right) f\left(\frac{D \theta}{b^2}\right) = E_a E_b \text{ (quatre cares; cilindre)}$$

$$= E_a E_b E_c \text{ (sis cares)}$$

FIGURA 1. Difusió en règim transitori

TAULA 1. Coeficients de difusivitat per soluts biològics en solució aquosa

Solut	Massa molecular kg/kmol	Temperatura K	Difusivitat m <sup>2</sup> /s
Albúmina, sèrum de bou	67.500	298	$6,81 \cdot 10^{-11}$
Albúmina, sèrum humà	72.300	293	$5,93 \cdot 10^{-11}$
Caprilat sòdic	166,2	298	$8,78 \cdot 10^{-10}$
Creatimina	113,1	310	$1,08 \cdot 10^{-9}$
Fibrinogen humà	339.700	293	$1,98 \cdot 10^{-11}$
Glicerina	92,1	293	$8,25 \cdot 10^{-10}$
Glicina	75,1	298	$1,055 \cdot 10^{-9}$
g-Globulina humana	153.100	293	$4,0 \cdot 10^{-11}$
Lipoxidasa	97.440	293	$5,59 \cdot 10^{-11}$
Proteïna de soia	361.800	293	$2,91 \cdot 10^{-11}$
Sacarosa	342,3	310	$6,97 \cdot 10^{-10}$
Sacarosa	342,3	293	$4,6 \cdot 10^{-10}$
Urea	60,1	293	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Urea	60,1	298	$1,378 \cdot 10^{-9}$
Ureasa	482.700	293	$3,46 \cdot 10^{-11}$
Ureasa	482.700	298	$4,01 \cdot 10^{-11}$

TAULA 2. Difusivitat d'alguns soluts en gels biològics diluïts, en solució aquosa

Solut	Gel	Concentració, massa de gel en la solució %	Temperatura K	Difusivitat D · 10 <sup>9</sup> m <sup>2</sup> /s	
Metanol	} Gelatina	3,8	} 278	0,626	
Sacarosa		3,8		0,209	
Urea		2,9		0,644	
Dextrosa	} Agar	0,79		0,327	
Etanol		5,15		0,393	
Glicerina		2,06		0,297	
Sacarosa		0,79		0,247	
Urea		3,16		0,591	
NaCl(0,05M)	Agarosa	2		298	1,398

**Exemple 2.**

Per tal de mesurar la difusivitat de la urea en agar-agar, es moldeja un dau de gel de 3 cm d'aresta, el qual té una concentració uniforme de 5 g d'urea per 100 cm<sup>3</sup>. S'exposa una sola cara del dau a un corrent d'aigua, constantment renovada. Es treballa a 278 K. A les 68 hores, la concentració mitjana d'urea en gel és de 3 g per 100 cm<sup>3</sup>. Calculem:

1. El valor del coeficient de difusivitat.
2. El temps necessari perquè la concentració arribi a 1 g/100 cm<sup>3</sup>.
3. El mateix, exposant, però, dues cares oposades del dau al corrent d'aigua.

**Solució:**

Amb la notació de la figura 1, es té:

$$(1) \quad C_0 = 5\text{g}/100 \text{ cm}^3$$

$$C_1 = 0 \quad \} \quad E = \frac{3-0}{5-0} = 0,6 \text{ que dóna } \frac{D \cdot \theta}{a^2} = 0,128$$

$$C = 3\text{g}/100 \text{ cm}^3$$

Com que sols hi ha una cara exposada, el recorregut és  $a = 3 \text{ cm}$ , i com que  $\theta = 68 \cdot 3600 = 244.800 \text{ s}$ ,

$$\frac{D \cdot 244.800}{(0,03)^2} = 0,128 \quad i \quad D = 4,7 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$$

(2) Aplicant el mateix model, ara és

$$E = \frac{1-0}{5-0} = 0,2 \quad i \quad \frac{D \cdot \theta}{a^2} = 0,568$$

i es calcula amb la D anterior

$$\theta = \frac{(0,03)^2 \cdot (0,568)}{4,7 \cdot 10^{-10}} = 1,086 \cdot 10^{10} \text{ s} = 302 \text{ hores}$$

$$(3) \quad \text{Ara és } a = \frac{1}{2} \cdot 0,03 = 0,015 \text{ m} \quad i \quad \text{el temps serà } \frac{302}{4} = 75,5 \text{ hores}$$

**Exemple 3.**

En una operació de lixiviació s'estan tractant partícules de 2 mm de mida mitjana, aproximadament esfèriques, en condicions tals que la concentració del solut en el dissolvent és gairebé constant. Es mesuren 3,11 hores per tal d'extreure'n el 80 per cent del solut. Suposant que la difusió en el sòlid és l'etapa controlant, calculem el nou temps quan la mida de partícula es redueix a 1,5 mm.

**Solució:**

Com que el valor d'E és el mateix en ambdós casos, també seran iguals els valors de l'abscissa:

$$\frac{D \theta_1}{a_1^2} = \frac{D \theta_2}{a_2^2}$$

$$\frac{\theta_1}{\theta_2} = \left( \frac{a_2}{a_1} \right)^2 = \left( \frac{1,5}{2} \right)^2 = 0,5625$$

Per tant

$$\theta_2 = 0,5625 \cdot 3,11 = 1,75 \text{ h.}$$

**4. MÈTODES OPERATIUS DE LIXIVIACIÓ. APARELLS**

Les operacions poden ésser contínues o per càrregues, d'una etapa o en una bateria. En tots els casos s'ha de preveure el moviment relatiu del sòlid i del líquid.

- *Llit fix.* S'utilitza en l'extracció de sucre, tanins, indústria farmacèutica, etc. Un exemple és el difusor típic de remolatxa (fig. 2). Les cossetes es carreguen en l'aparell que té un fals fons. Per la part superior entra aigua a 343...350 K i pel fons surt una solució ensucrada que entra en un segon difusor, i així successivament. En el sistema Shanks (fig. 3) es disposa d'un grup d'N difusors. En l'esquema se n'han dibuixat sis. D'ells, el 6 es troba fora de circuit (descàrrega de cossetes esgotades, i càrrega de cossetes noves). L'aigua entra en l'1 i passa de l'1 al 2 i del 2 al 3, etc. L'últim és el que té

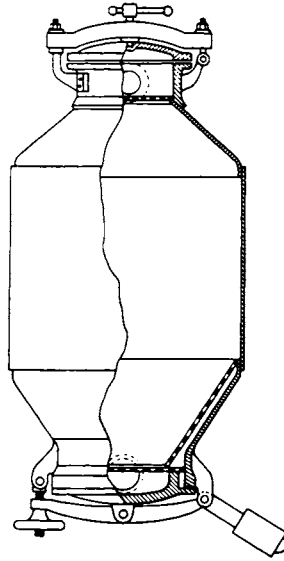


FIGURA 2. Difusor de remolatxa

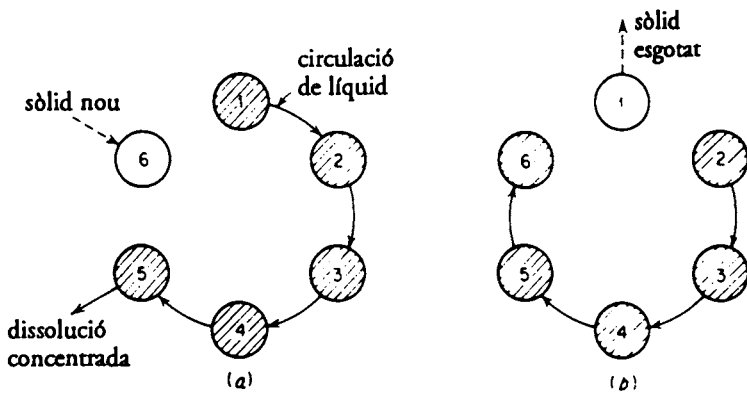


FIGURA 3. Sistema Shanks de contacte en contracorrent

les cossetes més fresques, mentre que l'1 les té gairebé esgotades; de manera que, al següent cicle, l'aigua entrarà en el 2, i passarà al 3 i d'aquest al 4, etc., quedant l'1 fora del circuit per descàrrega i càrrega, etc.

• *Llit mòbil*. El sòlid circula a contracorrent transportat en catúfols (sistema Bollman) (fig. 4) o mitjançant transportadors d'Arquímedes (sistema Hildebrandt).

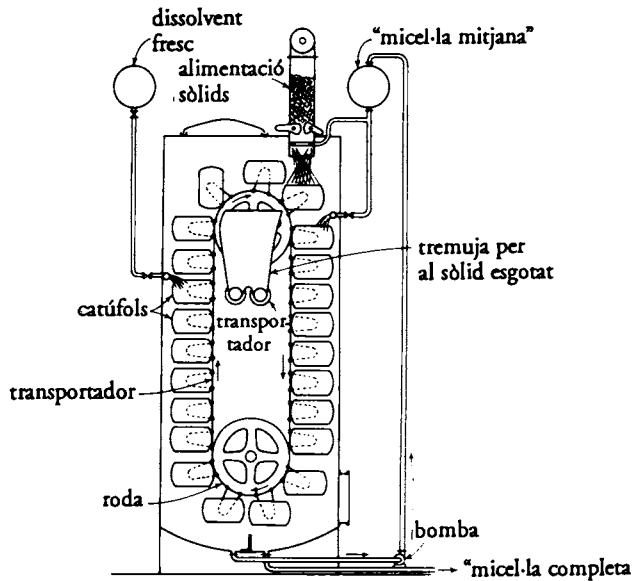


FIGURA 4. Extractor Bollman

Un altre sistema consisteix en una banda transportadora regada amb dissolvents en diferents trams (fig. 5)

• *Sòlid agitat*. El contacte té lloc en recipients agitats en els que el sòlid es manté en suspensió. Cada tanc va proveït d'un espessador per tal de separar el sòlid i fer-lo circular a contracorrent per tota la bateria (fig. 6).

## 5. EQUILIBRI

En aquesta operació es consideren dues fases líquides diferents: la dissolució lliure, formada per dissolvent i solut, homogènia en cada etapa, i la dissolució retinguda pel sòlid, que es troba emplenant forats i porus del



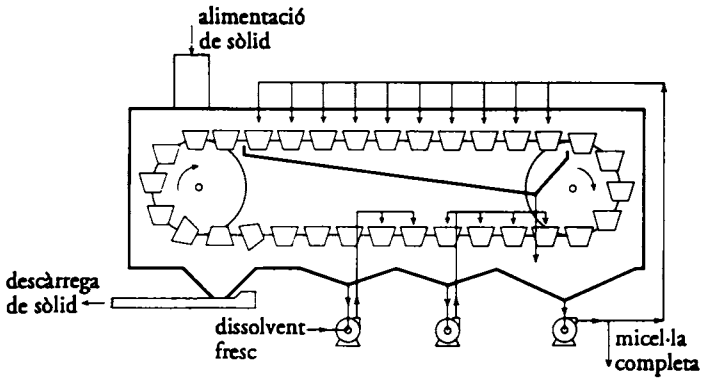


FIGURA 5. Extractor de banda transportadora horitzontal

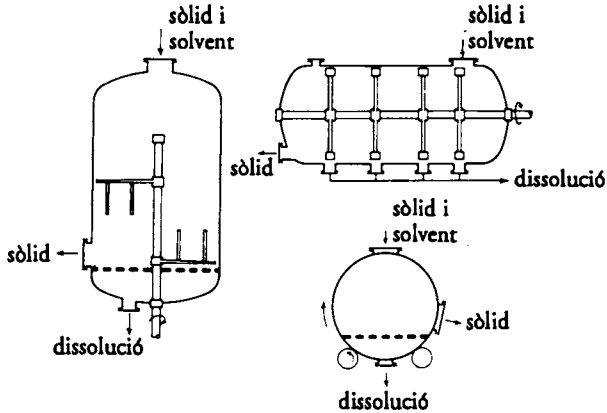


FIGURA 6. Extractor de tanc agitat

sòlid. Si el temps de contacte és prou llarg, quan ambdues fases (designada la primera per E i la segona per R, inicials d'*extracte* i *refinat*, respectivament) arriben a l'equilibri, tenen la mateixa composició (es negligeixen accions d'afinitat del sòlid pel solut).

Els diagrames d'equilibri fan ús de les següents coordenades, en unitats màssiques. Si es designa per A el solut, B, el sòlid inert i C el dissolvent, els extractes E i els refinats R són dissolucions de composició respectiva y i x, definides per:

$$x \text{ (o } y) = \frac{\text{kg A}}{\text{kg A} + \text{kg C}} = \frac{\text{massa de solut}}{\text{massa de dissolució}} \quad (5)$$

Per tant, en el segment 0...1 de l'eix d'abscisses, es representen totes les composicions possibles.

Com a ordenada, es defineix la magnitud

$$N = \frac{\text{kg B}}{\text{kg A} + \text{kg C}} = \frac{\text{massa d'inerts}}{\text{massa de solució}} \quad (6)$$

És evident que tots els extractes tenen  $N = 0$  (estan lliures de sòlid) i es representen al mateix eix 0x. Mentre que els refinats tenen un cert valor d' $N$ . Si es designa per *retenció de dissolució* del sòlid, la massa de dissolució retinuda per la unitat de massa de sòlid inert, és evident que aquesta retenció és  $1/N$ .

La retenció pot ésser constant o variable, és a dir, independent o no de la concentració de la dissolució. Un cas interessant de retenció variable és el de *retenció de dissolvent constant*. Si aquest valor es designa per  $r$ , es pot escriure:

$$N = \frac{B}{A + C} \quad x = \frac{A}{A + C} \quad r = \frac{C}{B}$$

multiplicant la primera per la tercera,

$$Nr = \frac{C}{A + C} = 1 - \frac{A}{A + C} = 1 - x$$

i, per tant,

$$x + \frac{N}{r} = 1$$

que en el sistema  $(x, N)$  és una recta (fig. 7).

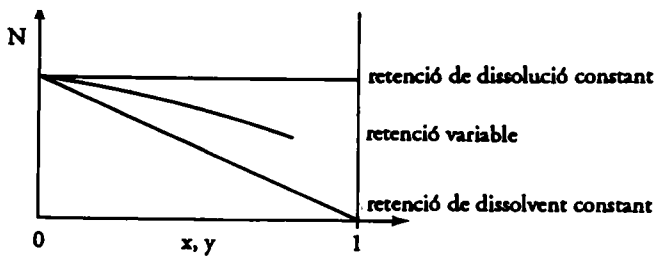


FIGURA 7.

## 6. SISTEMES DE CONTACTE

El sistema més senzill és el d'etapa única, però es guanya efectivitat augmentant el nombre d'etapes. Com que el contacte a contracorrent és el més efectiu, és també el més emprat.

### 6.1. Etapa única

El sòlid es manté en llarg contacte amb el líquid per tal d'arribar a l'equilibri.

A continuació se separen les dues fases (fig. 8). El sòlid F és de composició coneguda. Forçosament tindrà una proporció d'inert (B) i una de solut (A). En algun cas tindrà dissolvent (C), com és el cas de les remolat-

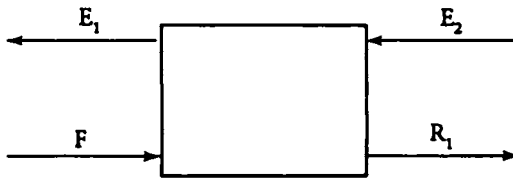


FIGURA 8.

xes, que porten aigua; en altres casos no, com en el cas dels olis, que, evidentment, no porten hexà.

Coneguda la composició d'F es poden calcular les seves coordenades:

$$x_F = \frac{A}{A + C} \quad (\text{igual a 1 si no hi ha dissolvent})$$

$$N_F = \frac{B}{A + C}$$

El dissolvent és  $E_2$ , de coordenades  $N = 0$ , evidentment, i  $y = 0$  si és pur, o un cert valor si conté solut.

Els corrents  $E_1$  i  $R_1$  estan en equilibri, i per tant  $y_1 = x_1$  (fig 9). Gràficament si es coneix la retenció, el punt  $R_1$  s'ha de trobar sobre la línia de retencions. El balanç global

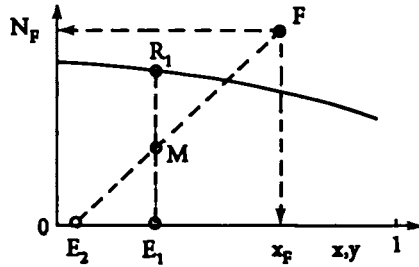


FIGURA 9.

$$F + E_2 = E_1 + R_1 = M$$

permet referir-se a un punt fictici M, punt de barreja dels corrents F i  $E_2$ , situat, per tant, en el segment  $\overline{FE_2}$  i tal que

$$\frac{\overline{ME_2}}{\overline{MF}} = \frac{\text{kg d'alimentació}}{\text{kg de dissolvent}}.$$

La vertical projectada des d'M permet trobar els punts  $E_1$  i  $R_1$ , així com les seves quantitats respectives, ja que

$$\frac{\overline{ME_1}}{\overline{MR_1}} = \frac{\text{kg d}'R_1}{\text{kg d}'E_1}.$$

S'ha de tenir en compte, quan s'interpreten propietats quantitatives en els diagrames, que quan es diu kg d'F, d'  $R_1$ , d'  $E_1$ , etc, els kg corresponen a quantitats de producte del denominador definitori de la coordenada. Per tant, la massa d'F no és tota la quantitat alimentada, sinó la quantitat de solut i dissolvent que porta F (l'inert no compta).

#### **Exemple 4.**

*S'extreu amb hexà oli de faves de soia, tractant-se 100 kg de faves que contenen un 20 per cent d'oli amb 100 kg de dissolvent pur. La retenció pot considerar-se constant i igual a 1,5 kg de sòlid inert per kg de dissolució. Calculem les quantitats d'extracte i refinat produïdes i la seva composició.*

#### **Solució:**

*Utilitzant les coordenades definides a 5 i 6, la quantitat d'F a considerar, quan s'alimenten 100 kg és*

$$F = 100 \cdot 0,2 = 20 \text{ kg}$$

$$E_2 = 100 \text{ kg}$$

Amb les composicions respectives,

$$x_F = \frac{20}{20} = 1; N_F = \frac{80}{20} = 4$$

$$y_{E_2} = 0; N_{E_2} = 0$$

Quant a la retenció, és constant i val  $N = 1,5$  (fig 10).

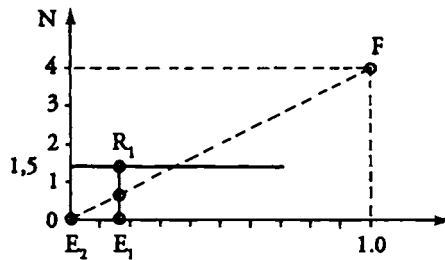


FIGURA 10.

El punt  $M$  es situa amb  $\frac{MO}{MF} = \frac{F}{E_2} = \frac{20}{100} = \frac{1}{5}$

O bé,  $\frac{MO}{OF} = \frac{1}{6}$

i, per Thales,  $x_M = \frac{1}{6} = 0,1667$

Per tant,  $x_1 = y_1 = 0,1667$

$$M = E_2 + F = 120 \text{ kg} = E_1 + R_1 \quad ; \quad \frac{ME_1}{MR_1} = \frac{R_1}{E_1} = \frac{ME_1}{1,5} = \frac{R_1}{120}$$

però, per Thales,  $\frac{ME_1}{4} = \frac{0,1667}{1}$ ;  $ME_1 = 0,6667 = \frac{1,5}{120} R_1$

$$\text{Per tant, } R_1 = \frac{120}{1,5} \frac{2}{3} = 53,33 \text{ kg} \quad i \quad E_1 = 66,67 \text{ kg}$$

## 6.2. Bateria d'extractors a contracorrent

El sòlid s'alimenta contínuament en la primera etapa i va passant d'etapa a etapa, trobant cada vegada dissolucions més diluïdes, fins a l'última etapa, que és la que rep el dissolvent nou, i de la qual surt esgotat. Per contra, el dissolvent va avançant des de l'última etapa fins a la primera, enriquint-se de solut, i sortint-ne en forma d'extracte final.

Els corrents E i R de cada etapa tenen el mateix subíndex i estan en equilibri, de manera que en general es pot posar (fig. 11):

$$x_n = y_n \quad (7)$$

En la representació gràfica això vol dir que els punts  $E_n$  i  $R_n$  es troben a la mateixa vertical. A més, tots els R s'han de trobar a la corba de retencions, i els E sobre l'eix 0x. Els punts F i  $E_0$  es representen com s'ha dit en el paràgraf anterior.

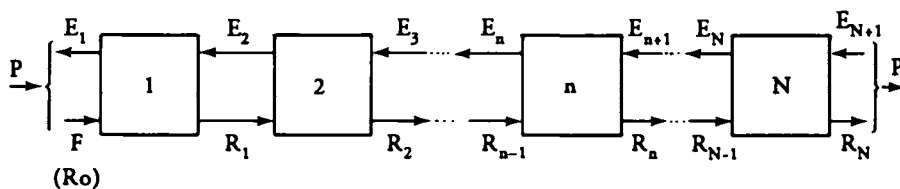


FIGURA 11.

– El balanç global permet de fixar el punt de barreja M:

$$F + E_{N+1} = E_1 + R_N = M \quad (8)$$

que compleix les relacions quantitatives:

$$\frac{MF}{ME_{N+1}} = \frac{E_{N+1}}{F} \quad i \quad \frac{MR_N}{ME_1} = \frac{E_1}{R_N}$$

– Un balanç genèric permet definir el punt P:

$$P = F - E_1 = R_N - E_{N+1} = R_n - E_{n+1} \quad (9)$$

Segons les dues primeres equacions, el punt P es troba a la intersecció dels segments  $\overline{FE_1}$  i  $\overline{R_N E_{N+1}}$ ; la tercera equació indica que els punts  $R_n$ ,  $E_{n+1}$  i P estan en línia recta, la qual cosa permet de trobar-ne un conegut l'altre i el punt P.

Per a l'estudi gràfic d'una separació es comença per representar la corba de retencions i situar els punts F i  $E_{N+1}$ . El punt  $L_N$  pot situar-se per l'especificació definida. Situat el punt M (amb les quantitats relatives d'alimentació i dissolvent), queda determinat el punt  $E_1$  (fig. 12).

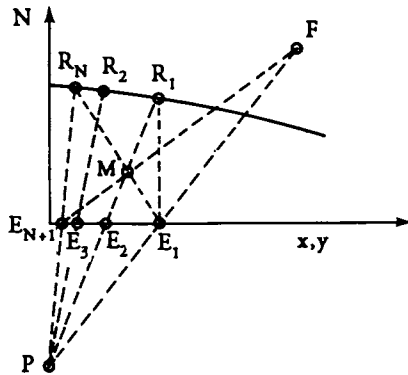


FIGURA 12.

Aplicant (9) pot fixar-se el punt P i amb la relació (7) i la (9), alternativament, es poden calcular les etapes, tal com indica el dibuix: d' $E_1$ , verticalment, sobre la corba de retencions,  $R_1$ .

Projectant  $PR_1$  sobre l'eix  $Ox$ , es troba  $E_2$ ; la vertical d'aquest últim situa  $R_2$ , i així successivament, fins a arribar a  $R_N$ .

### Exemple 5.

*S'ha d'extreure oli d'un sòlid amb benzè en una bateria d'extracció. L'alimentació consisteix en 2850 kg/h formats per 2000 kg/h d'inert; 800 kg/h d'oli; 50 kg/h de dissolvent impregnat.*

El dissolvent emprat està format per 1310 kg/h de benzè i 20kg/h d'oli. El sòlid esgotat tindrà 120 kg d'oli. Empíricament es determina la retenció:

$N$ kg inert / kg dissolució	2	1,98	1,94	1,89	1,82	1,75	1,68	1,61
$x$ kg d'oli / kg dissolució	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7

Calculem els cabals i concentracions dels corrents de sortida i el nombre d'etapes.

**Solució:**

Preparació de les dades

$$F = 850 \text{ kg/h (suma de dissolvent i solut, sense inert)} = R_0$$

$$x_0 = \frac{800}{850} = 0,9412; \quad N_0 = \frac{2000}{850} = 2,3529$$

$$E_{N+1} = 1330 \text{ kg/h} \quad y_{N+1} = \frac{20}{1330} = 0,015$$

El sòlid esgotat  $R_N$  s'ha de trobar sobre la línia de retenció, amb coordenades:

$$x_N = \frac{\text{kg d'oli}}{\text{kg de dissolvent}} \quad i \quad N_N = \frac{\text{kg d'inert}}{\text{kg de dissolvent}}$$

$$\text{Per tant } \operatorname{tg} \alpha = \frac{N_N}{x_N} = \frac{\text{kg d'inert}}{\text{kg d'oli}} = \frac{2000}{120} = 16,667 = m$$

$$y = mx$$

$$x = 0,3, \quad y = 5$$

El punt  $M$  compleix (fig. 13)

$$\frac{MF}{ME_{N+1}} = \frac{1330}{850} = 1,5647$$

geomètricament pot calcular-se  $x_M = 0,3761$ . Amb el punt  $M$  i  $R_N$ , se situa  $E_1$  en  $y_1 = 0,6$ . Ara ja es pot situar  $P_1$  unint  $F$  i  $E_1$  fins a tallar a  $R_N - E_{N+1}$ .

Fent el traçat indicat es calculen 3,9 etapes teòriques.



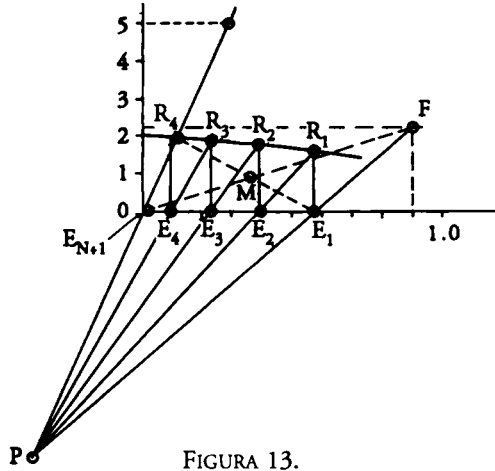


FIGURA 13.

Aplicant l'Eq. (8):  $E_1 + R_N = M = 850 + 1330 = 2180 \text{ kg/h}$ . De manera aproximada  $x_N = 0,1186$ , valor que amb  $x_M = 0,3761$ , i  $y_1 = 0,6$  permet escriure

$$\frac{E_1}{E_1 + E_1} = \frac{E_1}{2160} = \frac{0,6 - 0,1186}{0,3761 - 0,1186}$$

$$E_1 = 1166 \text{ kg/h}$$

$$L_N = 1014 \text{ kg/h}$$

El resultat pot visualitzar-se amb el següent esquema (en kg/h):

	F	$E_{N+1}$	M	$R_N$	$E_1$				
Inert	2000	—	2000	2000	—				
Oli	800	+	20	=	820	=	120	+	700
Benzè	50	1310	1360	894	466				
	2850	1330	4180	3014	1166				

### 6.3. Resolucions analítiques

En el cas del sistema de retenció de dissolució constant, els corrents d'E i d'R són invariables per a totes les etapes, a excepció de la primera.

Per a la primera etapa es calcula

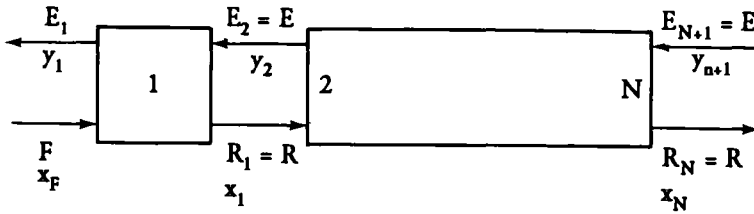


FIGURA 14.

$$\begin{aligned}
 F + E_2 &= R_1 + E_1 \\
 Fx_F + E_2 y_2 &= R_1 x_1 + E_1 y_1 \\
 y_1 &= x_1
 \end{aligned}$$

Un balanç global dóna  $F x_0 + E y_{N+1} = R x_N + E_1 y_1$

Amb aquestes equacions es calculen  $x_1$ ,  $y_2$ ,  $x_N$  i  $y_{N+1}$ , amb els quals es calcula

$$N = \frac{\log \frac{x_1 - y_2}{x_N - y_{N+1}}}{\log \frac{x_1 - y_N}{y_2 - y_{N+1}}} + 1 \quad (10)$$

### Exemple 6.

Repetir l'exemple 5 suposant la retenció constant ( $N = 1,85$  kg/kg).

#### Solució:

Es tenen calculats

$$F = 850 \text{ kg/h}; \quad x_0 = 0,9412; \quad N_0 = 2,3529$$

$$E_{N+1} = 1330 \quad y_{N+1} = 0,015038$$

$$\text{Amb } N = 1,85 \text{ i } 2000 \text{ kg/h d'inerts,} \quad R = \frac{2000}{1,85} = 1081 \text{ kg/h}$$

$$x_N = \frac{120}{1081} = 0,111$$

$$F + x_{N+1} = 850 + 1330 = R_N + E_1 = 1081 + E_1 \quad E_1 = 1099 \text{ kg/h}$$

$$N = 1 + \frac{\log \frac{0,6309 - 0,4424}{0,111 - 0,0115038}}{\log \frac{0,4424 - 0,015038}{0,6369 - 0,111}} = 4,4 \text{ etapes ideals}$$

#### 6.4. Eficàcia o rendiment d'etapa

Les etapes considerades són ideals o d'equilibri. Però les etapes reals deixen els corrents en condicions allunyades d'aquest estat. En el cas que el mecanisme controlant sigui la difusió del sòlid, l'eficàcia de Murphree de l'etapa és

$$\eta_M = \frac{C_A^i - C_A^{i-1}}{C_{A\infty}^i - C_A^{i-1}} \quad (11)$$

on  $C_A^i$  és la concentració de sortida;  $C_{A\infty}^i$  la que tindria si hagués arribat a l'equilibri. Es dedueix:  $\eta_M = 1 - E$

essent  $E$  el valor definit a (4) i calculat amb la fig. 1.

## II. EXTRACCIÓ LÍQUID-LÍQUID O AMB DISSOLVENTS

### 1. DEFINICIONS, SELECTIVITAT, SELECCIÓ DEL DISSOLVENT

L'operació d'extracció líquid-líquid és una operació de transferència de massa en la qual una dissolució líquida, l'alimentació (F), es posa en contacte amb un segon líquid totalment o pràcticament immiscible, el dissolvent (s), escollit de manera que tingui preferència o afinitat pel component a extreure del primer, el solut. D'aquest contacte en resulten dos corrents o fases en equilibri: l'extracte E, que és la dissolució del dissolvent enriquit en solut, i el refinat R, que de fet és l'alimentació empobrida en el solut extret.

En general tant l'extracte com el refinat contenen els tres components: solut, diluent i dissolvent. El coeficient de distribució d'un component és la relació entre les concentracions del component a l'extracte i al refinat. Així, pel solut es pot posar

$$m_A = y_A / x_A$$

De la mateixa manera es pot escriure el coeficient de distribució de l'altre component, B,

$$m_B = y_B / x_B$$

La selectivitat es defineix per

$$a_{A/B} = m_A / m_B$$

Quant més gran sigui el valor d' $a_{A/B}$  (que ha d'ésser superior a 1), més efectiva és l'operació.

A més de considerar la selectivitat, l'elecció del solvent s'ha de fer tenint en compte altres consideracions: facilitat de regeneració, baixa miscibilitat, diferenciació de densitat, baixa tensió superficial, baixa viscositat i corrosivitat, baixa inflamabilitat i toxicitat, economia i facilitat d'aprovisionament.

A la taula 1 es donen indicacions útils quant a la selecció del dissolvent en funció del solut a extreure. A la taula s'indiquen els símbols (0), (+), (-) per tal de representar l'efecte del compost de la columna en l'augment de l'activitat dels components indicats a les files.

## 2. APLICACIONS

La separació de mescles líquides es realitza generalment millor per destil·lació que per altres mètodes. El recurs a l'extracció és obligat en el cas de separacions de components impossibles o difícils de tractar per destil·lació ordinària.

TAULA 1. Selecció de dissolvents  
(s'han d'escollir els que disminueixen l'activitat (-))

Grup	Solut	Dissolvent								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Àcid, OH aromàtic (fenol)	0	-	-	-	-	0	+	+	+
2	OH parafínic (alcohol) H <sub>2</sub> O imida o amida amb H actiu.	-	0	+	+	+	+	+	+	+
3	Cetona, nitrat aromàtic, amina terciària, piridina, fosfat trialquílic.	-	+	0	+	+	-	0	+	+
4	Èster, aldehyd, carbonat, fosfat, nitrit, nitrat, amida sense H actiu.	-	+	+	0	+	-	+	+	+
5	Èter, òxid, sulfur, sulfoxid, amina o imina primària i secundària	-	+	+	+	0	-	0	+	+
6	Multihalo - parafines amb H actiu	0	+	-	-	-	0	0	+	0
7	Aromàtics, id halogenats, olefines.	+	+	0	+	0	0	0	0	0
8	Parafines	+	+	+	+	+	+	0	0	0
9	Monohalo - parafines o olefines	+	+	+	+	+	0	0	+	0

Exemples típics són :

Separació de mescles de components que tinguin punts d'ebullició molt pròxims, com és el cas dels isòmers.

Separació de materials que siguin molt sensibles a la calor, com per exemple els antibiòtics.

Recuperació de components que no siguin volàtils, com és el cas de processos de metal·lúrgia extractiva.

Separació de productes orgànics de corrents d'aigua.

Altres aplicacions més específiques que es poden enunciar són :

- Recuperació de materials actius de brous de fermentació.
- Purificació de productes vitamínics .
- Separació d'olefines i parafines.

- Separació d'isòmers estructurals.
- Descafeïnització del cafè i te.
- Separació d'olis essencials (sabors i fragàncies).

### 3. INSTAL·LACIONS I APARELLS

Les extraccions poden ésser d'una etapa o de moltes etapes ; de contacte per etapes físiques o en contacte continu (figs. 1 i 2).

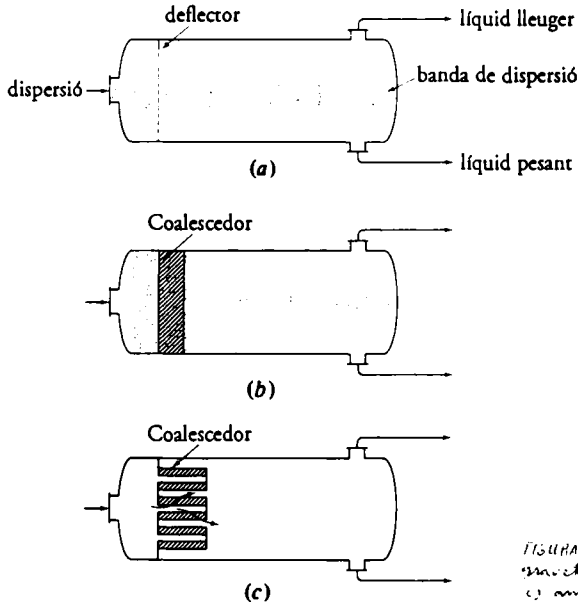


FIGURA  
muvet  
c) am

FIGURA 1. Decantador per gravetat: a) simple; b) i c) amb coalescedor

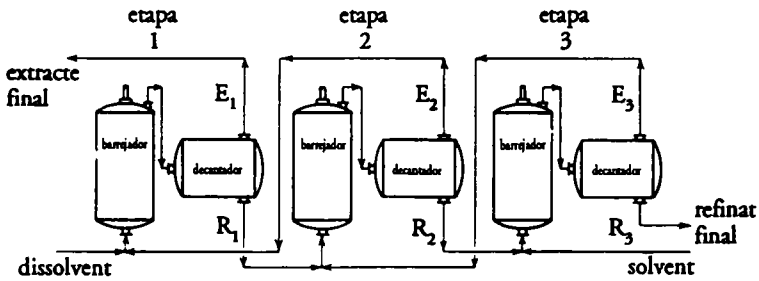


FIGURA 2. Cascada de 3 etapes en contracorrent

Una etapa pot estar constituïda per mescladors o tancs agitats, combinats amb un decantador. En el barrejador un dels líquids, la fase dispersa, forma gotes que es dispersen en l'altre, la fase contínua. S'han d'aconseguir gotes prou petites per tal d'obtenir una àrea de contacte suficient, però no tant que després s'hagi de prolongar massa el temps de decantació (figs. 3 i 4).

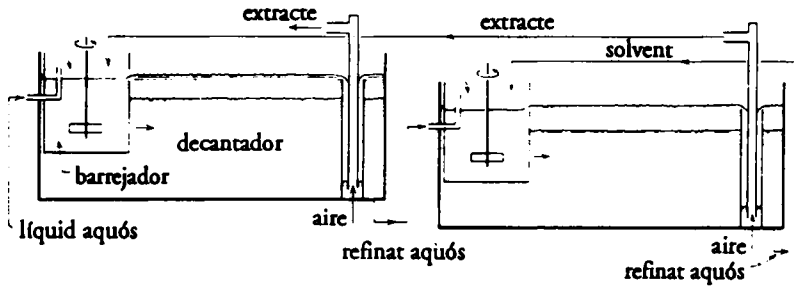


FIGURA 3. Extractor d'urani refinat aquós

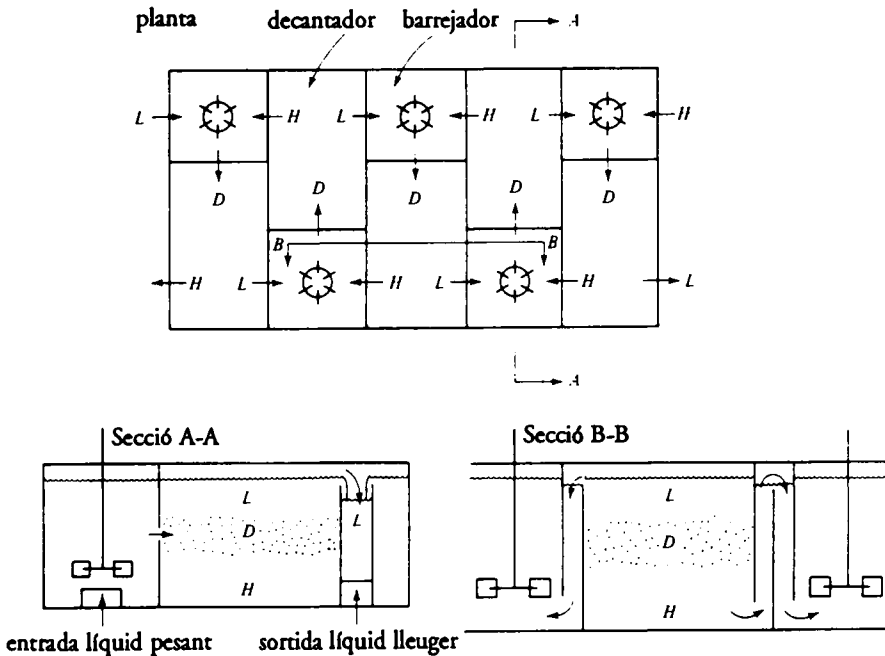


FIGURA 4. Barrejador-decantador tipus caixa. D: dispersió; H: líquid pesant; L: líquid lleuger

En els processos d'etapa múltiple es poden combinar diversos equips com els descrits, formant una bateria d'extractors. També es poden utilitzar torres d'extracció de diferents dissenys.

Les torres de polvorització (fig. 5) consisteixen essencialment en un recipient cilíndric buit alimentat per les solucions pesada i lleugera introduïdes per la part superior i inferior, respectivament.

Una d'elles és la fase dispersa i l'altra la contínua.

Les torres de rebliment (fig. 6) són com les anteriors, però contenen sòlids escollits de manera que quedin mullats per la fase contínua. Així la

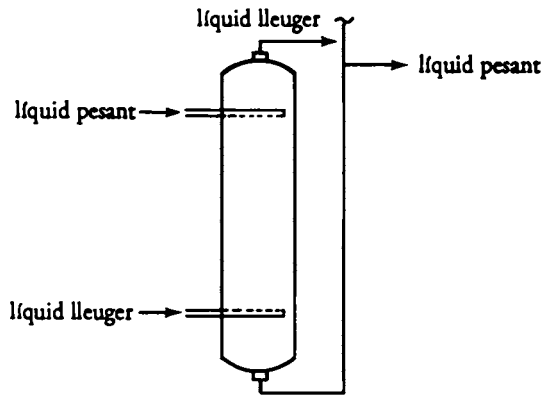


FIGURA 5. Torre de polvorització

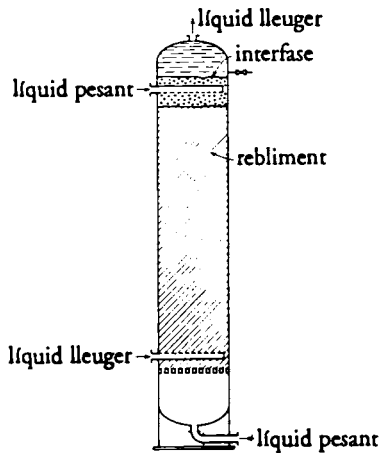


FIGURA 6. Torre de rebliment amb líquid lleuger dispers



ceràmica es mulla preferentment per les solucions aquoses, mentre que el grafit i els plàstics, es mullen preferentment per les solucions orgàniques. Com en el cas de l'absorció, la grandària del rebliment no ha de superar un octau del diàmetre de la columna.

En les columnes de plats perforats (fig. 7), la dispersió d'una de les fases s'aconsegueix en fer-la passar per les perforacions dels plats; per altra banda les torres són similars a les de destil·lació.

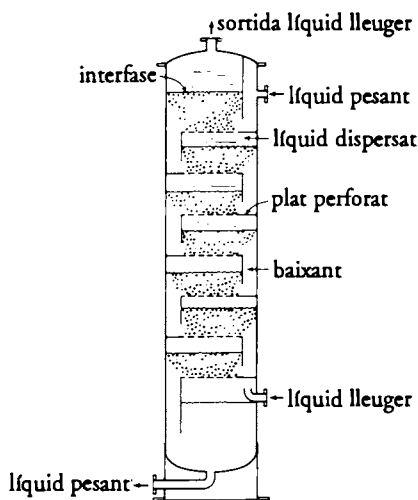


FIGURA 7. Torre d'extracció de plats perforats

Les torres agitades (figs. 8 i 9) porten un eix central rotatiu, proveït de turbines de paletes planes, distribuïdes al llarg de la torre, a la paret de la qual uns deflectors faciliten la dispersió. També poden portar discs que giren arrossegats per l'eix entre anells fixats a la paret.

Les columnes pulsades (fig. 10) poden ésser de plats perforats o de rebliment. Al líquid se li dóna un moviment de curta amplitud que força el seu pas per les perforacions o pel rebliment.

L'extractor de Podbielniak (fig. 11) és un tambor cilíndric constituït per les capes concèntriques foradades, que gira al voltant d'un eix horitzontal, a raó de dos a cinc-mil revolucions per minut. Els líquids s'alimenten per l'eix, conduint el pesant al centre i el lleuger a la perifèria. El pesant flueix aleshores cap a fora, desplaçant el lleuger que avança cap al centre.

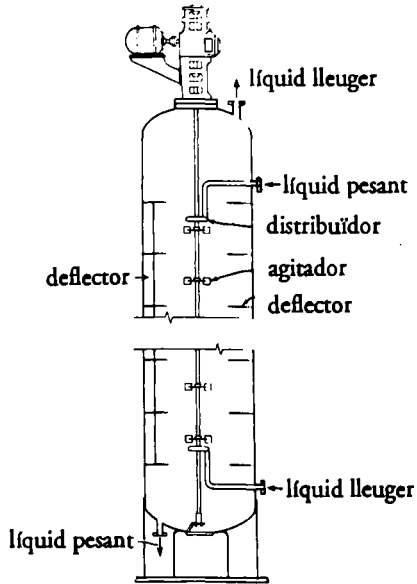


FIGURA 8. Torre agitada

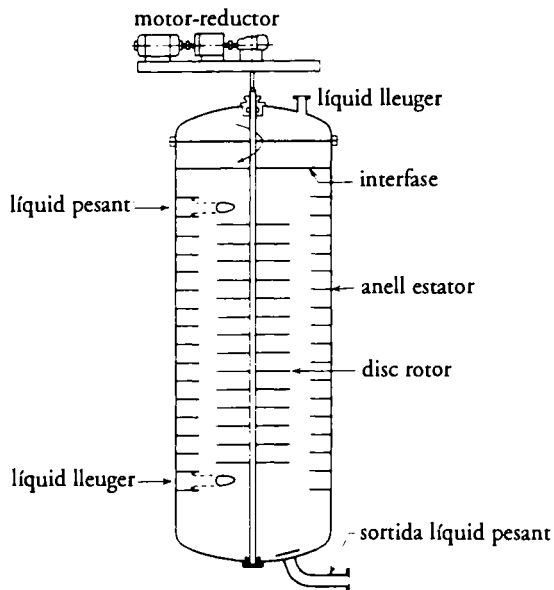


FIGURA 9. Torre de disc rotatiu

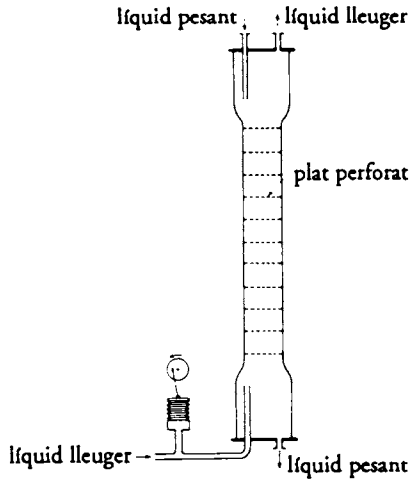


FIGURA 10. Torre polsant

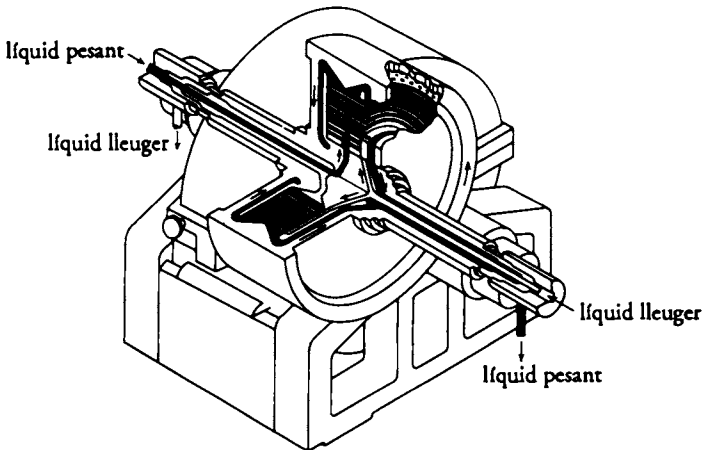


FIGURA 11. Extractor centrífug de Podbielniak

#### 4. EQUILIBRI I COORDENADES

El sistema físic de l'extracció està constituït per tres components, A, B i C. L'alimentació en té dos que es designaran per A i B, essent l'A el solut a extreure i B el diluent. El component C és bàsicament el dissolvent afegit

per a extreure el solut A. Es designa per  $x$  i  $y$  la fracció màssica del solut A en el refinat i en l'extracte, respectivament.

Per  $X$  i  $Y$  es designen les mateixes composicions lliures de dissolvent, és a dir,  $A/(A+B)$  en el refinat i extracte, respectivament. La coordenada  $N$  és  $C/(A+B)$ .

El sistema gràfic bàsic és el triangular (ja que els components són tres).

Qualsevol punt interior d'un triangle equilàter té la propietat que la suma de les seves distàncies als costats és sempre igual a l'altura del triangle.

Per tant ,

$$x_A + x_B + x_C = 1$$

i totes les mescles possibles queden representades per un punt del triangle. Els vèrtexs representen els components purs, A, B, C. Els costats contenen totes les mescles binàries possibles.

Per tal de facilitar la lectura de composicions és preferible prendre com a unitat no l'alçada, sinó el costat. A la figura 12 el punt  $M$  té la composició  $x_A, x_B, x_C$ , indicada de manera que la lectura pot fer-se en qualsevol costat traçant paral·leles als tres costats per  $M$ . Dels tres segments en què cada costat queda dividit, el central representa la composició del component

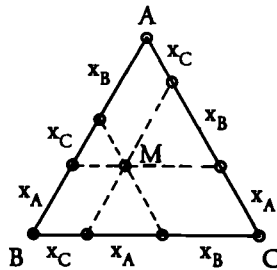


FIGURA 12.

corresponent al vèrtex oposat. Els altres dos corresponen al component de l'altre extrem del mateix costat, tal com s'indica a la figura.

El diagrama té propietats quantitatives. Si  $m_p$  kg de composició representada per  $P$  es barregen amb  $m_Q$  kg de  $Q$ , la mescla dels  $(m_p+m_Q)$  kg tenen composició  $M$ , punt situat en el segment  $PQ$  i tal que (fig. 13)

$$\frac{\overline{MP}}{\overline{MQ}} = \frac{m_Q}{m_p} \quad (1)$$

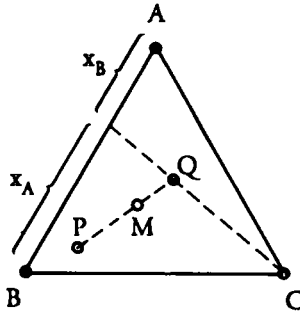


FIGURA 13.

El punt Q, per exemple, conté determinades proporcions d'A, B i C. Si se n'elimina el dissolvent C, o es desitja conèixer la seva composició lliure de solvent, és a dir, el valor de  $X_A$ , es projecta des de C, tal com s'indica a la figura.

En aquestes coordenades poden representar-se els sistemes físics caracteritzats perquè formen fases líquides separades en certa regió del triangle. S'empren els sistemes denominats de classe I i de classe II (fig. 14). Les mescles de composició global que correspongui a un punt de l'interior de les zones ratllades, es desdoblen en dues fases líquides de diferent

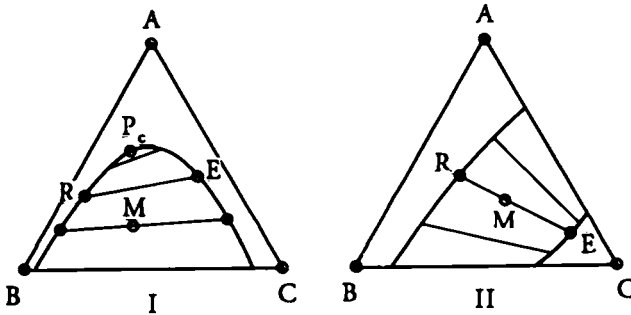


FIGURA 14.

composició; així el punt M es desdobla en R i E situats als extrems d'una recta que passa per M i que s'anomena recta d'enllaç, i en unes corbes determinades empíricament. La corba dels refinats (R) són pobres en dissolvent i riques en diluent (B). La corba dels extractes (E) són riques en dissolvent.

En els sistemes de la classe II, ambdues corbes estan separades. En els sistemes de classe I conflueixen en un punt  $P_C$ , anomenat punt crític o de plegament.

L'equilibri és funció de la temperatura, de manera que la posició de les corbes, la disposició de les línies d'enllaç i fins el tipus I o II pot variar d'una temperatura a una altra.

Les rectes d'enllaç poden traçar-se fàcilment si es coneix la funció d' $y_A$  envers  $x_A$ , tal com es representa a la fig. 15

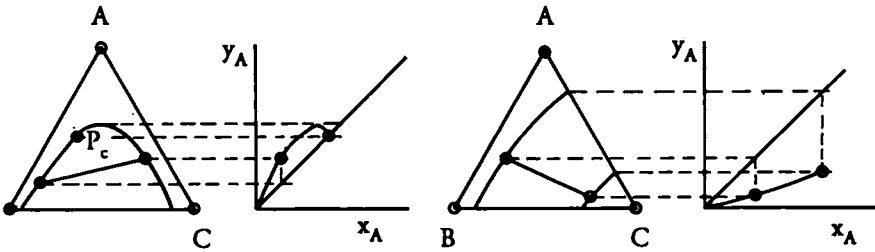


FIGURA 15.

A part d'aquests sistemes de representació poden utilitzar-se triangles rectangles, i coordenades especials, tals com representar com a abscisses els valors de  $X$  i  $Y$ , calculats per  $kgA/(kgA + kgB)$ , tant de la fase  $R$  com de la fase  $E$  i com a ordenades el valor de  $N = kgC/(kgA + kgB)$ . Vegeu la fig. 16.

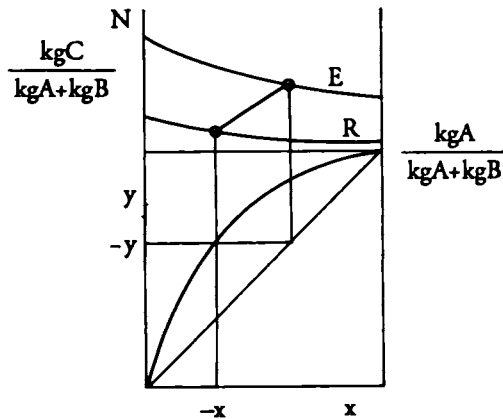


FIGURA 16.

En el cas de líquids insolubles resulta més adient definir com a coordenades el valor de

$$x = \frac{\text{kgA}}{\text{kgB}} ; y = \frac{\text{kgA}}{\text{kgC}} \quad (\text{de vegades, en comptes del kg/kg s'emptra kg/m}^3).$$

## 5. SISTEMES DE CONTACTE

Les separacions físiques es realitzen amb l'equip descrit a l'apartat 3. Però els estudis teòrics pressuposen que els contactes entre fases i les separacions entre elles constitueixen etapes ideals, en el sentit que les fases que surten de cada etapa es troben en equilibri. El rendiment o eficàcia d'una etapa real o física permet relacionar-la amb l'etapa ideal.

### 5.1. Etapa única

És el cas d'extracció més simple: una barreja F de solut A amb B s'extreu amb dissolvent S, ric en C, però que pot tenir petites quantitats d'A i B. El balanç global és:

$$S + F = M = E_1 + R_1 \quad (2)$$

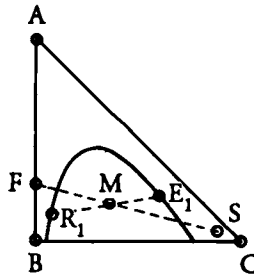
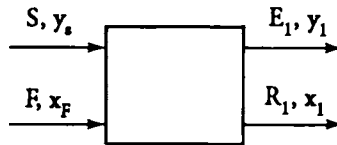


FIGURA 17.

El punt de barreja, M, es troba en el segment FS, i se situa d'acord amb l'Eq. (1). Pel punt M hi passa una recta d'enllaç, la  $E_1 R_1$  que permet trobar l'extracte  $E_1$  i el refinat  $R_1$ , així com les seves proporcions, aplicant al segment  $E_1 R_1$  la relació (1).

### Exemple 1.

Una barreja de 40% d'àcid acètic en aigua s'ha de separar amb èter isopropilic. A 1 kg de barreja inicial s'afegeix 1 kg d'èter. Suposant conegut l'equilibri (figura), volem calcular la quantitat i la composició de les dues fraccions.

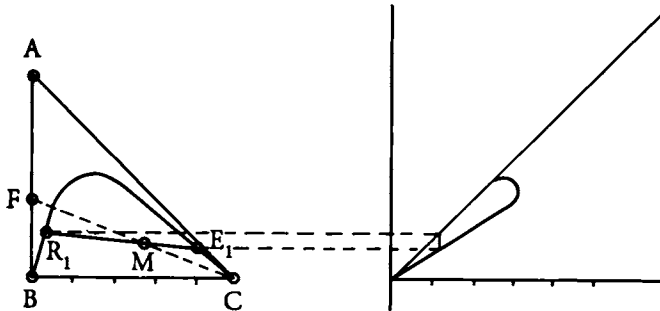


FIGURA E.1.

### Solució:

$A = \text{Ac. acètic}$

$B = \text{H}_2\text{O}$

$C = \text{Èter}$

El punt F representa la barreja d'àcid acètic + aigua al 40%.

El punt M es troba a la meitat d'FC.

La recta d'enllaç que passa per M s'ha de dibuixar per temptaig.

Les relacions quantitatives que es poden escriure són:

$$M = S + F = 1 + 1 = 2\text{kg} = R + E$$

$$(x)_M = 0,2$$

$$y = 0,16$$

$$x = 0,25 \quad 2 \cdot 0,2 = R \cdot 0,25 + E \cdot 0,16$$

$E = 1,11 \text{ kg amb un } 16\% \text{ d'acètic}$

$R = 0,89 \text{ kg amb un } 25\% \text{ d'acètic}$



## 5.2. Flux creuat; cas de líquids insolubles

El model consisteix en una repetició de l'anterior, barrejant el refinat de cada etapa amb nou dissolvent, i recollint tots els extractes.

Quan els líquids són insolubles, que és el cas més interessant, designant per  $x$  i per  $y$ , respectivament, les concentracions de solut a les dues fases, a l'etapa  $i$ -èsima es pot escriure:

$$F x_{i-1} + S_i y_s = F x_i + D_i y_i \quad (3)$$

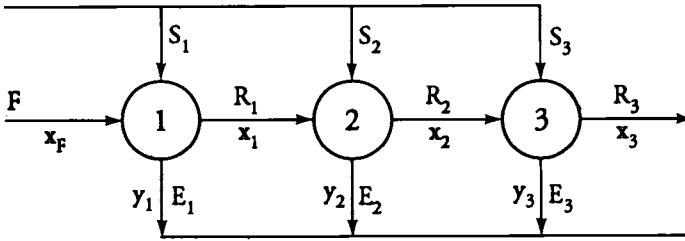


FIGURA 18

és a dir, ordenant,

$$-\frac{F}{S_i} = \frac{y_s - y_i}{x_{i-1} - x_i}$$

que és l'equació d'una recta de pendent  $(-F/S_i)$  que dona lloc al traçat de la figura 19.

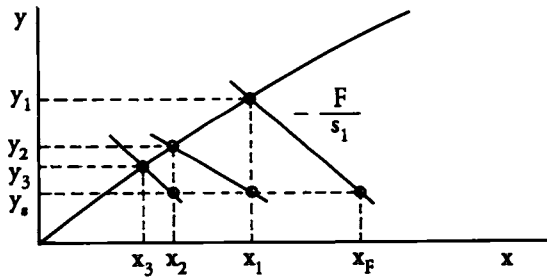


FIGURA 19.

Pel punt  $(x_F, y_s)$  es dibuixa la recta de pendent  $(-F/S_1)$ , que talla la corba d'equilibri en el punt  $(x_1, y_1)$ , composicions del refinat i extracte de la primera etapa. Amb el valor d' $x_1$  i  $y_s$  es dibuixa una recta, etc.

### Exemple 2.

Es vol extreure la nicotina (A) d'una dissolució d'aquesta en aigua (B) a l'1 per cent, mitjançant querosè (C) a 20 °C com a agent d'extracció, escollit perquè ell i l'aigua són mutuament insolubles.

a) Determineu l'extracció percentual de nicotina si es tracten, en una sola etapa, 100 kg de solució amb 150 kg de dissolvent.

b) Repetiu els càlculs amb una bateria d'extracció de 3 etapes en flux creuat, utilitzant 50 kg de dissolvent en cada etapa.

Les dades de l'equilibri són:

$x$ = grams de nicotina/kg $H_2O$ :	0	1	2,5	5	7,5	10	20,4
$y$ = grams de nicotina/kg querosè :	0	0,8	2,0	4,6	6,9	9	18,7

### Solució:

Les dades de l'equilibri es representaran com a la figura 19. En aquesta, però, el valor de  $y_s = 0$ , perquè el querosè no conté gens de nicotina. I les rectes de pendent  $(-F/S)$  són paral·leles, perquè la quantitat de querosè emprat en cada etapa és constant.

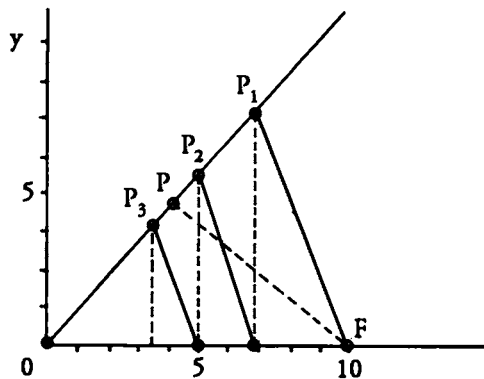


FIGURA E.2.

a) Partint de 100 kg de solució,  $F = 99$  kg i  $S = 150$  kg. Per tant,

$$-\frac{F}{S} = \frac{-99}{150} = -0,66$$

El punt  $F$  té el valor

$$x_F = \frac{1000}{99} = 10,1 \text{ g/kg}$$

La recta de pendent  $-0,66$ , talla la corba d'equilibri en el punt  $P$

$$x_1 = 4,25$$

$$y_1 = 3,8$$

L'aigua inicial, amb 10,1 g de nicotina per kg, passa a tenir 4,25 g/kg. Per tant, l'extracció percentual és:

$$\frac{10,1 - 4,25}{10,1} = 0,58 \text{ o un } 58\%$$

b) Quan es fan tres extraccions amb  $S = 50$  kg de querosè en cadascuna,

$$-\frac{F}{S} = \frac{-99}{50} = -1,98$$

Des d' $F$  es traça la recta d'aquesta pendent que talla la corba d'equilibri en  $P_1$ , aproximadament a 7 g/kg; una paral·lela per aquest punt, torna a tallar en  $P_2$  i finalment en  $P_3$  amb un valor de  $x_3$  de 3,4 g per kg.

La recuperació de nicotina és ara de

$$\frac{10,1 - 3,4}{10,1} = 0,663; \text{ és a dir, del } 66,3\%$$

### 5.3. Bateria d'extraccions a contracorrent

En el cas de bateria d'extractors alimentada per un extrem amb  $F$  i per solvent fresc  $S$ , per l'altre, la disposició pot representar-se per la figura 20, però pot tractar-se de torres de plats o agitades, etc.

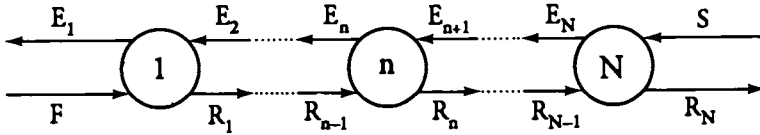


FIGURA 20.

El balanç global és:

$$F+S = M = R_N + E_1 \quad (4)$$

El punt de barreja  $M$  es troba en la recta  $FS$ , situat d'acord amb les quantitats relatives de solvent i alimentació. El punt  $M$  també es troba en el segment  $R_N - E_1$ . Per tant, conegut (o fixat) el refinat (o l'extracte) final, queda determinat l'altre (fig. 21).

Un cop fixats els quatre punts  $F$ ,  $S$ ,  $E_1$  i  $R_N$ , el balanç general entre qual-sevol grup d'etapes és:

$$P = F - E_1 = R_N - E_{n+1} = R_N - S \quad (5)$$

relacions que permeten trobar un punt  $P$  com intersecció de les rectes  $FE_1$  i  $SR_N$ , punt que té la propietat (d'acord amb (5)) d'alinejar  $R_n$  i  $E_{n+1}$ .

Aquesta propietat, juntament amb la condició que les etapes són d'equilibri, permet calcular el nombre d'etapes necessàries per la separació especificada.

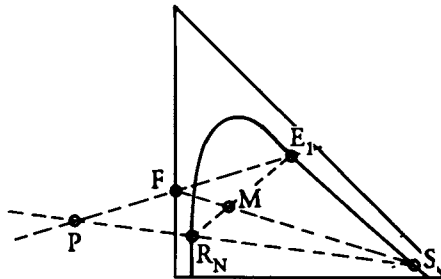


FIGURA 21.

A partir d' $E_1$  es determina  $R_1$  traçant la recta d'enllaç  $E_1R_1$ . La unió d' $R_1$  amb  $P$  talla a la corba en  $E_2$ . Amb un procés iteratiu, es van determinant  $R_2$ ,  $R_3$ , etc., fins a arribar al punt  $R_N$  prefixat. Cada recta d'enllaç és una etapa ideal, i així es determina el nombre d'etapes necessàries.

En el cas de líquids insolubles es poden utilitzar les coordenades definides a l'apartat 5.2 i establir una equació de balanç, que en el cas de solucions diluïdes es:

$$F(x - x_F) = S(y - y_1)$$

o bé

$$y = \frac{F}{S}x + y_1 - \frac{F}{S}x_F$$

Amb aquesta recta i la corba d'equilibri es pot fer la construcció de McCabe-Thiele per tal de determinar el nombre d'etapes.

Si, a més, la relació d'equilibri és lineal, de pendent  $m$ , es pot fer ús de l'equació de Kremser:

$$N = \frac{\log \left[ \frac{x_F - y_s/m}{x_N - y_s/m} \left(1 - \frac{1}{E}\right) + \frac{1}{E} \right]}{\log E} \quad (6)$$

on  $E$  és el factor d'extracció

$$E = m \frac{S}{F} \quad (7)$$

La fig. 22 facilita l'aplicació de l'equació anterior. En ella l'ordenada és la fracció extreta,  $x_N/x_F$  (si  $y_S = 0$ ).

En general, el procés d'extracció ha de fer-se amb un factor d'extracció mínim d'1,3. Per sota d'aquest valor, el nombre d'etapes es fa excessiu.

### **Exemple 3.**

*Una aigua residual conté fenol en la proporció de 1000 ppm. Per tal de poder-la llençar, aquest contingut s'ha de deixar a 1 ppm. Escolliu el solvent més adient entre els cinc proposats:*

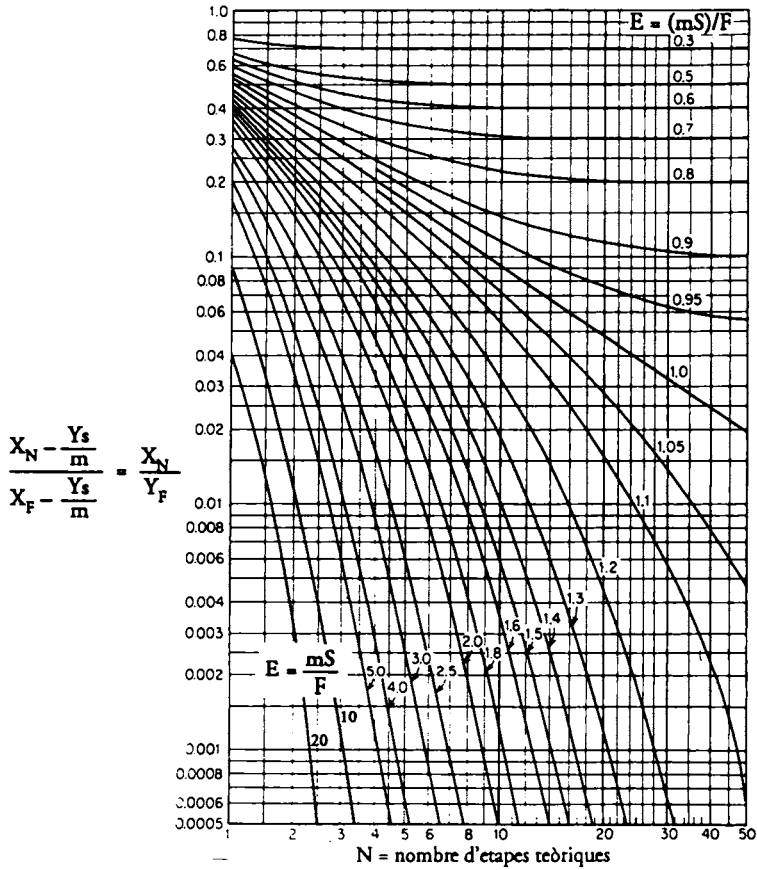


FIGURA 22. Expressió gràfica de l'equació de Kremser

Solvent	P.E.(°C)	m	Solubilitat H <sub>2</sub> O%
Toluè	110,1	1,97	0,05
Benzè	80,3	2,30	0,178
Isopropil-èter	68,5	29	0,90
Acetat N-butil	126,2	71	1,20
MIBK	116,6	80	2,70

**Solució:**

$$\text{El valor de } \frac{x_N}{x_F} = \frac{1}{1000} = 0,001$$

A la figura de l'equació de Kremser, es llegeix:

$$\begin{array}{ll} E = 1,3 & n > 20 \\ E = 1,5 & n \approx 15 \\ E = 2 & n = 9,2 \end{array}$$

Prendrem  $E = 2$  i en (E.7), amb  $F = 100$  kg/h

$$S = E \frac{F}{m} = 2 \frac{100}{m}, \text{ i per cada dissolvent es calcula}$$

Toluè: 101,5 kg/h  
Benzè: 86,9  
IPE: 6,9  
NBA: 2,8  
MIBK: 2,5

Per tant, els dos últims són els més adients. S'ha de tenir en compte, però, que tant la solubilitat com el punt d'ebullició també són importants.

Si la solubilitat és gran, s'haurà d'emprar més energia per tal d'eliminar el solvent de l'aigua abans de descarregar-la. El punt d'ebullició del dissolvent, d'altra banda, ha d'ésser prou diferent del punt d'ebullició del solut, per tal de poder-los separar fàcilment per destil·lació. En aquest cas, el fenol té un P.E. de 182 °C.

#### 5.4. Operacions amb reflux

En el cas de sistemes de la classe II pot ésser útil emprar un reflux en la cascada.

El sistema de càlcul és com el de Ponchon-Savarit per la destil·lació; en un diagrama com el de la figura 5, la quantitat de solvent per unitat de dissolució fa el paper de l'entalpia en els diagrames de destil·lació.

L'alimentació de la barreja a separar té lloc en un plat intermedi. L'extracte final  $E_1$  va a un separador de solvent (anàleg al condensador), i s'obté el producte E, part del qual, designat per  $R_0$ , torna a la columna com a reflux. El solvent separat s'injecta a la columna pel fons, d'on surt el refinat final R (fig. 23).

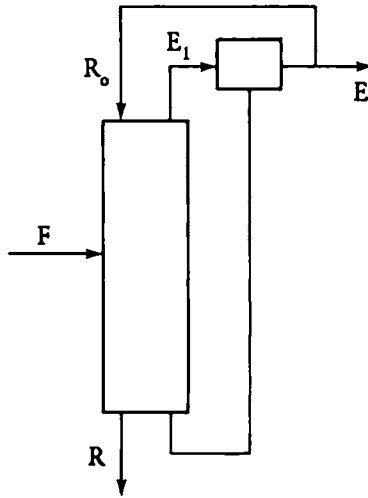


FIGURA 23.

### 5.5. Extraccions amb dos dissolvents

Si en la barreja a separar poden trobar-se dos dissolvents mutuament immiscibles, que presentin afinitats selectives contraposades per cadascún dels components, pot ésser útil la disposició de la figura 24.

L'alimentació entra en una etapa intermèdia. Per un extrem de la cascada s'alimenta un dels solvents  $S_1$ , per exemple, el que té afinitat per l'A, i, per l'altre extrem, el solvent 2, que té afinitat pel B.

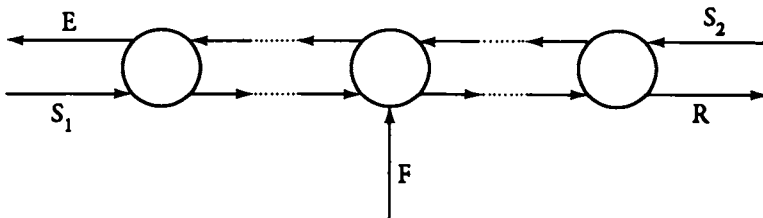


FIGURA 24.

Per un extrem sortirà un producte E, constituït per  $S_2$  amb molt de B i poc d'A; i per l'altre extrem, un producte R ric en A i pobre en B, dissolts en  $S_2$ .



Les quantitats relatives dels solvents s'han d'escollir adequadament, tenint en compte els coeficients d'afinitat pels components.

#### Exemple 4.

Els isòmers *p*- i *o*-cloronitrobenzè se separen mitjançant dos dissolvents mútuament insolubles: heptà i metanol aquós, que presenten afinitats preferents respectivament a cada isòmer. Es designarà com A l'isòmer para ; B, l'orto;  $S_1$ , l'heptà i  $S_2$  el metanol; E, els extractes rics en  $S_1$ ; R, els refinats, rics en  $S_2$ .

Les coordenades de l'extracte  $y_A$  i  $y_B$  són els kg d'A o B per  $m^3$  d' $S_1$ ; les del refinat, són, respectivament,  $x_A$  i  $x_B$  en kg per  $m^3$  d' $S_2$ .

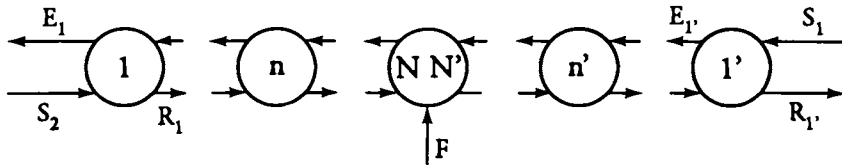
Els coeficients de distribució (equilibri) són:  $y_A = 1,1 x_A$ ;  $y_B = 0,68 x_B$ .

L'alimentació té per composició 40% d'A i 60% de B, i el cabal és de 5 kg/h. Els cabals d' $S_1$  i  $S_2$  són, respectivament,  $0,18 m^3/h$  i  $0,15 m^3/h$ .

S'ha de calcular el nombre d'etapes teòriques i la posició de l'alimentació si es volen obtenir un extracte i un refinat finals, la composició dels quals, un cop deslliurats de solvent, sigui de 80% d'A i 20% de B i de 10% d'A i 90% de B, respectivament.

#### Solució:

Les etapes es numeren començant pels dos extrems, com s'indica a l'esquema:



$$\text{Balanç global en A} \quad 5 \cdot 0,4 = 0,18 y_{A1} + 0,15 x_{A1}$$

$$\text{Balanç global en B} \quad 5 \cdot 0,6 = 0,18 y_{B1'} + 0,15 x_{B1'}$$

Especificacions

$$\frac{y_{A1}}{y_{B1}} = 4$$

$$\frac{y_{A1'}}{y_{B1'}} = 9$$

$$\left. \begin{array}{l} x_{A1} = 1,89 \\ x_{B1'} = 17,01 \\ y_{A1} = 9,53 \\ y_{B1'} = 2,38 \end{array} \right\}$$

Balanços generals:

$$\text{en A, part esquerra} \quad S_1 y_{An+1} = S_2 x_{An} + S_1 9,53; \quad y_{An+1} = 0,833 x_{An} + 9,53 \quad (1)$$

$$\text{en A, part dreta} \quad S_2 x_{An'+1} = S_1 y_{An'} + S_2 1,89; \quad y_{An'} = 0,833 x_{An'+1} - 1,57 \quad (2)$$

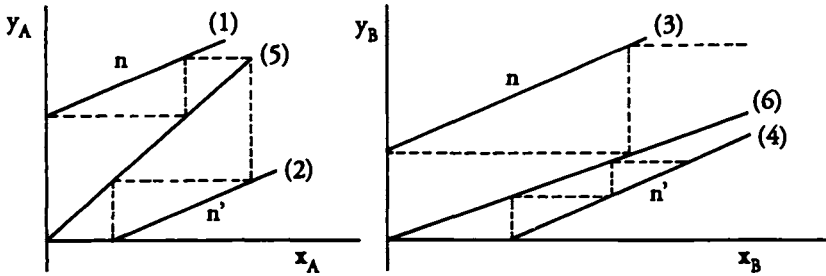
en B, part esquerra  $S_1 y_{B_{n+1}} = S_2 x_{B_n} + S_1 2,38; y_{B_{n+1}} = 0,833 x_{B_n} + 2,38$  (3)

en B, part dreta  $S_2 x_{B_{n+1}} = S_1 y_{B_n} + S_2 17,01; y_{B_n} = 0,833 x_{B_{n+1}} - 14,18$  (4)

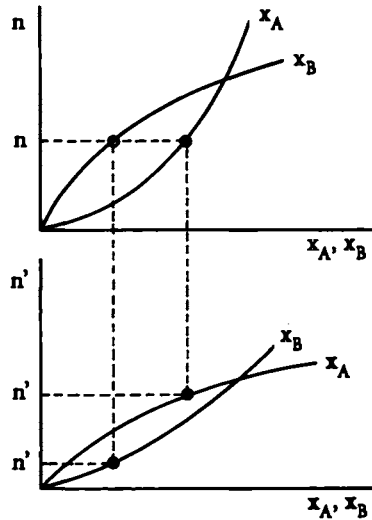
Equilibri:  $y_A = 1,10 x_A$  (5)

$y_B = 0,68 x_B$  (6)

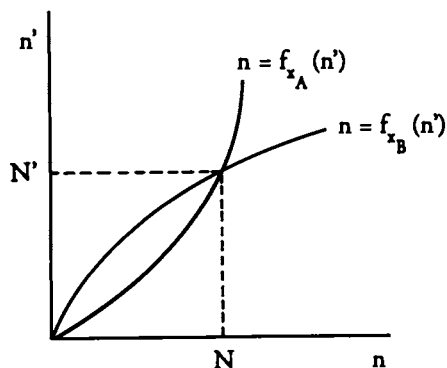
Arribats aquí, la resolució es fa gràficament. Primer es representen separatament els sistemes  $(y_A, x_A)$  i  $(y_B, x_B)$ , representant les equacions (1), (2) i (5), en el primer, i les (3), (4) i (6) en el segon:



Es fa la construcció de plats que permet determinar els valors d' $n$  en funció dels  $x_A$  i  $x_B$  d'una banda; i d' $n'$  en funció dels mateixos, de l'altra, i que permeten la representació següent:



A partir de les representacions anteriors es pot representar  $n$  en funció d' $n'$  de dues formes diferents: una deduïda de les corbes  $(x_A)$  i l'altra de les  $(x_B)$ .



La intersecció d'ambdues permet trobar la solució  $N$  i  $N'$ . El nombre total d'etapes és, evidentment,  $N+N'-1$ .

## 5.6. Extracció reactiva

Fins ara, tots els tipus d'extracció considerats es fonamentaven en la relació d'equilibri i el coeficient de distribució. Altres processos d'extracció es basen en la reacció química, que pot ésser reversible o irreversible.

En el cas de reaccions irreversibles, es produeix una nova espècie química en una dispersió líquid-líquid heterogènia. Exemples típics són: la nitració i la sulfuració d'aromàtics; l'alquilació d'hidrocarburs per tal d'augmentar l'índex d'octà; l'hidròlisi de greixos per tal d'obtenir àcids grassos i glicerina, en la fabricació del sabó. La semblança d'aquests processos amb l'extracció resideix solament en la disposició dels contactes.

En les reaccions reversibles, la semblança és més pròxima, ja que en elles s'ha de recuperar el solut. Exemples típics són: separació del sulfur de carbonil i del sulfur d'hidrogen dels GLP; recuperació dels àcids fórmic i acètic de solucions aquoses mitjançant fosfat de tributil, extracció de coure, níquel, cobalt, urani i altres metalls de solucions aquoses.

En el disseny d'aquests sistemes, l'extracció reactiva obliga a considerar un factor addicional, en comparació amb l'extracció física: la cinètica de la reacció. Molt sovint, el temps de residència pot ésser el factor controlant de les dimensions del reactor.

### 5.7. Eficàcia o rendiment d'etapa

Les etapes considerades en els plantejaments teòrics del disseny són, tal com ja s'ha dit, etapes d'equilibri. Les etapes reals posen diferències importants respecte a les d'equilibri: primer, el temps de contacte no pot ésser gaire llarg, si es volen tenir produccions tangibles; les dispersions han de fer-se de manera que s'evitin les emulsions, i que sigui relativament fàcil la coalescència de les gotes de la fase dispersa.

En general el rendiment d'etapa s'ha de determinar empíricament, per experiències en planta pilot, o a partir d'informació prèvia. En el cas dels mescladors-decantadors ben dissenyats, no és inversemblant un valor de 0,8 a 0,9 com a rendiment d'etapa.

### BIBLIOGRAFIA:

- R.E. TREYBAL. *Mass-Transfer Operations*, 3<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill Book. Nova York (1980).
- W. L. McCABE, J.C. SMITH, P. HARRIOT. *Unit Operations of Chemical Engineering*, 4<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill Book. Nova York (1985).
- PERRY'S *Chemical Engineer's Handbook*, 6<sup>a</sup> ed. McGraw-Hill Book. Nova York (1984).

# FILTRACIÓ

*Luis Puigjaner\**

## 1. INTRODUCCIÓ

Podem definir la filtració com aquella operació bàsica on un fluid format per una mescla de sòlids i líquids passa a través d'un medi porós on es dipositen els sòlids, deixant passar el líquid. Els sòlids formen un *tortó* a la superfície del medi, mentre que el líquid clarificat o *filtrat* es descarrega. Si es desitja la recuperació dels sòlids, el procés s'anomena *filtració*. S'aplica el terme *clarificació* quan els sòlids no excedeixen de l'1,0% i el producte primari és el filtrat.

La retenció de partícules pel filtre pot tenir lloc essencialment de dues maneres:

a) Per una acció de tamisatge, on les partícules són més grans que els porus del filtre, i el sòlid queda retingut a la superfície del medi filtrant, acumulant-se eventualment, per formar una capa espessa.

b) Per una acció de retenció de les partícules al fons del filtre. En aquest cas, les partícules són sempre menors que la mida mitjana dels buits del medi filtrant, a través del qual passa el fluid.

El mecanisme de tamisatge d'un filtre s'explica per si mateix, mentre que l'acció de retenció només pot ésser explicada per forces de Van der Waals o electrostàtiques, que només actuen a curta distància. El mecanisme pel qual les partícules en suspensió s'aproximen a la superfície sòlida del medi filtrant pot ésser divers. Per a partícules inferiors a la micra ( $1\mu\text{m}$ ), la difusió sembla el mecanisme controlant; però si les partícules són majors de  $20\mu\text{m}$ , les forces d'inèrcia i gravetat superen les de difusió. Aleshores, les partícules poden ésser capturades per impacte, en xocar amb una fibra del

---

\* *Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

filtre o per inèrcia, en travessar els filets del fluid fins tocar les fibres de la superfície del medi filtrant.

Al segon tipus de filtració, que s'utilitza exclusivament per a eliminar petites quantitats de contaminants de volums relativament grans de líquid, el medi filtrant està constituït per matèria sòlida disposada de manera que la trajectòria del líquid és llarga en comparació amb la mida de les partícules a separar. Un cas especial d'aquest tipus de filtració és l'anomenada filtració laminar, on el material a clarificar es passa a través d'un empaquetament que consisteix, comunament, en una mescla de fibres d'asbest immerses en cel·lulosa.

## 2. FONAMENTS DE LA SEPARACIÓ MECÀNICA SÒLID-LÍQUID

Els factors que modifiquen la velocitat de filtració depenen essencialment de les característiques del procés. La separació mecànica sòlid-líquid que té lloc al procés de filtració correspon a dos tipus de fenòmens que descrivim a continuació.

A la filtració pròpiament dita, el líquid passa a través d'un medi filtrant porós (tela, tamís, etc.) mentre que les partícules sòlides romanen a la superfície del medi formant una capa anomenada **tortó** (fig. 1).

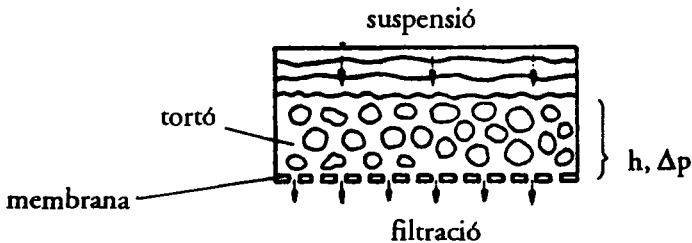


FIGURA 1. Diagrama del procés de filtració

Els paràmetres característics que afecten la velocitat de filtració són fonamentalment la caiguda de pressió,  $\Delta p$ , i la resistència del filtre representada per  $h$ , l'altura total del tortó més la membrana.

Entre les aplicacions més freqüents d'aquest tipus de filtrat es troba el filtre premsa, el filtre de buit, el filtre a pressió i determinades classes de centrífugues.

Un altre mecanisme de separació de sòlids totalment diferent és l'indicat a la fig. 2, anomenat *sedimentació*.

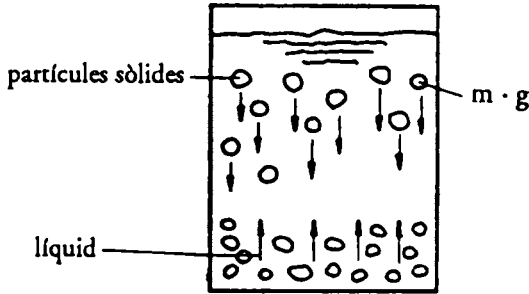


FIGURA 2. Diagrama del procés de sedimentació

En aquest procés, les partícules sòlides es dipositen sobre una superfície impermeable, mentre que el líquid es desplaça cap amunt. Aquest fenomen té lloc sempre que la densitat de les partícules sòlides sigui superior a la del líquid. La velocitat de sedimentació dependrà de la massa de partícules i la seva acceleració.

Les aplicacions pràctiques d'aquest mecanisme de separació són: tancs de sedimentació, espessidors i determinats tipus de centrífuges.

## 2.1. Teoria de la filtració

### *Equació fonamental*

El fonament teòric del procés de filtració pot comparar-se al de transferència de calor. En ambdós casos poden establir-se les següents relacions:

D'una part, la velocitat de transferència d'una certa quantitat de filtrat  $Q_F$  és directament proporcional a la força impulsora  $P$  i inversament proporcional a la resistència del medi filtrant  $W$ .

$$Q_F \approx \frac{P}{W} \quad (1)$$

A més, la resistència  $W$  és proporcional a la longitud  $l$  del camí de transferència i inversament proporcional a l'àrea de la secció transversal de filtrat  $F$ , o sigui

$$W \approx \frac{1}{F} \quad (2)$$

de les equacions (1) i (2) es dedueix que

$$Q_F = C \cdot \frac{P \cdot F}{l} \quad (3)$$

on s'ha introduït la constant de proporcionalitat  $C$ .

La quantitat de partícules sòlides separades per unitat de temps serà:

$$\frac{dQ_F}{dt} = \frac{K}{\eta} \cdot \frac{F (-\Delta p)}{l} \quad (4)$$

on apareix la constant de proporcionalitat  $C$  en funció de la permeabilitat del medi porós  $K$  i la viscositat del fluid  $\eta$

$$C = \frac{1}{\eta K}$$

essent  $\Delta p$  la caiguda de pressió a través del tortó o força motriu en aquest cas. El gruix de la capa formada pel sòlid dipositat  $l$  serà una funció del temps d'operació

$$l = f(t)$$

d'aquí que en processos de filtració contínua s'hauran de proveir dispositius adequats per a renovar la quantitat de filtrat que es va formant, mantenint un gruix constant, a fi d'aconseguir una bona eficàcia de filtrat.

### **Exemple 1:**

*La filtració d'un most cerveser té lloc en un filtre premsa on s'obtenen 10 m<sup>3</sup> de filtrat en 2000 s i 12 m<sup>3</sup> en 3600 s, moment on es para la filtració. Calculem la velocitat final de filtració, suposant que la resistència de la tela filtrant pot ésser menyspreada i que es manté constant la pressió.*

**Solució:**

*Per a filtració a pressió constant sense resistències addicionals es verifica (equació (4))*

$$\frac{dQ_F}{dt} = \frac{K (-\Delta P) F}{\eta l} = \frac{K (-\Delta P) F^2}{\eta v Q_F}$$



$$= \frac{K(-\Delta P)F}{\eta l}$$

on  $v$  és el volum de tortó disposat per unitat de filtrat, és a dir

$$v = \frac{lF}{Q_F}$$

$$t = \frac{\eta v}{K 2F^2 (-\Delta P)} Q_F^2$$

per  $t_1 = 2000$  s,  $Q_{F1} = 80$  m<sup>3</sup> i quan  $t_2 = 3600$  s,  $Q_{F2} = 12$  m<sup>3</sup>

$$3600 - 2000 = \frac{\eta v}{K 2F^2 (-\Delta P)} (12^2 - 80^2)$$

$$\frac{\eta v}{K 2F^2 (-\Delta P)} = 36,36$$

llavors

$$\frac{dQ_F}{dt} = \frac{K F^2 (-\Delta P)}{\eta v Q_F} = \frac{1}{2 \cdot 36,36 Q_F} = \frac{0,0138}{Q_F}$$

i la velocitat final de filtració serà:  $0,0138/12 = 1,15 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s

### Equació de balanç

Per a trobar la relació de dependència del gruix de sòlid retingut (tortó) en funció del temps, plantejarem el balanç global de matèria en un instant determinat

Sigui un volum de fluid  $V$  amb una concentració de sòlids en suspensió  $C$  que travessa una membrana, on es dipositen els sòlids

$$V - \frac{dQ_F}{F(1-\epsilon-C)} \quad (5)$$

Cada partícula sòlida que es diposita al tortó, desplaça el líquid equivalent al seu volum, és a dir, que el cabal de fluid a l'entrada i a la sortida del filtre roman constant. El balanç total de matèria sòlida serà per tant

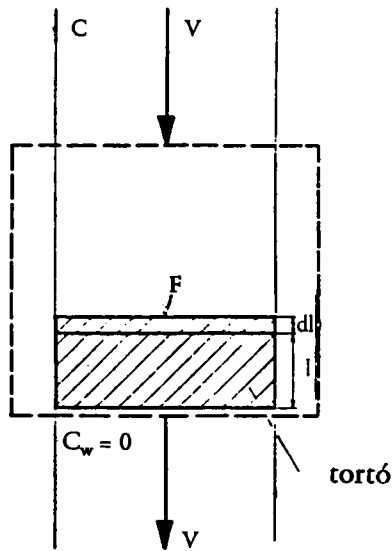


FIGURA 3. Plantejament de l'equació de balanç

$$V C dt = F dl (1 - \epsilon) - F dl C \quad (6)$$

és a dir

$$\frac{dQ_F}{dt} = \frac{F \cdot (1 - \epsilon - C)}{C} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (7)$$

De les equacions (4) i (7) es dedueix

$$\frac{dQ_F}{dt} = \frac{K (-\Delta p) F}{\eta l} = \frac{dl}{dt} \frac{F (1 - \epsilon - C)}{C}$$

d'on

$$l dl = \frac{K (-\Delta p) C}{\eta (1 - \epsilon - C)} dt \quad (8)$$

i integrant s'obté

$$l = \left[ \frac{2 K (-\Delta p) C}{\eta (1 - \epsilon - C)} t \right]^{1/2} \quad (9)$$

i queda com a expressió final del gruix del tortó  $l$  en funció del temps

$$l = (C_F (-\Delta p) t)^{1/2} \quad (10)$$

on el factor  $C_F$  depèn de la concentració de sòlids, la porositat del filtre i la viscositat del fluid i ve donat per

$$C_F = \frac{2.K.C}{\eta (1-\epsilon-C)}$$

### *Procés de filtració contínua*

El diagrama del procés pot observar-se a la fig. 4.

La membrana on es dipositen els sòlids constitueix una superfície cilíndrica, que es troba en contacte amb el fluid, que conté les partícules sòlides en suspensió, amb angle  $\psi$ , i gira a raó de  $n$  revolucions per unitat de temps. El temps de contacte per revolució serà

$\tau = \psi / n$ , i el volum del tortó  $V_F$  dipositat en aquest temps serà

$$V_F = n (\pi D L) l \tau \quad (11)$$

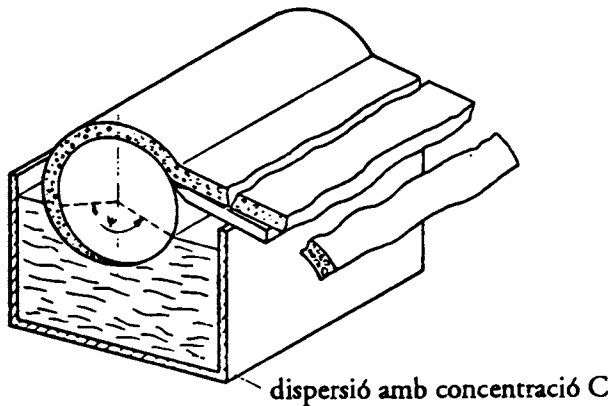


FIGURA 4. Diagrama del procés de filtració contínua

on  $D$  és el diàmetre del tambor i  $L$  la seva longitud. De l'equació (10) es dedueix

$$V_F = n (\pi D L) (C_F (-\Delta p) \psi / n)^{1/2} t \quad (12)$$

De l'expressió anterior es dedueix que el volum del tortó augmenta proporcionalment a l'arrel quadrada del nombre de revolucions: és a dir, en doblar  $n$ , el tortó augmentarà en un factor de  $\sqrt{2}$ . El mateix succeeix amb la pressió diferencial: augmentant aquesta al doble, el volum total del tortó s'incrementarà en  $\sqrt{2}$ .

### Exemple 2:

Suposem que el filtre premsa utilitzat a l'exemple 1 ha quedat fora de servei i per a reemplaçar-lo s'utilitza eventualment un filtre rotatori que a una velocitat de 0,05 Hz (3 rpm) filtra 0,0008 m<sup>3</sup>/s. Suposant que les condicions de pressió de filtració són les mateixes que abans ( $1,15 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s), ¿quina serà la velocitat necessària de rotació del filtre per a obtenir la mateixa velocitat final de filtració trobada anteriorment?

#### Solució:

A pressió constant, en un filtre rotatori es compleix (equació (4)):

$$Q_F^2 = \frac{K F^2 (-\Delta P)}{\eta v} \quad t = \frac{K F^2 (-\Delta P)}{\eta v} \psi \frac{1}{n}$$

és a dir,

$$Q_F^2 \approx t \approx \frac{1}{n}$$

on  $n$  és la velocitat de rotació,

essent la velocitat de filtració =  $\frac{Q_F}{t}$

$$\frac{Q_F}{t} \approx \left( \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{t} \right) \approx \left( \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot n \right) \approx \sqrt{n}$$

per tant

$$\frac{(Q_F/t)_1}{(Q_F/t)_2} \approx \frac{\sqrt{n_1}}{\sqrt{n_2}}$$

$$\frac{0,0008}{0,00115} \approx \frac{\sqrt{0,05}}{\sqrt{n_2}}$$

$n_2 = 0,10$  Hz, és a dir, 6 rpm.

### *Influència de l'equip*

A l'exposició anterior no hem tingut en compte la influència de certs elements constituents de l'equip real en el procés de filtració. D'aquesta manera, la resistència a través de la membrana ha estat menyspreada i s'ha suposat que el tortó ha estat totalment descarregat a cada revolució, cosa que no és tècnicament possible a la major part dels casos, causant una resistència addicional al pas del fluid. Tant aquestes resistències, com altres degudes a característiques específiques de l'equip (conductes de connexió i buidat, etc), se solen incloure en una "longitud característica" de cada equip,  $l_c$ . L'equació (8) queda, per tant, d'aquesta manera:

$$(l + l_c) dl = \frac{K (-\Delta p) C}{\eta (1 - \varepsilon - C)} dt$$

que un cop integrada dóna el valor de  $l$

$$l = -l_c + (l_c^2 + C_F (-\Delta p) t)^{1/2} \quad (13)$$

i, per tant,

$$V_F = n \Pi D L (-l_c + (l_c^2 + C_F (-\Delta p) t)^{1/2}) \quad (14)$$

El valor de  $l_c$  pot afectar substancialment l'eficàcia de la filtració, per això s'adopten detalls constructius conduents a disminuir les resistències que inclouen  $l_c$ , així com dispositius per a remoure el tortó, membranes que ofereixin menor resistència, etc. (filtres de roba enrotllable, rascadors, etc.).

### *Exemple 3:*

*A l'exemple anterior (exemple 2), suposem que el gruix de tortó format és de 10 mm. Volem comparar l'eficàcia teòrica de filtració tenint en compte que la resistència de la tela filtrant i la capa romanent de sòlids sobre la tela equival a un gruix de 3 mm.*

**Solució:**

*De l'equació (13) sabem que:*

$$l = -l_c + (l_c^2 + C_F (-\Delta p) t)^{1/2}$$

per a  $l_c = 0$ ,  $l = 1 \text{ mm}$ , cas ideal

$$V_1 = n \pi DL \ 10$$

quan tenim en compte les pèrdues reals,  $l_c = 3 \text{ mm}$ ,  $l = 10 \text{ mm}$

$$V_2 = n \pi DL (l_c + (l_c^2 + C_F (-\Delta p) t)^{1/2}) = n \pi DL 7,4$$

o sigui,

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{0,74}$$

És a dir, que l'eficàcia real de la filtració és un 26% inferior a la teòrica, per raó del funcionament deficient del filtre.

#### Efecte de la compressibilitat

El factor  $C_F$  és constant únicament si es considera el tortó incompressible. Si no és així, el valor de  $C_F$  és determinat empíricament. En una primera aproximació, es considera una dependència exponencial de la caiguda de la pressió,

$$C_F = C'_F (-\Delta p)^\alpha$$

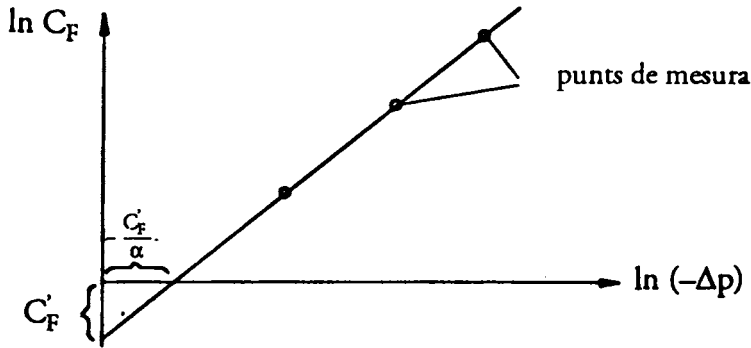
i per tant, l'expressió (10) queda:

$$1 = \left( C'_F (-\Delta p)^{\alpha+1} \cdot t \right)^{1/2} \quad (15)$$

Els valors de  $C_F$  es mesuren experimentalment mitjançant proves pilot a diferents pressions i es representen en un gràfic logarítmic, de manera que s'obté una recta que dona els valors de  $\alpha$  i  $C'_F$  (fig. 5).

L'efecte de la compressibilitat del tortó al cabal de filtrat pot deduir-se de l'equació de Kozeny (15b), ja que aquest és proporcional a  $\epsilon^3/(1-\epsilon)^2$ . És a dir, que un 10% de canvi a la porositat pot produir un cabal tres vegades més gran o més petit.

$$Q_F = \frac{F (-\Delta p) \epsilon^3}{\eta S K' l (1 - \epsilon^2)}, K' \approx 5 \quad (15b)$$

FIGURA 5. Determinació dels valors  $\alpha$  i  $C'_F$ 

## 2.2. Teoria de la sedimentació

### *Sedimentació estàtica*

Segons la llei de Stokes, l'empenta ascensional a què està sotmès un cos dins un fluid és igual al pes del cos menys la resistència a la fricció, és a dir:

$$A = G - R \quad (16)$$

on  $A$  és la força ascensional,  $G$  és el pes i  $R$  és la resistència a la filtració. Suposant un cos sòlid de forma esfèrica amb diàmetre  $d$

$$R = G - A = \frac{\Pi}{6} d^3 g (\rho_p - \rho_f) \quad (17)$$

éssent  $\rho_p$  i  $\rho_f$  les densitats del sòlid i el fluid respectivament. El valor de  $R$  per a cossos esfèrics és, segons Stokes:

$$R = 3\Pi \eta d u_{so} \quad (18)$$

essent  $u_{so}$  la velocitat de sedimentació de les partícules sòlides. De les expressions (17) i (18) es dedueix:

$$u_{so} = d^2 \frac{\rho_p - \rho_f}{18\eta} g \quad (19)$$

L'expressió (19) és certa per a un cos aïllat. Tanmateix, al procés de sedimentació es dona una interferència entre partícules i el fluid que es desplaça en sentit contrari. Steinour proposa la correcció següent:

$$u'_{so} = u_{so} f(\epsilon) \quad (20)$$

on  $f(\epsilon)$  és la funció d'interferència, que depèn del volum relatiu entre partícules sòlides  $\epsilon$ . Segons Von Steinour

$$f(\epsilon) = \epsilon^2 e^{-c(1-\epsilon)} \quad (21)$$

relació estrictament vàlida per a partícules esfèriques. Resultats experimentals realitzats per Verschoor i Carman foren comprovats amb la relació (21) i resumits per L. Schiller al gràfic de la fig. 6.

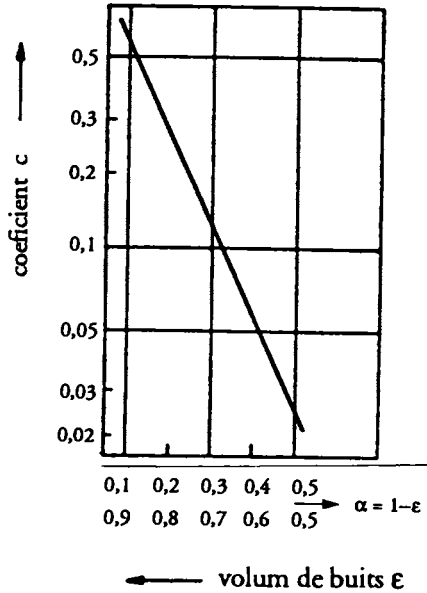


FIGURA 6. Gràfic de Schiller

El gràfic de Schiller ens permet de calcular la velocitat mitjana de sedimentació de partícules d'una suspensió en el cas més general. Per al cas específic de sedimentació contínua o centrífuga existeixen models particulars que desenvolupem a continuació.



**Exemple 4:**

En una fàbrica de cervesa es vol utilitzar un recipient de decantació abans de passar a fermentar el most. Calculem l'àrea mínima i el diàmetre del decantador per a tractar un most a raó de  $0,10 \text{ m}^3$  amb una concentració de sedimentació col·loïdal de  $150 \text{ kg/m}^3$  consistent en agregats globulars de  $5 \times 10^{-5} \text{ m}$ . La viscositat del most és de  $7 \cdot 10^{-4} \text{ kg/ms}$  i la seva densitat és 3.

**Solució:**

La velocitat de sedimentació serà (equació (19))

$$u_{so} = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_f)}{18 \eta} g = \frac{(5 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 9,81 (3000 - 1000)}{18 (7 \cdot 10^{-4})} = 3,89 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

La quantitat de sediment per unitat de superfície serà

$$U_{so} \cdot \text{concentració} = 3,89 \cdot 10^{-3} \cdot 150 = 0,584 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

i l'àrea

$$F = \frac{0,1 \cdot 150}{0,584} = 25,68 \text{ m}^2$$

que correspon a un diàmetre de

$$d = \left( \frac{4 \cdot 25,68}{\pi} \right)^{1/2} = 5,7 \text{ m}$$

**Sedimentació en operació contínua**

El diagrama del procés de sedimentació contínua pot observar-se a la fig. 7.

L'anomenat "balanç de sedimentació" estableix l'equilibri entre la velocitat de sedimentació  $u_{so}$  i l'ascensional del líquid  $q_F = Q_0/F$

$$u_{so} = q_F \quad (22)$$

on  $Q_0$  és el cabal de filtrat i  $F$  és la secció del tanc. Per tant, podem calcular el valor de  $Q_0$  per a unes condicions físiques particulars segons l'expressió:

$$Q_o = \frac{\pi}{4} D^2 d^2 \frac{\rho_p - \rho_f}{18 \eta} g \quad (23)$$

De l'expressió anterior es dedueix que la qualitat de filtrat en plantes contínues depèn d'un dimensionament correcte segons l'equació (22). Si augmenta el cabal de filtrat, mantenint les dimensions de la planta ( $F = \text{constant}$ ), les partícules de menors dimensions no arribaran a sedimentar. Una forma de millorar el procés continu és l'ús d'additius, que tendeixen —en definitiva— a engrossir la mida de les partícules.

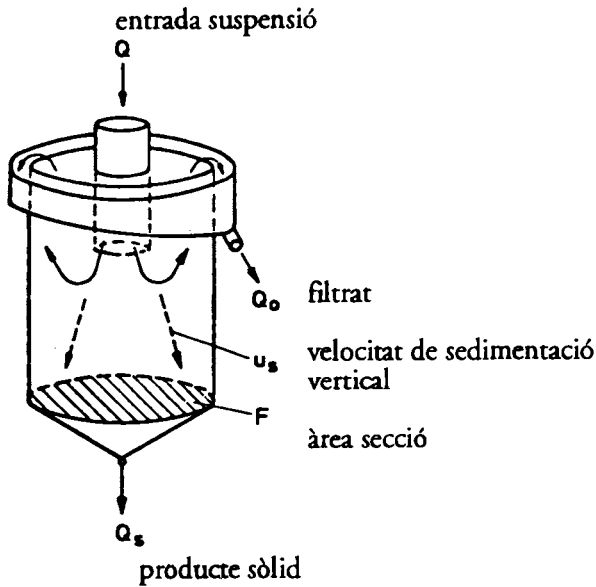


FIGURA 7. Diagrama del procés de sedimentació contínua

### *Sedimentació centrífuga*

L'equació (19), resultant de l'aplicació de la llei de Stokes, continua essent vàlida si substituïm el valor de l'acceleració de la gravetat  $g$  per l'acceleració centrífuga  $b$  a què està sotmesa una partícula que gira a una velocitat angular  $\omega$  i amb un radi de gir  $r$  (fig. 8).

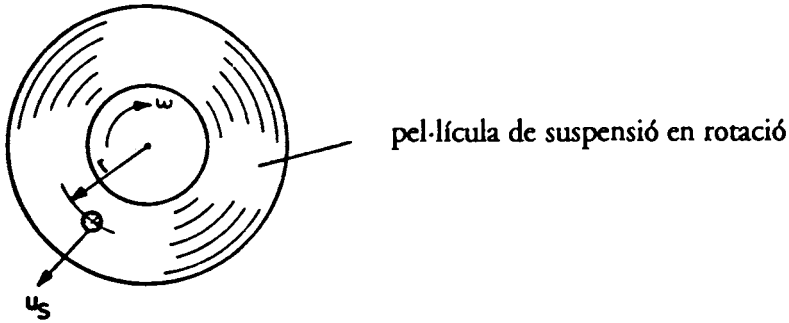


FIGURA 8. Sedimentació centrífuga

$$b = r \omega^2 = \frac{\pi^2 r n^2}{900}$$

Per tant, el valor de la velocitat de sedimentació ens queda:

$$u_s = \frac{d^2 \pi^2 n^2 D}{32400 \eta} (\rho_p - \rho_f) \quad (24)$$

Novament, hem de considerar aquí l'efecte beneficiós sobre la qualitat de filtrat d'additius adequats, segons es dedueix de l'expressió anterior.

Una centrífuga de decantació amb superfície cilíndrica és equivalent a una planta de sedimentació contínua amb flux rotatiu. Per tant, podem aplicar l'expressió (23) per a obtenir:

$$Q_o = (\pi L D^2 n^2) \frac{d^2 (\rho_p - \rho_f) s}{\eta} \quad (25)$$

on  $s$  és una constant amb valor  $\pi^2/32400$ .

El primer membre de l'expressió (25), entre parèntesis, és característic de l'equip i correspon a les dimensions físiques d'aquest, mentre que el segon correspon a dades característiques del material. Es pot demostrar que l'únic paràmetre d'equip que afecta concretament a l'estabilitat de la centrífuga és la longitud del rotor  $L$ ; resulta per tant aconsellable utilitzar rotors de diferent longitud o material per a resoldre problemes d'equilibrat.

**Exemple 5:**

Calculem a quin nombre de revolucions per minut hauria d'operar una centrífuga que substituís eventualment l'equip de sedimentació de l'exemple 4 per a tractar el mateix material. Suposem que la centrífuga disponible a la planta industrial té un rotor cilíndric de 0,6 m de diàmetre i una longitud d'1 m.

**Solució:**

$$u_s = \frac{(5 \cdot 10^{-5})^2 \cdot \pi^2 n^2 \cdot 0,6}{32400 (7 \cdot 10^{-4})} (3000 - 1000) = 1,31 \cdot 10^{-6} n^2$$

$$n^2 = \frac{0,1}{\pi D L \cdot 1,31 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,4049 \cdot 10^{-5}$$

$$n = 252 \text{ revolucions per minut.}$$

**2.3. Determinació dels paràmetres físics del procés de filtració***Classificació de dades i variables físiques*

L'elecció d'un grup de filtració concret requereix la determinació de diferents dades físiques que caracteritzen la suspensió a filtrar i afecten el procés de filtració, que com ja hem vist, depèn de:

- a) Àrea de la superfície filtrant
- b) Resistència del tortó i membrana
- c) Viscositat del filtrat
- d) Pressió diferencial a través del filtre

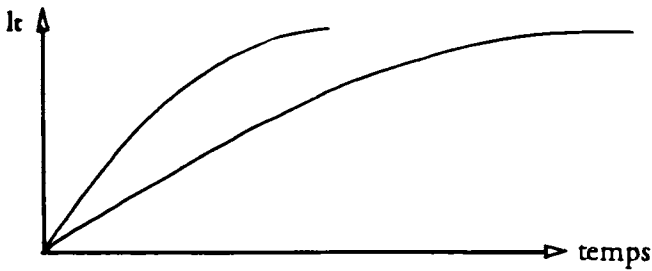
Les dades físiques mesurables de la suspensió que intervenen al procés de filtració són les següents:

- Residus de filtrat
- Compressibilitat del residu
- Concentració de la suspensió
- Viscositat dinàmica del medi filtrant
- Valor del pH
- Forma granular

- Valor màxim de la mida de partícula
- Valor mínim de la mida de partícula

### *Mesures de les diferents variables*

La determinació quantitativa del residu filtrat es porta a terme mitjançant un test pilot amb una mostra de 2 l, de suspensió a pressió d'1 bar, i la quantitat de filtrat es registra per unitat de temps.



Eventualment, es realitza la prova amb diferents additius i suports de membrana. La distribució de la mida de partícula es realitza mitjançant comptadors Coulter; a més a més, es poden realitzar assaigs de floculació i sedimentació. El resultat del test de residu de filtrat es caracteritza mitjançant un índex global de quatre dígit (RFT).

La compressibilitat del residu es dona en tant per cent, corresponent a:

$$\frac{\text{Gruix del tortó després de la compressió a 3 bar}}{\text{Gruix del tortó després de la compressió a 1 bar}} \cdot 100$$

L'índex de compressibilitat tindrà, per tant, dos dígit corresponents al tant per cent aconseguit a la prova.

La concentració de la suspensió es dona en dígit corresponents al tant per cent de pes de matèria sòlida (seca) respecte al pes d'un volum de suspensió.

El viscosímetre dinàmic ens dona la unitat de viscositat (un dígit) en N/m.s. Mitjançant un pH-metre convencional s'obtenen els dígit que caracteritzen el pH del medi.

El cos de forma granular classifica, mitjançant dos dígit, formes esponjoses gruixudes o primes, o formes de tipus d'agulla curtes o llargues,

gruixudes o primes. Els valors de la mida de partícula corresponen a quatre tipus estàndard:

de 0	a	1 mm – 0
de 1,1	a	10 mm – 1
de 10,1	a	$10^2$ mm – 2
de 100,1	a	$10^3$ mm – 3

### Planta experimental d'assajos físics

L'esquema d'una planta experimental per a la realització dels assajos físics que determinen les característiques de la suspensió apareix a la fig. 9. Les característiques essencials d'aquest tipus de plantes d'assaig són les següents:

- Dispositiu d'alimentació de la suspensió i aigües de rentat
- Filtre de geometria variable ( $0,4 \text{ m}^2 - 2,5 \text{ m}^2$ )
- Dipòsits de filtrat i aigües de rentat amb detector de nivell continu
- Dispositiu de recollida del tortó
- Equip d'asseccament del tortó

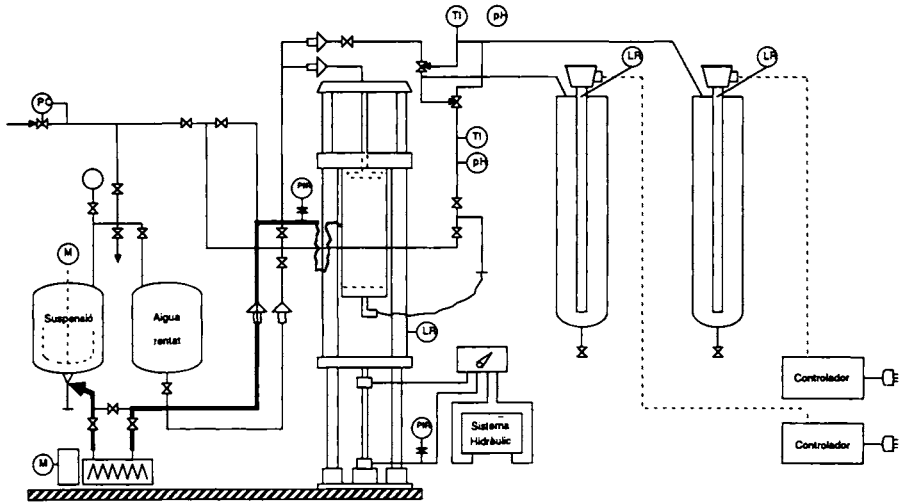


FIGURA 9. Planta experimental d'assajos físics de la suspensió

### 3. FILTRACIÓ SÒLID-LÍQUID. EQUIP

#### 3.1. Consideracions generals

##### *Medi filtrant*

La selecció del medi filtrant i l'equip filtrant adequat depèn del propòsit de la filtració i de la quantitat a filtrar. En general, és desitjable que el medi filtrant:

- a) sigui inert, és a dir, sense possible interacció química i sense canvis físics apreciables (arrugues, encogiment,...),
- b) permeti el màxim pas de líquid i retenció del sòlid,
- c) ofereixi suficient resistència mecànica per a aguantar la pressió de la filtració,
- d) mostri una adsorció negligible respecte al material dissolt.

El "filtre tela" consisteix en un teixit de tot tipus de fibres naturals, sintètiques o metalls. El cotó és la fibra més utilitzada. El niló té millors característiques a la indústria de l'alimentació i farmacèutica, ja que no és afectat pel florit, fongs o bacteris i té una adsorció negligible. Ambdós són utilitzats en filtració asèptica ja que permeten la seva esterilització en autoclau. El teixit metàl·lic, particularment l'acer inoxidable, és resistent, de llarga durada i fàcil neteja. Poden utilitzar-se conjuntament amb additius filtrants i també com a suport d'altres tipus de medi filtrant.

El filtre no teixit inclou feltres, paper kraft i d'altres tèxtils no teixits. Es caracteritzen per proporcionar cabals elevats i baixa caiguda de pressió. Es recomana per a filtració de solucions gelatinoses o en aquelles on intervenen partícules de petit diàmetre. El teixit d'asbest té propietats estèrils i el paper kraft, encara que d'ús limitat a filtres de plats i safates, segueix essent d'ús extensiu a la indústria farmacèutica i alimentària per la seva porositat controlada, adsorció limitada i baix cost.

Les membranes són els medis filtrants bàsics per a la microfiltració, utilitzada particularment en solucions estèrils. Acostumen a estar formades per esters de cel·lulosa o niló, tefló, clorur de polivinil o plata. Les membranes acostumen a ésser de 150  $\mu\text{m}$  de gruix amb porus de 0,05 a 14  $\mu\text{m}$  que ocupen el 80% del volum del medi. Gràcies a aquesta elevada porositat, permeten velocitats de filtració 40 vegades superiors a d'altres medis de qualitat de retenció semblant, encara que requereixen prefiltració per a evitar la colmatació. La inherent fragilitat de la

membrana millora mitjançant l'ús d'estructures de suport a base de niló monofilament.

La major part de medis filtrants es presenten també en forma de cartutxos unitaris. Aquests cartutxos acostumen a ésser de baix cost i d'ús convenient per a eliminar baixos percentatges de sòlids al rang d'1 mm a 100 µm de mida de partícula. Un element estàndard consisteix en un cilindre de 2,5 polzades de diàmetre i 10 de llarg amb una obertura central d'una polzada. Poden fer-se servir com a filtres de superfície o profunditat. Els primers, si són ceràmics o de material sinteritzat, són reusables i útils per a certes aplicacions estèrils. Els de profunditat són en general de cotó, asbest o cel·lulosa i no permeten la seva neteja, són d'un sol ús.

### *Additius*

Quan la suspensió conté matèries de tipus col·loïdal, el medi filtrant tendeix a embussar-se. En aquests casos, se solen incorporar additius que formen una estructura rígida porosa que reté les partícules sòlides, permet el pas del fluid, i millora així el rendiment del procés de filtració en condicions adverses, amb suspensions de difícil tractament. A la pràctica, els additius poden utilitzar-se de dos maneres:

- afegint-los a la suspensió, tractant la mescla formada de manera usual.
- realitzant una suspensió addicional amb l'additiu que, passant a través del medi filtrant, el cobreix d'una capa protectora de l'additiu.

Els additius han d'ésser químicament inerts, de baixa densitat específica, de material preferentment porós i recuperable, com kieselguhr, talc, carbó vegetal, asbest, polpa de paper, bentonita, terra de diatomea. Els materials com el carbó actiu adsorbeixen en major o menor grau compostos orgànics i inorgànics presents a la solució. Els alcaloides són ràpidament adsorbits pel carbó vegetal, i un additiu com el kieselguhr és preferible per a la clarificació de solucions alcalines. La terra de diatomea és essencialment sílice relativament inerta i insoluble. La perlita, silicat d'alúmina, és de menor cost però no és porosa i forma tortons de l'ordre del 20 al 30% inferiors en densitat que la diatomea. La cel·lulosa, l'asbest i el carbó s'utilitzen normalment quan les suspensions a tractar són incompatibles amb els compostos de sílice, ja que el seu cost és molt més gran que el de la diatomea o perlita. Existeixen mescles comercials de diferents additius d'usos específics.



### *Pretractament dels materials*

Alguns materials que són pràcticament infiltrables poden ésser modificats mitjançant un tractament oportú. Aquests tractaments inclouen:

- Tractament tèrmic: la precipitació de materials sòlids d'una suspensió pot facilitar-se concentrant la solució mitjançant un augment de la temperatura, que té com a resultat partícules més gruixudes que a la solució diluïda. Així, la separació de proteïnes no desitjades en extractes vegetals líquids pot aconseguir-se escalfant la solució que provoca la coagulació proteínica procedint a la seva filtració. Additius de tipus perfumant acostumen a filtrar millor a temperatura baixa.

- Additius: afegits a la suspensió, converteixen el tortó filtrant en material més porós i menys compressible i milloren el cabal de filtració. La seva utilització com a clarificadors de suspensions amb terbolesa ja ha estat comentada anteriorment.

- Eliminació de tanins: quan la terbolesa de preparacions alcohòliques és deguda al contingut en taní, a vegades pot ésser adient el pretractament mitjançant gelatina, cola de peix, que es combinen amb el taní per a formar un complex insoluble fàcilment filtrable.

- Efecte pH: una proteïna en solució és menys soluble al seu punt isoelèctric i pot ésser fàcilment precipitada en forma filtrable.

### **3.2. Diagrama de selecció**

Segons l'esmentat a l'apartat anterior, seran criteris decisius per a la selecció de l'equip de filtració adequat:

- la durada estimada segons el producte (pH, temperatura, solvents)
- pressió diferencial de treball
- estanqueïtat
- resistència mecànica (superfície uniforme, dilatació, contracció, sistemes de subjecció)

A la taula 1 es presenta un quadre de preselecció ràpida del tipus d'equip que respon a tres criteris bàsics:

1. Suspensions que contenen solvents o suspensions purament aquoses.
2. Suspensions que filtren "bé" (separen la matèria sòlida –tortó– en quantitat superior als 50 kg/m<sup>2</sup>h), o suspensions que filtren malament (separen la matèria sòlida en quantitat inferior).
3. Medi filtrant (cotó, malla d'acer, sinteritzat, poli-propilè, tefló...).

TAULA 1. Selecció d'equip de filtració

Residus de Filtració (residu = producte)															
Suspensió contenint solvents								Suspensió aquosa							
Filtració pobre <30 kg/m <sup>2</sup> h mat. seca				Filtració bona >50 kg/m <sup>2</sup> h mat. seca				Filtració pobre <30 kg/m <sup>2</sup> h mat. seca				Filtració bona >50 kg/m <sup>2</sup> h mat. seca			
sense rentat		amb rentat		sense rentat		amb rentat		sense rentat		amb rentat		sense rentat		amb rentat	
contínu	batch	contínu	batch	contínu	batch	contínu	batch	contínu	batch	contínu	batch	contínu	batch	contínu	batch
A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Filtre Dyno	Filtre Premsa	Dyno Slurr.	Filtre Premsa	Rotatiu Buit	Centrifuga	Filtre Premsa	Centrifuga	Filtre Dyno	Filtre Premsa	Dyno Slurr.	Filtre Autom.	Filtre Transp.	Centrifuga	Filtre Transp.	Centrifuga
3.10.5	3.9	3.10.5	3.5	3.3	4.1	3.6	4.1	3.10.5	3.9	3.10.5	3.8	3.4	4.1	3.4	4.1
Decantador	Nutsche	Decantador + slurr.	Filtre Buit	Filtre Rotatiu	Centrifuga Cistella	Filtre Rotatiu	Centrifuga Cistella	Filtre Cinta	Filtre Buit	Decantador + slurr.	Filtre Buit	Filtre Rotatiu	Centrifuga Cistella	Filtre Rotatiu	Centrifuga Cistella
4.4.2	3.5	4.3	3.5	3.6	4.2	3.3	4.2	3.10.5	3.5	4.3	3.5	3.3	4.2	3.6	4.2
Filtre Rotatiu	Typ Funda	Filtre Rot + Reslurr.	Filtre Premsa	Decantador	Filtre Premsa Buit	Filtre Horizontal	Filtre Premsa Buit	Decantador	Filtre Premsa		Filtre Premsa Buit	Filtre Dyno	Filtre Premsa Buit	Filtre Horizontal	Filtre Premsa Buit
3.3.2	5.2.1	3.3	3.9	4.3	3.5	3.10.2	3.5	4.3	3.8		3.5	3.10.5	3.5	3.10.2	3.5
Separador				Filtre Horizontal	Filtre Premsa Buit	Centrifuga	Filtre Premsa Buit	Filtre Rotatiu	Filtre Horizontal		Filtre Premsa	Decantador	Filtre Premsa	Filtre Rotatiu	Filtre Premsa aut.
4.4.6				3.10.2	3.5	4.4.5	3.5	3.3.2	3.5		3.9	4.3	3.9	3.3	3.8
				Centrifuga	Filtre Premsa	Heinkel	Filtre Mecànic	Separador	Espeesido			Filtre Premsa Rotatiu	Filtre Premsa		Filtre Premsa
				4.4.5	3.9	4.4.2	3.7	4.4.6	3.10.1			3.6	3.5		3.9
Heinkel	Typ Funda			4.4.2	5.2.1		3.9					Filtre Horizontal	Filtre Premsa aut.		3.7
4.4.2	5.2.1											3.10.2	3.8		

A la Taula 2 es presenta un qüestionari amb les dades essencials per a l'especificació adequada del filtre.

TAULA 2. Dades essencials per a l'especificació del filtre

Categoria	Dades característiques
Materials	Propietats físiques: viscositat, porositat Propietats químiques: toxicitat, corrosió Qualitat del filtratge
Procés	Dipòsits d'alimentació i recollida de productes Processos físics (separació de sòlids) Processos químics (pretractament requerit) Condicions d'operació (temperatura, pressió, pH, concentració)
Requisits del procés	Additius admissibles Humitat residual Puresa de filtratge Propietats del residu
Equip	Atmosfera inert, estèril Principi de filtració Diagrama planta experimental Materials de construcció Cabal Càlcul d'extrapolació Dependències
Operació	Ajustament aparells i variacions Regulació, control, automatització Personal encarregat Manteniment i reparació Versatilitat Seguretat Clavegueró Serveis
Costos	Capital - Amortització Energia Mà d'obra Durada Unitaris (costos/kg)

### 3.3. Descripció d'equips diversos

#### *Comercial*

L'equip de filtració es classifica pel tipus de força impulsora (gravetat, pressió, buit), per la manera d'operació (per càrregues o contínua), i pel producte final desitjat (líquid filtrat o sòlids retinguts). L'operació de clarificació requerida a la indústria farmacèutica i d'alimentació utilitza equips a pressió en operació discontinua. Per raons de compatibilitat amb un ampli marge de productes, es restringeix el material de construcció a acer inoxidable, vidre i polímers inerts.

Els filtres per gravetat s'utilitzen correntment al tractament d'aigües, on un filtre de sorra acostuma a utilitzar-se com a clarificador previ a la desionització i/o destil·lació. Filtres per gravetat s'utilitzen també per a concentració de magmes com la llet de magnèsia. Però resulten més eficients els filtres Nutsche i tancs provistos d'un doble fons amb un suport per al medi filtrant; encara que els filtres tipus Nutsche més corrents poden operar a pressió o al buit, per tal d'augmentar el rendiment (fig. 10).

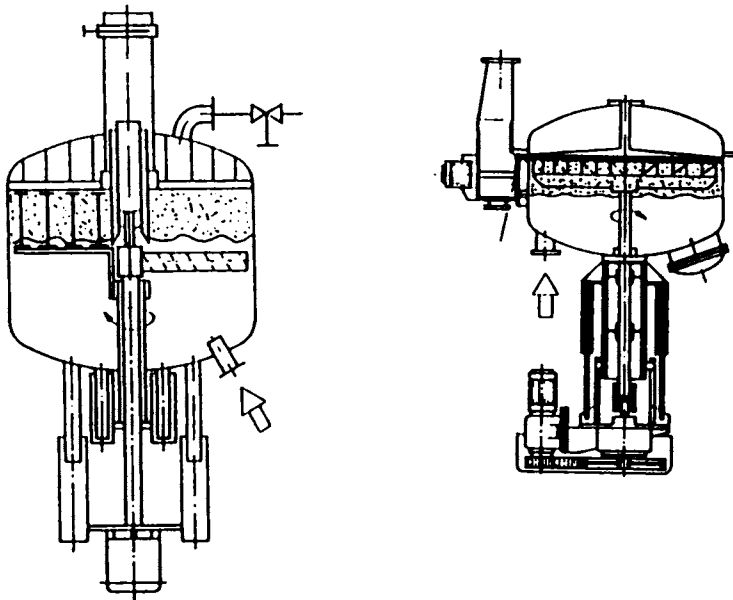


FIGURA 10. Filtre tipus Nutsche

El filtre prensa de marcs o plaques és el més utilitzat dels equips de filtració a pressió. Consisteix en un encaix de marcs buits i plaques que suporten el medi filtrant i es troben disposats alternadament en una unitat vertical o horitzontal. Les partícules sòlides queden retingudes als marcs i el líquid filtrat s'elimina a través de conductes localitzats a les plaques. El gruix dels marcs és crític per a un bon filtratge i la formació adequada del tortó. Gràcies a diferents tipus de marcs i plaques, el filtre prensa constitueix l'equip de filtració existent més versàtil, que inclou la filtració estèril. Pot convertir-se fàcilment en filtre multietapa i és –sens dubte– el més econòmic per unitat de superfície filtrant, i els materials de construcció poden adaptar-se a qualsevol procés. Com a desavantatge cal assenyalar els costos de mà d'obra en muntatge i neteja, i possibles fuites. En condicions normals d'operació s'obté un cabal de  $0,68 \text{ m}^3/\text{h}$  (25 gal/min) a pressions fins a  $17 \times 10^4 \text{ N/m}^2$  (25 lb/m<sup>2</sup>) (fig. 11).

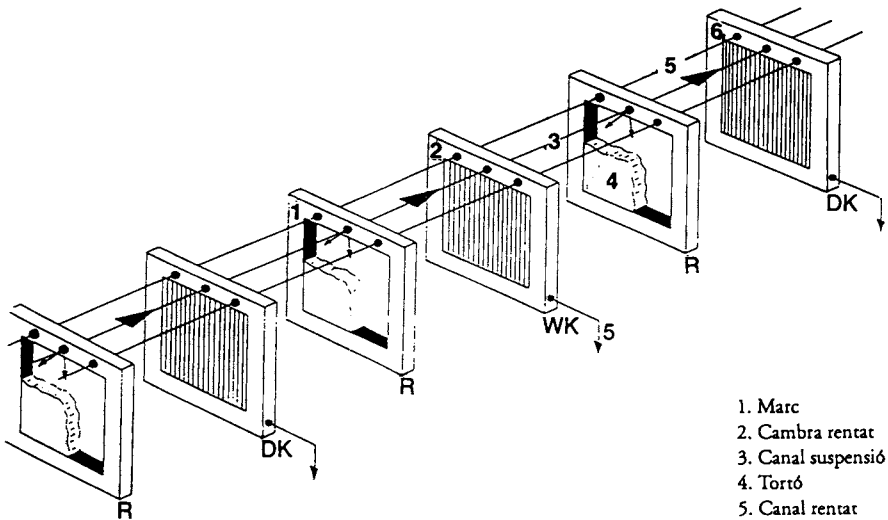


FIGURA 11. Filtre prensa

El filtre de discos tendeix a esmenar alguna de les deficiències del filtre a pressió. És compacte, portable, permet millor neteja amb els consegüents avantatges a la indústria alimentària i farmacèutica d'operació discontinua. Estan constituïts per un conjunt de discos de filtre o paper allotjats en una carcassa sota pressió. Aquest tipus de filtre s'utilitza preferentment en operacions de clarificació. Els cabals obtinguts són semblants als del filtre prensa i permeten operació fins a  $34 \times 10^4 \text{ N/m}^2$ . En lloc de discos poden

utilitzar-se empaquetaments de “massa filtrant” en detriment del cabal de filtratge, però amb major brillantor al producte final.

El filtre precapa a pressió està dissenyat per a evitar el temps i el cost de neteja i el muntatge dels dos tipus anteriors. Consisteix en una sèrie d'elements tubulars o plaques, sobre els que es disposa una capa d'additiu filtrant, que forma la superfície filtrant. El conjunt s'allotja en un tanc vertical que té previstes les connexions per a descàrrega del tortó, rentat, desplaçament de l'aire, vibració o acció centrífuga. Aquest tipus de filtre està especialment indicat per a processament d'elevats volums de líquid. Acostumen a utilitzar-se dos o més unitats en paral·lel amb tancs d'emmagatzematge intermedi (fig. 12).

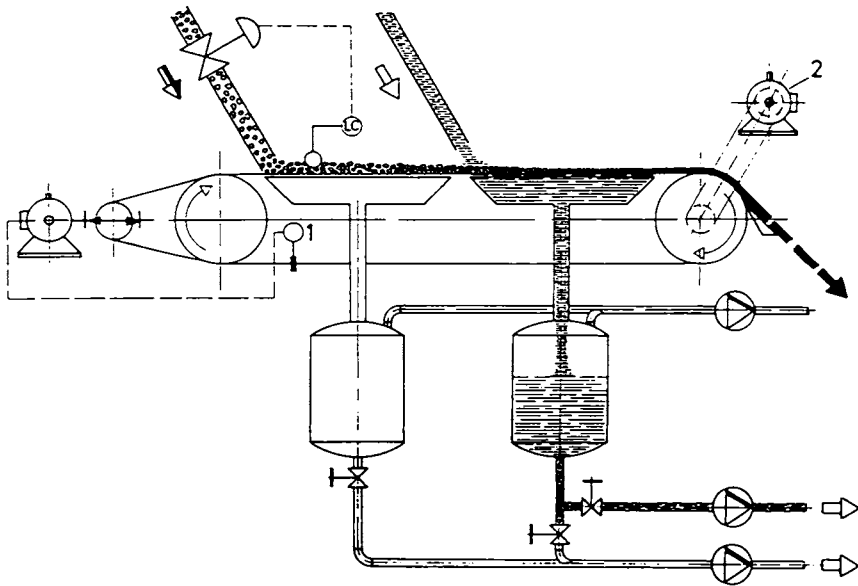


FIGURA 12. Filtre precapa a pressió

Els filtres de cartutxos amb elements permanents o d'un sol ús s'utilitzen únicament per a clarificació. Actualment permeten l'ús de cartutxos comercials de diferents marques. Suports multielement incrementen la capacitat de producció. Una unitat amb 12 elements sol ésser adequada per a càrregues entre 1.9 i 3.8 m<sup>3</sup>. El cost d'elements d'un sol ús normalment queda compensat per l'estalvi de despeses de neteja i manteniment del sistema amb elements permanents.

Els filtres de ganivetes, que tenen accessoris per a autoneteja, són especialment adequats per a tractar suspensions que poden ocasionar colmatació en filtres convencionals. Un sistema de ganivetes elimina els sòlids acumulats, que són evacuats del fons del tanc. Els filtres de cartutxos metàl·lics que eviten el curt-circuit de l'element filtrant, permeten una neteja ràpida i la utilització de cartutxos reusables. Els elements metàl·lics permeten retenció de partícules per sota els 30 mm, i els de tela fins a 5 mm. Normalment estan proveïts de vibradors per tal de millorar la filtració que tendeix a colmatar els elements.

Els filtres de membrana accepten membranes entre 13 i 293 mm de diàmetre amb suports de geometria variable d'acer inoxidable i recobriments de tefló que permeten esterilització "in situ". Per a aplicacions especials s'utilitzen recobriments de PVC i polipropilè.

### *Equip de filtració de laboratori*

L'equip de laboratori inclou embuts tipus Buchner i Hirsh de mida diversa que permeten una anàlisi inicial dels problemes de filtració. Però un equipament mínim ha d'incloure un filtre premsa, filtre de membrana i de cartutxos d'un sol ús.

L'equip auxiliar consisteix en un mesclador d'additius i d'alimentació, tancs, agitadors i bombes centrífugues, per a tractament de quantitats fins a 40 litres. Addicionalment caldrà disposar també d'una àmplia selecció d'additius, equip test de bombolles i —eventualment— d'un filtre de cartutxos metàl·lics.

### *Filtració amb recuperació de sòlids*

La filtració amb recuperació de sòlids té molta importància a la indústria alimentària i farmacèutica. Els processos de síntesi i fermentació per a produir ingredients actius en grans quantitats tenen la filtració amb recuperació de sòlids com a etapa de primària importància.

El filtre premsa i el precapa a pressió s'utilitzen també per a recuperació de sòlids, encara que la seva aplicació queda restringida a operació discontinua de quantitats moderades de matèria d'alt valor afegit.

Per a operacions en gran escala, els filtres continus al buit són els més utilitzats, concretament el filtre de tambor rotatori al buit dividit en

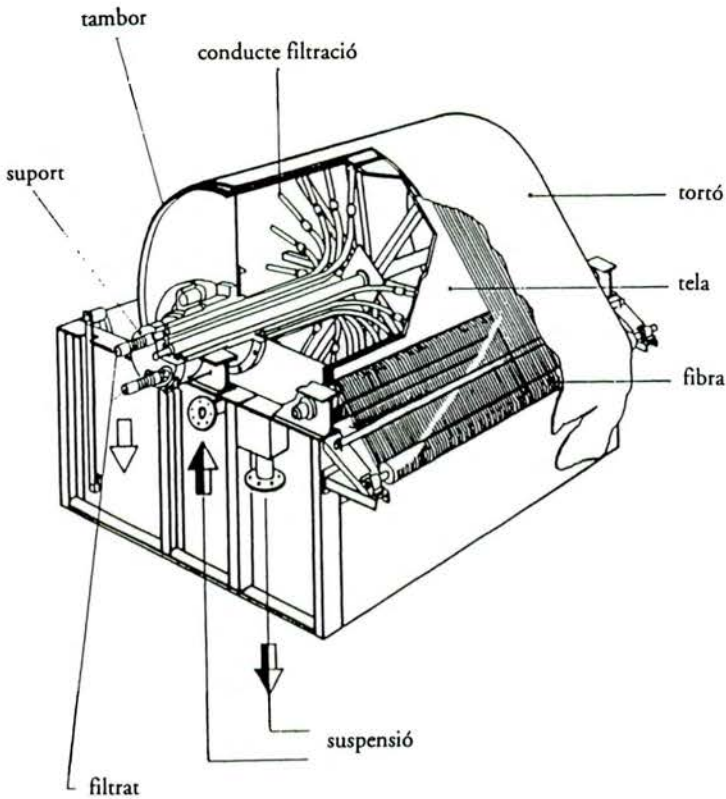


FIGURA 13. Filtre contínu al buit

seccions connectades a sortides de descàrrega (fig. 13). La suspensió és alimentada a un tanc on els sòlids es mantenen suspesos mitjançant agitació. En girar el tambor, cada secció d'aquest passa a través de la suspensió i mitjançant l'acció del buit, el líquid passa a través del medi filtrant a la superfície del tambor. Les partícules sòlides es dipositen al tambor en forma de tortó adherit a la superfície del tambor. El tortó passa a una secció de rentat a mesura que es mou cap al punt de descàrrega. Aquí pot ésser eliminat mitjançant rasquetes o transportat per cordes fins que es trenca pel seu propi pes. Existeixen diverses variables que afecten la formació del tortó: velocitat d'asseccament i propietats de la descàrrega.

Les centrífugues de cistella s'utilitzen comunament per a la filtració amb recuperació de sòlids. Els cistells perforats serveixen de suport al medi filtrant. La suspensió cau a l'interior del cistell que gira, i sota l'acció de la



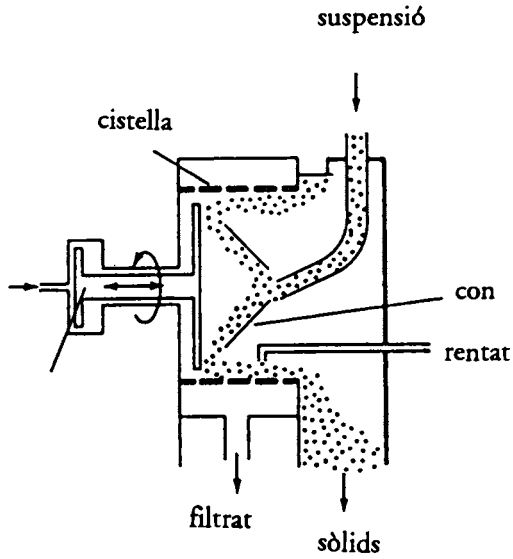


FIGURA 14. Centrífuga de cistella

força centrífuga, el filtrat passa a través del medi filtrant, mentre que el sòlid es diposita en aquest. L'operació pot ésser contínua o discontinua segons el que es requereixi (fig. 14).

## NOTACIÓ

A	Empenta d'un sòlid al si d'un fluid, N
b	Acceleració centrífuga, $m(\text{rad/s})^2$
c	Coefficient de Steiner
C	Concentració, $\text{kg/m}^3$
C'	Factor de compressibilitat
D	Diàmetre del tambor, m
d	Diàmetre de partícula sòlida, m
f	Designa una funció en general
F	Àrea, $\text{m}^2$
g	Acceleració de la gravetat, $9,80 \text{ N/s}^2$
G	Pes, kg
h	Alçada, m
K'	Constant de Kozeny
l	Longitud característica d'un equip, m
L	Longitud, m
m	Massa, kg
n	Velocitat angular, r.p.m.
p	Pressió, $\text{N/m}^2$
p	Força impulsora, N
Q	Cabal, $\text{kg/s}$
r	Radi, m
R	Resistència per fricció, N
S	Superfície específica del llit, $\text{m}^2$
t	Temps, s
u	Velocitat, $\text{m/s}$
V	Cabal, $\text{m}^3/\text{s}$
W	Resistència del medi filtrant, N

*Caràcters grecs:*

$\alpha$	Factor complementari de la porositat = $1-\epsilon$
$\Delta$	Gradient o diferencial
$\epsilon$	Porositat
$\eta$	Viscositat
$\psi$	Angle de mullat, graus
$\omega$	Velocitat angular
$\rho$	Densitat, $\text{kg/m}^3$

**Subíndex:**

- c      Caracteritza la longitud equivalent d'un equip
- f      Fa referència al fluid
- F      Fa referència al filtrat
- p      Fa referència al sòlid
- s      Fa referència a la sedimentació

**BIBLIOGRAFIA**

- CHEREMINISOFF, N.P. i AZBEL, D.S., *Liquid Filtration*, McGraw-Hill, Nova York, 1984.
- HILL, R.A., "Clarification and Filtration" in *Theory and Practice of Industrial Pharmacy*, Chap. 7, pp. 136-153, John Willey, Nova York, 1982.
- Liquid Filtration in Chemical Industry, CIBA-GEIGY, 1977.



## BARREJA DE SÒLIDS

*Ramon Rosell i Rius*

### 1. GENERALITATS. DEFINICIONS.

A la indústria en general, i a la de l'alimentació en particular, un gran nombre de processos de fabricació inclouen operacions de barreja, operacions que es realitzen amb productes en qualsevol dels estats d'agregació de la matèria (sòlid, líquid o gas). En aquest capítol ens referirem exclusivament a la barreja de sòlids en forma de pols, entenent com a "pols" (Gstirner, (11)), agregats de partícules sòlides d'una mida per sota dels 100  $\mu\text{m}$ .

Entenem per barrejar sòlids la juxtaposició de partícules de dos o més productes de tal manera que arribem a obtenir un conjunt on la distribució de les partícules sigui la més homogènia possible. Per això ens cal definir quin és l'objectiu a assolir, i quins paràmetres o índexs utilitzarem per a definir la bondat de la barreja.

Històricament, la barreja de sòlids s'ha realitzat de forma artesanal al llarg dels segles. El primer estudi on ja apareixen valoracions de la qualitat de les barrejes (Lexis, (18)) data del 1887. El tractament que podríem qualificar d'actual del tema s'inicià cap als anys 40.

Lacey, el 1943, publicà un treball (16) que podem considerar pioner sobre aquesta qüestió. A partir d'aleshores i fins al 1980 es publicaren gran quantitat d'articles tractant d'aprofundir sobre la teoria general de les barreges. Des d'aquelles dates, i en anar coneixent l'extrema complexitat del tema, la bibliografia s'ha anat fent molt profusa i, en algunes ocasions, contradictòria. Per això, en la majoria de casos concrets, industrialment s'ha continuat treballant en la barreja de sòlids sobre bases majoritàriament empíriques i artesanals. De Jong afirmava encara el 1983 que industrialment la barreja de sòlids té més d'art que de ciència (7).

### 1.1. Característiques específiques de l'operació de barrejar sòlids

Referint-nos tant al procés de barreja com a la barreja pròpiament dita, cal fer les consideracions següents:

a) La barreja de sòlids no es produeix mai espontàniament. Per molt temps que transcorri, si tenim dues capes, una sobre l'altra, de dos productes (A i B), mai no trobarem partícules d'A en la capa B ni viceversa. D'aquí ja podem inferir que per a barrejar necessitarem aplicar un cert treball durant un cert temps.

b) La barreja no podrà realitzar-se si el volum total a barrejar es manté constant. És a dir, el conjunt de les partícules necessita un espai lliure per a poder-se moure (23).

c) La barreja no arriba mai al nivell molecular. El que denominem "partícules" són agregats de matèria més o menys voluminosos que donaran un determinat grau d'interposició, grau que no podrem sobrepassar a menys que efectuem alguna operació auxiliar (p. ex. mòlta conjunta).

d) La facilitat o dificultat de la barreja és funció també de certes característiques dels productes i del seu comportament mutu a efectes de barreja tals com cohesió, mida, densitat, rugositat, etc. de les partícules. Més endavant aprofundirem en aquest tema.

e) Segregació. S'anomena segregació un fenomen de "desbarreja" que en menor o major grau acompanya l'acció de barrejar i que té lloc també en les barreges ja fetes. Per la seva importància li dedicarem un apartat especial, ja que pot dificultar seriosament el resultat pràctic de l'operació.

Podem dir doncs, segons Train (32), que l'operació de barrejar ve condicionada pels quatre factors següents:

- 1.- Aplicació d'un cert treball.
- 2.- Un temps suficient d'acció.
- 3.- Espai per l'expansió del conjunt a barrejar.
- 4.- Utilitzar mecanismes per a prevenir la segregació.

### 1.2. Definició d'objectius. Barreges: perfecta; en equilibri (o estabilitzada, o a l'atzar (random)) i real

En disposar-nos a barrejar sòlids cal que tinguem ben clar quin grau d'homogeneïtat perseguim. Hem de fixar-nos uns límits i veure quin és el camí més adient per a assolir el propòsit que ens hem fet. Ja hem dit que no és possible arribar al nivell molecular; hem de tenir present doncs que

volem, i posar en joc els elements i la metodologia necessaris per a arribar al resultat desitjat.

El tipus de barreja es defineix segons el seu grau d'homogeneïtat. Malgrat haver-hi diferents classificacions (vegeu p. ex. Egermann, (8)), aquí només considerarem tres tipus de barreja: perfecta, en equilibri (*random*), i real. Des del punt de vista del seu estudi, també considerarem com a "barreja" l'estat inicial, és a dir, el conjunt format pels productes encara totalment separats. Aquest estat de barreja es denomina barreja zero, o en segregació total o primària.

*Barreja perfecta (o ideal).*- Sobre el paper podem imaginar l'existència d'una barreja absolutament homogènia, on cada partícula es trobés rodejada de partícules de classe diferent. Referint-nos a una barreja binària de partícules de la mateixa mida i en proporció 50 % de cada mena, podríem representar-la simbòlicament per un tauler d'escacs tridimensional o bé un cristall de NaCl. És fàcilment comprensible que aquesta és una situació teòrica a la qual és impossible d'arribar.

*Barreja en equilibri (o estabilitzada, o a l'atzar (random)).*- És la barreja que té una distribució determinada, que no arriba a l'homogeneïtat de la barreja que hem denominat "perfecta", però de la qual no podem passar per molt que insistim en l'operació, ja que sempre anirem obtenint resultats amb igual grau de desordre.

*Barreja real (incompleta o parcialment segregada).*- Són les que obtindrem sempre a la pràctica, i, per tant, caldrà definir d'una manera o altra el seu grau d'homogeneïtat.

### 1.3. Bondat de la barreja. Índexs qualitius

Harnby (13) introdueix el tema amb la pregunta: "Quan és bona una barreja?". Una resposta imprecisa, si bé moltes vegades suficient a la pràctica, és "quan respon al que se li demana". Així, una barreja de pigments direm que és suficientment bona quan l'ull no pot distingir variacions de color en la massa del producte. Això no vol dir que la barreja no pugui millorar-se, només significa que passa satisfactòriament un test arbitrari de qualitat. Si examinem la barreja amb una lupa, potser veurem notables diferències d'homogeneïtat (26). La nostra valoració que hem fet en base a una prova "passa - no passa", no ens dóna cap informació quantitativa ni permet establir comparacions. Si ens basem exclusivament en un test d'aquest tipus, el procés pot anar evolucionant cap a barreges no satisfactòries que arribin a estar fora d'especificacions.

En uns primers estadis de definició de la qualitat, Dankwerts (6) proposà els conceptes següents:

*Grau de segregació (GS)*. És la mesura de la mida màxima d'aquella regió on no hi ha barreja (on només hi trobem un sol component). Com més petit sigui el GS millor serà la barreja.

*Intensitat de segregació (IS)*. És la diferència de concentració d'un dels components en dues regions de la mateixa mida. A més petita IS, millor barreja.

*Escala d'escrutini (EE)*. L'estimació de la qualitat d'una barreja, tal com hem vist abans, depèn de la "proximitat" amb què l'examinem. En el cas de la dispersió del pigment que hem comentat més amunt, un examen microscòpic de la barreja revelarà una falta d'homogeneïtat del color que no és visible a ull nu. En el límit, si examinéssim la barreja al nivell de partícula, podem arribar a la conclusió que no hi ha hagut barreja. O fins i tot que es tracta d'un únic producte.

Per a una comprensió millor examinem la fig. 1, que representa una barreja binària al 50% en equilibri. Si aquesta barreja l'examinem al nivell d'agregats A, sense haver definit dimensions ni què és el que volem determinar, aquest examen pot induir-nos a creure erròniament que tenim dos productes sense barrejar. Dependrà de l'ús a què destinem la barreja que, de la mida de la mostra, en treiem una conclusió enganyosa o no: si és per a fer comprimits farmacèutics, convé una escala d'escrutini molt petita; no cal ésser tan estrictes si la barreja es per fer una base de pinso per a ramaderia.

A la vegada, i del mateix examen, podríem arribar a una segona conclusió errònia com seria deduir que els dos productes estan en la proporció del 75 i 25%.

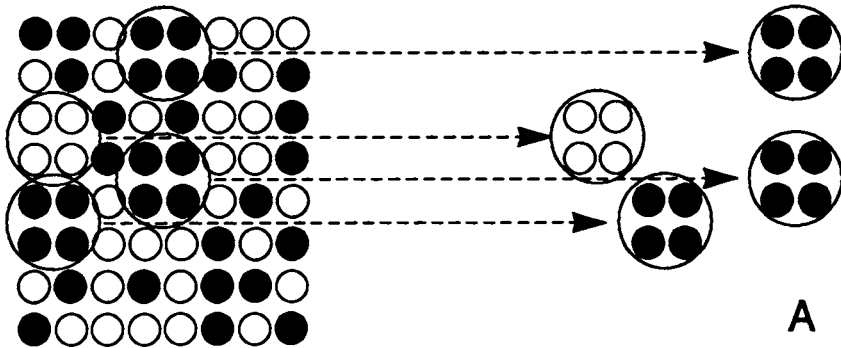


FIGURA 1



L'escala d'escrutini ens fixa, doncs, la mida a què ens convé examinar la barreja.

Entre els exemples que podem trobar-nos a la pràctica, podríem citar:

1) Com que el nostre ull no pot distingir variacions de color en àrees més petites d'un mm, aquesta és l'escala d'escrutini per a la barreja de pigments.

2) Si un pinso ha de tenir una determinada quantitat de nutrient diari, l'EE ha d'ésser la del consum diari de pinso de l'animal. Així, per kg de pinso, l'EE ha d'ésser menor si és pinso per a conills que per a vaques.

3) Altres exemples serien barreges de pols per a fer flams, per a fer comprimits, etc. En tots els casos ha d'haver-hi el principi actiu *per dosi*. No és necessària una barreja més íntima ja que no n'hi ha necessitat pràctica. Només ens calen un GS i un IS suficientment petits.

L'EE pot ésser fixada fins per raons de màrqueting.

Veurem més endavant com el concepte d'escala d'escrutini és important en l'elecció de la mida de les mostres.

Definides aquestes tres nocions, podem resumir:

Fixada l'EE adequada al fi perseguit, la barreja serà:

- millor com més petit sigui el G. de S.
- millor com més petita sigui la I. de S.

Fins aquí hem estudiat com estimar l'homogeneïtat d'una barreja de forma qualitativa. La valoració quantitativa es fa per procediments estadístics, tal com veurem més endavant.

## 2. CLASSIFICACIÓ DELS PRODUCTES A EFECTES DE BARREJA. FLUX

Els productes en pols tenen determinades característiques que influeixen (positivament o negativament) en la seva facilitat per a la barreja.

De totes elles, la més important és la *cohesivitat* (o cohesió), entenent per cohesió la facilitat a fluir. Segons quina sigui aquesta, es divideixen en dos grans grups (Harnby, Edwards i Nienow, (13)): de *flux lliure* (*free flowing*) i *cohesius*.

Els anomenats de *flux lliure* són productes que presenten poca cohesió (o gran mobilitat: rellisquen sobre ells mateixos).

Els *cohesius* són aquells que en virtut de diferents forces interactives es mantenen formant aglomerats més o menys compactes i estables.

Tot i que aquestes característiques són pròpies de cada producte, poden ésser alterades per la presència dels altres productes que formen part de la barreja.

## 2.1. Característiques que afecten la cohesivitat (pròpia o relativa)

Ens interessa conèixer quins són els factors que afecten la cohesió, per a saber si influiran favorablement o desfavorablement en l'obtenció d'una barreja concreta.

Citarem entre aquests factors:

– *Afinitat entre partícules*. En general el seu efecte és petit.

– *Humitat*. Té una gran importància la humitat pròpia dels productes i en determinats casos àdhuc la humitat ambient.

No poden donar-se regles generals quant a l'efecte de la humitat sobre el resultat final; encara que una lleugera humitat no facilités la barreja, possiblement dificultaria la segregació.

La humitat cohesionava les pols o bé per una capa d'humitat que recobreix les partícules, o bé per formar "ponts d'aigua" entre elles. Coelho i Harnby (5) han estudiat amb detall aquesta qüestió.

– *Càrrega electrostàtica*. L'efecte de la càrrega electrostàtica és variable. Es produeix per la fricció tant dels productes entre ells com amb l'equip de barreja. A la pràctica produeix freqüentment efectes indesitjats de gran importància en els resultats de l'operació de barreja, que a més d'ésser imprevisibles en magnitud, fins poden donar lloc a descàrregues elèctriques perilloses. Els diversos autors que han treballat en el tema no han arribat a resultats concloents ni en el seu aspecte teòric, malgrat la seva importància en la pràctica industrial.

– *Forces de Van der Waals*. Tenen escassa importància però les citem per la seva significació universal (Craik, (4)).

Les fórmules a aplicar, derivades de la general

$$F = \frac{k}{d^2}$$

són

$$F = \frac{k}{8 \pi Z_0^2} R \quad \text{i} \quad F = \frac{k}{8 \pi Z_0^2} \left( \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

que corresponen respectivament a l'atracció entre una partícula esfèrica i una paret plana i a la de dues partícules esfèriques entre si.

$k$  és una constant (Van der Waals - Lifshitz).

$Z$  és la distància.

R són els radis respectivament.

La seva repercussió ha estat estudiada per Lifshitz (19).

Per les fórmules anteriors, veiem que l'efecte de les forces de Van der Waals és més important com menors són els diàmetres de les partícules, i per tant, reduir-los per a millorar la barreja és augmentar la cohesió per aquest factor.

Rumpf (27), Train (32), Craik (4), etc., han publicat interessants treballs sobre la interacció de totes les forces implicades en la cohesivitat de les partícules en pols.

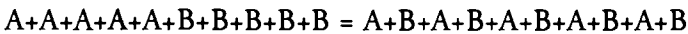
### 3. SEGREGACIÓ

Ja hem definit la segregació com un fenomen invers (simultani o posterior) al de barreja, atribuïble a una certa reversibilitat de l'operació.

També hem citat com abans de començar l'operació de barrejar (és a dir, quan els components encara estan totalment separats) es diu, per extrapolació, que la barreja està en estat *zero*, de *segregació total*, o de *segregació primària*.

L'energia mecànica que proporcionem amb la finalitat d'interposar les partícules d'"A" dins la massa de les partícules "B" és responsable també d'una possible "extracció" simultània d'algun tipus de partícula de la barreja quan aquesta ha arribat a una determinada composició. Però la segregació té lloc també en una barreja ja donada per llesta; en aquest cas la força causant de la segregació és fonamentalment la gravetat, quan la barreja està en moviment (p. ex. en el transport).

Podem doncs imaginar que tant en el procés com en la posterior manipulació de la barreja s'estableix, per a un grau de barreja determinat, una espècie d'equilibri entre barreja i segregació,



en el qual, a diferència de les reaccions químiques, no podem pressuposar cap condició que desplaci l'equilibri en un sentit o un altre.

La segregació es produeix quan les partícules d'un component tenen preferència a agrupar-se, per un motiu o altre, en determinats llocs de la massa de la barreja (o de la barrejadora, o dels equips auxiliars). També hem de tenir present que una barreja llesta estarà sempre sotmesa a l'acció de la

gravetat i que, sotmesa a moviment, teòricament podrà segregarse més o menys i en qualsevol moment després de la seva correcta preparació.

A efectes pràctics, doncs, no n'hi ha prou a barrejar; hem de mantenir la barreja en totes les situacions posteriors. Podem dir per tant, i d'una manera molt general, que:

- En una barrejadora movem el producte: barregem (i també té lloc allora una certa segregació).

- Posteriorment a l'operació de barreja, la barreja llesta estarà habitualment sotmesa a moviments (sovint en condicions fora del nostre control): únicament segreguem.

Per a evitar al màxim una possible segregació posterior, cal posar molta atenció a la manipulació del producte un cop barrejat. Podríem sospitar un mal procés de barreja (i esforçar-nos en la seva correcció) i en realitat tractar-se d'una barreja enllestida correctament i posteriorment segregada.

### 3.1. Causes de la segregació

#### *Segregació deguda als productes*

Sobre la doble acció barreja-segregació influeixen les següents característiques relatives de les partícules a barrejar, que cal afegir a les ja estudiades en parlar de la mobilitat:

- La diferència entre les mides (diàmetres) respectives.
- La diferència de densitats.
- La diferència de forma.
- La diferència de rugositat.
- La diferència d'elasticitat.

De totes aquestes diferències, la més important, de llarg, és la diferència de mida entre les partícules, que en la majoria dels casos és la responsable principal de la segregació. Com a regla general, l'efecte de la relació de diàmetres pot estimar-se així:

- Diferència de diàmetres superior a 75  $\mu\text{m}$ : Segregació fàcil
- Diferència entre 75 i 10  $\mu\text{m}$ : Segregació relativa
- Diferència inferior a 10  $\mu\text{m}$ : Segregació difícil

O, dit d'una altra manera, es produirà fàcilment segregació quan la relació de diàmetres sigui igual o superior a 4. D'aquí ja podríem anticipar que en determinades circumstàncies, una forma excel·lent de barrejar productes serà moldre'ls junts.

La diferència de densitats també té influència, encara que en una escala molt més modesta.

La resta de característiques són en general molt menys importants, però caldrà recordar-les per la seva possible influència en aquelles operacions que ens donin dificultats a l'hora de barrejar.

### *Segregació deguda al maneig. Mecanismes de segregació.*

La segregació té lloc segons diferents mecanismes; en citarem els més importants.

– Projecció de les partícules en l'aire.

En determinades barrejadores, com veurem més endavant, la barreja té lloc projectant les partícules en l'aire.

En aquest cas, les partícules petites tendeixen a caure abans que les més grosses, amb la conseqüent separació. El fenomen es regeix per la mateixa fórmula que ens dona l'espai horitzontal recorregut per una partícula:

$$s = v_0 \frac{\rho}{18 \mu} \cdot D^2$$

on

$s$  = espai recorregut

$v_0$  = velocitat inicial

$\rho$  = densitat de la partícula

$\mu$  = densitat del fluid (generalment aire)

$D$  = diàmetre de la partícula

– Percolació.

Si una massa composta de partícules de diferents mides se sotmet a moviment, té lloc una reordenació, ja que en moure's, les partícules més grosses donen espais buits que són omplerts per les més fines. El resultat final és que aquestes es desplacen cap a la part baixa de la massa, i les partícules més grosses queden acumulades a la part superior. La percolació té lloc segons Williams (33) quan:

– El moviment dels productes dins la barrejadora té lloc en capes horitzontals. Aquest és un aspecte tècnic a tenir en compte en la selecció d'una barrejadora.

– S'aboca la barreja en caiguda lliure. Aquesta és una situació freqüent

en el buidat de les barrejadores ja que descarreguen gairebé sempre per gravetat i per una obertura inferior.

– La barreja llesta se sotmet a vibració. Cosa també freqüent, perquè generalment les barreges s'utilitzen en llocs distants d'allà on s'han fabricat i per tant estan subjectes a moviment pel transport.

– Elutriació.

És un altre mecanisme causant de segregació que té lloc en l'ompliment de sitges i que es presenta per diferències de mida de les partícules superior a les 50 micres. La segregació, en aquest cas ve motivada pel corrent d'aire ascensional dins la sitja quan aquesta es va omplint. Aquest aire posa en suspensió les partícules més fines, que van dipositant-se en estrats sobre altres capes formades per partícules més grosses.

L'elutriació té lloc amb el concurs de la gravetat.

### 3.2. Mesura de la segregació

En qualsevol procés industrial, a més de la segregació produïda per les característiques dels productes, hem de considerar la que pugui atribuir-se al tipus de barrejadora utilitzat. Per tant interessa disposar d'una mesura de la segregació produïda en diferents tipus de màquina.

Amb aquest propòsit, Williams i Kahn (34) definiren un *Coefficient de Segregació*, coeficient que es calcula experimentalment per als diferents tipus de barrejadora que ens interessin, i utilitzant sempre els mateixos productes a barrejar objecte d'estudi. Carregant les corresponents barrejadores pilot de cabuda equivalent amb iguals quantitats de components a barrejar, al cap d'un cert temps de treball, igual per totes, es determinen en les meitats superior i inferior de la massa els respectius continguts de partícules originals de cada tipus.

A partir d'aquestes dades, es calcula el coeficient de segregació  $C_{sg}$  per la fórmula següent:

$$C_{sg} = \frac{W_{GS} - W_{GI}}{W_{GS} + W_{GI}} \cdot 100$$

$W_{GS}$  i  $W_{GI}$  són els pesos del component de mida més gran en les meitats superior i inferior respectivament. És evident que aquest coeficient val zero en una barreja perfecta i 100 en cas de segregació total.

El coeficient de segregació no s'utilitza per a determinar la qualitat d'una barreja, sino el comportament de la màquina. La qualitat i el progrés quan-

titatiu de l'operació s'obté per comparació d'uns valors anomenats *índexs de barreja*, el càlcul dels quals veurem més endavant. L'interès del coeficient de segregació es limita, com ja hem dit, a efectuar estudis comparatius per a escollir la millor barrejadora per un problema concret.

## 4. MECANISMES I MÈTODES DE BARREJA

### 4.1. Mecanismes de barreja

La classificació d'aquests mecanismes es deu a Lacey (15). En el seu treball en defineix tres, als quals Leva (17) afegí la fluidització com a desdoblament d'un d'ells. Molts altres autors han afegit consideracions o proposat modificacions en la classificació d'aquests mecanismes.

Segons Lacey, els mecanismes tradicionals són:

- Difusió.
- Convecció (per acció mecànica).
- Fluidització (convecció per aire/gas (Leva)).
- Cisallament.

Com que en les barrejadores modernes es juxtaposen cada vegada més els tres mecanismes, es tendeix actualment a classificar-les en “segregatives” i “no-segregatives” (10).

Abouzeid ha publicat recentment una revisió sobre aquest tema (1).

*Difusió.*– La barreja per difusió té lloc quan les partícules “rodolen” unes sobre altres per acció de la barrejadora. És el mecanisme típic de les barrejadores constituïdes per un contenidor tancat que roda sobre un eix, i on la barreja es fa per l'acció de la gravetat, si bé es presenta igualment en la majoria de màquines. La difusió produeix fàcilment segregació.

*Convecció.*– Consisteix en el desplaçament d'agregats comparativament grossos de partícules per acció mecànica reiterada. Aquest desplaçament, igual que en la convecció tèrmica, té lloc bàsicament en sentit vertical. L'equip és més sofisticat que el de difusió; la barrejadora té un recipient contenidor fix, proveït d'elements mòbils interiors de tipus molt variable que són els que en combinació amb la gravetat efectuen la barreja.

*Fluidització.*– El mecanisme és el mateix que el de la convecció. La diferència és que l'element que fa moure la massa és un gas (generalment

aire), que la posa en suspensió. L'hem citat separatament de la convecció mecànica perquè tant els aspectes teòrics com els equips utilitzats són notablement diferents.

*Cisallament.*— Es denomina així el desplaçament dels productes no en agregats com en la convecció, sino en plans adjacents. Aquest desplaçament és efectuat per pales o culleres que poden ésser tant de moviment horitzontal com vertical. El cisallament vertical, moltes vegades indestriable de la convecció, té una considerable importància tècnica.

#### 4.2. Mètodes de barreja. Procés continu i discontinu

Hi ha dues maneres bàsiques de dur a terme l'operació de barreja:

- Discontínua (per recàrregues o *batch*).
- Contínua.
- Procés discontinu.

És el mètode diguem-ne tradicional i opera, com el seu nom indica, carregant la barrejadora amb la quantitat desitjada de cada un dels components, efectuant la barreja durant el temps establert, i descarregant la barrejadora un cop finalitzada l'operació. Normalment hi ha una quantitat important de producte en procés. Després de la descàrrega de la barrejadora és quan, com repetidament hem dit, poden presentar-se o agreujar-se els problemes de segregació.

- Procés continu.

L'equip, especialment dissenyat, es carrega de forma ininterrompuda i amb les proporcions *exactes* i *simultànies* dels components de la barreja desitjada. A la vegada s'evacua també la barreja a mesura que aquesta va quedant llesta. La quantitat de material en procés en aquest cas és molt petita.

En l'apartat *Obtenció de barreges a la pràctica* exposarem els avantatges i els inconvenients de cada un dels dos tipus de procés.

### 5. LA QUALITAT DE LES BARREGES I LA SEVA DETERMINACIÓ

Ja hem definit anteriorment uns conceptes (grau de segregació, intensitat de segregació, escala d'escrutini) que ens orienten si la barreja complirà amb les expectatives, i que a la vegada permeten aproximar la mida de la mostra i la precisió de les determinacions a fer sobre aquesta.



En aquest capítol ens ocuparem de com determinar quantitativament l'evolució del procés de barreja i la bondat del producte final obtingut. S'utilitzen per això uns valors que denominem *índexs de barreja* calculats a partir de les dades estadístiques obtingudes en les anàlisis de les mostres tretes per aquest fi.

## 5.1. Mesurament de la qualitat

*Mostreig. Determinacions quantitatives. Índexs de barreja.*

L'evolució d'un procés de barreja, o sigui la mesura del seu avanç, l'obtinguem a partir del tractament estadístic de les mostres que anirem extraient seqüencialment.

*Mostra. Mida. Obtenció*

“Mostra” és una part alíquota d'un univers, amb l'examen de la qual pretenem inferir alguna característica d'aquest. En el cas d'una barreja, l'examen de la mostra ens ha de servir per a estimar si la barreja és bona o no: és obvi que aquesta estimació serà menys exacta com menys representativa sigui la mostra i com més imprecises siguin les anàlisis.

La representativitat és funció del *nombre de partícules que conté la mostra* (recordem que s'ha dit a propòsit del concepte d'Escala d'Escrutini). És evident que la mostra serà més representativa com més gran sigui el nombre de partícules que contingui. Això pot assolir-se per dos camins: o bé augmentant la mida de la pròpia mostra (cosa a vegades improcedent), o bé utilitzant productes molts finament a fi que en una mostra de mida raonable hi hagi gran nombre de partícules. Lacey (16) i Train (32) s'han referit detalladament a aquesta qüestió.

L'obtenció d'una mostra representativa és, al seu torn, una tasca que, malgrat que pugui no semblar-ho, és de realització delicada, ja que la pròpia acció de mostrejar pot ésser causa de segregació i donar per tant una falsa informació sobre la composició de la barreja. Kish (14) ha examinat extensament els mètodes de mostreig i les seves limitacions; aquí apuntarem només uns criteris generals a tenir en compte:

- A pitjor barreja, major dificultat d'obtenir mostres representatives.
- És preferible mostrejar una massa en moviment que una d'estàtica.
- Convé mostrejar freqüentment i en mostres petites.

Cal tenir present que per “mostrejar” entenem *treure diverses mostres de diferents punts de l'univers i totes simultàniament*. D'aquest conjunt en direm un *lot*, si bé en general s'utilitza la paraula “mostra” com a sinònim de “lot”.

El mostreig es practica amb utillatges adequats, que permeten obtenir les mostres, com hem dit, a la vegada i de diferents punts de la barreja en repòs, o bé millor encara, mostrejant un flux de producte. Junt amb altres autors, Harnby (13) afirma que aquest és l'únic sistema fiable: no s'hauria de mostrejar de dins de la barrejadora, sinó que s'hauria de fer sortir barreja de la màquina sense parar-la i prendre la mostra durant la sortida. Aquestes limitacions i dificultats són les que han portat a dissenyar aparells o dispositius de mostreig per a obviar la segregació produïda en l'obtenció de mostres.

## 5.2. Tractament estadístic dels resultats analítics de les mostres

### *Càlcul de l'índex de barreja*

Ja hem dit que per a obtenir valors representatius de l'estat de la barreja s'han de prendre simultàniament diverses mostres. Fetes les oportunes anàlisis, aplicarem sobre els resultats els tractaments estadístics corresponents que ens permeten calcular els valors que coneixem com a *índexs de barreja*, que són els que ens serveixen per a avaluar el grau de barreja assolit.

En l'exposició que segueix utilitzarem conceptes que poden trobar-se en qualsevol tractat d'estadística (Snedecor (29), Adams (2), etc.). Recordarem algunes definicions generals.

Remarquem que en aquesta exposició ens referirem només a barreges binàries de partícules de la mateixa mida, atès que l'estudi de barreges multicomponents i multimides és de gran complexitat matemàtica (vegeu, p. ex., Poole, Taylor i Wall (22), Stange (30, 31), Fan (9), Too (31), etc.).

### *Composició mitjana. Desviació estàndard. Variança*

#### *Composició mitjana*

Si prenem un lot d'"n" mostres (el nombre "n" sovint es defineix com la "mida de la mostra", que representa igualment el "nombre de mostres pre-

ses”) i determinem la composició en funció d'un dels components (“x” per exemple), la composició mitjana ( $\bar{x}$ ) ve donada per l'expressió

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_n}{n}$$

Aquesta mitjana no pot ésser utilitzada sola per a determinar el grau de barreja. Àdhuc, com pot comprendre's fàcilment, pot donar-se el cas que la mitjana no correspongui ni a cap valor real.

La representació gràfica de la freqüència respecte als valors individuals de la “x” és la coneguda corba de campana de Gauss (fig. 2). El valor  $\bar{x}$  és el del punt d'inflexió de la corba.

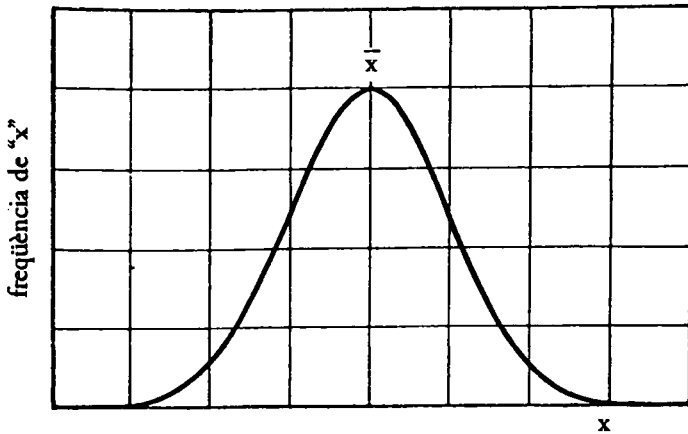


FIGURA 2

#### *Desviació estàndard. Variança (estimació)*

La *desviació estàndard* d'un lot de mostres és essencialment un concepte matemàtic i segons la seva coneguda definició és l'arrel quadrada de la suma dels quadrats de les diferències entre cada un dels valors de les mostres del lot i la seva mitjana, dividida pel nombre total de mostres menys 1.

La fórmula de la desviació estàndard, és per tant,

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Notem que en passar de la fórmula de la mitjana a la de la desviació estàndard, el denominador passa de "n" a "n-1", per haver-se perdut un grau de llibertat. Aquesta notació correspon no exactament a la variança sinó a l'*estimació* de la variança.

La desviació estàndard és una primera mesura de la uniformitat d'una barreja, i, essent proporcional a la diferència entre cada un dels valors de la x i el seu valor mitjà, ja serà bastant representativa, i podrem començar a dir que una barreja bona tindrà una baixa desviació estàndard. Traient lots de mostres a diferents intervals de temps, podrem observar si la desviació estàndard baixa, es manté, o creix, i deduir d'aquí, en primera aproximació, si la barreja millora, està estabilitzada, o se segrega.

(Recordem que en estadística s'utilitza la lletra "s" com a estimacions de la desviació estàndard, mentre que els valors exactes o reals es representen per "σ")

La *variança* és el quadrat de la desviació estàndard, i és el valor que s'utilitza en el càlcul dels "índexs de barreja" més utilitzats.

La fórmula que ens dóna la variança és:

$$s^2 = \frac{\sum_1^n (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}$$

### *Variança (real) "σ"*

Si el procés que hem seguit fins ara es repeteix diverses vegades, s'obté un ventall de composicions mitjanes, de desviacions estàndard i d'estimacions de variances. A partir d'aquestes últimes podrem construir una nova corba (fig. 3) que ens relacioni els valors individuals de les variances amb la seva freqüència. El punt d'inflexió (o màxim) d'aquesta corba *correspon al valor real de la variança de la barreja en estudi* ("σ<sup>2</sup>"), i això ens permet calcular la desviació estàndard de les estimacions de la variança (també denominat error estàndard de la variança).

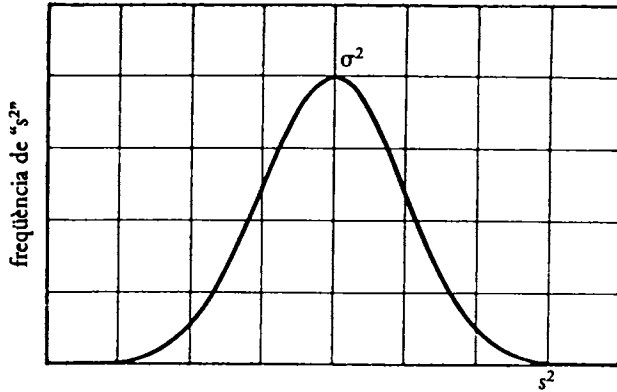


FIGURA 3

L'àrea sota aquesta segona corba representa la probabilitat que tenim de trobar determinats valors de la variança de les mostres d'una barreja, i per tant la probabilitat que el resultat obtingut sigui real, o bé si, al contrari, es tracta d'un valor erràtic. Aquestes probabilitats vindran donades com a percentatge de l'error que ens hàgim fixat com a acceptable.

Aquesta forma de càlcul representa un gran esforç analític; per això s'accepta que la corba de variances és, o bé una corba normal, o una corba " $\chi^2$ ". La validesa estadística d'aquesta estimació, al segon nivell de la precisió de la qualitat de la barreja, sols és possible si la corba de distribució de les mostres (fig. 2) és la d'una distribució normal. Si ho és o no, pot determinar-se amb mètodes específics que són tractats a la literatura adient (14, 29).

Suposat que la composició de les mostres tinguin una distribució normal, la precisió de la variança de la barreja pot ésser calculada amb dos mètodes, segons si el nombre de mostres tretes és inferior o superior a 50.

A menys de 50 mostres.— No podem assegurar que la corba de distribució de les variances sigui també normal. Aleshores la corba es descriu millor com una corba " $\chi^2$ ", i els límits inferior i superior de la variança es determinen amb els mètodes habituals en aquest tipus de càlcul.

A més de 50 mostres.— En aquest cas podem confiar que la distribució de variances seguirà una llei normal. El nivell de fiabilitat anirà donat pel valor "t" (Student).

#### *Valors límits de les variances*

Per al càlcul d'alguns dels índexs de barreja més utilitzats, necessitem també, a més dels valors de la variança determinats experimentalment sobre

les mostres, els valors límits de la variança, entenen per valors límits els que corresponen al de la barreja abans d'iniciar l'operació (o barreja en segregació primària), i al de la barreja en equilibri (o *random*).

*Variança d'una barreja en estat de segregació primària (estat inicial).*

Lacey (16), Fan, Chen i Watson (10), Boss (3), etc., han demostrat que el valor de la variança en aquestes condicions pot expressar-se per

$$s_0^2 = p (1-p)$$

on  $p$  és la proporció unitària (tant per u) d'un dels dos components de la barreja en segregació primària.  $p$  indica igualment la *probabilitat* de trobar aquest component en una barreja ideal.

Observi's que el càlcul de la variança en estat de segregació primària, és independent de la mida de la mostra.

Així, i a títol d'exemple, per a una massa total de productes A + B amb un contingut d'un 25% de producte A, la variança abans d'iniciar el procés, calculada segons la fórmula anterior, és 0,1875.

*Variança d'una barreja en estat d'equilibri (random).*

Per raonaments semblants als de la segregació primària, els autors citats demostren que la fórmula de la variança d'una barreja en estat d'equilibri és:

$$s_r^2 = p (1-p) / N$$

on  $N$  és el nombre de partícules a cada mostra. En aquest cas, en la fórmula intervé la mida de la mostra, i en conseqüència cada una d'elles haurà de tenir el mateix nombre de partícules. A fi de simplificar els càlculs, es procura que siguin de l'ordre de 100 o 1000.

Seguint amb l'exemple anterior, i prenent mostres de 100 partícules (i tantes mostres com sumessin el volum total de la barreja), la variança seria 0,001875.

Per tant, podem afirmar que la variança de qualsevol barreja pràctica d'A + B amb una proporció d'A del 25 %, estarà compresa entre els límits 0,1875 i 0,001875.

És evident que per a una *barreja ideal* (que sabem és impossible d'obtenir a la pràctica), i atès que totes les mostres tindrien exactament la mateixa composició, *la variança seria zero*.

Les variances obtingudes experimentalment per *barreges reals* estaran, per tant, compreses entre els casos límits anteriors.

### *Índexs de barreja*

Els valors de la desviació estàndard i de la variança obtinguts segons les fórmules proposades a l'apartat anterior, s'utilitzen en el càlcul d'uns valors sense dimensions denominats *índexs de barreja*. Aquests índexs són els que ens permetran seguir el progrés, establir comparacions i en definitiva avaluar la qualitat i l'evolució d'una barreja.

La dificultat de posar unes bases teòriques vàlides a tots els casos sobre els problemes de barreges de sòlids ha donat lloc a la formulació de nombrosos índexs diferents que s'ajusten preferentment als problemes estudiats per llurs autors. Per això, mentre Fan, Chen i Watson el 1970 (10) en tabularen 24, Boss (3), el 1986, en recull fins a 37. A tots dos treballs es fa una crítica i una valoració comparatives.

Atesa aquesta diversitat, una vegada decidit d'acord amb aquesta bibliografia quin és l'índex de barreja més adient al problema que ens ocupa, ens hi hem de mantenir fidels al llarg de tot el nostre treball.

D'aquests estudis en resulta que en general els índexs més representatius són els de Lacey (16) i de Rose (24), aplicables preferentment l'un o l'altre segons si es tracta d'avaluar la *velocitat* d'un procés de barreja, o de determinar-ne l'*estat final*.

La fórmula que ens dóna el de Lacey és

$$M_1 = \frac{s_0^2 - s^2}{s_0^2 - s_r^2}$$

I el de Rose

$$M_2 = 1 - \frac{s}{s_0}$$

Com es pot veure, l'índex de Lacey ens dóna la relació entre quina part de barreja ja ha tingut lloc i la que *podria tenir lloc teòricament*.

El sol valor de l'índex de barreja ens dóna una orientació de la qualitat d'una barreja. Rose i Robinson (25) donen com a il·lustració la taula següent, tot relacionant l'índex de barreja (segons la fórmula de Rose) amb la qualitat.

Qualitat de la barreja	Valor de l'índex
Molt dolenta	< 0,70
Dolenta	0,70 - 0,80
Regular	0,80 - 0,90
Bona	0,90 - 0,95
Molt bona	0,95 - 0,98
Excel·lent	> 0,98

D'acord amb aquesta taula, els valors d'M que anem obtenint ens permeten d'establir l'evolució d'una operació de barreja. Aquesta evolució pot representar-se gràficament respecte al temps, i en aquestes representacions sovint es comprova com els índexs de barreja, que al principi han anat creixent (millora de la barreja), després d'un temps més o menys llarg (generalment de l'ordre de minuts i subjectes a les condicions específiques de cada cas), comencen a disminuir, com ja es podia esperar pel conegut efecte de la segregació.

## 6. OBTENCIÓ DE BARREGES A LA PRÀCTICA

Com a resum del que hem dit fins ara, per a obtenir una barreja a la pràctica ens caldrà aconseguir, doncs:

- Barrejar efectivament els components.
- Evitar la segregació; fent especial atenció a la que té lloc en la manipulació posterior de la barreja obtinguda.

I tenir present també que els resultats finals de l'operació de barrejar seran influïts per:

- El comportament dels productes.
- Condicions que fan referència al procés.
- Condicions que fan referència a l'equip de barreja.
- La manipulació posterior.

Necessitem doncs saber quina és la influència i quines accions podem prendre respecte a cada un d'aquests epígrafs, per tal d'obtenir barreges satisfactòries.



## 6.1. Comportament dels productes. Com modificar-lo

Ja classificarem els productes com de “flux lliure” i “cohesius”, i els factors que afectaven el seu comportament tant propi com relatiu.

Considerarem ara com podem actuar sobre aquests factors per a modificar la interacció que té lloc entre dos productes en posar-los un enfront de l'altre a efectes de barreja.

– Humitat. Un augment de la humitat afavoreix gairebé sempre la barreja. L'addició de petites quantitats d'aigua (de l'ordre d'un 2%) millora en molts casos el resultat. A quantitats superiors, l'efecte pot ésser negatiu. Pel mateix motiu cal vigilar la humitat ambient.

– Temperatura. No afecta en general la qualitat de la barreja si no és que modifica alguna propietat dels productes (p. ex. si els fa adherents).

Convé conèixer l'efecte que té sobre cada cas particular.

– Pressió. Igual que en el cas anterior. Tenir-la en compte per si convé treballar al buit.

– Càrrega electrostàtica. Pot fixar uns productes sobre els altres, o adherir-ne algun a la pròpia barrejadora. En aquest últim cas cal provar de connectar l'equip a terra.

– Diferència de diàmetres. Si és possible, cal treballar amb productes suficientment fins. Recordem que la segregació no s'acostuma a presentar per diferències de granulometria inferiors a 10  $\mu\text{m}$ , condició que pot assolir-se si els productes permeten la molturació conjunta.

## 6.2. Condicions que fan referència al procés

L'obtenció d'una barreja satisfactòria rep la influència de les circumstàncies en què duem a terme la operació. Destaquem per la seva importància:

– El pes de cada producte i la proporció relativa. Si la proporció del component menor és inferior al 5/1000, serà millor barrejar en dues etapes.

– El mètode continu o discontinu; molt lligat al tipus de barrejadora.

– L'ordre, el lloc, el moment i la velocitat d'addició dels components.

– El temps de barreja. A determinar segons l'evolució del corresponent índex.

– L'addició de modificadors de la cohesivitat.

És necessari avaluar l'efecte de tots aquests condicionants en el cas concret que ens ocupi (bibliogràficament, per referències de casos semblants, o experimentant en planta pilot, etc.).

### 6.3. Condicions que fan referència a l'equip de barreja

Afectaran el procés de barreja:

- La geometria i les dimensions de la màquina.
- La relació entre el volum de la barrejadora i el de la suma dels components. Relacions usuals satisfactòries són de l'ordre d'un ompliment entre 1/2 i 2/3 de la màquina.
- La geometria, la varietat, les dimensions, la distribució i la velocitat dels elements mòbils.
- Disseny i/o dispositius mecànics de càrrega i descàrrega de la barrejadora.
- Materials de construcció i acabat de superfícies.

#### *Manipulació de la barreja*

Per a evitar la segregació, durant i després del procés, tant per a obtenir mostres representatives com per a no desestabilitzar la barreja, hem de tenir en compte:

- Com traiem les mostres de la barrejadora.
- Com manipulem aquestes mostres.
- On posem la barreja un cop llesta.
- Precaucions per a evitar vibracions (transport, etc).

### 6.4. Opcions de mètode: continu o discontinu

Hem citat a *Mètodes de barreja* la possibilitat d'un procés continu o discontinu. Abans de passar a l'estudi de les màquines utilitzades en els processos de barreja, convindrà detenir-nos un moment a exposar els pros i els contres de cada un dels dos processos.

Com a condició prèvia, cal dir que només serà factible un procés continu quan es tracti d'obtenir grans quantitats de barreja.

Feta aquesta salvetat, els avantatges del procés continu són:

- Equip de barreja més petit.
- Segregació menor durant l'operació.
- Essent normalment una operació intermèdia d'un procés continu més complex, s'evita en gran mesura la segregació posterior.
- Més aprofitament horari de la barrejadora, ja que evita temps morts de càrrega i descàrrega de la màquina.

- Poc material en curs.
  - Estalvi econòmic per disminució de pèrdues en cas d'avaría.
  - Menor consum energètic (eliminació de parades i arrancades de motors més petits).
  - Estalvi de mà d'obra. Menys manipulació, facilitat d'automatització.
  - Estalvi d'espai pel volum menor de l'equip.
- I té com a inconvenients:
- No és adequat a lots petits o canvis freqüents.
  - No és adequat per a components minoritaris.
  - És difícil de posar i mantenir a règim.
  - Necessita una alimentació regular de productes en quantitat i proporció, tant més difícil com més siguin els components.
  - Sensible a la densitat dels components en cas de dosificació volumètrica.
  - Desviacions impossibles de corregir *a posteriori*. Cal un control acurat de les proporcions sobre la marxa.
  - Elevat cost de l'equip (per a una fiabilitat adequada es necessiten bàscules múltiples, regulació de les proporcions per PLC, etc.).

## 7. TIPUS DE BARREJADORES. CLASSIFICACIÓ

Tal com hem dit més amunt, al llarg del temps s'han proposat diferents criteris per a classificar les barrejadores, (Moran (21), Williams (35), Lloyd i Yeung (20), etc.). Utilitzarem aquí la classificació de Williams recollida també en un treball precedent de Rosell (26).

Aquesta classificació contempla a la vegada tant la tendència a la segregació com el principal mecanisme de barreja. Sota aquests conceptes, les barrejadores es classifiquen en:

- *Difusives* (segregatives).
- *Convectives* (no segregatives).
- *Cisalladores* (segregatives).

Hi caldrà afegir encara un altre grup, que comprendrà les barrejadores que podríem denominar inespecífiques.

Insistirem que en les barrejadores industrials, el mecanisme bàsic sempre va acompanyat, en més o menys grau, per un (o més d'un) dels altres mecanismes citats.

Llistarem a continuació els tipus de barrejadores industrials utilitzats més sovint, així com algunes dades orientatives de dimensions, capacitat, etc.

### 7.1. Barrejadores difusives

Presenten problemes de segregació més o menys greus, segons la geometria de la màquina.

Són de contenidor mòbil.

Tipus: cub rotatiu. Tambor inclinat (fig 4). De doble con (fig. 5), simètric o asimètric. De tipus "V" o "Y" (fig. 6). De moviment tridimensional (fig 7).

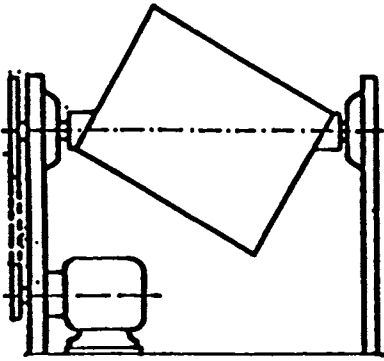


FIGURA 4. Tambor inclinat (*tumbler*)

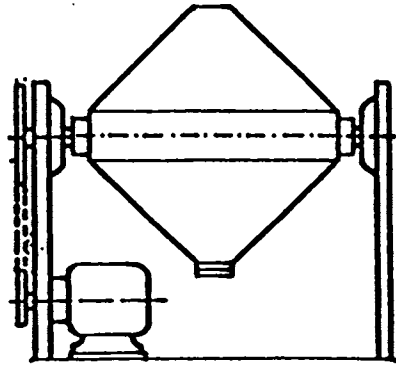


FIGURA 5. Doble con

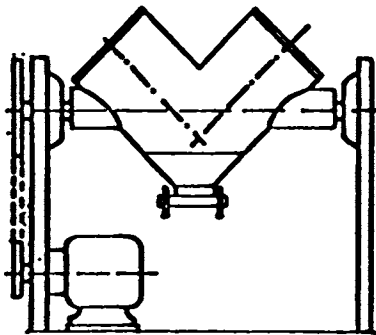


FIGURA 6. Tipus "V"

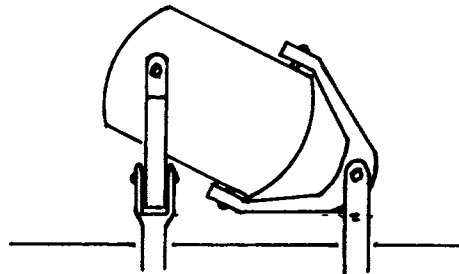


FIGURA 7. De moviment tridimensional

Totes poden equipar-se amb dispositius per a disminuir la segregació (pantalles interiors, etc.).

Un temps normal de barreja és de 10-15 minuts.

La velocitat és lenta (de 10 a 15 r.p.m.).

El volum pot arribar als 50 m<sup>3</sup> als models més simples. Els models més complexos (moviment tridimensional, p. ex.) són de petita cabuda i usats per a microbarreges.

## 7.2. Barrejadores convectives

En general, són menys segregatives que les difusives.

Estan constituïdes per un contenidor fix, generalment de forma semi-cilíndrica horitzontal, proveït d'elements interiors mòbils (eixos amb pales, cintes, etc.), que són els responsables de moure la massa a barrejar. Altres tipus tenen el contenidor vertical (cilíndric o cònic), amb elements mòbils també verticals (generalment en forma de rosca).

Tipus: de cinta (fig. 8). Cilíndriques amb rosca vertical (fig. 9). Còniques (con invertit), amb rosca de desplaçament circular o orbital a la part superior (fig. 10).

El temps de barreja és molt variable, segons les diferents configuracions de les màquines. En general són de moviments lents (de 15 a 60 r.p.m.).

La cabuda pot arribar fins a 20 m<sup>3</sup>.

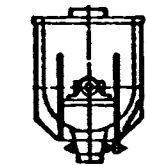
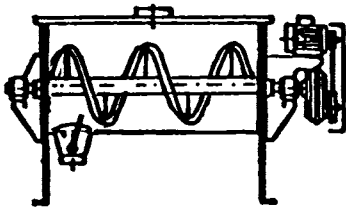


FIGURA 8. De cinta

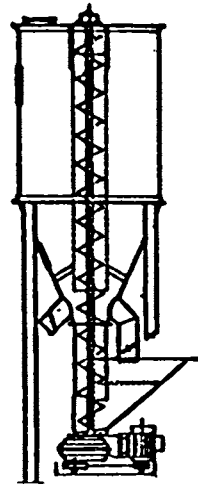


FIGURA 9. Rosca vertical

Intermèdies entre les barrejadores convectives i les cisalladores hem de citar per la seva importància les de tipus d'arada (fig. 11). Consisteixen en un cilindre horitzontal totalment tancat dins el qual gira a 200-250 r.p.m. un eix proveït d'uns braços suportant unes peces en forma de rella (d'aquí la seva denominació "d'arada") que s'ajusten a pocs mil·límetres de la paret. Les relles centrifuguen els productes en trajectòries entrecruades; el resultat és una barreja eficient en temps molt curts. S'utilitzen per productes difícils o per a una gamma àmplia de proporcions. Són molt més ràpides que les convectives

Temps de barreja molt curts (1 a 5 min.).

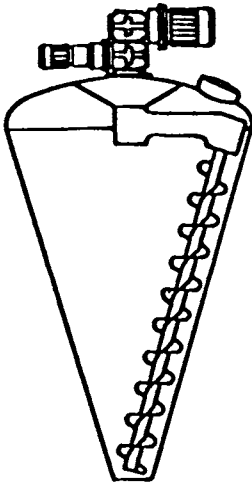


FIGURA 10. Rosca mòbil

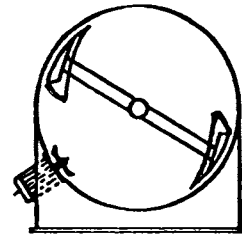
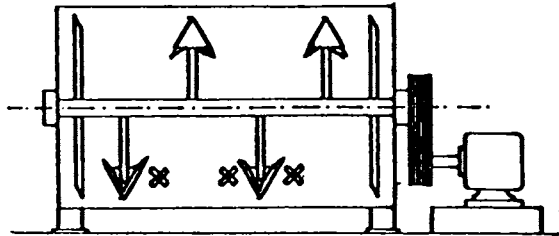


FIGURA 11. Tipus d'arada

Cabuda mitjana (5 m<sup>3</sup> màxim).

Ja es dedueix per la seva descripció que són màquines que exigeixen una construcció mecànica acurada.

Dins el grup de les convectives podem incloure-hi les denominades de *fluidització*, en què el moviment del material es produeix per un corrent ascensional d'aire o qualsevol altre gas (fig. 12). No s'ha d'oblidar, en considerar aquest tipus de barrejadora, el possible fenomen pertorbador de l'elutriació.

També ens cal citar aquí un altre tipus, anomenat *convectiu fluiditzador*, on la fluidització és originada mecànicament per les mateixes pales res-

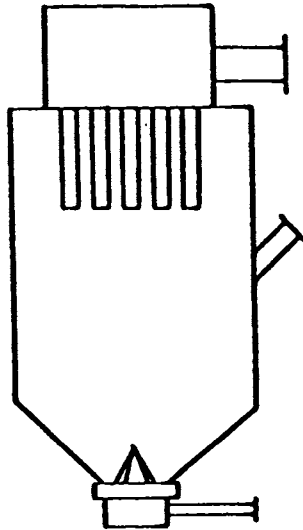


FIGURA 12. Fluïdització

ponsables de la convecció. Aquestes pales, muntades sobre dos eixos paral·lels que giren en sentit contrari i ascendent pel centre de la màquina, produeixen una enèrgica convecció; però també i a la vegada, en llançar els productes en l'aire, produeixen una zona fluïditzada mecànicament. És en aquesta zona on té lloc una barreja molt efectiva.

### 7.3. Barrejadores cisalladores

En general, poden definir-se com a segregatives.

També tenen el contenidor fix. Els mecanismes mòbils interiors desplacen el producte en estrats horitzontals.

Tipus: "Batedora" o Turmix (fig 13).

Molt ràpides (fins a 1000 r.p.m.).

Petita cabuda. Màxim fins a 1 m<sup>3</sup>.

### 7.4. Barrejadores diverses

Per a treballs específics, es construeixen barrejadores de classificació difícil.

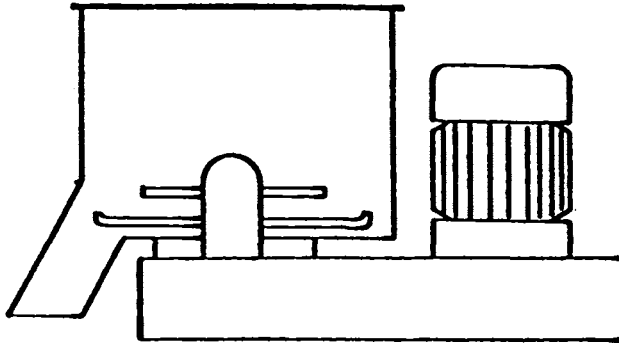


FIGURA 13. Batedora

Citarem entre aquestes les de tipus Muller (dites també “conxes” o de solera), en què dins un recipient cilíndric (en forma de cubeta) hi ha uns rodets que efectuen un treball de desintegració d'aglomerats (fig 14). Els rodets poden girar o bé verticalment o horitzontalment. A l'acció de barreja s'hi afegeix un efecte de molturació, que ajuda a la realització d'aquella.

També incloem en aquest grup les que podem denominar estàtiques, ja que no presenten elements mòbils. La barreja es produeix per efecte de la gravetat. Tenen dues configuracions bàsiques: en una, la barrejadora pròpiament dita, és un conducte o tub vertical per on es fan caure els productes. El conducte està proveït de deflectors que són els responsables de la barreja. L'altre tipus consisteix en una sitja (per això es coneixen també com a “sitges barrejadores”, fig. 15), que es carrega en capes successives dels productes a barrejar. Els productes s'extreuen dels seus diferents nivells per mitjà

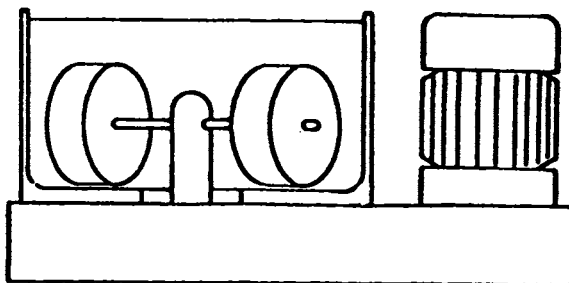


FIGURA 14. Conxa



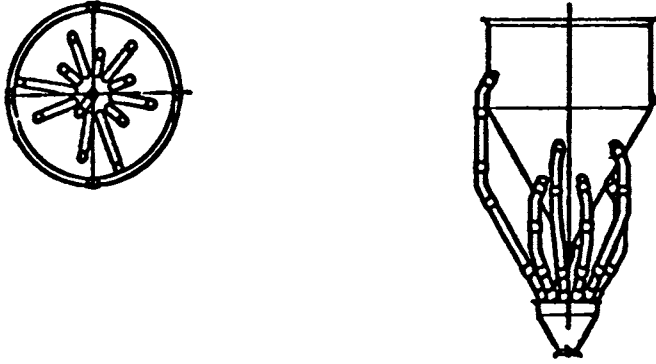


FIGURA 15. Sitja barrejadora

de tubs-sonda de diàmetres proporcionals a les quantitats que entren a la barreja.

La majoria dels tipus presentats, i amb les oportunes modificacions mecàniques, poden adaptar-se per a barrejar en continu.

No obstant això, hi ha màquines específicament dissenyades per al treball en continu. En descriurem breument una, tant pel seu interès com per la seva originalitat.

La màquina en si es pot classificar com a difusiva, però la seva disposició la fa operativa només en continu, a diferència de les altres difusives. Consta d'un tambor horitzontal que gira sobre el seu eix, eix format per un tub fix dins el qual passa una cadena transportadora. A l'interior del tambor, el tub té dos orificis o finestres, una a cada extrem: la primera (en el sentit de marxa de la cadena), està a la part inferior del tub, i l'altra a la part de dalt. Els productes, arrossegats per la cadena, entren dins el tambor, on cauen en trobar-se amb la finestra inferior. La rotació del tambor, a més de barrejar els productes, gràcies a unes pantalles en espiral fixades a la seva paret, els fa avançar cap a l'altre extrem, on una espècie de catúfols carreguen la barreja a la cadena a través de la finestra superior del tub.

Com a resum, el quadre següent relaciona el mecanisme d'algunes de les barrejadores més utilitzades i les seves principals característiques pràctiques.



– Canvis freqüents	barrejadores difusives o convectives
– Addicions freqüents	barrejadores convectives
– Escalfar, refredar	barrejadores convectives
– Qualitat de la barreja	comparar barrejadores
– Processos continus	barrejadores de cinta, de fluïdització o especials

i valorar també l'efecte que tenen, per a cada tipus de barrejadora que assagem:

- El temps necessari de barreja per obtenir el resultat pretès.
- La segregació que es produeixi en buidar.
- La necessitat de carregar en un cert ordre .
- El nivell òptim de càrrega; aprofitament de la màquina.
- La velocitat òptima del moviment (rotació, vibracions, etc.).
- El consum energètic.
- El cost de l'equip.
- El volum de la instal·lació.

Finalment, i abans de decidir definitivament quina és la barrejadora aparentment més idònia, és del tot imprescindible fer una prospecció de les màquines utilitzades en la indústria per al problema que ens ocupa, i/o demanar la màxima informació sobre aquest a les cases constructores d'equips de barreja.

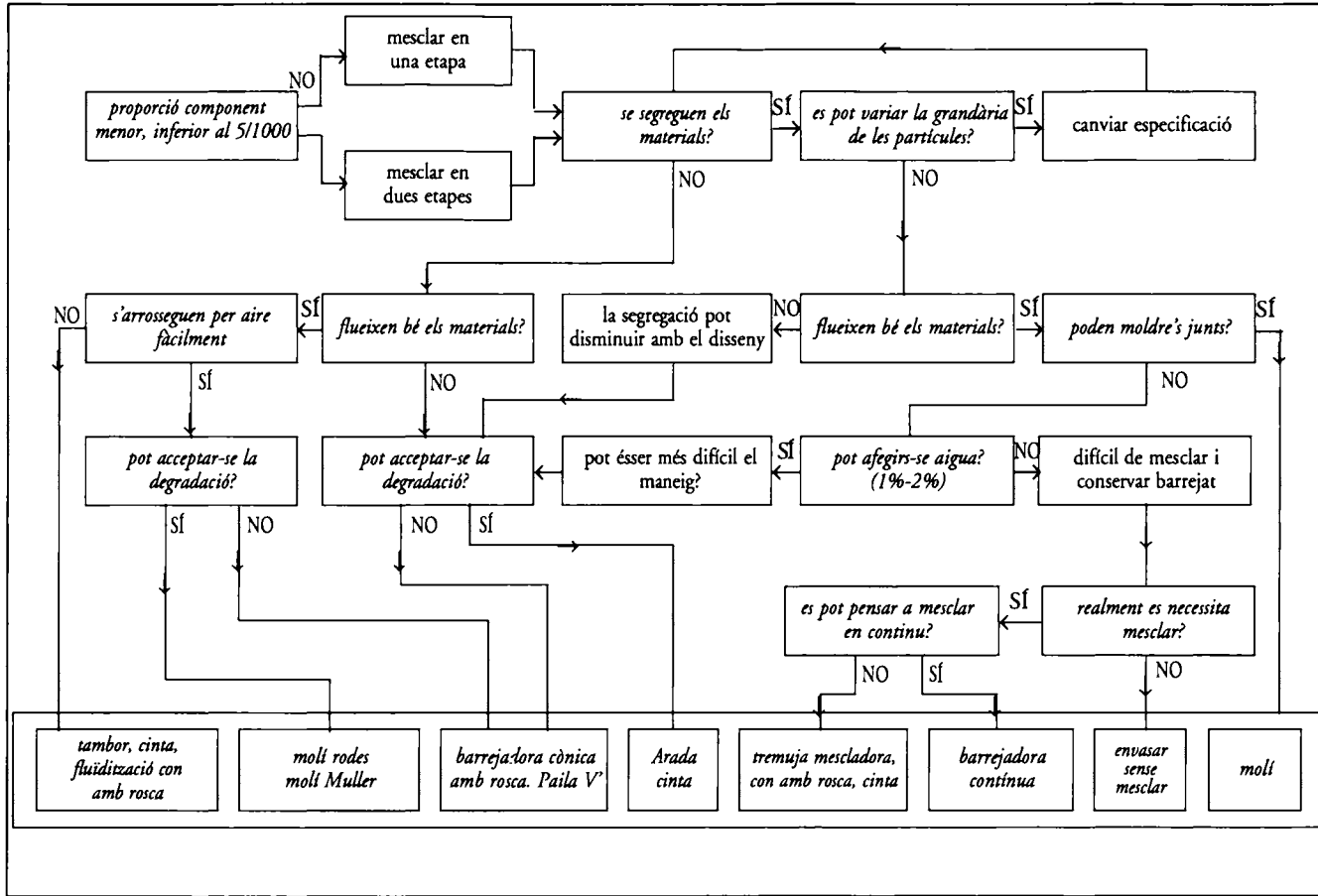
Com a resum de les recomanacions sobre l'elecció de l'equip, és necessari:

- Examinar l'adaptabilitat al nostre problema dels equips disponibles en el mercat.
- Efectuar proves en equips pilots, o, si és possible, proves reals de barrejadores en indústries semblants o en els tallers dels constructors.

Per a una primera idea en la selecció de l'equip a utilitzar, i partint de les dades del cas que tinguem entre mans, incloem a la pàgina següent l'adaptació (26) d'una taula de Schofield i Miles, que contempla les variables més significatives de què acabem de parlar.

D'aquesta taula cal remarcar que en una de les alternatives ens apareix una pregunta que és aconsellable fer-nos sempre quan iniciem l'estudi d'un problema en què el camí més idoni sembli passar per una barreja de sòlids:

*Estem segurs que ens és realment imprescindible barrejar?*



## BIBLIOGRAFIA

- 1.- ABOUZEID, A. Z. M.: *Powd. Hand. & Proc.* 1, 173 - 177, (1989).
- 2.- ADAMS, J. K. "Basic Statistical Concepts" Mc.Graw-Hill, Nova York, 1955.
- 3.- BOSS, J.: *Bulk Sol. Hand.* 6, 1207 - 1215, (1986).
- 4.- CRAIK, D. J.: *J. Pharm. Pharmacol.* 10, 73, (1958).
- 5.- COELHO, M. C. i HARNBY, N.: *Powd. Tech.* 20, 197 i 201, (1978).
- 6.- DANKWERTS, P. V.: *Research*, (Londres), 6, 355, (1953).
- 7.- DE JONG, J. A. H.: *Voedingsmiddelentechnologie*, 16, (7), 14 - 15, (1983).
- 8.- EGERMANN, H.: *Powd. Tech.* 26, 235 - 237, (1980).
- 9.- FAN, L. T. (1<sup>a</sup> part): *Powd. Tech.* 22, 205 - 213, (1979). (2<sup>a</sup> part): *Powd. Tech.* 24, 73 - 89, (1979).
- 10.- FAN, L. T., CHEN, S. J. i WATSON, C. A.: *Ind. Eng. Chem.* 62, (7), 53 - 69, (1970).
- 11.- GSTIRNER, F.: *Arch. Pharmaz.* 300, (6), 504 - 515, (1967).
- 12.- HARNBY, N.: *Powd. Tech. Series*, n° 6, (1975).
- 13.- HARNBY, N., EDWARDS, M. F. i NIENOW, A. W.: "Mixing in the Process Industries", Butterworths, Londres, 1985.
- 14.- KISH, L.: "Survey Sampling", Wiley, Nova York, 1965.
- 15.- LACEY, P. M. C.: *J. Appl. Chem.* (Londres) 4, 257 - 268, (1964).
- 16.- LACEY, P. M. C.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 21, 53 - 59, (1943).
- 17.- LEVA, M.: "Fluidisation", Mc. Graw - Hill, Nova York, (1959).
- 18.- LEXIS, W.: "Zur Theorie der Massenerscheinungen" Friburg, 1877.
- 19.- LIFSHITZ, E. M.: *J. E. T. P. (Soviet Physics)*, 2, 73, (1956).
- 20.- LLOYD, P. J. i YEUNG, P. C. M.: *Chem. Proc. Eng.* 48, 57, (1967).
- 21.- MORAN, R. J.: *Aust. Chem. Eng. August*, 9, (1967).
- 22.- POOLE, K. R., TAYLOR, R. F. i WALL, G. P.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 42 T, 305 - 315, (1964).
- 23.- REYNOLDS, O.: *Phil. Mag.* 20, 469, (1885).
- 24.- ROSE, H. E.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.* 37, 47 - 64, (1959).
- 25.- ROSE, H. E. i Robinson, D. J.: *A. I. Ch. E. Symp. Series* n° 10, 61 - 70, (1965).
- 26.- ROSELL, R.: *Autom. Inst.* 209, 71 - 77, (1991).
- 27.- RUMPF, H.: "Agglomeration", Wiley, Nova York, 1962.
- 28.- SNEDECOR, G. W.: "Métodos estadísticos. Aplicados a la investigación agrícola y biológica". Cía. Edit. Continental, Mèxic D. F., Trad. de la 5a ed. anglesa.

- 29.- STANGE, K.: Chem. Ing. Tech., 26, 331, (1954).
- 30.- STANGE, K.: Chem. Ing. Tech., 35, 580, (1963).
- 31.- TOO, J. R.: Powd. Tech., 23, 99 - 113, (1979).
- 32.- TRAIN, D.: Pharm. J., 6 Aug. 129 - 134, (1960).
- 33.- WILLIAMS, J. C.: Fuel Soc. Jour. 14, 29, (1963).
- 34.- WILLIAMS, J. C., i KAHN, M. L.: The Chem. Eng. 269, 19 - 24, (1973).
- 35.- WILLIAMS, J. C.: Powd. Tech. 2, 13 - 20, (1968/69).

A més de la bibliografia anterior que ha estat citada al text, existeixen diverses obres generals que s'ocupen de la barreja de sòlids. Tant pel detallat tractament de la matèria, com per l'extensa bibliografia que inclouen, cal citar:

- HARNBY, N, Edwards, M. F. i Nienow, A.W. (Ref. 11)
- PAHL. M., "Mischen bei der Herstellung und Verarbeitung von Kuntstoffe".  
V. D. I. Verlag, Dusseldorf, 1986.
- PERRY, "Chemical Engineers Handbook" 6th. Ed., Mc. Graw Hill, Nova York, 1984.
- SOMMER, K., a Ullmann, "Encyclopedia of Industrial Chemistry", 5th. Engl. Ed., Vol. B "Unit Operations", Sec. 27, pgs. 27 - 1 a 27 - 16.
- SOMMER, K., Fortschritte der Verfahrenstechnik, 19, 189 - 208, 1981.
- WEIDENBAUM, S. S., "Mixing of Solids" en "Advances in Chemical Engineering", Vol. II, 209 - 324, 1958.

# TRACTAMENTS D'AIGUA

*Mercè Raventós\**

## 1. INTRODUCCIÓ

### 1.1. Necessitats d'aigua a la indústria alimentària

En l'ús de l'aigua en una indústria alimentària moderna, hi ha tres factors de vital importància per a un funcionament correcte.

El primer és el *subministrament* de l'aigua necessària per als processos, ja sia en quantitat o en qualitat, essent el cas més freqüent la necessitat de diversos cabals de diferents qualitats en funció de la seva destinació.

El segon, és l'*evacuació* de les aigües residuals resultants de les diverses aplicacions en què s'han emprat els cabals anteriors. Aquestes aigües també són de cabal i característiques molt variades, i caldrà tractar-les adequadament abans del seu abocament, ja sia a una xarxa municipal d'evacuació o bé a una llera pública.

El tercer punt és la *gestió i el tractament de residus*, el qual dia rera dia s'està convertint en més important, i en alguns casos en determinant per a decidir un procés. A conseqüència dels tractaments anteriors, s'acostumen a generar a les indústries alimentàries uns residus sòlids o pastosos que se solen anomenar fangs. Aquests contenen els contaminants eliminats en els tractaments de les aigües residuals confinats dins la massa pastosa en forma física o química. Aquests residus (conjuntament amb la resta de residus que es generen directament dels processos de la indústria en forma sòlida, líquida o fins gasosa) en molts casos i a causa de la càrrega contaminant que incorporen, han de ser sotmesos a tractaments específics per a fer-los inerts.

---

\* Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

La importància d'aquests tres factors és tan gran, que la manca d'un subministrament d'aigua, o bé una qualitat inadequada, o no poder evacuar les aigües residuals i els residus d'una forma eficient i econòmica, acostumen a ésser motius per a parar un procés productiu. Les anteriors mancances, també solen ésser motiu per a variar un emplaçament d'una fàbrica.

A Catalunya, on els recursos aquífers son escassos i moltes vegades es troben sobreexplotats, trobem que la problemàtica derivada de l'abastament d'aigua i l'abocament de residus s'ha convertit en un problema social de primer ordre. Totes aquestes consideracions no fan més que ressaltar la necessitat d'una gestió correcta de l'aigua en les indústries i en especial les alimentàries, que són de les més necessitades d'aquest recurs cada dia més escàs i car.

La indústria alimentària necessita uns cabals d'aigua molt importants i de qualitats molt variades, i a més a més necessita aigua en la quantitat i qualitat específica que exigeixi el seu procés.

En funció de les aplicacions es poden classificar les aplicacions de l'aigua en una indústria alimentària en els següents apartats:

- a) Generació i transport d'energia tèrmica.
- b) Transport de matèries primeres o de rebuig.
- c) Neteja i preparació de productes i instal·lacions.
- d) Aigua de procés i d'incorporació al producte.
- e) Refrigeració.

*a) Generació i transport d'energia tèrmica.* Per a l'alimentació d'aigua a les calderes, no sol ésser suficient un tractament de desenduriment de l'aigua, sinó que caldrà reduir el contingut en sòlids per tal d'evitar la seva deposició a les superfícies de bescanvi tèrmic en forma d'incrustacions. Igualment, caldrà un control continu de la qualitat de l'aigua al mateix temps que s'intentarà donar la màxima estanqueïtat als circuits de transport de vapor i aigua calenta per tal de no malbaratar l'aigua tractada.

*b) Transport de matèries primeres o de rebuig.* La qualitat d'aquesta aigua dependrà de les exigències del producte arrossegat. En el cas de productes de rebuig, és suficient la qualitat d'aigua d'un subministrament públic, mentre que en el cas de matèries primeres estarà en funció de la seva aplicació específica.

*c) Neteja i preparació de productes i instal·lacions.* Com que en aquestes aplicacions l'aigua ha d'estar en contacte amb el producte que s'elabora o bé en contacte amb la instal·lació que després el contindrà, cal aigua neta i potable, per tant sense olor ni color, microbiològicament compatible amb les normes en vigor per la indústria alimentària, així com amb un contingut



màxim admissible de metalls, que ve fixat per la reglamentació específica de cadascun d'ells, i, finalment, també sense ions tòxics.

*d) Aigua de procés i d'incorporació al producte.* Les aigües de procés depenen evidentment del procés que es tracti. A més d'ésser potables, aquestes aigües poden necessitar un desenduriment per a separar sals solubles que poden influir en la textura de certs vegetals, provocar dipòsits en llocs inadequats de la superfície dels aparells, en ampolles de rentat, etc.

*e) Refrigeració.* Les exigències de l'aigua de refrigeració solen ésser molt menors. En molts casos, si es pot garantir la no contaminació del producte se sol emprar aigua no potable en la qual l'eliminació del color i l'olor passa a segon terme. Com que se solen utilitzar grans volums d'aigua en circuits tancats o semitancats, l'aigua s'ha de desendurir per a evitar incrustacions.

## 1.2. Mesura de la qualitat de l'aigua d'abastament i residual

Per a determinar la qualitat de les aigües tant d'abastament com residuals, s'utilitzen uns paràmetres de control, que es poden mesurar de forma constant o discontinua. Existeixen nombrosos paràmetres de control i també són molt nombrosos els mètodes de mesura d'aquests. En cada cas, i en funció de l'aplicació concreta, caldrà escollir-ne uns de determinats. En alguns casos, s'empren diversos mètodes diferents per a la mesura del mateix paràmetre. També es troben unitats de mesura diferents per al mateix paràmetre, que acostumen a derivar del diferent mètode de mesura. Encara que en aquests casos hi sol haver taules de conversió, no sempre solen ésser directes i senzilles. En aquest apartat, no es pretén ser exhaustiu, ni detallista en la descripció dels paràmetres de mesura de la qualitat de l'aigua, però sí que s'exposen els més importants i comuns. Per alguna mesura específica sobre una característica física, química o biològica determinada cal adreçar-se a la literatura específica.

Les aigües d'abastament són de característiques molt variades, en funció de la font de subministrament. Preferentment, les indústries tendeixen a utilitzar aigües superficials (rius, llacs, pluja...) en cas de disposar d'aquestes. Això és degut no solament a criteris de qualitat de l'aigua, sinó també al seu cost de captació i tractament. En cas de no disposar d'una font de subministrament superficial es recorre a la captació d'aigua de pou. En aquest cas, les característiques i cabals extrets solen ésser molt poc variables, encara que el seu cost és més elevat. Finalment, si no és possible obtenir aigua de cap de les dues formes anteriors es recorre al subministrament públic que sol

ésser el més car. La problemàtica específica de les aigües d'abastament es descriu amb més detall a l'apartat 2.1.

Les aigües residuals en canvi, són molt més variades quant a cabals i càrregues contaminants, especialment si són aigües industrials, ja que les aigües assimilables a "urbanes" que aboca una indústria són bastant uniformes, de la mateixa manera que ho són les domèstiques.

Els paràmetres de control de la qualitat de les aigües es poden classificar en tres tipus: físics, químics i biològics. Darrerament, s'està imposant amb més freqüència el control de paràmetres radiològics, però a causa de la poca presència dels contaminants radioactius a les indústries alimentàries no es descriuran.

### 1.3. Paràmetres físics

*Sabor, olor i color.* Aquests tres paràmetres de determinació sensorial són fonamentals per a l'aigua de consum humà o d'incorporació a productes. També solen ésser fonamentals en la majoria de les aigües de procés de les indústries alimentàries. El sabor i l'olor es determinen d'una manera totalment subjectiva, i no hi ha definides formes de mesura ni unitats. L'excés de clorurs per exemple (a partir de 300 mg/l) dóna un sabor salat i un excés de sulfats (a partir de 450 mg/l) dóna sabor salat i amarg. També la presència de CO<sub>2</sub> lliure dóna un sabor picant. La presència de compostos orgànics i fenols pot donar sabor i olors desagradables.

El color és una propietat física que mesura la capacitat d'absorció de radiacions de l'espectre visible. El color pot ésser indicatiu de la presència de contaminant a l'aigua, afecta la presència estètica de l'aigua, punt que no solament afecta al que la consumeix directament en beure-la, sino que pot afectar la coloració de productes en les aigües de procés. La presència de metalls en l'aigua sol donar colors variats, fins al punt que a la indústria de colorants anomenen els diferents colors amb relació al seu metall base.

El color es mesura amb referència a un estàndard definit sobre solucions de platí-cobalt de diferents concentracions. S'expressen els resultats referits a la concentració en mg/l de platí en la solució estàndard equivalent. Mentre que en les aigües subterrànies no se sol superar els 5 mg/l de Pt, en les superficials poden superar els 400 mg/l de Pt.

*Terbolesa.* La presència de matèries en suspensió a l'aigua és el que dóna lloc a la terbolesa, que no és més que la dificultat que té a transmetre la llum.

Aquestes matèries en suspensió solen ésser molt fines o col·loïdals, cosa que implica una certa dificultat en la seva separació. Aquestes matèries en suspensió incideixen notablement en els processos i donen lloc a deposicions i incrustacions.

La mesura de la terbolesa es fa mitjançant la comparació amb la intensitat de llum difosa a 90° per la mostra i solucions estàndard de formacina. La intensitat de llum difosa es mesura a través de cèl·lules fotosensibles. També s'utilitzen dissolucions de sílex, i aleshores els resultats es donen en mg/l de SiO<sub>2</sub>. Les aigües subterrànies tenen al voltant d'1 mg/l de SiO<sub>2</sub>. Per a aigües amb més de 100 mg/l de SiO<sub>2</sub>, no es poden fer servir filtres sense tractaments previs ja que s'obstrueixen molt ràpidament.

*Conductivitat.* L'aigua oposa una resistència al pas de corrent elèctric, en funció de les sals dissoltes que contingui i de la seva temperatura. La resistivitat en l'aigua (que és la inversa de la conductivitat) es mesura en megaohms per centímetre (MΩ/cm) i la conductivitat en microsiemens per centímetre (μS/cm). L'aparell emprat per a la seva mesura és el conductímetre o el resistímetre, que es fonamenten en la mesura de la intensitat del corrent elèctric recollida entre dos elèctrodes de forma coneguda submergits en la mostra i sotmesos a una diferència de potencial constant. Com s'ha esmentat la temperatura també influeix de manera notable en la conductivitat, per això cal tenir present de referir les mesures sempre a la mateixa temperatura (se sol prendre 20 °C).

#### 1.4. Paràmetres químics

*pH.* El pH mesura la concentració d'ions d'hidrògen. Recordem que la seva definició és:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

El pH és una mesura de l'alcalinitat o l'acidesa de l'aigua. En les aigües naturals, el pH pot variar molt, essent el pH de l'aigua pura de 7. En les aigües residuals pot prendre qualsevol valor depenent de la seva procedència.

La mesura del pH és molt senzilla, i es realitza mitjançant una sonda anomenada pHmetre. També hi ha papers indicadors per coloració d'àmplia utilització. Cal tenir en compte que el pH té certa variació amb la temperatura, per tant cal sempre fer referència a la temperatura de medicació.

*Duresa.* La duresa mesura la presència de sals de calci i magnesi dissoltes en l'aigua. Aquestes sals són les responsables de les incrustacions que es produeixen en les instal·lacions, especialment en els processos on intervé l'energia tèrmica (calderes, bescanviadors de calor, canonades de transport...), i també afecta notablement a la cocció de determinats aliments com per exemple els llegums. Per contra, l'absència de duresa (aigua molt "tova") és agressiva, no aplicable directament al consum o incorporació a determinats productes.

La duresa es mesura com a duresa total o grau hidrotimètric TH que indica el contingut global d'ions  $\text{Ca}^{++}$  i  $\text{Mg}^{++}$ . Hi ha altres mesures de duresa que són de tipus parcial i que s'acostumen a emprar. Una d'elles és el grau hidrotimètric càlcic, que només té en compte l'ió  $\text{Ca}^{++}$ . També es mesuren la duresa no carbonatada o permanent que indica el contingut en sulfats i clorurs de calci i magnesi, i la duresa carbonatada o temporal que mesura la presència d'ions  $\text{CO}_3\text{H}^-$ . Aquesta darrera és la diferència de les anteriors i s'anomena temporal perquè s'elimina amb l'ebullició.

La duresa s'expressa en mg/l de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ . Les aigües "toves" són de menys de 50 mg/l de  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ; fins a 200 mg/l de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  són lleugerament dures, mentre que amb més de 200 mg/l de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  es consideren molt dures. També és molt utilitzat l'anomenat Grau Francès. Les equivalències entre diferents unitats de mesura són:

$$1 \text{ °francés} = 0,56 \text{ °alemanys} = 0,7 \text{ °anglesos} = 10 \text{ mg/l } \text{CO}_3\text{Ca}$$

*Alcalinitat.* És una mesura de la capacitat de l'aigua per a neutralitzar àcids. Es distingeix entre l'alcalinitat total TAC i l'alcalinitat simple TA, i ambdues tenen les mateixes unitats que la duresa. Els valors d'ambdós paràmetres ens indiquen el contingut que té l'aigua en hidròxids, carbonats i bicarbonats alcalins o alcalinoterris. Tant els bicarbonats com els carbonats produeixen  $\text{CO}_2$  en el vapor emprat en la indústria, el qual posteriorment en les línies de condensat és una causa d'agressió. També pot produir, a les calderes, escumes, arrossegaments de sòlids i fragilitat de l'acer.

La mesura de l'alcalinitat simple TA es realitza mitjançant una dissolució valorada d'àcid en presència de fenolftaleïna, la qual té el viratge de color a un pH de 8,3. La mesura de l'alcalinitat total TAC es realitza en una dissolució valorada en presència d'ataronjat de metil que té el viratge a un pH de 4,3. Amb el TA es determinen la totalitat dels hidròxids i només la meitat dels carbonats, ja que es valoren fins a la seva transformació en bicarbonats. El viratge del groc al taronja de l'ataronjat de metil es produeix en el mateix moment que hi ha presència d'àcid lliure. En conseqüència, el TAC permet determinar el contingut en bicarbonats.

Així, doncs, d'ambdós valors de TAC i TA se'n pot deduir el contingut en l'aigua de cada un dels tres grups de compostos que constitueixen l'alcalinitat: hidròxids, carbonats i bicarbonats, a través de la següent taula:

TAULA 1. Relacions entre TA i TAC

Sals dissoltes	mg/l per grau	Valors respectius dels graus TA i TAC				
		Si TA = 0	Si TA < $\frac{TAC}{2}$	Si TA = $\frac{TAC}{2}$	Si TA > $\frac{TAC}{2}$	Si TA = TAC
(OH)	3,4					
CaO	5,6					
Ca(OH) <sub>2</sub>	7,4					
MgO	4,0	0	0	0	2TA-TAC	TAC
Mg(OH) <sub>2</sub>	5,8					
Na(OH)	8					
CO <sub>3</sub>	6,0					
CaCO <sub>3</sub>	10,0	0	2TA	TAC	2(TAC-TA)	0
MgCO <sub>3</sub>	8,4					
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	10,6					
HCO <sub>3</sub>	12,2					
Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	16,2					
Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	14,6	TAC	TAC-2TA	0	0	0
NaHCO <sub>3</sub>	16,8					

**Acidesa.** És la capacitat de l'aigua per a neutralitzar bases. Rarament les aigües naturals presenten acidesa. Es mesura amb les mateixes unitats i de la mateixa manera que l'alcalinitat però a través de l'addició de bases. L'aigua amb excessiva acidesa pot produir corrosió en els acers de les calderes i canonades de transport.

**Contingut de sòlids.** També anomenat sòlids totals, és la suma dels sòlids en suspensió i els sòlids dissolts; cadascun dels quals es determinen separatament.

Els sòlids en suspensió, SS, representen el contingut de sòlids de l'aigua que es poden retenir per un filtre; és a dir, no contempen els dissolts ni els col·loïdes. Es determinen pesant el residu retingut per un filtre després del seu assecatge. Els sòlids en suspensió creen nombrosos dipòsits que entorpeixen els processos i la generació de vapor en calderes. Les aigües sub-

terrànies contenen molt pocs sòlids en suspensió (al voltant d'1 mg/l), però en les superficials varia molt en funció del context del punt de captació.

Els sòlids solubles, també anomenats sals solubles, representen la quantitat de matèria dissolta que conté l'aigua. Es determina per pesatge del residu assecat que deixa l'aigua sotmesa a evaporació havent-la prèviament filtrat. Els sòlids solubles interfereixen en els processos en funció del tipus de matèria dissolta.

*Clorurs.* La principal presència d'ions  $\text{Cl}^-$  en l'aigua, és a través de la seva combinació amb l'ió  $\text{Na}^+$ . La presència de clorurs en l'aigua, n'afecta la potabilitat i l'ús agrícola i industrial. A partir de 300 mg/l l'aigua té un sabor clarament salat. L'aigua amb clorurs és molt corrosiva i afecta notablement la majoria dels processos d'elaboració d'aliments. A Catalunya, ens veiem fortament afectats per l'excés de clorurs en l'aigua al llarg de la conca del riu Llobregat, entre altres coses per l'aportació d'aigües salobres dels efluentes procedents de les explotacions mineres de sal en la part alta de la conca. Aquest problema és tan greu que l'Administració ha dut a terme una important inversió, construint un col·lector de salmorres paral·lel al traçat del riu, per a recollir aquests abocaments i derivar-los directament fins al mar, amb l'objectiu de reduir el contingut de clorurs del riu. També hi ha la zona de polígons industrials propers a la desembocadura del riu Llobregat, els quals, per la sobreexplotació històrica de les aigües subterrànies, han produït una disminució dels nivells de les capes freàtiques, que ha provocat una intrusió d'aigua marina en els aquífers. Aquest problema també és molt greu, ja que tradicionalment les indústries de la zona es proveïen d'aigües subterrànies, i a més la major part eren molt intensives en consum d'aigua. El retrocés de la intrusió salina és un procés molt lent i car, i actualment són moltes les indústries de la zona que es proveeixen d'aigua de subministrament públic, a causa del cost que els suposa el tractament de l'aigua amb gran quantitat de clorurs (a vegades per sobre de 1000 mg/l).

La mesura del contingut de clorurs en l'aigua es realitza mitjançant la valoració amb nitrat de plata i emprant cromat potàssic com a indicador.

*Silex.*  $\text{SiO}_2$  es troba a l'aigua en forma col·loïdal. Produeix incrustacions en calderes i equips de refrigeració i forma dipòsits insolubles. En aigües naturals oscil·la entre 1 i 50 mg/l, encara que es poden trobar aigües fins amb 100 mg/l.

*Ferro.* L'aigua ferruginosa és especialment indesitjable per la indústria alimentària, car afavoreix les corrosions, dona dipòsits i incrustacions, i pot afectar

la potabilitat de l'aigua. Les condicions d'estabilitat fan que les aigües subterrànies normalment només ténen  $\text{Fe}^{++}$  dissolt. La concentració acostuma a ésser entre 0 i 10 mg/l de  $\text{Fe}^{++}$ , però en airejar l'aigua, precipita  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  i el contingut de ferro dissolt es redueix a menys de 0,5 mg/l. Només les aigües de pH àcid poden tenir continguts de ferro de diverses desenes de mg/l.

*Manganès.* Actua de forma semblant al ferro, formant  $\text{MnO}_2$  insoluble. Diffícilment n'hi ha més d'1 mg/l.

Per a la neteja d'instal·lacions a la indústria alimentària, per exemple, es recomanen dosis de  $\text{SiO}_2$ , Fe i Mn inferiors respectivament a 5 mg/l, 0,05 mg/l i 0,02 mg/l [25].

*Metalls tòxics.* Es presenten en funció de l'origen de les aigües i procedeixen d'abocaments contaminants de nombroses indústries. Quan se'n sospita la presència, immediatament se n'ha de procedir a l'anàlisi i el control. Els més comuns i perillosos són l'arsènic, el cadmi, el plom, el mercuri, el bari i el seleni.

### 1.5. Paràmetres orgànics i biològics.

Tot i que algun paràmetre que es definirà en aquest apartat és pròpiament químic, pel seu caràcter relacionat amb les càrregues orgàniques de l'aigua s'ha inclòs en aquest apartat. La matèria orgànica s'incorpora a les aigües tant per raó de les activitats naturals com de les humanes. Les aigües domèstiques aporten a les aigües residuals nombrosos compostos orgànics com per exemple detergents, substàncies en descomposició i olis. Les indústries també aporten gran quantitat i varietat de contaminació orgànica a les aigües, en funció dels seus processos. La indústria alimentària és, evidentment, una indústria en què la contaminació de les aigües és fonamentalment orgànica, tot i que en moltes ocasions incorporen càrregues contaminants físiques i químiques importants, cosa que es reflecteix en els tipus de tractaments de depuració.

Els paràmetres de mesura i control, en aquest cas, no són tant específics com els químics, però tot i així permeten, amb molt pocs paràmetres, un control eficaç de l'evolució dels processos de tractament i depuració.

*Demanda bioquímica d'oxigen.* Coneguda per DBO, defineix la quantitat d'oxigen consumit pels microorganismes per a l'oxidació de la matèria orgà-

nica present a l'aigua. La mesura se'n realitza sota unes condicions determinades. En el cas que s'empri una incubació durant cinc dies a les fosques i a 20° C, s'obté la DBO<sub>5</sub>, mentre que si es fa durant 21 dies es coneix per DBO<sub>21</sub>. En el cas de DBO<sub>5</sub>, l'oxidació de la matèria orgànica és entre un 60 i un 70 %, mentre que als 21 dies (DBO<sub>21</sub>), és entre un 95 i un 99 %. La DBO es mesura en mg/l d'O<sub>2</sub> consumit. Les aigües naturals tenen una DBO<sub>5</sub> d'1 mg/l d'O<sub>2</sub>. Si se'n detecta un valor superior, indica una contaminació orgànica addicional d'origen no natural. A les aigües domèstiques, la DBO<sub>5</sub> oscil·la entre 100 i 350 mg/l d'O<sub>2</sub>. A les aigües residuals depèn evidentment del procés, però en casos de forta càrrega orgànica se solen superar àmpliament els 10.000 mg/l d'O<sub>2</sub>.

La mesura de la DBO és molt important en el tractament d'aigües residuals ja que permet determinar la quantitat d'oxigen que caldrà per a estabilitzar la matèria orgànica present i d'aquesta manera dimensionar l'estació depuradora.

Si no s'especifica expressament, es considera que quan es parla de DBO es refereix a la DBO<sub>5</sub>.

*Demanda química d'oxigen.* Es coneix com DQO. És la quantitat necessària d'un agent oxidant fort (normalment dicromat potàssic en medi àcid) per a l'oxidació de la matèria orgànica. Les unitats de mesura són mg/l d'O<sub>2</sub>. La DQO és una determinació de tota la matèria oxidable present a l'aigua, tant orgànica com mineral (ió ferrós, nitrits, amoníac, sulfurs i clorurs).

La DQO d'una aigua residual és generalment superior a la DBO, ja que és més gran el nombre de compostos que es poden oxidar per via química que per via biològica. Si tota la matèria orgànica que conté l'aigua fos biodegradable, es compliria que:

$$DQO = DBO_{21}$$

Si existeix a l'aigua matèria orgànica no biodegradable (que és el cas més freqüent tant en aigües urbanes com industrials), el valor de la DQO sempre és superior a la DBO. Com més s'apropi el valor de la DBO al de la DQO, més biodegradable serà l'aigua. En aigües residuals, un valor de la relació DBO<sub>5</sub>/DQO inferior a 0,2 s'interpreta com un abocament de tipus inorgànic, i si supera el de 0,6 es considera clarament orgànic. Les aigües naturals no contaminades assoleixen valors de DQO d'1 a 5 mg/l d'O<sub>2</sub>.

*Carboni orgànic total.* Anomenat COT, és una mesura del contingut total de matèria orgànica de l'aigua, que s'emptra especialment per a petites con-



centracions. En comptes de mesurar l'oxigen consumit per a l'oxidació, es mesura l'anhidric carbònic,  $\text{CO}_2$ , produït en l'oxidació del carboni orgànic. La mesura del COT necessita aparells costosos.

*Mesures microbiològiques.* La potabilitat de l'aigua i la mesura de la seva contaminació fecal no es pot determinar mitjançant una simple anàlisi de quantitat de matèria orgànica. Per a determinar-ho totalment cal una anàlisi complementària de tipus microbiològic. Aquesta anàlisi, en l'aigua, es basa en gèrmens del grup coliforme, concretament l'*Escherichia coli*, els quals indiquen la contaminació de tipus fecal. La presència de bacteris en algunes aigües no té importància (alimentació a calderes, refrigeració en circuits oberts,...), però en els processos de les indústries alimentàries cal que l'aigua tingui la qualitat de potable, i per tant és fonamental garantir-ho amb el tractament adequat.

## 2. TRACTAMENTS D'AIGUA D'ABASTAMENT D'INDÚSTRIES ALIMENTÀRIES

### 2.1. Captació i tractaments previs

L'aigua precipitada en forma de pluja, neu o calamarsa és l'origen de totes les aigües emprades en la indústria, amb l'excepció d'alguns casos com són la utilització d'aigua de mar en aplicacions de refrigeració i congelació de peix i obtenció d'aigua en llocs propers a la costa i d'escassetat pluviomètrica (molt típics a les illes Canàries).

L'aigua de pluja és relativament pura, ja que conté pocs sòlids dissolts i en suspensió, i pràcticament cap flora bacteriana. Tot i així, l'aigua que arriba a les indústries o als serveis municipals té unes característiques molt variades. L'aigua entra en contacte amb substàncies que es retenen en suspensió o es dissolen, i la matèria orgànica és arrencada de la matèria orgànica en descomposició i a més a més molts microorganismes hi troben un magnífic suport de creixement. És a dir, qualsevulla que sigui la font de subministrament d'aigua, sempre contindrà en més o menys mesura un contingut total que en podríem dir d'impureses, les quals la fan inadequada per a la seva aplicació directa com a aigua de refrigeració, generació i transport de calor, aigua per a procés, consum humà o d'incorporació als productes.

Així doncs, abans de decidir d'on ens proveïm del cabal necessari, cal analitzar les diferents fonts que se'ns ofereixen. El primer pas és fer les anàlisis pertinents dels paràmetres de control de qualitat de l'aigua des del punt

de vista de l'ús que se'n farà. En el cas d'un subministrament públic, aquesta anàlisi se simplifica molt, car els subministradors públics estan obligats a subministrar l'aigua dins uns valors dels paràmetres de control regulats normativament (en general són aigües clarificades, filtrades i esterilitzades per a oferir aigua potable). En el cas d'indústries alimentàries, sol ésser necessari un tractament addicional, per a obtenir una aigua de suficient qualitat en funció del seu ús. Quan en calen grans cabals, sol ésser millor per a la indústria consumidora adquirir aigua sense tractaments previs i disposar d'instal·lacions pròpies on condicionarà l'aigua segons les seves necessitats de quantitat i de qualitat.

Les aigües que no són de subministrament públic són superficials o subterrànies.

Les aigües superficials són les que recomanen les Administracions en primer lloc. Es capten directament de rius, llacs o directament de pluja, i per tant es troben molt directament exposades a la contaminació per residus humans, animals i industrials. Les seves característiques són molt variades, ja que:

- \* la temperatura varia en funció de la climatologia
- \* la salinitat varia segons la naturalesa dels sòls
- \* la contaminació orgànica varia amb els abocaments
- \* la contaminació física (matèries en suspensió, color, olor i sabor)

depèn del règim de pluges i del desglaç.

Les aigües subterrànies en canvi, són de característiques molt més estables. La temperatura i la salinitat varien molt poc i la seva contaminació orgànica pot variar en funció de contaminació creixent, però sempre de forma molt gradual. El contingut de sòlids dissolts hi sol ésser superior. La captació de les aigües subterrànies es fa a través de pous, manantials, fonts o mines.

L'elecció de la font de subministrament (en el cas de poder escollir), passa doncs per un balanç econòmic. En aquest intervén el cost de tractament i condicionament primari (el qual en general és notablement proporcional al contingut de càrrega contaminant); però cal tenir molt present que a partir de certs nivells de qualitat de l'aigua, el cost de tractament per a obtenir una puresa addicional per a aplicacions excepcionals augmenta d'una manera exponencial a la qualitat final requerida.

És important de tenir en compte que el cost de l'aigua de subministrament públic és important, i que en cas de necessitar un mínim cabal i disposar d'una font alternativa, sol ésser rendible aprofitar-la encara que s'hi hagi de fer un tractament previ. També cal saber que tant les aigües subterrànies com les superficials no són gratuïtes, car ambdues es troben sot-

meses a taxes de captació que graven cada m<sup>3</sup> captat, i la captació furtiva es troba penalitzada.

A més del cost del tractament de condicionament (productes químics, energia, mà d'obra i rendiment o pèrdues del tractament), cal tenir en compte criteris financers que contemplin les inversions amb els seus terminis d'amortització; i criteris tècnics com ara la seguretat i l'estabilitat del subministrament. No és infreqüent observar en algunes indústries que s'abasteixen d'aigua de subministrament públic per a unes aplicacions, i d'aigua subterrània o superficial per a altres.

Sigui quina sigui l'aplicació que es donarà a l'aigua i els tractaments posteriors a què se sotmetrà, és aconsellable en alguns casos fer-li un tractament general senzill prop del punt de captació. Aquests tractaments previs tenen per finalitat la protecció de la posterior xarxa de distribució i moltes vegades estalvien una part del tractament posterior.

En el cas d'aigües superficials cal prevenir l'obstrucció i la deposició de llots que sol arrossegar l'aigua. Per a evitar l'obstrucció de canonades i conduccions, se sotmet l'aigua a un tamisatge o desbast a través de reixes d'acord amb la xarxa a protegir. Solen ésser suficients reixes d'espaiat de 2 mm entre barrots o tamisos d'obertura per sobre dels 250 µm. Quant als llots, es poden eliminar amb un tamisatge de 250 µm, tot i que en alguns casos cal arribar a 50 µm. A vegades, cal una filtració ràpida amb filtres de sorra per a eliminar les matèries en suspensió fins a algunes micres, i en casos extrems de grans quantitats de matèries en suspensió caldrà una decantació més o menys forçada.

En el cas d'aigües subterrànies, existeixen riscos d'abradió o bé de corrosió. L'abradió és deguda a la presència de grans quantitats de sorra, que ataquen les conduccions i especialment les vàlvules, les bombes i els elements mòbils que hi puguin haver. Per a eliminar-la, s'empra la filtració ràpida o tamisatge a pressió. La corrosió es produeix en les xarxes d'aigües de pous per l'absència d'oxigen, cosa que provoca la presència d'adherències a les parets que no s'han de confondre amb les incrustacions. El tractament anticorrosiu consisteix en l'oxigenació i filtració que elimina al mateix temps la sorra i assegura un nivell mínim de presència d'oxigen protector a la xarxa posterior.

## 2.2. Processos de tractament

Les impureses més comunes que han d'ésser separades de l'aigua són matèries en suspensió, microorganismes, matèries orgàniques, i substàn-

cies sòlides i gasoses dissoltes. En aquest apartat, es consideren els distints processos de tractament d'aigua per al seu ús a la indústria fent esment de les particularitats de la indústria alimentària. Els casos d'aigües de refrigeració i generació de calor es tracten independentment als apartats següents. Quant a les aigües residuals, es troben tractades amb detall al tercer apartat.

Cal tenir en compte que molts processos unitaris emprats per als tractaments d'aigües, s'apliquen tant a les aigües d'abastament com residuals, de manera que tant sols varien el disseny dels equips i la forma d'operació, però el principi de funcionament és el mateix.

### *Eliminació de matèries en suspensió*

L'aigua amb matèries en suspensió és inadequada per a la major part de les aplicacions. Aquestes matèries en suspensió solen ésser sílex, argiles, productes vegetals i substàncies animals. La seva distribució per mides pot ésser molt àmplia. Les partícules més gruixudes es dipositen per sedimentació natural quan l'aigua es troba en repòs. Les partícules fines, en canvi, poden romandre en suspensió més o menys estable i donar a l'aigua una terbolesa. Les aigües subterrànies solen estar exemptes de terbolesa, excepte en alguns casos quan han esdevingut pluges fortes que amb la seva filtració a través de les capes permeables l'han embrutat.

El mètode seleccionat per a separar les matèries en suspensió depèn del cabal d'aigua a tractar i de la mida i la naturalesa dels sòlids que es troben suspesos. Els tractaments emprats són: la sedimentació, la coagulació-floculació i la filtració.

*La sedimentació* suposa l'existència de grans volums emmagatzemats d'aigua, de manera que el temps mitjà de permanència de l'aigua permet la decantació natural de les matèries suspeses. Cal dir que s'empra com a tractament previ, ja que sense cap ajuda la decantació natural no és mai completa, car a l'aigua sempre hi romanen matèries en suspensió estable.

*La coagulació-floculació* i la posterior decantació s'apliquen especialment per les partícules col·loïdals. A diferència de les partícules en suspensió normals, en què la mida és de l'ordre d'una micra, les partícules col·loïdals corresponen a mides de centèsimes de micra. Aquestes partícules es troben en suspensió especialment estable, perquè amb la mida que tenen els influeixen més les interaccions elèctriques i superficials que no el propi pes. Les partícules en suspensió col·loïdal, són en gran manera les responsables de la terbolesa residual i del color de les aigües.

La *coagulació-floculació* consisteix en l'addició d'un anomenat agent de coagulació, el qual per interacció química venç les repulsions elèctriques que mantenen el col·loide en suspensió i els força a agrupar-se en conglomerats anomenats coàguls. També s'empren agents de floculació o floculants, els quals congreguen els anteriors coàguls en flocs que ja són aptes per a ésser separats posteriorment per decantació.

Els coagulants més emprats són sals d'alumini o ferro. Les de més freqüent utilització són el sulfat d'alumini, el sulfat ferrós, l'aluminat sòdic i el clorur ferric. Els floculants solen ésser polielectròlits aniónics o catiónics en funció de les característiques del coàguls.

Per a dur a terme el procés de coagulació-floculació s'utilitzen els anomenats floculadors. Els floculadors com el de la figura 1 adjunta no són més que uns tancs on s'alimenta l'aigua bruta d'entrada en continu. Al tanc, s'hi afegeixen els agents químics pertinents i es garanteix a través d'una agitació

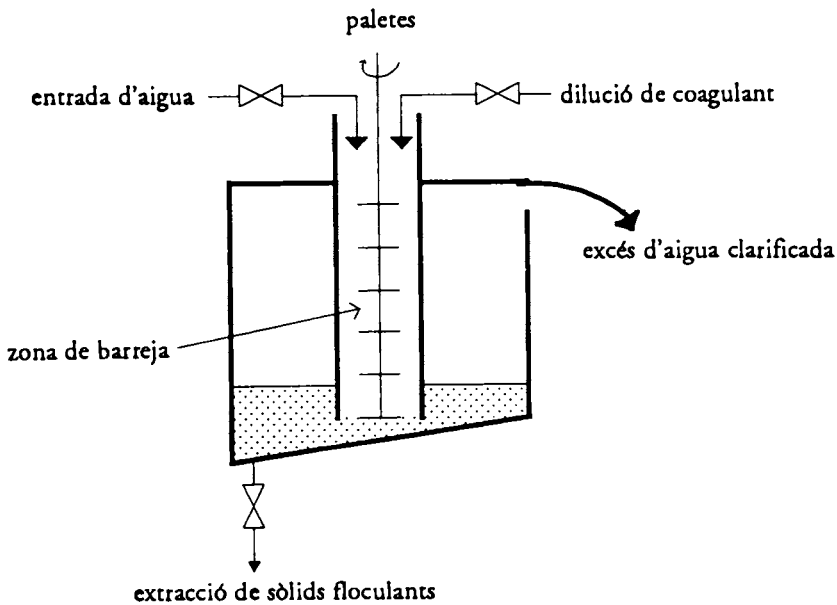


FIGURA 1. Dipòsit de floculació

la mescla íntima d'aquests amb l'aigua. Aquesta agitació ha d'ésser suficient per a tenir una mescla correcta, però un excés pot arribar a destruir els flocs. La capacitat del tanc de floculació està dissenyada per a garantir un temps

mínim de permanència de l'aigua per a garantir la formació i la mida correcta dels flocs.

La *decantació* es produeix als decantadors. En aquests s'aprofita la força de la gravetat, que força les partícules a un moviment descendent, i queden dipositades a la part inferior del decantador, on un sistema d'extracció s'encarrega de retirar els fangs. Per a obtenir una bona eficàcia de la decantació, cal haver obtingut prèviament unes partícules prou grans i pesants en la flocculació prèvia.

Els decantadors són molt variats en el seu disseny i forma d'operació. Fonamentalment es poden dividir en dos tipus principals: rectangulars o longitudinals, i circulars.

Als decantadors rectangulars, la recollida de fangs es realitza mitjançant rasquetes arrossegades amb un mecanisme d'arrossegament que les desplaça al llarg del decantador, mentre que en els circulars les rasquetes es troben subjectes a un braç rotatiu, de forma que condueixen els fangs al punt central inferior del decantador.

L'ús d'un tipus o altre de decantador en alguna de les seves múltiples variants dependrà de l'aplicació. En la selecció es considera el cabal a tractar, la càrrega contaminant, la densitat i la mida de les partícules i la qualitat de l'aigua a obtenir.

Els decantadors s'empren en els tractaments d'aigua d'abastament, en els tractaments fisico-químics d'aigües residuals i en els tractaments biolò-

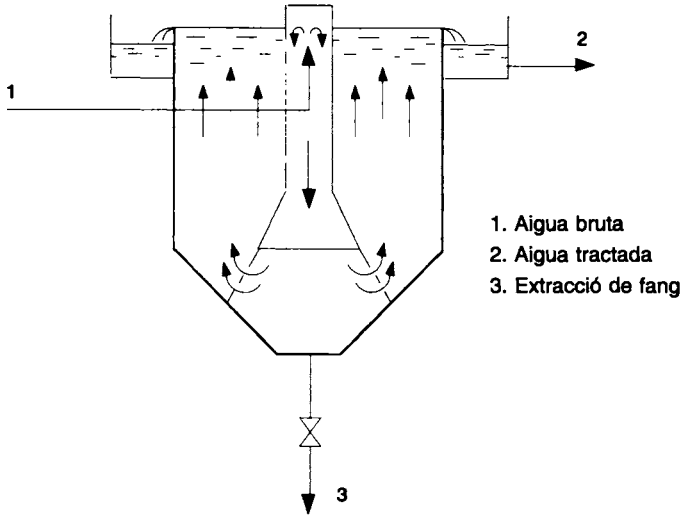


FIGURA 2. Decantador estàtic cilíndric-cònic [3]

gics de les aigües residuals. D'aquests dos darrers, anomenats decantadors primaris i decantadors secundaris respectivament, se'n parlarà amb més detall als apartats 3.3 i 3.4.

Hi ha decantadors que inclouen el floculador dins el cos d'un mateix equip (figura 3).

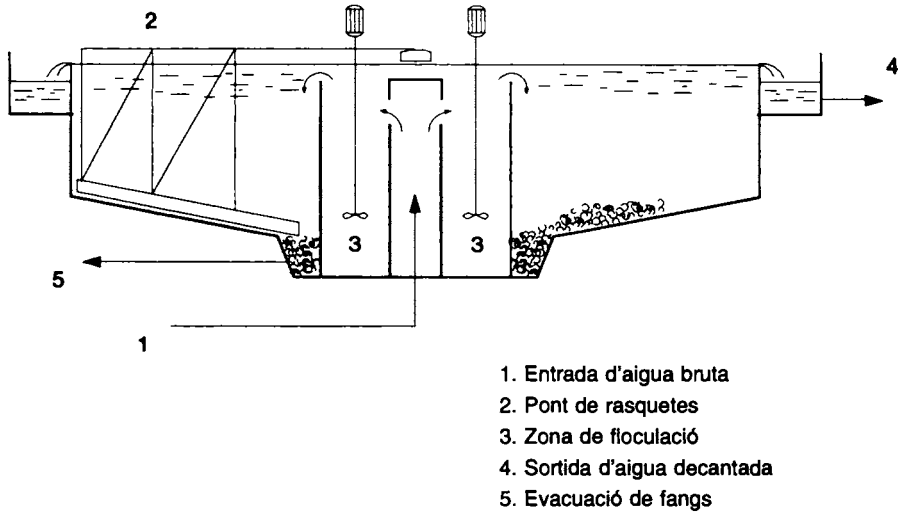


FIGURA 3. Decantador-floculador circular amb rasquetes d'arrossegament perifèric [3]

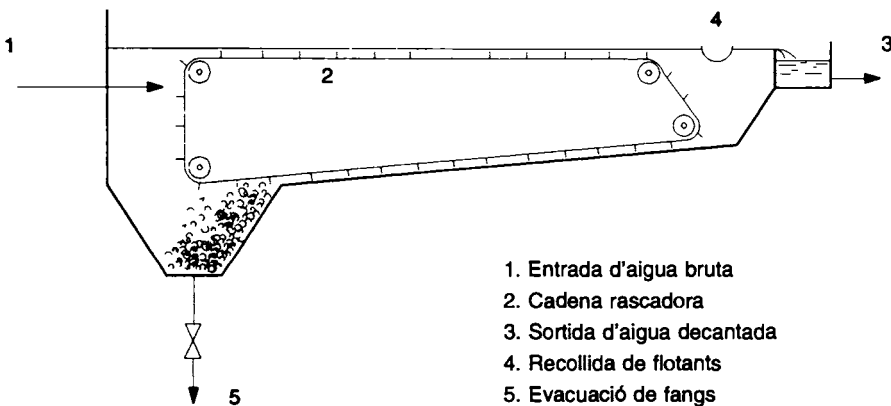


FIGURA 4. Decantador longitudinal amb sistema de cadenes [3]

*La filtració.* Consisteix en la separació de partícules sòlides de l'aigua per intercepció i retenció d'aquestes sobre una superfície o en el si d'una massa porosa anomenada massa filtrant, a través de la qual es força a passar el fluid.

Els filtres tenen una gran varietat d'equips i aplicacions. El més freqüent és la filtració en un medi granulat. El medi granulat està compost de diferents capes de granulometria variable (grava, antracita, sorra,...). L'aigua es troba primer amb la més grollera, on queden retingudes les partícules més grosses. Les capes següents van disminuint la mida del granulat, de manera que a la darrera es retenen les partícules més fines. En acumular-se les partícules retingudes al filtre, la pèrdua de càrrega a través d'aquest augmenta i la velocitat de filtració disminueix. Quan el filtre queda col·lapsat i no és capaç de filtrar més (la qual cosa es detecta per l'elevada pèrdua de càrrega que es produeix), es renta a contracorrent.

El rentatge a contracorrent es fa amb aigua o amb una barreja aigua-aire. La forma d'operació sol ésser a base d'una bateria de filtres en què s'alternen els que treballen amb els que es regeneren.

En l'equilibri entre uns cicles de rentatge el més llargs possible i una bona qualitat de l'aigua, es busca un mida intermèdia del medi filtrant que s'acosti a l'òptim. La durada dels cicles de filtració s'optimitza en funció del nombre de filtres en paral·lel i el dimensionat del tanc d'emmagatzematge de l'aigua de rentatge.

Si la força impulsora de l'aigua és la mateixa gravetat, el filtre s'anomena filtre de gravetat o obert, mentre que si hi ha una bomba d'impulsió, s'anomena filtre a pressió o tancat.

Les tècniques de filtració amb membranes, en particular la ultrafiltració i l'osmosi inversa, són cada dia més utilitzades en les indústries ali-

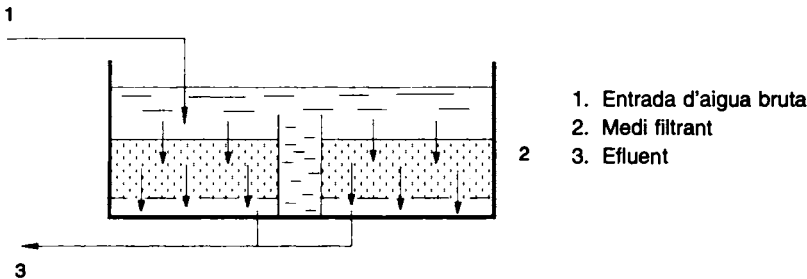


FIGURA 5. Filtre de gravetat en fase de filtració



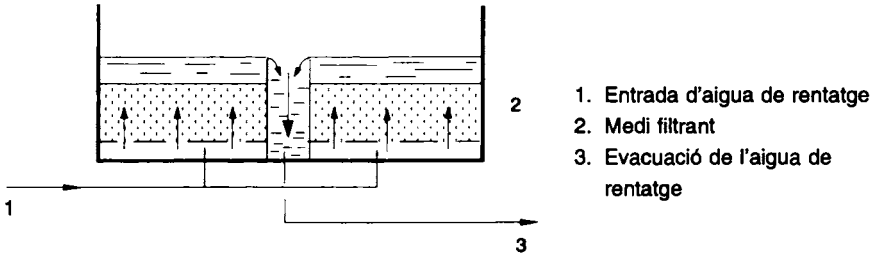


FIGURA 6. Filtre de gravetat en fase de rentatge

mentàries per a la purificació de l'aigua. Asseguren l'eliminació de matèries molt fines en suspensió a l'aigua. A França, hi ha força instal·lacions en què l'aigua, a la sortida de resines de bescanvi iònic, és tractada per osmosi inversa abans de la seva utilització en el procés de fabricació.

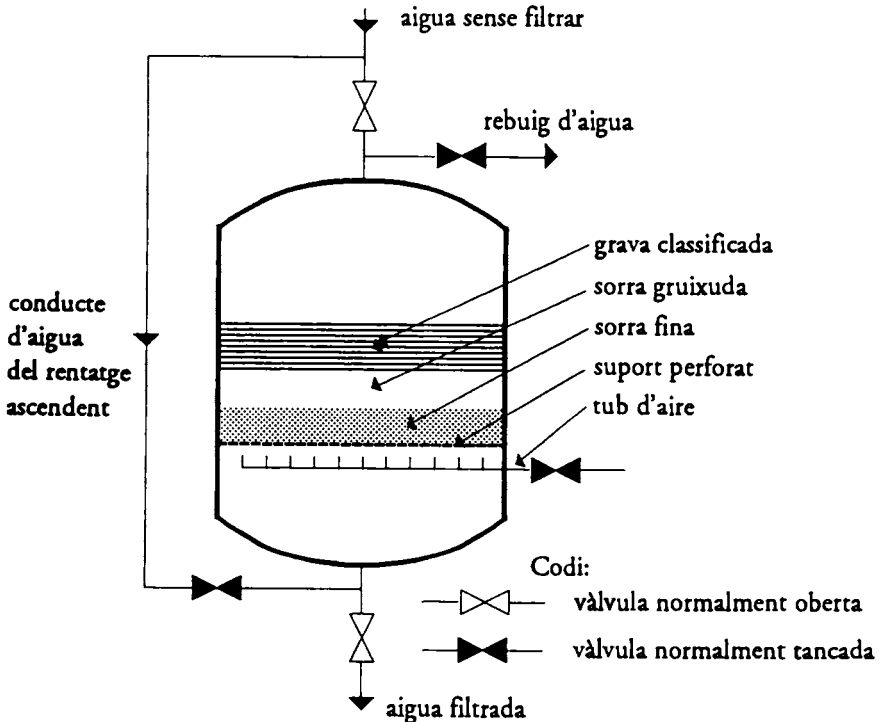


FIGURA 7. Filtre de sorra a pressió

També, l'osmosi inversa pot a vegades substituir les resines de bescanvi d'ions per al tractament de l'aigua. En general, a Alemanya, la tècnica d'osmosi inversa es prefereix a d'altres tècniques per la desmineralització de l'aigua.

### *Eliminació de microorganismes*

L'eliminació de microorganismes és fonamental en les aplicacions en què l'aigua entra en contacte o forma part del producte alimentari. Si arriben microorganismes vius a la fàbrica d'elaboració d'aliments, tant ells com els seus productes de descomposició donen lloc a sabors, colors i olors en els equips i en els productes alimentaris. Si a més hi ha bacteris patògens, no provoquen tan sols el deteriorament del producte, sinó també toxiinfeccions alimentàries. Per a reduir el risc de la contaminació, l'aigua de procés no ha de contenir microorganismes.

Fonamentalment, els microorganismes es troben a les aigües superficials. A l'aigua procedent de pous, en general, el contingut és petit.

Per al tractament a la mateixa fàbrica, la coagulació i la floculació, la decantació, la filtració i la desinfecció final generen una aigua de qualitat bacteriològica normalment acceptable.

La desinfecció final s'aconsegueix mitjançant el tractament amb clor o derivats clorats, o bé amb tractament d'ozó.

*La cloració.* El clor dissolt s'empra per a grans instal·lacions, mentre que per a aplicacions més reduïdes s'empra el diòxid de clor o hipoclorits.

L'eficiència de la cloració depèn de la concentració de clor, del temps de contacte, de la temperatura, del pH i de la quantitat de matèria orgànica present. El clor reacciona amb la matèria orgànica i nitrogenada de l'aigua. La quantitat de clor necessària per a què aquesta reacció sigui completa es denomina "demanda de clor". Per tal d'assegurar una destrucció total de tots els bacteris, ha de romandre clor residual a l'aigua després d'un cert temps de contacte. Aquest temps de contacte augmenta amb el pH de l'aigua i disminueix amb la temperatura.

En dosificar el clor, el clor residual creix inicialment amb la dosi afegida. Això es dona mentre el clor és absorbit per la matèria orgànica formant cloramines. Més addició de clor provoca l'oxidació de les cloramines, i així el clor residual disminueix, per a tornar a augmentar quan l'oxidació de les cloramines s'ha completat (vegeu el gràfic adjunt).

El punt de mínim clor residual és conegut com a "punt de ruptura". Després del punt de ruptura, l'addició de clor provoca un augment pro-

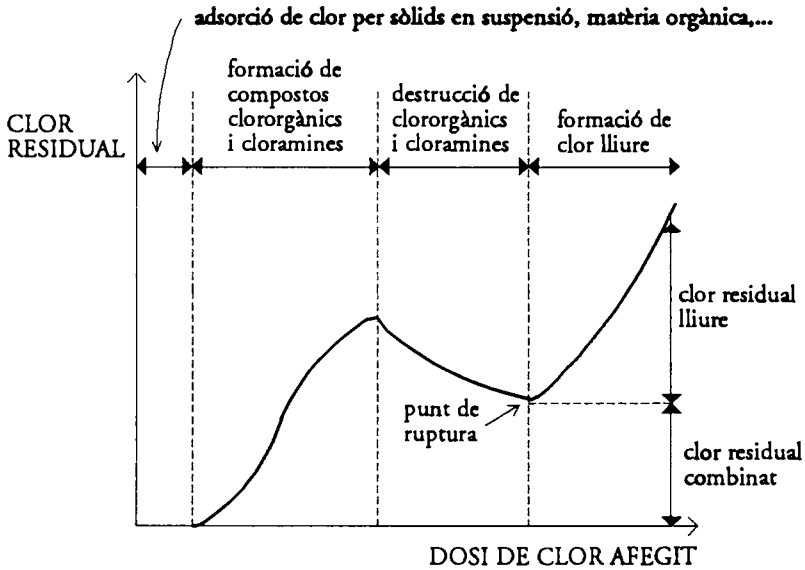


FIGURA 8. Corbes de clor residual i punt de ruptura (*break-point*)

porcional del clor residual lliure. La desinfecció ideal pretén aconseguir un mínim de clor residual lliure que garanteixi la destrucció dels microorganismes però que no comuniqui a l'aigua olor ni sabor de clor.

*Ozonització.* A mesura que han anat millorant els equips i les tècniques en els equips de producció d'ozó, s'ha incrementat l'interès i l'ús d'aquest mètode de desinfecció. El gran avantatge de l'ozó enfront del clor és que no

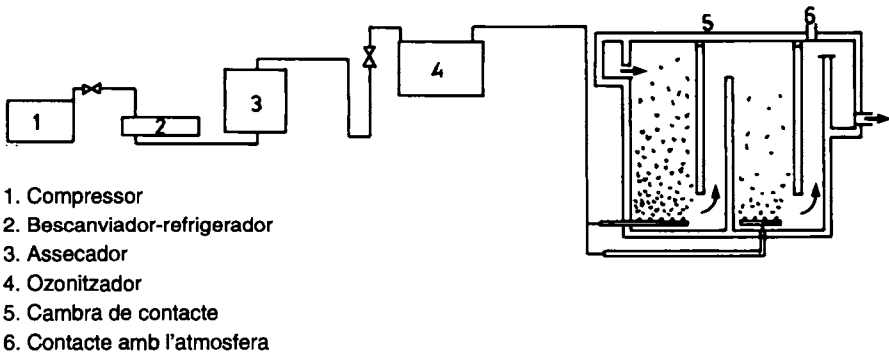


FIGURA 9. Desinfecció per ozó. Funcionament a forta pressió. Dessecació en una fase

deixa sabor residual. El tractament amb ozó també s'aplica en aigües residuals quan hi ha una exigència de desinfecció abans de l'abocament. L'aire ozonitzat es genera mitjançant un ozonitzador. El contingut d'ozó en l'aire pot ser fins a  $20 \text{ g/m}^3$ .

L'aire ozonitzat s'injecta dins la massa fluida mitjançant difusors. Com que l'agitació natural produïda per aquesta injecció no és suficient, s'incorpora un sistema d'agitació forçada amb turbina, per tal de garantir la màxima eficàcia de l'oxidació de matèries orgàniques per ozó.

*Raigs ultraviolats.* La desinfecció de l'aigua amb raigs ultraviolats (UV) s'aplica en general com a fase terminal dels tractaments d'aigua. S'aplica industrialment des de fa uns trenta anys. Els raigs emesos indueixen poques transformacions en els materials bioquímics polimoleculars d'estructura complexa. Per contra, a longitud d'ona de 240 a 270 nanometres hi ha la zona bactericida i entre 200 i 180 nanometres és suficient per a inactivar els microorganismes. L'engegada d'aquest procés requereix una definició precisa de les dosis de raigs damunt cada partícula d'aigua, el cabal a tractar, el tipus de germen a destruir i el percentatge de destrucció buscat. L'aigua inicial, cal que estigui poc carregada de partícules (si cal es filtra prèviament). Hi ha sistemes hidrodinàmics que donen una màxima homogeneïtat de l'exposició de l'aigua als raigs.

### *Eliminació de substàncies dissoltes*

Totes les aigües residuals contenen substàncies minerals dissoltes, i les més comunes són sulfats, clorurs, bicarbonats de sodi, calci i magnesi. Per al tractament d'aigües, es controlen aquestes impureses des del punt de vista de l'alcalinitat i la duresa.

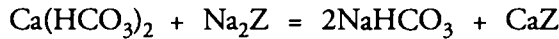
Sovint es troben aigües alcalines, per raó de la presència de bicarbonats solubles de calci, magnesi, sodi i potassi. En moltes aplicacions a indústria alimentària (per exemple elaboració de begudes), cal una aigua de poca alcalinitat. També cal alcalinitat reduïda per l'aigua d'alimentació a calderes (apartat 2.3).

Quant a la duresa, és deguda, tal com ja s'ha esmentat, a les sals solubles de calci i magnesi. Les sals de calci i magnesi endureixen la pell de les hortalisses en l'escaldament i envasament; les operacions de rentatge amb detergents alcalins són més difícils amb aigua dura i necessiten més detergent; en pasteuritzadors i bescanviadors de calor, en general, es dipositen crostes de carbonat i sulfat càlcic que redueixen el bescanvi tèrmic i la capacitat dels aparells.

Per a combatre l'excessiva alcalinitat de l'aigua s'empra el bescanvi iònic amb zeolites, i la duresa s'elimina per precipitació, bescanvi iònic amb zeolites o desmineralització.

*Precipitació.* Afegint a l'aigua quantitats conegudes de calç hidratada  $\text{Ca(OH)}_2$  s'elimina la duresa temporal, i amb carbonat sòdic  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  s'elimina la duresa permanent. Normalment, s'afegeix un floculant per a facilitar la precipitació, i posteriorment es filtra per a obtenir l'aigua clara. Amb aquest sistema es pot arribar a reduir la duresa fins a uns 70 mg/l. Si cal eliminar-la del tot, cal a continuació sotmetre l'aigua a un procés de bescanvi iònic.

*Bescanvi iònic amb zeolites.* Les zeolites són silicats complexos naturals o sintètics que tenen la propietat de bescanviar ions de sodi pels de calci i magnesi:



Per al desenduriment de l'aigua, aquesta es fa circular mitjançant la caiguda per gravetat o forçadament sota pressió, a través d'un llit de zeolita granulada. La zeolita bescanvia els cations eliminant la duresa. Quan la zeolita es troba esgotada, es regenera rentant-la en sentit contrari amb aigua amb una gran concentració de clorur sòdic (salmorra). L'aigua resultant arrossega el Ca i el Mg en forma de clorurs solubles, i deixa el llit en les mateixes condicions inicials. La forma normal d'operar és amb dues unitats; mentre la primera treballa, la segona es troba en procés de regeneració. El tractament amb zeolites pot arribar a proporcionar aigua amb duresa zero.

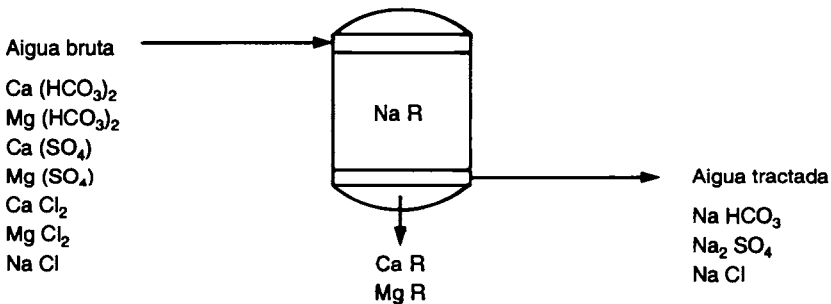
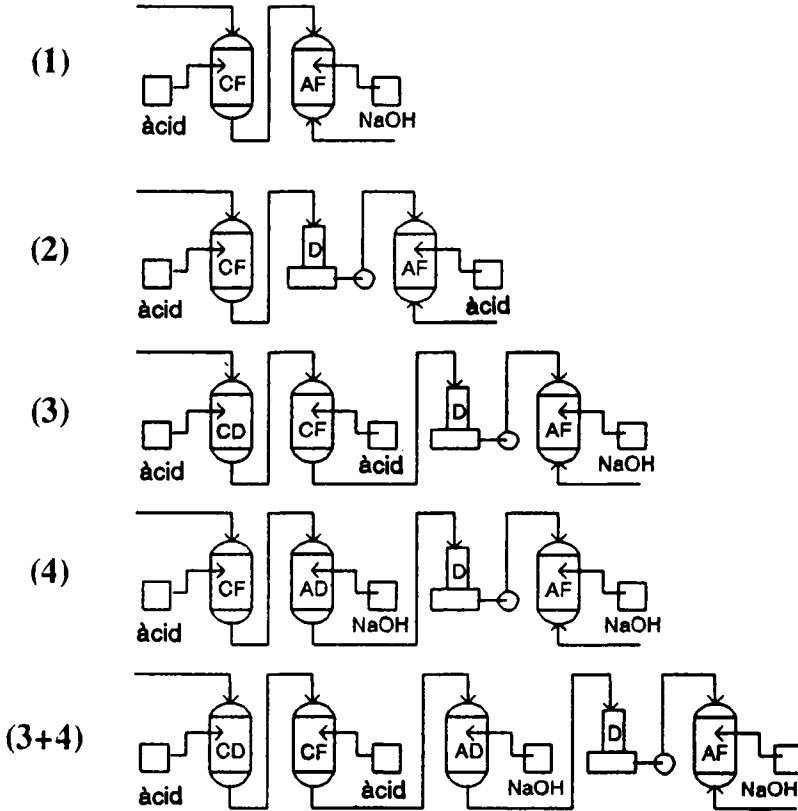


FIGURA 10. Desenduriment

*Desmineralització.* La desmineralització no és més que un bescanvi iònic en què s'utilitzen resines sintètiques de bescanvi d'anions i de cations per a obtenir aigua extremadament pura (exempta de sals minerals dissoltes) per a algunes aplicacions. S'aplica en unitats muntades en sèrie on l'aigua tra-



CF catió fort  
 AF anió fort  
 D desgasificador  
 CD catió dèbil  
 AD anió dèbil

(1) Esquema fonamental  
 (2) Alcalinitat important  
 (3) Alcalinitat i duresa important  
 (4) Percentatge de sals d'àcid fort important

FIGURA 11. Esquemes de desmineralització.

vessa diferents tipus de resines i bescanvia amb cada una d'elles anions o cations. Les instal·lacions solen estar duplicades per a permetre el treball en continu, i les regeneracions es fan mitjançant rentatges a contracorrent amb solucions regeneradores fortament concentrades (a l'apartat següent s'exposa amb detall la desmineralització en aigua per a calderes).

### 2.3. Tractament d'aigua per a la generació de vapor.

L'ús de vapor en qualsevol indústria es pot esquematitzar de la manera següent: el generador de vapor rep una certa proporció variable d'aigua condensada recuperada del procés de bescanvi de calor on s'ha aplicat el vapor, i aigua de nova aportació degudament tractada que compensa les pèrdues i fuites del circuit vapor-aigua condensada de retorn. El conjunt d'aquesta aigua es converteix en vapor en el generador de vapor gràcies a la calor aportada per la combustió d'un combustible i s'envia al punt de consum. L'aigua que es manté en forma líquida dins el generador es va concentrant en les impureses que contenia l'aigua que ja s'ha convertit en vapor i per tant cal efectuar una desconcentració sistemàtica mitjançant una extracció anomenada purga.

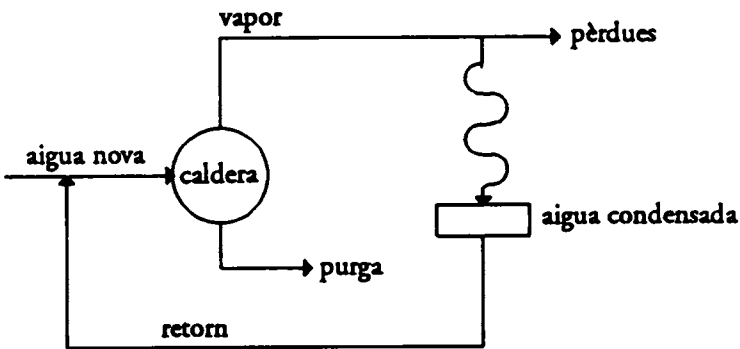


FIGURA 12. Cicle de l'aigua en el circuit d'una caldera

Les impureses en l'aigua d'aportació al generador de vapor produeixen tot un seguit d'inconvenients:

- Incrustacions degudes al dipòsit sobre les parets del generador de vapor, degudes fonamentalment a sals de calci, que dificulten la transmissió de calor i provoquen escalfaments locals.

– Arrossegament de partícules d'aigua amb el vapor que provoca un descens del rendiment energètic del vapor. Depèn de la viscositat i de la tendència a formar escumes, les quals són funció de l'alcalinitat, de la salinitat total i de la presència de certes substàncies orgàniques.

– Arrossegament de minerals volàtils amb el vapor, entre els quals el més important és el sílex. L'arrossegament de sílex augmenta amb la temperatura d'ebullició i la pressió.

– Corrosions degudes entre altres a la presència d'oxigen dissolt o de CO<sub>2</sub>.

TAULA 2. Característiques límit de les aigües d'alimentació a calderes i l'aigua de la caldera [16]

Caldera de vapor		fins a 15 bar	de 15 a 30 bar
Aigua d'alimentació			
TH total	(°f)	< 0,2	< 0,2
pH a 10°C		> 8,5	> 8,5
O <sub>2</sub>	(ppm) (mg/l)	0,05	0,03
Aigua de la caldera			
pH		11 a 12	11 a 11,8
TAC	(°f)	< 100	< 80
TA	(°f)	< 70	< 60
Síllice màx.	(mg/l)	200	100
Fosfats	(mg/l)	20 a 40	10 a 25
Sulfits	(mg/l)	40 a 80	40 a 80
Conductivitat	(µS/cm)	–	–

Els procediments per al tractament de l'aigua d'aportació a les calderes de vapor se seleccionen de manera que s'evitin els inconvenients anteriors.

És evident que a un generador de vapor s'hi ha d'aportar aigua totalment desendurida. Les aigües d'aportació caldrà doncs tractar-les sempre mitjançant processos de bescanvi de ions.

Per a les calderes de baixa pressió, a vegades és suficient un desenduriment mitjançant el bescanvi catiònic i una regeneració amb clorur sòdic fins a obtenir un TH igual a zero, tal com s'ha exposat a l'apartat anterior. A les calderes d'alta pressió s'utilitza pràcticament sense excepció la desmineralització.

La *desmineralització* total de les aigües d'aportació s'aplica quan els procediments de descarbonatació i desenduriment no són suficients i, tal com



s'ha dit, és del tot necessària per a les exigències d'un generador de vapor d'alta pressió.

Amb la desmineralització total s'obté una aigua amb un extracte sec molt petit, i el grau de depuració depèn de la cadena de bescanvi emprada. En funció de la pressió, del tipus de caldera, de la salinitat total i del contingut de sílex, s'escull la cadena de tractament més adient.

Les cadenes de tractament van des de desmineralitzacions en una sola etapa de bescanviadors catiónics i aniónics, fins a aplicacions molt exigents per a calderes de molta pressió, que podrien consistir en cadenes de tractament en dues etapes de bescanvis aniónics i catiónics alternant cations i anions dèbils i forts, amb eliminació intermèdia del  $\text{CO}_2$  i cadena prèvia de descarbonatció (vegeu la figura 11).

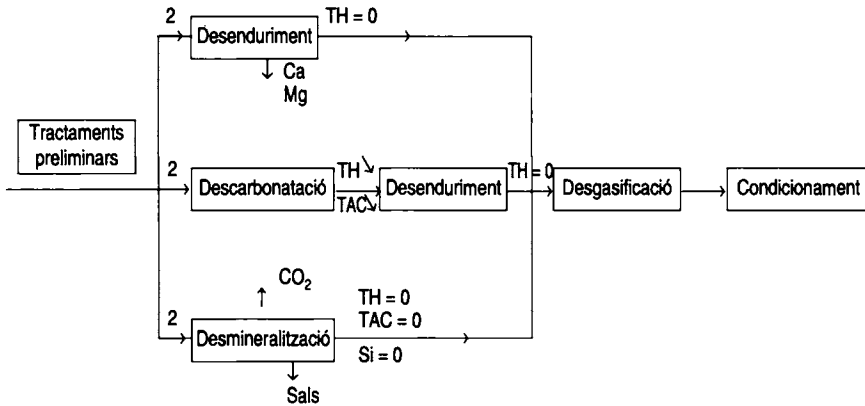


FIGURA 13. Possibilitats diverses de tractament d'aigües destinades a l'alimentació de calderes

#### 2.4. Tractament d'aigua per a refrigeració

La majoria d'instal·lacions de la indústria alimentària utilitzen l'aigua com a medi de refredament en part per la seva disponibilitat i en part per la seva elevada calor específica.

Normalment l'aigua no entra en contacte amb el fluid que es vol refredar, sinó que el bescanvi de calor es farà mitjançant una paret generalment metàl·lica, bona conductora de la calor. L'aparell on es duu a terme el refre-

dament del fluid mitjançant l'escalfament de l'aigua de refrigeració és el bescanviador de calor.

L'aigua freda entra al bescanviador i eleva la seva temperatura per contacte amb les parets més calentes. A la sortida es poden presentar tres situacions:

a) circuit obert: l'aigua ja calenta s'aboca a l'exterior.

b) circuit tancat: l'aigua calenta es refrigera en un circuit secundari (generalment aire o aigua) i es reutilitza de forma continua.

c) circuit semiobert: l'aigua ja calenta es refreda per evaporació parcial en una torre de refrigeració. En aquest cas caldrà una certa aportació d'aigua nova al circuit per a compensar les pèrdues produïdes per l'evaporació.

Les característiques de l'aigua i el tipus d'instal·lació permeten preveure el tipus de tractament que convé aplicar. Els problemes derivats de l'aigua bàsicament són la corrosió, les incrustacions, els dipòsits de fangs i el creixement biològic.

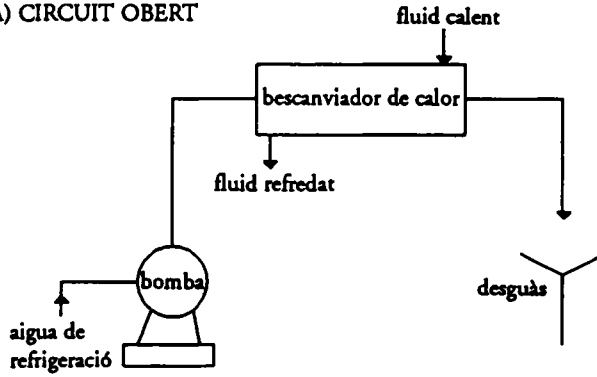
Als circuits oberts, com que l'aigua de refrigeració sols s'utilitza una vegada la correcció mitjançant productes químics seria molt cara. Unicament s'acostuma a corregir el pH, a addicionar un estabilitzador per a evitar les incrustacions, i a afegir clor o hipoclorit per tal d'impedir el desenvolupament d'algues i bacteris. Els problemes derivats dels dipòsits de fangs es minimitzen a base d'un condicionament o tractament dispersant, però el més fonamental per a evitar dipòsits és senzillament garantir que no hi hagi zones de baixa velocitat al llarg del circuit. Actualment gairebé no s'empren els sistemes oberts, excepte si es tracta d'una petita instal·lació o bé d'un cas on l'aigua és abundant i barata i la seva temperatura no s'incrementa gaire.

En canvi, als circuits tancats, l'aportació d'aigua és mínima i no hi ha contacte amb l'atmosfera. En aquest cas és molt important utilitzar aigua d'alta qualitat, per tal d'aconseguir una protecció total i gairebé definitiva car l'aigua sempre serà la mateixa. Amb un tractament químic n'hi ha prou, però cal realitzar un cert control de qualitat periòdic o permanent i minimitzar les eventuais aportacions d'aigua al circuit.

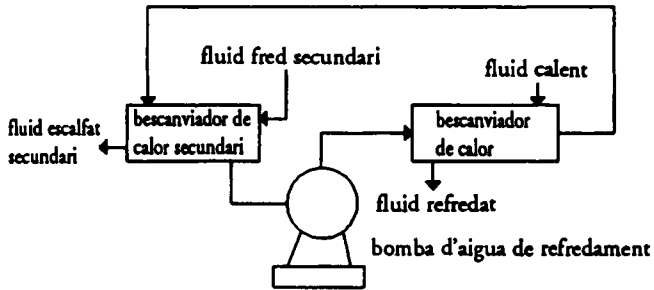
Als circuits semioberts la dimensió dels aparells, i la complexitat dels problemes que es plantegen, exigeixen un estudi més a fons de la protecció. En aquest cas, el tractament de l'aigua requereix un balanç força complex entre l'efectivitat i el cost.

Quan una part de l'aigua de refrigeració s'evapora a la torre, la part corresponent de sòlids dissolts i en suspensió queda retinguda a la fase aquosa. En augmentar la concentració, progressivament algunes sals dissoltes asso-

## A) CIRCUIT OBERT



## B) CIRCUIT TANCAT



## C) CIRCUIT SEMIOBERT

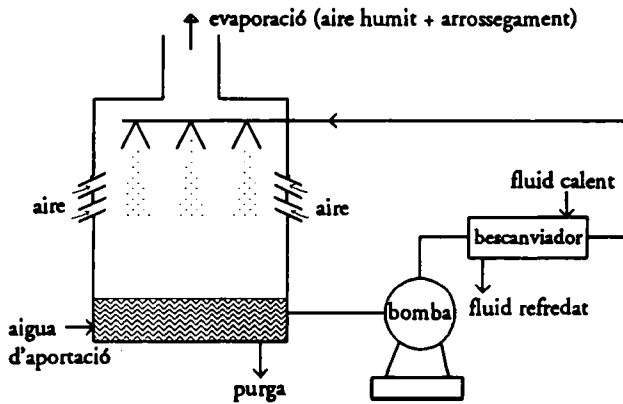


FIGURA 14. Circuits de refrigeració

leixen el límit de la seva solubilitat i comencen a dipositar-se. Igualment, la concentració de sòlids en suspensió aniria augmentant. El contacte de l'aigua amb l'aire també arrossega partícules sòlides de l'aire, que s'afegeixen a les pròpies de l'aigua. Per a controlar el contingut de sòlids en l'aigua circulant, cal fer-hi una purga controlada. Aleshores, l'aigua d'aportació ha de compensar l'evaporació, l'arrossegament de partícules d'aigua per l'aire i la purga.

Els additius destinats a evitar la corrosió, la incrustació i el dipòsit se solen afegir preferentment de forma contínua en funció de l'aigua d'aportació i la relació de concentracions. L'addició de biocides sol ésser irregular, a vegades amb dosis contínues alternades amb dosis de xoc periòdiques, per tal de contrarestar l'adaptació dels microorganismes als fenòmens regulars.

El tractament es dissenya per a mantenir un pH entre 6 i 8. Es recomana no sobrepassar els 1500 mg/l de sòlids dissolts, amb un màxim de 2500 mg/l. La conductivitat ha d'ésser inferior a 400 microsiemens i els sòlids en suspensió inferiors a 100 mg/l.

*Inhibició de la corrosió.* Els inhibidors de la corrosió són productes químics que s'afegeixen a l'aigua de refrigeració per tal d'eliminar l'efecte de corrosió enfront dels metalls. Generalment no actuen sobre compostos químics de l'aigua, sinó que formen una fina pel·lícula protectora que en suprimir el contacte metall-aigua n'evita la corrosió. Els principals inhibidors de la corrosió es poden classificar així:

- |                       |                 |                    |
|-----------------------|-----------------|--------------------|
| – simples . . . . .   | d'acció física  | —> Amines          |
|                       | d'acció química | —> Polifosfats     |
|                       |                 | —> Silicats        |
|                       |                 | —> Cromats         |
|                       |                 | —> Nitrits         |
| – compostos . . . . . |                 | —> Cromats-Fosfats |
|                       |                 | —> Fosfats-Zenc    |
|                       |                 | —> Cromats-Zenc    |
|                       |                 | —> Organats-Zenc   |

En circuits tancats, són més indicats els simples, ja que en aquests casos l'aportació d'aigua és petita i és més freqüent utilitzar un sol inhibidor, de manera que els controls se simplifiquen.

En circuits semioberts s'utilitzen inhibidors de la corrosió compostos, ja que la protecció és molt superior per l'efecte sinèrgic i es redueixen molt les dosis a utilitzar.

*Inhibició de les incrustacions i dels dipòsits.* A causa de les modificacions del medi (pH, temperatura, concentracions,...) hi ha elements dissolts en l'aigua que es poden tornar insolubles i formar incrustacions o dipòsits.

Les incrustacions provoquen una reducció de l'eficiència dels sistemes de refrigeració, ja que actuen com un aïllant de la transferència de calor i reduint la secció de pas de l'aigua. A més, l'increment de les pèrdues de càrrega pot arribar a impedir que el bescanviador de calor doni els valors mínims que necessita el procés. Aquestes precipitacions són especialment importants a les sucreries (apartat 2.5).

Cal doncs controlar la duresa de l'aigua, el calci i el magnesi, el pH i la temperatura, la concentració de sulfats, de sílex i d'altres contaminants.

Quant a la prevenció en la formació de dipòsits, s'inicia amb tractaments previs externs. Són adequats la decantació i la filtració, i convé que els dipòsits floculin adequadament els polielectròlits. Els ions que poden donar lloc a les precipitacions s'eliminen desendurint i desmineralitzant l'aigua. Aquests processos tenen un cost alt i només s'apliquen a circuits tancats.

L'addició d'un àcid és un dels tractaments més antics per a evitar la formació d'incrustacions, ja que en disminuir el pH s'evita la precipitació de carbonats. Actualment hi ha tractaments que eliminen l'àcid i es controlen les incrustacions mitjançant l'addició d'agents de control polimèric. Els principals mètodes de control químics són:

1) Dispersants: són polímers que ajuden a fer que les partícules es mantinguin en suspensió. Poden ésser absorbits sobre la superfície dels materials del dipòsit, i aporten càrregues elèctriques d'igual signe i, per tant, augmenten la repulsió entre partícules.

2) Quelants i segrestants: eviten el comportament normal d'alguns ions, en formar amb ells un complex. Poden fins i tot solubilitzar alguns dipòsits ja formats i per tant s'utilitzen també en la neteja d'instal·lacions. No s'utilitzen com a agents actius principals perquè són cars.

3) Estabilitzadors dels dipòsits. Els polifosfats, esters de fosfats i fosfonats són bons estabilitzadors. Controlen la duresa estabilitzant els ions de calci i magnesi, així com els compostos fèrrics i de manganès; tot i així la seva utilització es va substituint per agents més específics.

*Control microbiològic.* Els microorganismes dels sistemes de refrigeració afecten negativament el funcionament dels circuits de diferents formes. A més poden ésser agents directes de la corrosió o formar dipòsits.

Els microorganismes s'introdueixen als sistemes de refrigeració amb la mateixa aigua o fins i tot per l'aire que es filtra a la torre de refrigeració. La

temperatura i el pH de les torres es troben, en general, en les condicions idònies per a què es produeixi el creixement de microorganismes. Les espècies més comunes són els bacteris, les algues i els fongs.

Per tal de controlar aquesta activitat microbiana, s'utilitzen agents microbicides que es classifiquen en oxidants i no oxidants. El programa d'actuació és molt particular per a cada instal·lació i s'ha de basar en assaigs de cultiu i sensibilitat als agents biocides. Cal, a més, considerar la toxicitat potencial del medi.

Els microorganismes són capaços de desenvolupar formes resistents a un medi determinat, de forma que cal revisar periòdicament el programa de tractament utilitzat.

Dels biocides oxidants el més important és el clor. El consum de clor és la quantitat de clor que reacciona amb els contaminants abans que quedi clor lliure sense reaccionar (vegeu l'oxidació amb clor a l'apartat 2.2).

Els biocides no oxidants utilitzats sols han demostrat tenir sovint un caràcter biocida superior al dels oxidants. Sovint s'usen combinats per a tenir un espectre d'activitat més ampli. Els més comuns són el pentaclorfenat i d'altres fenols clorats. Per a molts bacteris i algues s'usen compostos organoestanyats, així com sals d'amoni quaternari. També s'usen compostos organosulfurats per a algues, fongs i bacteris.

## 2.5. Exemples de tractaments d'aigua en indústries alimentàries

La indústria alimentària és sens dubte una gran consumidora d'aigua. És imprescindible en les operacions de neteja tant d'instal·lacions com del producte. Sovint és també un ingredient essencial del procés.

La majoria de les vegades, l'aigua de subministrament públic que és de qualitat suficient per un particular no ho és per la indústria alimentària i cal sotmetre-la a tot un seguit de tractaments adaptats als usos posteriors.

### *Fàbriques de begudes (amb alcohol o sense)*

En aquests casos, l'aigua constitueix una part important del producte elaborat o fins i tot la seva totalitat. Les aigües fortament carregades de bicarbonats són un greu problema dels fabricants de begudes gasoses, car el pH d'aquestes begudes se situa entre 2 i 4.

Els principis de tractament d'aigua utilitzats en aquestes indústries són:

- descarbonatació de l'aigua d'elaboració de cervesa.
- desenduriment i/o descarbonatació d'aigua utilitzada en la preparació de llimonades i begudes carbòniques.
- descarbonatació parcial, seguida d'una esterilització amb supercloració i d'una desodorització amb carbó actiu, en les aigües destinades a la preparació de begudes refrescants com coles, etc...
- descarbonatació o desenduriment de les aigües utilitzades en la neteja d'ampolles en les anteriors indústries. En cas d'aigües molt salines, aquests procediments poden ésser insuficients, i aleshores cal combinar-los amb una desmineralització total per bescanvi iònic o osmosi inversa.
- desmineralització d'aigües destinades a reduir els alcohols.

### *Conserves de llegums*

Generalment, és indispensable un desenduriment parcial de les aigües de fabricació. Certament, és molt difícil obtenir un llegum tendre després d'una cocció amb aigua dura. També pot ésser necessari reduir la salinitat total.

### *Indústries làcties*

Les tècniques de tractament d'aigües poden intervenir en:

- la depuració i esterilització de les aigües de fabricació.
- l'eliminació de clor de les aigües esterilitzades destinades a la neteja de mantega.
- la desferrització d'aigües ferruginoses destinades a la fabricació.
- la desmineralització o desacidificació de llet o sèrum (fabricació de llet en pols).
- el tractament d'aigües condensades procedents de la concentració de la llet.
- la depuració de les aigües destinades a la reconstitució de la llet a partir de pols.
- la depuració de les aigües d'alimentació de calderes i de circuits de refrigeració.

### *Sucreries*

En la fabricació de sucre a partir de la remolatxa, els tractaments d'aigua intervenen en:

- la neteja de remolatxes: recirculació de les aigües utilitzades fins a uns decantadors de rasquetes, de manera que es recuperi l'aigua després de la separació dels fangs (tractaments antialgues i floculació amb polielectròlits).
- la preparació del licor brut: tractament sobre bescanviadors de cations de les aigües condensades amoniacals recirculades a principi de procés de difusió de cossetes i desinfectant amb clor.
- el tractament dels licors lleugers: descalcificació de licors de segona carbonatació (protecció contra incrustacions dels aparells d'evaporació).
- la desmineralització dels licors per doble bescanvi de cations i anions (reducció del percentatge de melasses).
- l'eliminació del color dels licors, a través de carbó actiu o resines adsorbents.
- el condicionament en els evaporadors concentradors dels licors.
- la desmineralització de les aigües per bescanvi iònic i tractaments complementaris per a l'obtenció de sucre líquid o caramel.

### **3. TRACTAMENTS D'AIGÜES RESIDUALS D'INDÚSTRIES ALIMENTÀRIES**

#### **3.1. Característiques de les aigües residuals. Abocament**

Mentre que els abocaments d'aigües residuals urbanes o domèstiques solen caracteritzar-se per una certa uniformitat de cabal i càrrega contaminant, no succeeix així en les aigües residuals de les indústries en general. Les indústries alimentàries generen una gran quantitat d'aigües residuals que provenen d'uns orígens molt variats: pells, sang, greixos, residus làctics, detergents de rentatge d'instal·lacions, residus vegetals, aigua de rentatge de productes...

A causa dels problemes cada vegada més grans que crea l'expansió i l'avenç industrial, cada vegada hi ha més exigència en el control de la contaminació, i com a conseqüència d'això es desenvolupen polítiques de protecció del medi ambient que han provocat que l'eliminació dels residus industrials es convertís en un factor econòmic vital en qualsevol indústria.

Les aigües residuals de la indústria alimentària contenen una gran proporció de matèria orgànica en comparació dels efluent domèstics. Això pot provocar problemes de putrefacció i olors, creixement d'organismes patògens i una disminució del contingut d'oxigen en l'aigua amb el conseqüent impacte sobre la flora i la fauna aquàtica. La seva DBO i els sòlids en sus-



pensió són doncs molt elevats. Això fa que els tractaments d'aigües residuals de les indústries alimentàries siguin principalment tractaments biològics, encara que també és freqüent el tractament físico-químic previ al biològic.

Per a definir un procés de tractament d'aigües residuals, cal examinar en detall l'origen i les característiques de cada un dels efluents. Aquesta revisió és essencial, i ens pot revelar un primer punt important abans de determinar el tractament, que és intentar reduir els efluents contaminants. Això es pot fer mitjançant el reciclatge o la reutilització de determinats cabals dins la mateixa indústria (apartat 4), o bé mitjançant canvis en el procés de manera que es redueixi el cabal i/o la càrrega contaminant. Un cop desenvolupat el punt anterior, si no es pot eliminar totalment la contaminació, caldrà definir pròpiament el procés de tractament adient.

Per a definir una instal·lació de tractament cal conèixer les dades següents:

- volum diari i característiques mitjanes dels efluents
- cabal mínim i màxim
- importància i periodicitat de les puntes de contaminació
- possibilitat de separar diferents circuits i per tant diferents tractaments
- contaminacions secundàries que poden afectar el tractament

Per a acabar de definir un tractament, cal fer proves reduïdes a escala pilot.

Sovint, és molt convenient aïllar diferents efluents per a sotmetre'ls a tractaments diferenciats, o bé a un tractament previ abans de barrejar-los amb la resta d'efluents per a un tractament final comú.

En general, els tractaments d'aigües residuals se solen classificar en primaris, secundaris i terciaris.

Els primaris són els tractaments també anomenats físico-químics. Aquests no solen ésser suficients en els casos de les indústries alimentàries i sovint poden ésser àdhuc innecessaris, i es converteixen en tractaments que preparen les aigües per als tractaments biològics posteriors també anomenats secundaris. Els tractaments primaris poden ésser purament físics (desbast, filtració grollera, desarenat, decantació, ...), purament químics (neutralització, oxidació...) o una combinació de tots dos.

Els tractaments secundaris o biològics estan encaminats fonamentalment a la reducció de la contaminació orgànica. Com que el seu funcionament es basa en l'acció de microorganismes, és molt important d'assegurar, mitjançant els tractaments primaris adients, l'absència de compostos químics que puguin alterar la flora bacteriana existent i per tant empitjorar o fins i tot inutilitzar el tractament biològic.

Els tractaments terciaris són tractaments addicionals que en alguns casos cal afegir per a completar el tractament d'una aigua residual que encara no

compleix els requeriments exigits (per exemple una filtració fina final per a eliminar l'excessiva presència de flocs procedents de tractaments anteriors).

### 3.2. Tractaments preliminars

Els tractaments preliminars solen ésser tractaments senzills de condicionament que solen consistir en l'eliminació de sòlids o escumes de separació fàcil. Tenen dues funcions primordials: reduir el dimensionament dels tractaments posteriors i per tant el cost, i evitar possibles avaries en les instal·lacions de tractament.

*Desbast.* És el primer de tots. Separa de l'aigua les partícules sòlides de mida més gran (papers, pedres, fulles, plàstics,...). Se sol fer mitjançant reixes de retenció de sòlids, tamisos o filtres. Es procuren emprar tamisos o reixes que siguin autonetejables, ja que aixó disminueix el seu manteniment.

1. Entrada d'aigua bruta
2. Difusors d'aire
3. Efluent
4. Sistema rascador de flotants
5. Evacuació de flotants

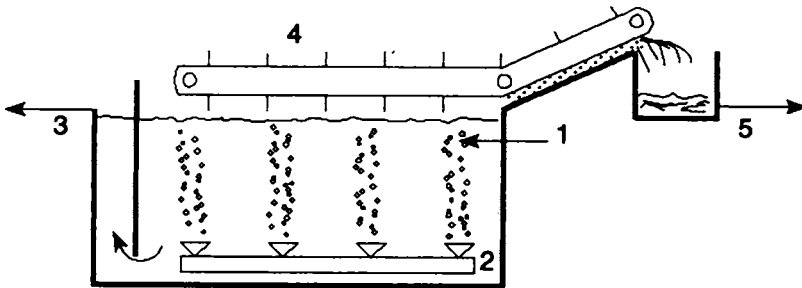


FIGURA 15. Desgreixador

*Desarenat.* Separa la sorra de l'aigua. S'aconsegueix amb tancs de repòs que permetin la simple sedimentació. De fet el seu disseny és similar al d'un decantador però tenint en compte que la partícula de sorra és fàcilment decantable.

*Separació d'oli.* La separació d'oli es realitza per flotació i sobreiximent. Si bé és una operació freqüent en indústries metal·lúrgiques, en indústries alimentàries només s'aplica en aquelles en què específicament el seu producte és oleaginos.

*Homogeneïtzació.* S'aplica per a uniformitzar els cabals i les càrregues contaminants dels diferents efluent de la indústria, per tal de garantir la mínima variació en el cabal i les característiques de les aportacions als tractaments posteriors. Amb això evitem l'impacte de descàrregues puntuals que poden afectar el procés posterior. Per a garantir una bona uniformitat de l'efluent, cal que el tanc d'homogeneïtzació sigui prou gran per a absorbir les variacions diàries i a més que estigui proveït d'un sistema d'agitació a fi d'evitar la possible sedimentació de sòlids i facilitar la barreja.

Altres pretractaments poden ésser una simple correcció de pH mitjançant una neutralització; o en alguns casos s'aconsegueix un cert grau de neutralització barrejant efluent de pH oposat.

### 3.3. Tractaments primaris o fisico-químics

El tractament fisico-químic en moltes indústries es converteix en el tractament final abans de l'abocament. No és així en canvi en les indústries alimentàries en general, en què es converteix en un tractament previ abans del secundari o biològic, el qual es dedicarà a eliminar la càrrega orgànica contaminant.

Les finalitats del tractament fisico-químic són:

- eliminar metalls o sals tòxiques (això no és gaire freqüent a l'indústria alimentària)
- eliminació d'olis en emulsió i de matèries en suspensió
- clarificació de l'aigua precipitant matèries col·loïdals
- certa reducció de la DBO i la DQO (encara que la veritable reducció serà en el tractament secundari).

Els tractaments solen consistir en precipitacions ja sia per sedimentació natural o processos de floculació amb posterior decantació, tal com ja s'ha explicat a l'apartat 2.2. Els equips emprats són molt variats, i el seu disseny

depèn de les característiques de les partícules o flocs a decantar, els quals depenen al mateix temps del tipus de contaminació de l'aigua i per tant de la indústria; i també de la relació entre el cabal a tractar i l'espai disponible per al tractament.

Els olis i greixos, en canvi, se separen per flotació si es disposa del suficient espai per a permetre un temps de residència de l'efluent suficient dins el tanc de flotació per a la seva separació espontània. Quan això no és possible o bé l'emulsió és bastant estable es recorre a l'aero-flotació. Aquesta consisteix a injectar aire a pressió pel fons del tanc de flotació de manera que l'agitació i la massa de petites bombolles que ascendeix arrossega fins a la superfície els greixos.

Els tractaments de precipitació físico-químics, en separar els productes sòlids de l'aigua, generen unes grans quantitats de fangs o llots, que no són més que la combinació de reactius-sòlids extrets a l'aigua i que contenen gran quantitat d'aigua. L'eliminació d'aquests llots juntament amb els llots que es produeixen en els tractaments secundaris de les plantes depuradores és un dels problemes greus amb què es troben les indústries alimentàries. Aquest problema és tant important, que en tota depuradora es parla de la línia de tractament de fangs de manera paral·lela al tractament principal. La importància del tractament de fangs i residus finals fa que es dediqui un apartat independent a aquest punt (apartat 3.6).

### **3.4. Tractaments biològics o secundaris**

En els tractaments biològics o secundaris, els bacteris i altres microorganismes destrueixen i metabolitzen les matèries orgàniques solubles o col·loïdals no retengudes en el tractament primari convertint-les en formes més estables. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir la DBO i DQO a valors inferiors a 100 mg/l. Cal tenir en compte que les aigües residuals domèstiques tenen una DBO de l'ordre de 200 a 500 mg/l. En canvi les aigües residuals d'una indústria alimentària poden arribar a tenir una DBO de l'ordre de  $10^5$  o fins  $10^6$  mg/l (vegeu els exemples a l'apartat 3.7).

Els tractaments biològics es divideixen en dos tipus: aeròbics i anaeròbics. Els tractaments aeròbics són la manera més comuna de tractar les aigües residuals amb càrrega contaminant orgànica, encara que els anaeròbics cada dia esdevenen més importants especialment en els casos de cabals i càrregues contaminants grans.

### *Tractaments aeròbics*

Els tractaments aeròbics consisteixen en l'assimilació de la matèria orgànica pels microorganismes, en presència d'oxigen i nutrients. Es basen en la degradació de la matèria orgànica, en un lloc concret i delimitat, mitjançant l'oxidació biològica de la mateixa manera que es dona en els cicles naturals, però d'una forma controlada, concentrada i en alguns casos accelerada, emprant fins i tot mètodes artificials per a aportar l'oxigen necessari per a l'oxidació.

Els tractaments aeròbics, es divideixen principalment en tres grans grups: llots actius, filtres percoladors i estanys d'estabilització.

A) *Llots o fangs actius*. Consisteix a provocar el desenvolupament d'un cultiu microbià dispers en forma de flocs o llots actius, dins un tanc degudament airejat. A aquest tanc, s'hi aporta l'aigua procedent del tractament primari (si aquest existeix) d'una forma contínua. En el tanc es produeix l'estabilització biològica de la matèria orgànica present gràcies a l'acció dels microorganismes en condicions aeròbies. L'aeració forçada per a garantir la presència suficient d'oxigen s'aconsegueix mitjançant unes turbines flotants que agiten tot el tanc, i en el cas de grans instal·lacions es recorre a la injecció d'aire a través de difusors. L'agitació garanteix el manteniment de la suspensió.

L'efluent del tanc d'aeració passa a un decantador anomenat secundari per a diferenciar-lo dels decantadors primaris dels tractaments físico-químics. En aquests els flocs o fangs actius se sedimenten i s'obté un sobreendament clarificat que sol estar entre 10 i 50 mg/l de DBO.

El dimensionament del tanc d'aeració i el decantador posterior permeten un temps de permanència mínim que garanteixi l'oxidació de la matèria orgànica i la decantació.

Una part dels fangs extrets del decantador es recirculen al tanc d'aeració per tal de garantir una concentració de microorganismes que garanteixi el ritme de l'activitat biològica. L'excés de fangs s'adreça vers el tractament de fangs abans esmentat (vegeu l'apartat 3.6).

Hi ha molts dissenys i variants en els sistemes de depuració per fangs actius, encara que tots es basen en els principis esmentats (vegeu exemples a l'apartat 3.7).

B) *Filtres biològics o percoladors*. Solen ésser uns tancs cilíndrics amb un reblliment de material extremadament porós. El tanc disposa d'un sistema de drenatge inferior. Per la part superior s'aporta el fluid a depurar mitjançant braços rotatius d'aspersió o bé difusors. El líquid percola a través del

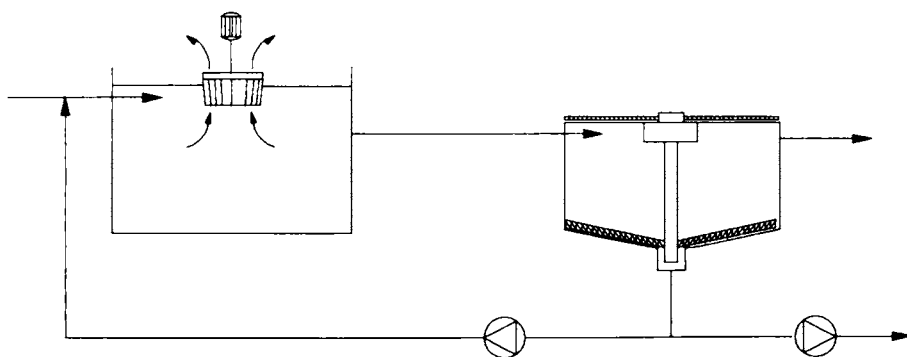
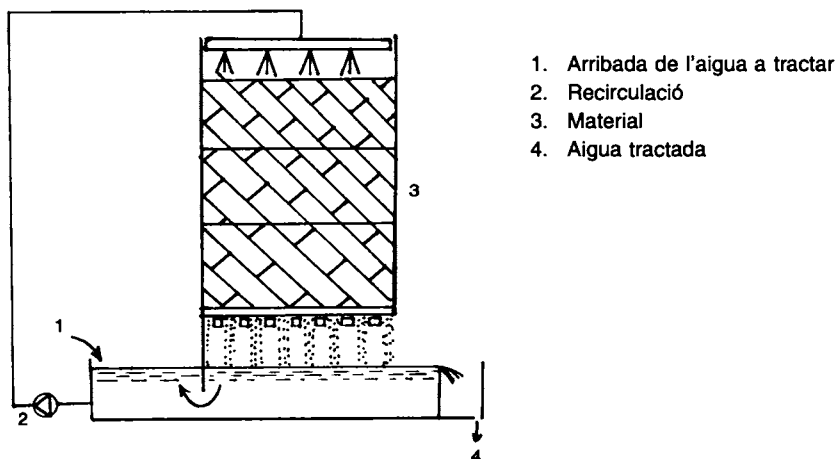


FIGURA 16. Reactor biològic de fangs actius: decantació secundària amb recirculació de fangs

material porós el qual desenvolupa sobre la seva superfície un llot de material biològicament actiu. La gran àrea de contacte d'aquest llit permet un contacte íntim entre l'aire, el líquid i el creixement de microorganismes actius, i facilita d'aquesta manera la biodegradabilitat de la matèria orgànica. La porositat del medi (aproximadament del 90%) elimina la possibilitat d'obturació del filtre. L'operació d'aquestes unitats és molt senzilla i tan sols cal garantir que el cabal d'alimentació es mantingui sempre entre un màxim i un mínim.



1. Arribada de l'aigua a tractar
2. Recirculació
3. Material
4. Aigua tractada

FIGURA 17. Llit bacterià amb recirculació

C) *Estany d'estabilització*. Aquest sistema consisteix en l'abocament de l'aigua residual en un gran estany on el temps de permanència mitjà és molt alt. D'aquesta manera les variacions de càrregues contaminants que s'hi aporten no afecten sensiblement l'equilibri de l'estany. Cal una extensió de terreny molt amplia, però no cal fer inversions en equips cars.

L'aeració pot ésser natural, cosa que significa un temps de permanència altíssim (entre 10 i 60 dies) i l'eliminació de la DBO assoleix nivells del 50 al 80%, i a més necessita extensions de terreny molt grans. La poca aeració, especialment en capes no superficials, provoca processos tant aeròbics com anaeròbics. Aquests darrers poden ésser font de males olors, i això, juntament amb la necessitat d'espai, en limita l'aplicació a emplaçaments aïllats.

Si l'aeració és artificial i es garanteix certa agitació, el temps de permanència es redueix a 1 o 3 dies. En aquest cas ens trobem amb el mateix principi de funcionament que el de fangs actius amb la diferència d'una dilució molt més elevada.

La combinació d'accions aeròbies i anaeròbies produeix la degeneració biològica, i els llots es van sedimentant i en part són absorbits pel mateix terreny.

### *Tractaments anaeròbics*

La digestió anaeròbia és una solució de tractament biològic de les aigües residuals que se sol aplicar quan la càrrega orgànica contaminant és molt alta (cosa freqüent en la indústria alimentària).

Els avantatges de la digestió anaeròbia són la producció de metà, el qual es pot cremar per a produir energia, i que no necessita l'aportació d'oxigen i produeix pocs fangs. Per contra, els inconvenients més importants són: que el rendiment de l'eliminació de la matèria orgànica és inferior als mètodes aeròbics, que cal treballar a certa temperatura (aprox. 30 °C) i que la inversió inicial és elevada.

El reactor anaeròbic sol ésser un tanc cilíndric tancat per tal d'evitar el contacte amb l'aire. Dins, la matèria orgànica dissolta i col·loïdal, es transforma en àcids volàtils, els quals es transformen en metà i CO<sub>2</sub> mitjançant l'acció de bacteris que produeixen les fermentacions àcides i metàniques en condicions anaeròbies.

El gas generat conté aproximadament un 65% de metà, que permet de mantenir la temperatura d'operació, i a vegades fins i tot hi ha un excedent energètic.

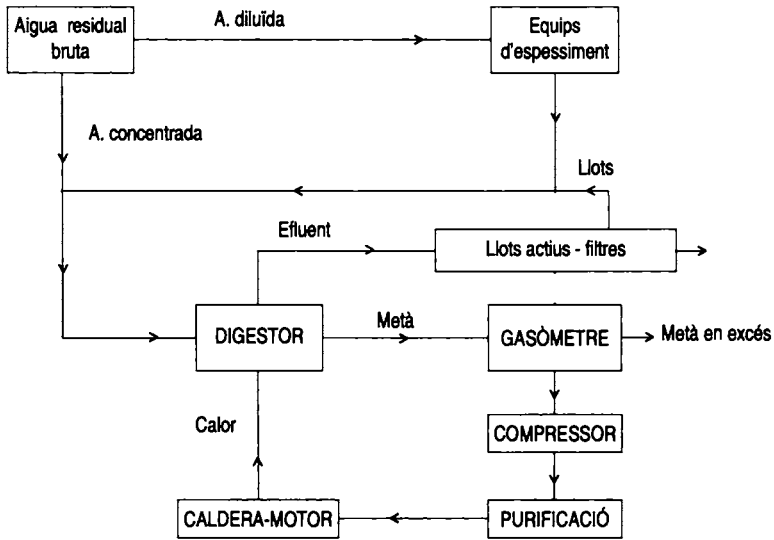


FIGURA 18. Diagrama de flux de digestió anaeròbia per generació d'energia [22]

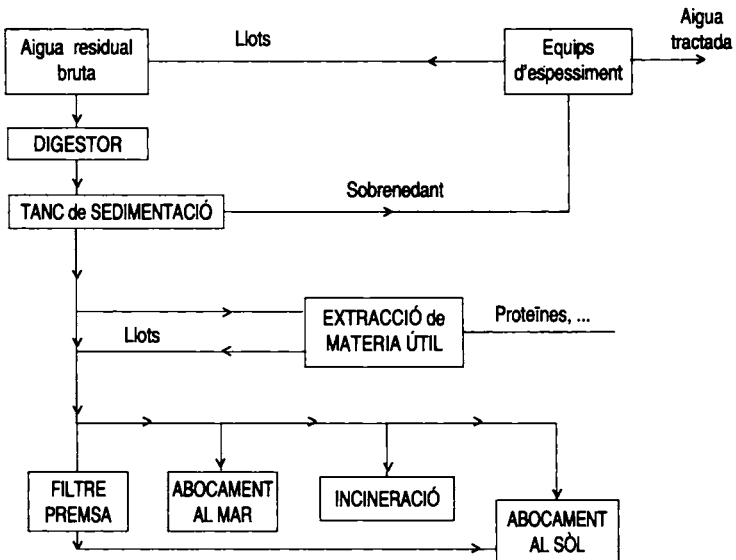


FIGURA 19. Diagrama de flux de digestió anaeròbia per la reducció de llots [22]

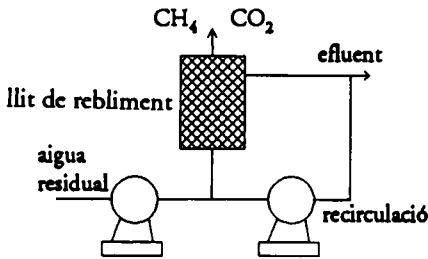


Per a dur a terme la digestió anaeròbia s'empren diverses solucions:

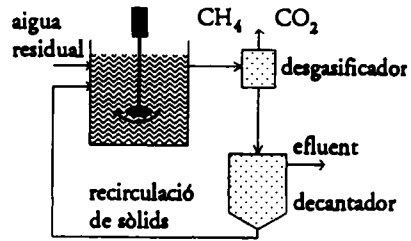
- per contacte, on al reactor no li cal més que un sistema d'agitació, però el temps de residència és més alt
- per filtre anaeròbic, on el reactor conté un rebliment sobre la superfície del qual s'adhereix la biomassa
- sistema UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), que no conté material de suport dels microorganismes, sinó que és la pròpia biomassa que produeix uns flocs prou grans que fan d'autosuport
- per llit fluïditzat, on s'aconsegueixen en algunes aplicacions uns rendiments molt alts

A l'apartat 3.7 s'hi poden trobar exemples d'aplicació.

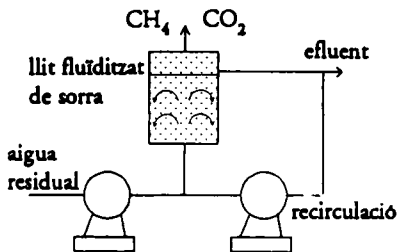
### FILTRE BIOLÒGIC



### REACTOR DE CONTACTE



### LLIT FLUÏDITZAT



### UASB

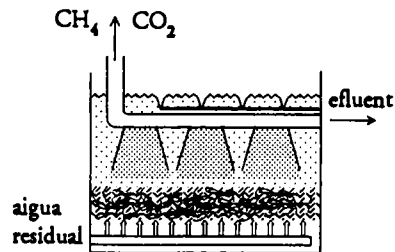


FIGURA 20. Variants de digestors anaeròbics [7]. El procés de contacte és el més versàtil però també necessita temps de residència hidràulica més alts. Les altres variants permeten de reduir el volum de reactor necessari per unitat de càrrega.

### 3.5. Tractaments terciaris

Els tractaments terciaris s'apliquen quan les aigües residuals necessiten una depuració més gran que la que s'ha pogut obtenir amb els tractaments primari o secundari. Això pot ésser degut al fet que els tractaments primari i secundari són del tot insuficients, o que les exigències de l'Administració de les condicions a complir en el punt d'abocament són molt elevades, o bé que aquesta aigua es pensa reutilitzar en alguna part concreta del procés.

Entre els tractaments terciaris més emprats, podem seleccionar els següents com a més utilitzats a la indústria alimentària: filtració, adsorció amb carbó actiu, oxidació amb ozó i cloració.

*Filtració.* S'empra per a separar els sòlids que poden haver estat arrossegats a la sortida del decantador secundari. Els filtres per a tractament terciari tenen el mateix principi de funcionament que els de tractament per a aigua d'abastament (vegeu l'apartat 2.2). Com a medi de filtració es pot emprar sorra, grava o antracita, o una combinació d'aquests. Cal tenir en compte que els flocs a filtrar en un tractament terciari són d'una mida més grossa i per tant cal posar cura en la correcta disposició de l'estratificació del medi filtrant amb granulometria creixent, per tal d'evitar el col·lapse prematur del filtre.

*Adsorció amb carbó actiu.* El carbó actiu es disposa en forma de filtre. La seva granulometria és extremadament fina per a aconseguir grans superfícies de contacte entre el carbó i l'aigua. El carbó actiu s'encarrega d'eliminar la resta de matèria orgànica que ha passat el tractament biològic.

El filtratge amb carbó actiu és un tractament d'afinament, per això no pot alimentar-se amb grans càrregues orgàniques, ja que l'esgotarien en molt poc temps, i la seva regeneració és costosa. Tractant-se d'un sistema car, només s'aplica si és estrictament necessari. En unes aigües residuals, no és fàcil justificar el seu ús, però, en canvi, en aigües d'abastament per a incorporació a productes alimentaris (begudes i líquids de govern especialment), on l'exigència és màxima, s'empra per a tenir unes elevades garanties de disposar d'aigua d'alta qualitat.

*Oxidació per ozó.* Es tracta també d'un tractament d'afinament per a eliminar determinats compostos orgànics residuals (generalment compostos alifàtics insaturats i aromàtics). El principi de funcionament és exactament el mateix que el de la desinfecció de les aigües d'abastament (apartat 2.2). L'aparell per a generar aire ozonitzat (aire amb una concentració d'ozó de 10 a 20 g/m<sup>3</sup>), s'anomena ozonitzador. Per a aconseguir una oxidació completa, no és suficient la injecció mitjançant difusors de l'aire ozonitzat, car les bombolles així

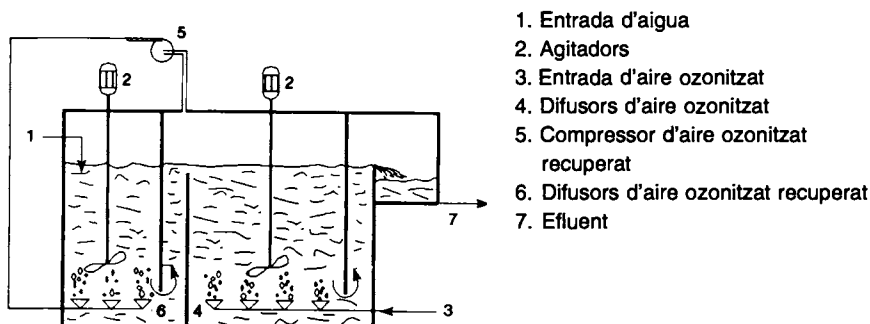


FIGURA 21. Contacte en sèrie amb recirculació de l'aire ozonitzat residual [3]

produïdes no poden crear una turbulència suficient per a disgregar les matèries aglomerades. Per a solucionar-ho, s'empren turbines d'agitació.

És freqüent complementar-ho amb llum ultraviolada. La combinació ozò/UV és força efectiva, per exemple per a eliminar residus de pesticides.

**Cloració.** El gran poder oxidant sobre la matèria orgànica del clor fa que també s'apliqui com a tractament terciari abans d'un abocament. El tractament es fa per simple addició de clor o hipoclorit sòdic segons les pautes esmentades a l'apartat 2.2.

### 3.6. Tractaments de fangs i eliminació de residus

Tal com s'ha esmentat anteriorment, l'eliminació dels fangs o llots com a conseqüència dels tractaments primaris i secundaris és cada dia un problema més greu. No ens podem conformar en haver separat la càrrega contaminant de l'aigua residual, sinó que els subproductes d'aquests tractaments, s'han de tractar i eliminar adequadament. Això crea una "línia de tractament de fangs" de forma paral·lela al tractament principal, que necessita també equips i tècniques pròpies per al seu tractament.

Els fangs o llots procedents dels tractaments primaris de les indústries alimentàries solen contenir greixos, carbohidrats, proteïnes i qualsevol resta infiltrada al drenatge de la fàbrica, i poden arribar a concentracions d'un 5% de sòlids, mentre que els secundaris són de tota mena de matèria orgànica i amb prou feina superen l'1% de concentració de sòlids. Encara que el seu aspecte sia força dens, és evident que per al tractament d'aquests fangs cal sotmetre'ls a processos de dessecació.

El tractament típic de fangs es divideix en espessiment, deshidratació, estabilització i destí final.

L'espessiment té per finalitat l'eliminació de l'aigua menys lligada mitjançant una decantació. Els decantadors emprats pels fangs s'anomenen espessidors. El principi de funcionament dels espessidors és el mateix que el d'una decantació primària o secundària, només cal tenir present que en aquest cas el fluid és força més dens i concentrat en sòlids cosa que repercuteix en el disseny i la forma d'operació. A la sortida d'un espessiment, els fangs assolixen concentracions entre el 8% i el 10%.

La deshidratació consisteix en la separació addicional d'aigua mitjançant mètodes mecànics. Els més freqüents són la centrifugació, el filtre de banda i els filtres premsa.

La deposició en grans extensions per a l'assecatge natural, cada dia cau més en desús per la dificultat que hi ha de disposar dels espais necessaris i el poc rendiment obtingut.

La centrifugació té els inconvenients del seu elevat cost en energia elèctrica i que és operació discontinua i per tant de difícil automatització, i per això cada vegada s'usa menys.

En els filtres de banda, els fangs circulen entre dues bandes transportadores i són sotmesos a compressió mecànica, tal com s'observa a l'esquema. Amb aquest sistema es pot aconseguir una concentració en sòlids d'un 25%.

Per a aconseguir concentracions superiors cal recórrer a filtres premsa. Amb un condicionament previ dels fangs amb calç i clorur fèrric es poden arribar a assolir concentracions de l'ordre del 50%. El filtre premsa funciona

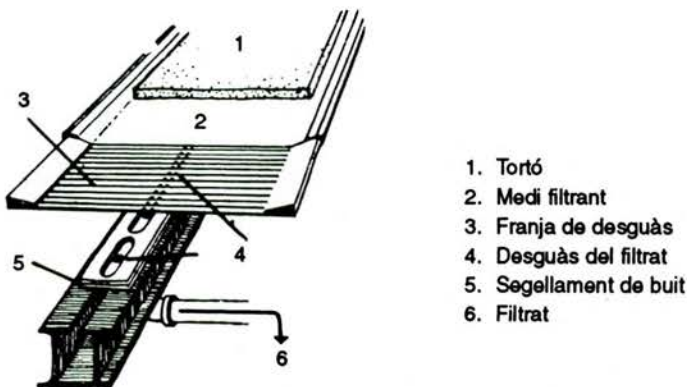
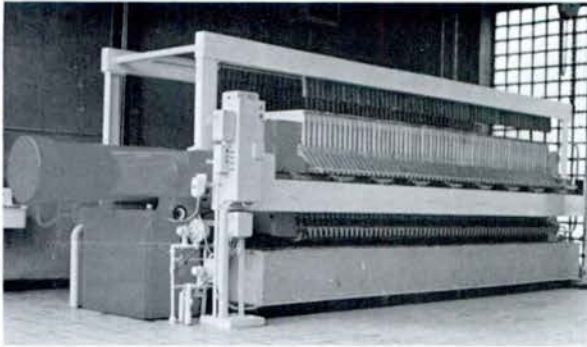
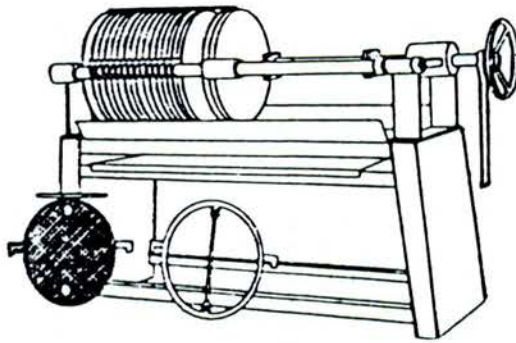


FIGURA 22. Detall de la secció d'un filtre continu de banda al buit (Straight Line Filters, Inc.)



Filtre premsa de plaques i marcs (Hoesch)



Filtre premsa de plaques circulars metàl·liques (Star Tank and Filter Corp.)

FIGURA 23. Filtres premsa

per compressió dels fangs entre dues plaques sotmeses a elevada pressió mitjançant sistemes oleohidràulics. Té l'inconvenient de l'operació discontinua, però la concentració final dels fangs en matèria seca és molt alta.

*L'estabilització* de fangs s'aplica quan cal eliminar la possible activitat química remanent als fangs. L'estabilització es pot fer mitjançant processos químics com l'addició de calç i clorur fèrric que formen un conjunt inertitzat, o en el cas de fangs fortament orgànics, s'aplica la digestió anaeròbia tal i com s'ha exposat a l'apartat 3.4.

Totes les aigües extretes de les diferents deshidratacions i espessiments es reciclen i retornen a la capçalera de la instal·lació depuradora.

*El destí final* dels residus sòlids inertitzats resultants, acostuma a ésser

l'abocament en un abocador públic per a residus domèstics, o bé, en el cas de fangs de dubtosa inertització en abocadors especials de residus industrials controlats.

L'alternativa de la incineració no es troba gaire desenvolupada en el nostre país. La incineració tan sols produeix cendres com a subproducte, però, quan a l'emissió de gasos a l'atmosfera, actualment està fortament qüestionada per les organitzacions ecologistes. A part que no sempre els residus són aptes per a la seva incineració eficient, aquest procés és molt car quant a inversió i quant a explotació. Si a més el residu té un poder calorífic baix i la quantitat generada no és important, el cost és totalment prohibitiu. És evident que la solució de la incineració ha d'ésser de tipus global per a un conjunt de la societat coordinat per l'Administració pública, però aquesta topa actualment amb molts problemes tècnics, econòmics, polítics i també ecològics per a la implantació d'incineradores.

### 3.7. Exemples d'aplicacions en indústries alimentàries

#### *Introducció*

A les indústries alimentàries, el procés de producció acostuma a tenir tres fases.

En primer lloc la neteja de les matèries primeres i l'eliminació de la part no comestible. Ambdues generen les aigües de neteja i les aigües de transport.

En segon lloc la preparació del producte que origina les aigües de procés, escaldat, cocció, refrigeració, generació de vapor, condensació, etc.

Finalment hi ha les aigües de neteja de la maquinària, de les instal·lacions i dels locals.

Les característiques de totes aquestes aigües són extremadament variables. Es pot trobar una DBO des de 100 mg/l fins a 100.000 mg/l. Poden trobar-se sòlids en suspensió en concentracions de 120.000 mg/l o pot no haver-n'hi gens. El pH pot oscil·lar entre 3,5 i 11. Les substàncies minerals poden trobar-se en quantitats molt variables i fins i tot els volums que s'aboquen poden oscil·lar entre gairebé res i milers de metres cúbics per dia.

Les característiques més comunes de les aigües residuals de la indústria alimentària són una contaminació essencialment orgànica i biodegradable,

una tendència general a l'acidificació i una ràpida fermentació. Sovint, és interessant que aquestes aigües se sotmetin a un pretractament. Els tractaments més importants són biològics, però sovint el medi no disposa de nitrogen i fósfor suficient; és necessari efectuar alguns ajustos per tal de proporcionar les condicions ambientals correctes per als microorganismes dels quals depèn el tractament biològic; és a dir: alimentació contínua, control de temperatura, ajust del pH, barreja, substàncies nutritives suplementàries i adaptació de la població microbioana.

En qualsevol cas, el tipus de tractament emprat depèn de:

- els resultats o aplicacions que es volen aconseguir
- la naturalesa de les aigües
- les variacions de cabals d'abocaments
- el cost de la instal·lació de tractament
- el cost de funcionament.

Així, doncs, el volum i les característiques de les aigües residuals varien considerablement d'una fàbrica a una altra i fins i tot dins una mateixa fàbrica d'un dia a l'altre.

### *Indústria conservera*

La indústria conservera inclou tant els aliments en llauna com els aliments congelats. Aquests tipus d'indústries utilitzen una gran quantitat d'aigua. Es tracta d'una indústria molt diversificada, ja que les matèries primeres poden ésser molt diferents. Les aigües residuals contenen elevades quantitats de matèria orgànica.

En cultius hortícoles (pèsol, pastanaga, mongeta tendra, faves, espinacs, patates, espàrrecs,...), l'origen dels abocaments són les aigües de rentat, sòlids de la classificació i vessadures de les màquines omplidores .

En les fruites (préssec, tomàquet, cireres, pomes, peres, raïm,...), l'origen dels efluents pot ésser de l'escaldat del pelat amb sosa, del rentat per aspersió, de la classificació, del trossejat, dels ompliments de llaunes, de l'eliminació de condensats, de la refrigeració de les llaunes i de la neteja de les instal·lacions. Altres devessalls procedeixen d'operacions específiques que no són necessàriament comunes a totes les fruites.

D'altra banda, els cítrics (taronja, llimona, aranja i mandarina) s'elaboren normalment en una mateixa fàbrica per a fer-ne suc o suc concentrat, olis essencials, farines dessecades i d'altres sucedanis. Aquestes aigües residuals dels cítrics són aigües amb pectines, líquids de les premses amb polpa,

aigües de refrigeració, bafs condensats i aigües de rentat que tenen restes d'escorça, llavors i fruita dolenta. Aquests residus, formen una massa gelatinosa i relliscosa no uniforme i amb un contingut d'humitat del 83 % aproximadament.

En general, les indústries conserveres treballen per temporades. Això fa que els tractaments d'aquests residus presentin problemes específics, especialment a l'hora de treballar en continu.

En general, els abocaments de les fàbriques conserveres poden tractar-se de manera força eficient passant-los per reixes o garbells de desbastament, precipitació química posterior i finalment estanys d'estabilització. Les aigües resultants solen ésser aptes per a regs amb aspersió. També s'utilitzen, però, i cada dia amb més freqüència, la filtració biològica i la digestió anaeròbia.

El desbastament inicial és un tractament preliminar que permet eliminar gran quantitat de partícules sòlides i facilita els tractaments posteriors. Tot i així, la DBO es redueix molt poc.

S'utilitzen garbells mecànics amb una mida de malla entre 1,6 i 0,6 mm de tipus rotatori o vibratori. Les càrregues típiques en el garbellat són de 4,8 a 6,0 kg/m<sup>3</sup> de residus. Les reixes vibratòries produeixen sòlids amb un contingut d'humitat entre el 70 % i el 95 % segons el producte.

TAULA 3. Informació general sobre aigües residuals de plantes de conserves vegetals [6]

		DBO (mg/l)
Pèsols	Aigües de rentatge	3.700
	Vessadures del blanqueig	13.800
	Fons dipòsits blanqueig	34.500
	Líquid de la sitja	35.000 - 78.000
Cítrics	Rentatge de la fruita	20 - 110
	Pelat	30.000
	Tallat	2.500
	Aigües rentatge terres	4.000
	Goteigs tremuges de pells	50.000

Els sòlids que queden entre les reixes es poden eliminar de diferents maneres, però el més interessant és fer-ho de forma automatitzada. Es freqüent la dessecació com a complement per a l'alimentació del bestiar.



La precipitació química utilitzada conjuntament amb d'altres mètodes de tractament s'utilitza bàsicament per a ajustar el pH i reduir la concentració de sòlids a les aigües. Amb l'ús de sals ferriques o bé d'alumini i calci, s'aconsegueixen reduccions en la DBO de 40 a 56 %. La precipitació química produeix aproximadament del 10 al 15 % de fangs en volum.

Els tractaments amb estanys d'estabilització impliquen una acció biològica, sedimentació, absorció per part del terreny, evaporació i dilució. Divereses fonts indiquen que aquest és el tractament més pràctic i econòmic dels abocaments de les indústries conserveres, sempre que es disposi del terreny adequat.

Si en l'estany no es mantenen les condicions prou aeròbies, es desprenen olors desagradables, a més de la presència de mosquits i altres insectes. Per tal d'eliminar l'olor, s'utilitza nitrat sòdic. Tot i així, la utilització de nitrat sòdic en els estanys d'estabilització per un tractament complet pot no resultar econòmica pel gran volum de llots produït. A vegades hi ha efluent molt forts com per exemple els procedents dels pèsols, en què les olors desagradables poden persistir fins i tot després del tractament amb  $\text{NO}_3\text{Na}$ . A vegades s'utilitza el reg per aspersió per tal de combatre la presència de mosquits i d'altres insectes. Cal tenir molt en compte les infiltracions, especialment si l'estany es troba prop de fonts subterrànies d'aigua potable.

Un dels possibles usos d'aquestes aigües pot ésser el reg. És un mètode econòmic sense grans inconvenients, que es pot utilitzar sempre que el residu de la fàbrica no sigui patògen ni tòxic per a les plantes. Això, evidentment, estarà limitat per la capacitat de la zona per a absorbir aquesta aigua. Es pot reduir molt la DBO en filtrar-se el residu per la vegetació i el terra. Per exemple, les pastures es poden sotmetre a una càrrega orgànica més forta que l'alfals.

El tractament biològic també pot fer-se per oxidació aeròbia amb filtres biològics o fangs actius. En els casos en què el procés es veu limitat per les condicions de temporada, és molt difícil justificar la inversió de capital necessària per als equips. Tot i així, en molts casos les aigües residuals de les indústries conserveres es poden barrejar amb les aigües residuals urbanes d'una població prou important de manera que el tractament es converteixi en una solució pràctica i econòmica pel factor d'escala.

Els filtres bacterians d'alta càrrega redueixen la DBO de les aigües residuals de pèsols, mongetes tendres i tomàquets fins a un 97%. També s'han tractat amb èxit els residus de sidra, cirera i cítrics. El tractament de fangs actius s'utilitza també per a obtenir un efluent transparent i sense olor dels residus dels cítrics amb una reducció de la DBO que volta el 90 %. S'han

tractat en plantes convencionals de fangs actius els residus de fàbriques de conserves de pèsols i pastanagues, amb una reducció de la DBO del 91 al 95 % essent la DBO en l'aigua residual sense tractar d'uns 1500 mg/l.

### *Feculeries i indústries de la patata*

Els residus d'aquestes indústries tenen un caràcter molt fermentescible, ja que es troben carregats de midó i proteïnes. Tenen una importància cada dia més gran, per l'increment de les patates fregides i els purés deshidratats.

Es troben bàsicament aigües de dos tipus: les de neteja i transport (on es troben terres, residus vegetals, fragments de tubèrculs...) i, d'altra banda, les aigües procedents de les peladores, és a dir, amb pell i polpa. Les quantitats de la polpa residual poden ésser suficients per preveure'n la recuperació per a l'alimentació d'animals.

Aquesta recuperació es pot fer mitjançant una simple recuperació estàtica. La polpa, quan se separa, se centrifuga i deshidrata. El sobrenedant del decantador es pot tractar conjuntament amb les aigües de rentatge amb fangs actius per exemple. Tot i això, les condicions d'emmagatzematge, i la naturalesa dels productes estabilitzants o antioxidants utilitzats en el procés, poden minvar la sedimentabilitat dels fangs actius.

Les fàbriques de transformació de la patata han estat les pioneres en l'aplicació de tractaments anaerobis a les seves aigües residuals. La composició d'aquests efluent varia molt en funció del producte final de cada fàbrica i tenen característiques tan particulars que el desenvolupament d'aquestes tecnologies es basa principalment en la pràctica, fent especial atenció al disseny i al control del procés. El més important és evitar el creixement del midó en suspensió. Actualment el sistema UASB permet eliminar fins al 90% dels components orgànics d'aquests efluent. Les aigües de neteja són equivalents a 0,1 m<sup>3</sup>/t de patata processada; mentre que les del procés són de l'ordre d'1,9 - 2,3 m<sup>3</sup>/t de patata processada o 3,5 - 4,5 m<sup>3</sup>/t de producte final [17]

A les fàbriques, la concentració és molt més forta, per les considerables aportacions dels condensats del evaporadors i les aigües de neteja dels midons. Normalment, s'aplica un tractament biològic aerobi.

### *Indústria làctia*

S'inclouen aquí les indústries que produeixen llet, formatges, mantega, gelats, postres, llet condensada, iogurt i llet en pols.

Les principals operacions que produeixen aigües residuals són les aigües de neteja dels dipòsits, tancs, equips i terres. Per tant, aquestes aigües estan constituïdes per diferents dilucions de llet crua, llet tractada, mantega i sèrum, procedents de les vessadures obligades o accidentals en els diferents punts del procés. A més, les restes de netejes contenen productes químics o bé residus parcialment caramel·litzats de dipòsits, tancs, bombes, conduccions, evaporadors, pasteuritzadors,...

En general, les aigües residuals de les lleteries són neutres o parcialment alcalines, però tot i així tenen tendència a tornar-se àcides molt ràpidament per la fermentació del sucre de la llet, que es transforma en àcid làctic. La lactosa de les aigües residuals pot passar a àcid quan l'aigua es trobi en condicions anaeròbies i el baix pH resultant pot provocar la precipitació de la caseïna.

Les formatgeries produeixen un sèrum ric en lactosa però pobre en proteïnes. Les mantegueries, un sèrum ric en lactosa i proteïnes però pobre en matèria grassa. La contaminació corresponent al sèrum és molt forta. A la pràctica, aquests subproductes sovint es recuperen (per exemple, per a l'alimentació del bestiar), i sols es depuren industrialment, fins ara, les aigües de rentatge.

Aquestes aigües residuals tenen en general un contingut alt de matèria orgànica dissolta, uns 1000 mg/l de DBO i són gairebé neutres. Com que aquestes aigües es componen principalment de matèries orgàniques, tendeixen a fermentar si queden retingudes en condicions anaeròbies i produeixen una forta i desagradable olor. Per tant, són aigües que responen molt bé al tractament per mètodes biològics. Els processos anaerobis són els més convenients; tot i així, la selecció final del mètode de tractament depèn molt de la localització i la mida de la planta. És per això que els sistemes emprats, en general, seran biològics, tant aeròbics com anaeròbics.

Com que hi ha una gran variació de concentració i matèries contaminants en els residus, és convenient preveure un període d'igualació i retenció per tal d'uniformitzar les aigües residuals abans del tractament i esmor-teir les puntes de pH.

*L'aeració* és molt interessant com a pretractament abans dels tractaments biològics pròpiament dits. La simple aeració durant un dia produeix normalment una reducció del 50 % de la DBO, i elimina també les males olors durant la conversió de la lactosa en àcid làctic. Es pot arribar a reduccions del 80 % de la DBO si les aigües s'airegen en presència d'algun material de sembra, tot preveient posteriorment un període de precipitació.

Els *filtres bacterians* amb recirculació a gran velocitat s'utilitzen normalment per a tractar aquests residus. També els *llots actius* han demostrat

que són un mètode útil per al tractament complet d'aquestes aigües residuals. Es produeix la concentració d'uns llots adaptats mitjançant una aeració. La flora present als llots actius quan tenen aire suficient, oxida els sòlids orgànics dissolts en les aigües residuals. Els llots en excés es precipiten i es retornen posteriorment a les unitats d'aeració. En general, si la planta es troba ben dimensionada i dona suficient quantitat d'aire per a tractar les aigües, els llots de retorn no acostumen a presentar dificultats i el control és molt senzill. Tot i així, el cost pot ésser més gran que el relacionat amb la filtració en llits bacterians.

Tant si el treball és en continu com si hi ha descàrregues brusques, s'han obtingut uns rendiments de la reducció de la DBO d'entre un 90 i un 97%.

Una concentració de llet o sèrum superior a l'1% o el 2% en les aigües residuals produeix ràpidament fermentacions aeròbies àcides difícilment controlables, que poden arribar a impedir totalment l'activitat biològica. A vegades, aquestes aigües també s'evacuen mitjançant el reg i l'aspersió. Segons la permeabilitat del sòl, cal limitar els cabals a 20-40 m<sup>3</sup> d'aigua per dia i hectàrea.

### *Indústries fermentatives*

S'inclouen aquí l'obtenció de cervesa a partir de l'ordi, la transformació del raïm en vi, l'obtenció d'alcohol a partir de melasses o fins i tot la utilització de llevat en la massa de pa.

En el cas de l'elaboració de la cervesa cal diferenciar dues etapes: el maltatge de l'ordi i la fermentació de la cervesa d'aquesta malta. El maltatge comprèn la neteja del gra, la maceració amb aigua fins a assolir un 45 % d'humitat, la germinació, l'asseccament fins a un 5 - 7 % d'humitat i el garbellament. Aquest procés produeix dues aigües residuals principals: les procedents del tanc on el gra es trobava en maceració amb aigua (són les aigües de premsatge del gra humit) i les procedents del tanc de germinació després d'eliminar la malta verda. També hi ha els líquids de recuperació dels llevats i s'utilitza molta aigua per al refredament i el rentat.

Les aigües residuals del maltatge tenen una mitjana de 72 mg/l de sòlids en suspensió i 400 mg/l de DBO. Són sòlids orgànics, principalment amb un alt contingut en nitrogen, que indica un considerable contingut proteínic. La porció més important de sòlids es troba en solució com així ho indica el baix contingut de sòlids en suspensió. L'any 1984, es tractà per primera vegada anaeròbicament amb el procés UASB (Upflow Anaerobic Sludge

Blanquet, és a dir, procés anaeròbic de llit de fangs de flux ascendent) l'efluent procedent d'una indústria cervesera. Avui, el disseny dels reactors ja es troba optimitzat i es disposa d'una experimentada tecnologia. Això fa que, en aquest moment, ja són moltes les fàbriques de cervesa que tracten les aigües residuals mitjançant el procés UASB [28]

En el cas de les destil·leries, les aigües residuals procedents de les vinasas tenen una elevada càrrega orgànica amb un marcat caràcter àcid i uns volums d'evacuació que superen anualment, a l'Estat espanyol, 1,5 milions de m<sup>3</sup> [27]

Aquestes aigües residuals contenen del 2 al 7 % de sòlids totals. Els residus de la fermentació del gra contenen al voltant del 3,3 % de sòlids totals, dels quals el 91 % són volàtils.

TAULA 4. Característiques mitjanes de les aigües residuals d'un procés de fermentació

DBO .....	4500 mg/l
pH .....	6-7
Sòlids totals .....	10000 mg/l
Sòlids precipitables .....	25 mg/l

La principal càrrega contaminant d'una destil·leria són les restes de la destil·lació en columnes. La quantitat més gran possible es recupera a la mateixa indústria com a subproducte destinat a l'alimentació animal o a la conversió de productes químics. Això fa que, mentre les aigües residuals sense aquesta recuperació tenen una DBO de 50.000, d'aquesta manera tinguin una DBO de 2.500 i unes aigües residuals de gran volum però dèbils.

Per a dur a terme una eliminació addicional de la DBO després de fer el procés de recuperació, aquesta aigua pot tractar-se en filtres bacterians o amb una digestió anaeròbia. També s'utilitza la centrifugació per a concentrar les restes de destil·lació.

Amb la filtració amb filtres bacterians, s'han aconseguit reduccions de la DBO d'un 60 a un 98 %; amb la digestió anaeròbia s'elimina d'un 60 a un 90 % de la DBO. Tot i així, la digestió anaeròbia presenta diversos avantatges enfront de tractaments aerobis convencionals: en primer lloc permet el tractament d'efluents amb elevada càrrega orgànica; en segon lloc, el balanç energètic del procés pot ésser favorable (si s'aprofita el biogàs generat) i a

més no necessita sistemes d'aeració; en tercer lloc el volum de llots és inferior (en destil·leries s'ha trobat una reducció del 20% al 25% respecte al procés aeròbic); i finalment no és necessària una suplementació amb nutrients.

TAULA 5. Rendiment en la depuració de les aigües residuals de producció de llevat premsat. Trubnic i Rudolf [6]

Procés de tractament	Reducció de la DBO en %
Tractament químic	10
Digestió anaeròbia	83
Llots actius	30
Filtres bacterians	72

La producció de llevats, tant si són per a la fermentació, com per a la venda directa per a la fabricació de pa, dona lloc a unes aigües residuals altament contaminants. Són aigües marrons, amb una olor típica i fortament higroscòpiques. Els sòlids es troben dissolts i en forma col·loïdal. Difícilment hi ha més de 200 mg/l de sòlids en suspensió.

### *Escorxadors*

El procés bàsic a què es fa referència és en aquest cas el sacrifici des que s'immobilitza l'animal i es deixa sagnar, la preparació de les carns (rentar i penjar a les cambres frigorífiques) i determinades elaboracions de productes secundaris com ara preparar les pells del bestiar boví i porcí, fer un adob amb sal, extreure les vísceres i juntament amb els ossos del cap i les potes enviar-ho a una planta de subproductes. Altres ossos s'envien també a fàbriques de coles.

Molts escorxadors també disposen de l'equip necessari per a transformar les despulles en sèu, greixos i fertilitzants orgànics, o bé converteixen les parts no comestibles de les aus, el peix i les despulles en general dels animals en greix i aliment per altres animals. Això s'aconsegueix mitjançant la cocció de les parts no comestibles a alta temperatura durant algunes hores. Es comprimeix la matèria cuita per tal que se'n desprenqui el greix i les peces premsades es trituren per a obtenir aliments de tipus secundari. Per tant, els residus dels escorxadors es produeixen a terra, on es fa el sacrifici, en esquar-terar i preparar les diferents peces, en fondre les parts no comestibles, al magatzem de pells i a la cambra frigorífica.

TAULA 6. Aigües residuals típiques produïdes als corrals

Característiques	Concentració (mg/l)
Sòlids totals en suspensió	173
Sòlids volàtils en suspensió	132
Nitrogen orgànic	11
Nitrogen amoniacal	8
DBO	64

Si s'analitzen aïlladament els següents cinc processos pel seu impacte en la càrrega de les aigües residuals es trobarà:

1) La recuperació de la sang és una situació típica del "tot o res"; és a dir, o es recupera totalment, o s'aboca tot al col·lector. La seva recuperació significa una reducció del 42% de la càrrega total de les aigües residuals d'un escorxadador.

2) Les tripes constitueixen una font de problemes de contaminació si es netegen en el procés, ja que la concentració total de sòlids és aleshores tan gran, com també la DBO i la DQO, que interfereix amb els mètodes de funcionament eficaços dels sistemes tradicionals de tractament de les aigües residuals.

3) El procés de fosa dels greixos comestibles també pot ésser força contaminant segons el mètode emprat. Si es fonen els greixos per la via humida, sense evaporació de l'aigua, el volum dels residus és el doble. Els mètodes més moderns de fosa de greixos, en sec i a baixa temperatura, redueixen els residus un 60 %.

4) La fosa de greixos i despulles no comestibles és un procés sec o humit. A la fosa per la via humida ha de seguir-la l'evaporació de l'aigua dels dipòsits a fi de reduir els volums dels residus a la meitat. La fosa de les despulles en sec i de forma contínua és el mètode més modern; tot i així, la contaminació d'aquest procés és important.

5) La neteja per aigua a alta pressió ha estat i continua essent el mètode que s'utilitza en la neteja de les instal·lacions dels escorxadors, indústries d'envasament i elaboració de productes càrnics. Hom pot reduir moltíssim els volums de contaminació per una neteja prèvia en sec abans de la neteja amb aigua. Això produeix també una recuperació més gran de les despulles i les restes per al seu aprofitament com a matèries no comestibles, en comptes d'anar a parar als col·lectors. Un altre efecte de la neteja en sec és la disminució del volum d'aigua emprada per a la neteja de les restes.

TAULA 6. Càrrega contaminant, per zones, d'un escorxadador de porcs (mg/l) [25]

Operacions	Sòlids		Nitrogen		DBO	pH
	Totals	Suspensió	Orgànic	NH <sub>3</sub>		
Sala de matança	1840	220	134	6	825	6,6
Sang i aigua	44640	3690	5400	205	32000	9,0
Cuba d'escaldament	13560	8360	1290	40	4600	9,0
Eliminació de cerres	1540	560	158	10	650	6,7
Processament de cerres	4680	80	586	30	3400	-
Neteja de cerres	7680	6780	822	18	2200	6,9
Sala d'especejament	2840	610	33	2,5	520	7,4
Triperia	22600	15120	643	43	13200	6,0
Sala de processament de la carn	26480	1800	83	12	2040	7,3
Adobament de la carn	34100	1720	255	25	460	6,7
Neteja	9560	920	109	17,5	1960	7,3
Adob	140000	—	2750	37	18000	5,6
Embotit	11380	560	136	4	800	7,3
Llards	820	180	84	25	180	7,3
Subproductes	4000	1380	186	50	2200	6,7
Neteja	18260	4120	56	5	1300	9,6

Les operacions i procediments dels escorxadors se centren a la zona on es realitza el sacrifici dels animals. Les deixalles que es produeixen en aquest lloc tenen un color vermell fosc, una DBO alta, i contenen quantitats considerables de matèries en suspensió. La sang, com que té molt nitrogen, es descomposa amb molta facilitat. A més, les deixalles contenen grans quantitats de pèls, fems i porqueries. Un abocament de tipus mitjà de la zona de sacrifici d'un escorxadador conté uns 2000 mg/l de DBO i un contingut total en nitrogen d'uns 500 mg/l.

En el procés industrial, i abans de procedir al tractament de les aigües residuals contaminades que inevitablement es generen, es poden dur a terme dues mesures bàsiques per tal de reduir la contaminació. En primer lloc, disminuir el cabal de les aigües contaminades, reduint el consum total d'aigua en el procés mitjançant un ús racional i l'ús de mecanismes de control adequats. En segon lloc, reduir la contaminació específica d'aquestes aigües tal com s'ha indicat als cinc processos.

Per a tractar les aigües residuals d'escorxadors, els mètodes principalment utilitzats són, a més de les operacions de recuperació dins la mateixa



factoria, la filtració, la flotació i el tractament biològic. Alguns mètodes de recuperació dins la factoria resulten profitosos i rendibles per a reduir la quantitat i la càrrega dels abocaments. Entre aquests es troben la recuperació de sang i greix, i l'ús de dipòsits d'aigua i dels líquids de les premses.

En canvi, per al tractament de les aigües residuals de les fàbriques elaboradores de diversos productes càrnics, els mètodes més corrents de tractament són el desbast, la sedimentació, la floculació-decantació, els filtres bacterians i els fangs activats.

Amb el desbast amb reixes hom pot eliminar pèls, restes de carn, fems i sòlids flotants. Això pot suposar una reducció de sòlids en suspensió total entre el 9 i el 19 %. La sedimentació en dipòsits de geometria de fons cònic pot arribar a separar el 63 % dels sòlids en suspensió i el 35 % del material de DBO, en períodes de retenció d'una a tres hores. En els filtres bacterians es poden aconseguir rendiments entre el 81 i el 90 %.

El tractament mitjançant llots actius també produeix un efluent satisfactori després d'unes nou hores d'aeració mitjana i un cabal de 26 m<sup>3</sup> d'aire per m<sup>3</sup> d'aigua a tractar.

Molt pocs residus d'escorxadors es precipiten químicament, pel cost excessiu que això suposa. El clor i el sulfat alumínic, si s'utilitzen en quantitats suficients, redueixen sensiblement la DBO i la coloració dels abocaments. Tot i que resulta car, la DBO de les aigües, que abans de tractar-les pot oscil·lar entre 1500 i 3800 mg/l, es pot reduir fins a 400 a 600 mg/l.

### *Indústria sucrera*

La campanya del sucre obtingut per extracció de la remolatxa dura a Europa de dos a tres mesos les vint-i-quatre hores del dia treballant en continu. En la línia contínua es fa l'extracció mitjançant l'obtenció de denses melasses (a vegades s'afegeix calci en pols a les melasses per tal de precipitar el sucre en forma de sucrat càlcic).

L'origen de la contaminació en una indústria d'aquestes és principalment degut a les aigües procedents de la neteja de la remolatxa, a les aigües de procés (de difusió, premsat de la polpa i transport d'escumes principalment) i a les aigües de regeneració de les instal·lacions de desmineralització de sucres ensucrats.

Les aigües de neteja d'una indústria d'obtenció de sucre de remolatxa poden ésser molt variables segons el contingut en terra, pedres, fulles, arrels i sòlids dissolts. Les aigües de la premsa contenen matèria orgànica i sòlids

en suspensió com les procedents del llot de calci. L'aigua de condensació pot contenir matèria orgànica que arrosseguen els bafes de l'últim efecte.

L'aigua de la canal representa aproximadament un 72 % del residus, tot i així és una aigua amb una DBO relativament baixa, semblant a les aigües domèstiques.

Cal, en aquestes indústries, reutilitzar les aigües residuals ja que es tracta de grans volums en un període de l'any relativament curt, sobretot les de neteja i transport de remolatxa. Per a dur-ho a terme, s'intercalen en el circuit decantadors-espessidors, amb la intenció de reduir el contingut de matèries en suspensió de l'aigua, les quals poden assolir valors d'uns quants grams per litre. La brutícia de la remolatxa condicionarà en gran mesura les dimensions del decantador.

En la decantació, s'obtenen fangs amb una concentració superior als 300 g/l. Convé preveure un dispositiu de desbast i un desarenador abans del decantador. A vegades, s'afegeix calç o polielectròlit per a facilitar la decantació a través dels flocs formats. Normalment, aquests fangs s'envien a grans dipòsits enterrats. D'aquests dipòsits, en surt una aigua molt carregada i de caràcter fortament fermentescible.

És freqüent aplicar una fermentació anaeròbia de tots els residus de la indústria emmagatzemats en aquests grans dipòsits, durant el període entre dues campanyes. Aquesta tècnica resulta la més viable, tant des d'un punt de vista econòmic com de seguretat. Tot i així, cal tenir en compte que immobilitza grans superfícies de terreny. Qualsevol dels altres mètodes de depuració biològica són igualment aplicables.

### *Indústries d'olis i greixos*

Els abocaments d'aquestes indústries tenen, en general, valors de pH extrems segons la seva procedència. Les aigües de neteja de matèries greixoses són molt àcides (pH entre 1 i 2), mentre que les corresponents a la saponificació dels àcids grassos són molt alcalines (pH entorn de 13).

Per tant, la barreja d'aquests efluents és favorable, tot i que els dipòsits de neutralització han d'ésser convenientment dimensionats.

Normalment, la separació del greix de les aigües residuals es fa per tractament àcid (cràcking) combinat o no amb una floculació seguida d'una separació per flotació.

Un tractament primari físico-químic de desengreixament i floculació redueix la contaminació orgànica entre un 50% i un 70%. Després, caldrà

un tractament biològic. Cal estudiar acuradament la tecnologia del tractament d'aquestes aigües residuals en cada cas particular.

### Indústria pesquera

Les instal·lacions d'aprofitament de subproductes del peix per a la producció d'oli, farina, substàncies solubles i altres matèries a base de peix constitueixen una indústria important, per exemple, la derivada de la indústria conservera de la sardina.

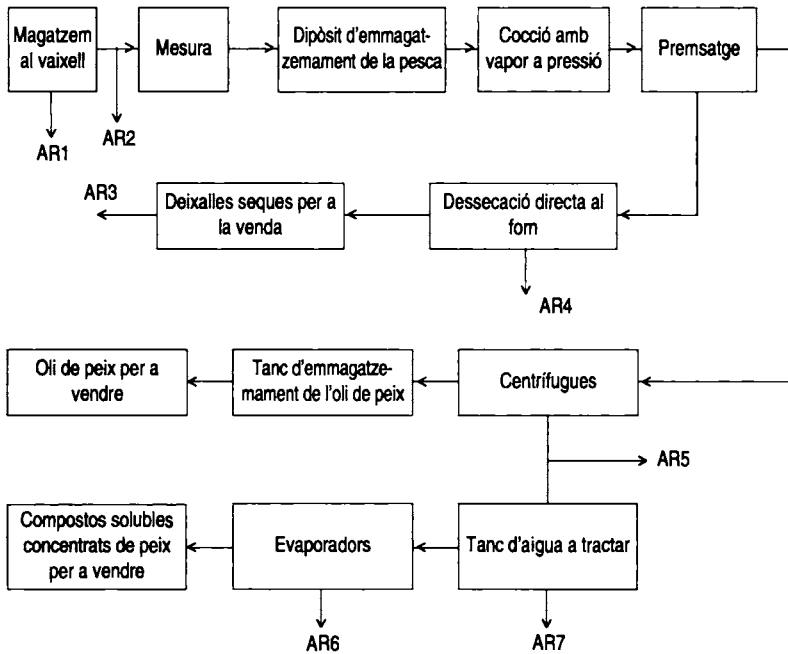


FIGURA 24. Diagrama simplificat d'una planta de preparació de conserves de peix [6]

Segons s'indica al diagrama simplificat, l'origen de les aigües residuals és el següent:

- AR1 Bodegues d'emmagatzemament dels vaixells quan el peix es treu dels compartiments corresponents.
- AR2 Aigua de transport. Principalment són aigües amb sang, escates i restes de peix.

- AR3 Són els residus de les caixes de peix fresc que pel propi pes del peix produeixen els efluents. Tenen una gran concentració de sal i sòlids dissolts.
- AR4 S'utilitza l'aigua en el forn per tal d'eliminar els fums en el procés d'assecatment i per a treure les males olors.
- AR5 Representen més del 90 % de la DBO de les aigües residuals de la fàbrica. Tot i així és una quantitat limitada.
- AR6 Es refereix a les aigües que vessen dels tancs d'emmagatzemament i dels fons que cal evacuar quan es netegen els tancs.
- AR7 Els evaporadors descarreguen constantment aigua de refrigeració i condensació. A més hi ha les aigües de neteja en calent de la instal·lació, així com les aigües residuals de rentat de la resta de l'equip (premses, tancs, centrífugues,...).

En aquestes aigües residuals, no és recomanable la coagulació-floculació química perquè s'aconsegueix una baixa eliminació de la DBO i una excessiva formació de fangs. S'han trobat mètodes satisfactoris que consisteixen a combinar tots els residus individualment amb les AR6 i evaporar-les. També, a vegades es transporten aquests residus a mar oberta.

Els tractaments aeròbics, especialment els llots actius, resulten eficients.

TAULA 8. Composició de les aigües residuals de la preparació del peix [6]

Aigües residuals	DBO, p.p.m.	Sòlids totals p.p.m.	Sòlids totals volàtils p.p.m.	Greix p.p.m.
AR1	42-265	15.576-20.606	2.489-3.394	
AR2	3.050-67.205	18.421-64.857	5.912-46.907	1.314-17.234
AR3	30.500-32.500	46.741-61.760	29.533-46.247	10.655
AR4	120-300	14.171-18.949	1.906-7.957	45
AR5	56.333-112.500	33.597-79.200	12.609-66.406	4.226-24.387
AR6	47.063	52.998	45.483	18.157
AR7	200-8.043	13.756-16.260	1.695-12.389	16-329

### *Indústries de cereals i derivats*

Existeixen, en aquest cas, dos tipus diferents de processos de cocció. El primer és una cocció en sec en què les úniques aigües residuals són les de neteja del terra i líquids procedents de maquinària especial. Els equips es

netejen en sec. Són aigües amb DBO i sòlids en suspensió baixos, i els principals contaminants són la farina i alguns greixos.

El segon tipus de cocció al forn (elaboració de pastissos bàsicament) és molt diferent en les característiques dels efluent i en el funcionament. Els dipòsits i safates s'han de rentar i untar amb greix després de cada fornada; per tant, les aigües residuals tindran més càrrega contaminant. La seva DBO oscil·la entre 3000 i 5000 mg/l i un contingut en sòlids en suspensió de 2000 a 3000 mg/l. Els principals contaminants són en aquest cas sucre, farina, restes de fruita i detergents.

Aquestes aigües residuals són tractables normalment amb fangs actius amb bons resultats. A causa de l'elevat contingut de carboni, fàcilment es produeix una flotació de llots o llots filamentosos lleugers. Els separadors de greixos per flotació sovint resulten ineficients perquè els detergents els emulsionen, i és recomanable la flotació per a eliminar els sòlids en suspensió. El tractament amb una mica d'àcid a les aigües de neteja més contaminades pot reduir els valors de la DBO en un 80 %. Fins ara, s'ha utilitzat la flotació i la centrifugació amb aparents bons resultats.

S'han assajat, a escala pilot, tractaments anaeròbics en llit fluïditzat en una fàbrica de *snacks* amb resultats molt favorables [26]

### *Plantes d'envasament de begudes no alcohòliques*

En aquestes plantes, les aigües residuals procedeixen del rentatge d'ampolles, la producció de xarops, els tractaments de l'aigua i la neteja de terres. Normalment són alcalines amb una DBO i un contingut en sòlids en suspensió lleugerament més alts que les aigües residuals urbanes, i s'aboquen als col·lectors a vegades amb una prèvia filtració.

Les deixalles que resten a les ampolles brutes, així com les restes de begudes, són la principal causa de l'alta concentració en DBO. Les aigües residuals procedents de neteja de terres, barreja de xarops, dipòsits d'emmagatzemament, filtres, deixalles,... són intermitents i no es considera que produeixin gaires sòlids en suspensió i DBO. Les aigües residuals procedents del tractament d'aigües diferiran àmpliament d'acord amb la qualitat requerida i la de l'aigua d'entrada.

La major part de les plantes d'embotellament de begudes no alcohòliques són prop de centres de població, de manera que l'abocament directe a la xarxa pública de clavegueram és una solució. Per a reduir el cabal d'aigua residual abocada, a vegades es reutilitza l'aigua de l'esbandida final de les

ampolles per a la pre-esbandida de les ampolles brutes o per a altres aplicacions. Igualment, si se separen les begudes sobrants es redueix notablement la DBO. Les aigües residuals que resulten d'aquesta operació es poden utilitzar d'altres formes que no sigui permetre que vagin als col·lectors. Els abocaments restants, encara que tinguin una alcalinitat elevada, donen lloc a pocs efectes indesitjables sobre els processos de tractament de la majoria de les aigües residuals urbanes.

#### 4. TENDÈNCIES ACTUALS

El 18 de març de 1991 s'aprovà, en Consell de Ministres de la CE, una nova directiva sobre el tractament necessari per als residus biodegradables, englobant en aquest terme tant les aigües residuals urbanes com les industrials.

L'objectiu de la Directiva és protegir el medi ambient dels efectes negatius derivats dels abocaments de les aigües residuals. La directiva estableix uns requisits mínims per als abocaments d'aigües i per a l'evacuació de fangs.

Tot i així, s'han dictat normes per a protegir la qualitat de l'aigua sense tenir en compte la protecció de l'aire o l'impacte en ambdós medis, sense pensar que el receptor final és la terra, ja que depurar l'aigua residual produeix uns llots i cremar dona lloc a contaminació atmosfèrica.

Les tecnologies normalment utilitzades estan prou preparades per a eliminar la matèria orgànica, carboni, sòlids en suspensió o altres contaminants bàsics que es trobin en grans quantitats. Tot i així, les noves tecnologies han donat lloc a nous contaminants de diferents tipus. A més, la problemàtica de les aigües residuals en la indústria agroalimentària és la seva extremada variabilitat quant a composició, concentració i cabal al llarg del dia.

És clar que ja no es pot confiar en la tecnologia tradicional per a resoldre els problemes del medi ambient. La contaminació és un residu o una pèrdua de recursos valuosos i maltractar-los, retira uns medis econòmics del procés productiu.

Cal anar disminuint la contaminació des de l'origen (reformular productes, eliminar components que siguin contaminants, modificar el procés i els equips), sobretot recirculant i reutilitzant les aigües residuals com a font de matèries primeres en lloc de tractar-les com a contaminants.

L'augment de les necessitats d'aigua de qualitat en les indústries alimentàries, junt amb el progressiu augment del cost de l'aigua en general, implica cada vegada més l'ús racional i òptim d'aquest recurs escàs.

L'augment del cost de l'aigua és degut a diversos factors:

1) l'aigua d'abastiment és cada dia més cara, ja que els recursos en són cada dia més escassos i les taxes de subministrament o captació augmenten.

2) el cost dels tractaments d'aigua d'abastiment també augmenten, car les aigües d'entrada a la indústria tendeixen a ésser de qualitat més deficient, o bé la mateixa indústria és cada vegada més exigent en la qualitat d'aigua que necessita per al seu procés.

3) els costos dels tractaments d'aigua residual també tendeixen a augmentar, d'una banda per l'augment de les taxes d'abocament a xarxes públiques de clavegueram o a lleres públiques, i, d'una altra banda, les exigències de la qualitat de l'abocament també tenen tendència creixent.

4) l'eliminació de residus també augmenta dia rera dia en les seves exigències per raons ecològiques. Aquest darrer punt ha passat en poc temps d'ésser un punt gairebé ignorat a cobrar una gran importància.

La racionalització que tendeixi a reduir el consum net d'aigua per part de la indústria influirà en la reducció dels costos en cada un dels quatre punts abans esmentats; a més de no malbaratar aquest recurs i reduir les conseqüències ecològiques.

És evident que l'estalvi en el consum d'aigua té un gran interès, ja que ni cal tanta aigua d'entrada, ni tants tractaments d'entrada i sortida, ni es generen tants residus, i es redueix l'impacte en l'entorn.

La racionalització del consum d'aigua passa per dos punts: la reutilització i la recirculació.

La *reutilització* consisteix en la utilització de la mateixa aigua en dues funcions diferents. L'aigua a la sortida d'un ús s'aprofita en una segona aplicació, amb un tractament intermedi en cas que sigui necessari. La segona aplicació sol ésser d'una exigència menor que la primera quant a qualitat de l'aigua. Un exemple és l'ús d'aigua per a refrigerar bescanviadors de calor o condensadors i posteriorment dedicar-la a operacions de neteja o esbandida. Un altre pot ésser obtenir una aigua de certa qualitat a la sortida de la depuradora de residuals mitjançant tractaments terciaris adients, i recircular l'aigua així obtinguda en processos no gaire exigents (neteja industrial, refrigeració en circuits oberts...).

La *recirculació* consisteix a reutilitzar indefinidament la mateixa aigua per a una mateixa funció en circuit tancat o semiobert, aportant tant sols l'aigua nova necessària per a compensar les pèrdues que es produeixin, les purgues o l'evaporació. La concentració de les sals, de matèries en suspensió o de matèries orgàniques tendeix a augmentar a causa de les evaporacions, i això pot obligar a introduir algún tipus de tractament en continu

dins el circuit. Els exemples més clars són el de la recirculació en un circuit tancat o semiobert de refrigeració, i l'aigua condensada de vapor que es recupera per a generar vapor a les calderes.

*Increment dels tractaments anaerobis.* L'eliminació de la matèria orgànica present en els abocaments d'aigües residuals, tradicionalment s'ha dut a terme per via bioquímica aeròbia, essencialment per oxidació del carboni a anhídric carbònic. És per això que la valoració de la contaminació es fa mitjançant la DBO i la DQO; avaluació lògica si es té en compte que la primera intenció és la destrucció del carboni.

La destrucció del carboni es pot fer amb diversos procediments aerobis (llots actius, filtres biològics, estanys d'estabilització) amb uns rendiments previsible de fins un 99%, tot i que els rendiments reals són una mica inferiors.

La idea de recuperar el carboni s'ha anat imposant recentment bàsicament per tres vies:

- 1) concentració per a la seva utilització com a adob
- 2) transformació del carboni associat al nitrogen i al fòsfor per a la producció de proteïnes
- 3) transformació en metà per a la producció d'energia.

Aquesta tercera ha tingut darrerament un desenvolupament espectacular. Són processos lents, amb llargs períodes de retenció, que a la pràctica donen uns costos d'inversions en les instal·lacions força elevats. El biogàs produït en el procés anaerobi es pot aprofitar després per a produir energia elèctrica o tèrmica en la mateixa indústria.

Actualment, l'interès està a trobar nous sistemes anaerobis que amino-rin les inversions per l'augment de la càrrega admissible per metre cúbic de digestor i redueixin així la inversió inicial.

Avui, és especialment important el sistema UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanquet), que està donant resultats excel·lents en aplicacions diverses, com per exemple en la indústria sucraera, els escorxadors i les fàbriques de cervesa, com s'ha indicat anteriorment.

Sens dubte, la base de qualsevol procés biològic de depuració, actualment, és el disseny i l'operació. Un dimensionament i seguiment del procés correcte pot donar resultats molt eficients, tal com s'està demostrant experimentalment.

A més, és convenient intentar descarregar el tractament biològic mitjançant programes de minimització dels efluent residuals en el propi procés productiu o bé per separacions físiques o físico-químiques que poden resultar més cares però de més fàcil operació.



## BIBLIOGRAFIA

1. BRENNAN, et. al. "Las operaciones de la ingeniería de los alimentos". Ed. Acribia. 2a edició. 1980, Cap 18, pp. 453-477.
2. CHEFTEL, et. al. "Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos". Ed. Acribia. 1977. Cap IX.5 pp. 373-381.
3. DEGREMONT. "Manual técnico del agua". Edició 1979.
4. METCALF & EDDY. "Ingeniería sanitaria. Tratamientos, evacuación y reutilización de aguas residuales". Ed. Labor. 1985.
5. NALCO. "Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones". Ed. Mac Graw-Hill. 1979.
6. NEMEROWN. "Aguas residuales industriales". Ed. Blume. Madrid. 1977. pp. 305-372.
7. RIGOLA. "Tratamientos de aguas industriales. Aguas de proceso y residuales". Marcombo, S.A. 1989.
8. RIVAS. "Tratamiento de aguas residuales". Eds. Vega. 1978.
9. SANS R., DE PABLO J. "Ingeniería ambiental: contaminación y tratamientos". Marcombo, S.A. 1989.
10. WEBER. "Control de calidad del agua: procesos fisicoquímicos. Ed. Reverté. 1979.
11. BBV. "Agua". *El Campo*. Oct-Des., 1984, núm. 96.
12. BECERRA. "Caracterización y ensayos preliminares de tratamientos de efluentes líquidos en la industria pesquera". *Alimentación, equipos y tecnología*. Maig, 1990. pp. 147-151.
13. BELIO A. "Ahorro de energía mediante un adecuado tratamiento de aguas en las calderas de la industria alimentaria". *Alimentación, equipos i tecnología*. Gener-Febrer, 1992. pp. 165-173.
14. Conservació i gestió de l'energia. "Depuració d'aigües residuals i millors energètiques". Núm. 77. Des., 1990.
15. Conservació i gestió de l'energia. "Aprofitament energètic en plantes depuradores". Núm. 24. Abril, 1991.
16. EDF Industrie. "Traitement des eaux de chaudières". *Cahiers des industries alimentaires*. Num. 23. Gener, 1991. pp. 3-8.
17. GALDÓS, VEREIJKEN. "Tratamiento anaerobio de aguas residuales de la industria transformadora de la patata". *Alimentación, equipos y tecnología*. Nov., 1990. pp. 147-151.
18. HERNÁNDEZ. "Dimensionamiento optimizado por ordenador del proyecto de plantas de digestión anaerobia de aguas residuales de maderos (I)". *Alimentación, equipos y tecnología*. Maig, 1991. pp.127-135.

19. HERNÁNDEZ. "Dimensionamiento optimizado por ordenador del proyecto de plantas de digestión anaerobia de aguas residuales de mata-deros (II)". *Alimentación, equipos y tecnología*. Juliol-agost, 1991. pp. 135-141.
20. IZQUIERDO J. "Nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas resi-duales". *Automática e instrumentación*. Març, 1992. pp. 54-55.
21. GAMALIEL. "Soluciones para la contaminación producida por la indus-tria alimentaria". *Alimentación, equipos y tecnología*. Maig, 1991. pp. 121-124.
22. MUÑOZ. "Depuración anaerobia de aguas residuales (I)". *Alimenta-ción, equipos y tecnología*. Maig, 1990. pp. 123-132.
- 23.-MOSQUERA. "Soluciones biológicas a la problemática de las aguas residuales en la industria química y agroalimentaria". *Alimentación, equi-pos y tecnología*. Maig, 1991. pp. 105-116.
- 24.-MUÑOZ. "Depuración anaerobia de aguas residuales(II)". *Alimenta-ción, equipos y tecnología*. Juliol-agost, 1990. pp. 167-173.
- 25.-MUÑOZ. "La carga contaminante en las aguas residuales de las indus-trias cárnicas y sus métodos de tratamiento". *Alimentación, equipos y tec-nología*. Octubre, 1990. pp. 61-73.
- 26.-PÉREZ CELADA. "Tratamientos de aguas residuales de una fábrica de snacks en un reactor anaerobio de lecho fluidizado". *Alimentación, equi-pos y tecnología*. Setembre-octubre, 1989. pp. 119-122.
- 27.-VALCARCEL. "Optimización de un proceso de depuración de verti-dos en destilerías vínicas". *Alimentación, equipos y tecnología*. Setembre-octubre, 1989. pp. 127-133.
- 28.-VEREIJKEN. "Desarrollos recientes en el tratamiento de aguas resi-duales de la industria cervecera". *Alimentación, equipos y tecnología*. Maig, 1990. pp. 103-106.
- 29.-TJOMB, LANGLEY. "L'eau dans les industries agroalimentaires". *RIA* 473, Desembre, 1991-gener, 1992. pp. 42-52.

# INTRODUCCIÓ AL DISSENY HIGIÈNIC

*José Mestres Lagarriga\**

*Roser Peiró Botifoll\*\**

## 1. INTRODUCCIÓ

El present capítol intenta introduir el lector en la qüestió de la higiene en el món de la indústria alimentària, a través de la presentació dels seus principis fonamentals i de la reflexió sobre alguns aspectes concrets del disseny higiènic alimentari.

Com el lector haurà tingut o tindrà ocasió de comprovar, el disseny higiènic és un element fonamental per a poder produir, emmagatzemar o transportar productes alimentaris de qualitat. En el mercat actual i futur, la qualitat dels productes és i serà un dels aspectes fonamentals del seu èxit comercial. Si els corresponents edificis, instal·lacions i equips no estan dissenyats higiènicament, no serà possible, per més esforços correctors que hi posem, obtenir productes de qualitat. En conseqüència, és fàcil imaginar la importància del disseny higiènic en el futur d'una empresa.

A tot això, cal afegir que és convenient pensar en la qüestió higiènica en el moment de dissenyar –i no més tard– qualsevol tipus de construcció, instal·lació o equip alimentari ja que, moltes vegades, atès l'elevat cost d'inversió que suposa la construcció d'un edifici o la implantació d'un equip o instal·lació, no és econòmicament corregible un defecte higiènic present en una planta de producció o un magatzem.

---

\* *Director de CEINAL. Professor de l'Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.*

\*\* *Responsable Departament Tecnologia Alimentària i Assistència de la Qualitat de CEINAL.*

Voldríem deixar clar, des del principi, que un disseny higiènic no té per què ser, forçosament, més car que un disseny no higiènic. El que sempre és més car, i algunes vegades irrealitzable a la pràctica, és la reforma d'un edifici, instal·lació o equip, per a corregir-ne els defectes higiènics.

Per a finalitzar aquesta introducció, volem establir que la higiene no és un caprici, ni un luxe, ni una obligació imposada per les autoritats, sinó que és un element fonamental per a poder aconseguir productes de qualitat. En conseqüència és un error considerar els aspectes higiènics com una despesa; ben al contrari, han d'ésser considerats com una inversió, ja que repercutiran directament sobre la qualitat del producte i disminuiran el cost de la no qualitat. Les mesures higièniques no tenen cap sentit en si mateixes i la seva justificació només es pot trobar en la mesura que col·laboren, en cada cas concret, a evitar la contaminació del producte.

Les mesures higièniques han d'ésser harmòniques, és a dir, no té gaire sentit contemplar exclusivament la higiene d'un determinat punt d'una sala, ja que el que compta, a l'hora d'obtenir resultats, és el grau de seguretat higiènica de la totalitat de la instal·lació. Aquest grau vindrà determinat per la suma de les probabilitats que succeeixi un accident higiènic en cada un dels elements que la conformen. En conseqüència, aquells elements d'una instal·lació, equip o sala amb una seguretat higiènica més petita són els que determinen fonamentalment el grau de seguretat higiènica. Fins que no es millori la seguretat higiènica dels elements crítics, les millores de seguretat higiènica que es puguin fer a la resta d'elements influiran molt poc sobre la seguretat higiènica global. El conèixer aquests elements crítics (punts crítics) serà fonamental per a poder dur a terme una política racional i eficaç d'augment de la seguretat higiènica del procés o de la instal·lació.

No voldríem descobrir en aquesta introducció més aspectes de la higiene. Confiam que el lector els vagi retrobant al llarg de la lectura del present capítol, així com que vagi descobrint que els principis de la higiene i del sentit comú coincideixen plenament.

Per a presentar el tema, hem escollit fer una reflexió sobre aquells elements més significatius de la higiene, presentant-ne els aspectes més sobresortints i proposant-ne les línies de solució. Com es podrà comprovar, més que donar solucions concretes, intentarem, sempre que sigui possible, donar informació del plantejament i de les línies de resposta a cada una de les situacions de possible inseguretat higiènica plantejades. Pensem que les solucions òptimes només existeixen per a cada cas concret i que tots els elements que intervenen en una activitat alimentària tenen alguna implicació higiènica, que sempre cal tenir en compte.

## 2. CONCEPTES BÀSICS

S'entén per **higiene**, en l'àmbit de la indústria alimentària, el conjunt de mesures encaminades a evitar tot tipus de contaminació en el producte que s'elabora, emmagatzema o transporta.

S'entén per **residu** tota substància, present a l'aliment, estranya al producte i lligada al seu procés d'obtenció.

S'entén per **contaminant** tota substància, present a l'aliment, estranya al producte i al seu procés d'obtenció.

S'entén per **contaminació** la incorporació involuntària, en un producte alimentari, d'un residu o contaminant.

La presència, en un producte alimentari, d'un residu (pesticida, antibiòtic, etc.) o d'un contaminant (botó, part del cos d'un insecte, substància aromàtica estranya, tros de pintura descrostada d'una paret, metall procedent de la corrosió de l'equip de processament, microorganisme, cabell humà o de rosegador, etc.), és un greu defecte de qualitat causat, molt probablement, per l'existència de mancances higièniques en el procés, l'emmagatzemament o el transport. La millora del nivell higiènic de tot l'entorn relacionat amb el producte és l'única possibilitat d'eliminar o reduir, a nivells extraordinàriament baixos, la probabilitat que succeeixin alguns d'aquests fenòmens tan poc desitjables.

Pensar en la possibilitat d'eliminar tots aquests defectes, a través d'un control més o menys rigorós del producte abans de sortir al mercat, no és correcte; aquest únicament ens permet detectar una part dels defectes i, en especial, aquells que tinguin un caràcter generalitzat dins tota la partida i que, a més, estiguin inclosos dins el grup de paràmetres crítics a controlar rutinàriament. La pràctica ens demostra que, a més de disposar d'un sistema adequat de control de qualitat, hem de disposar d'un entorn al producte suficientment segur per a tenir la certesa que no es produiran accidents de tipus higiènic.

S'entén per **punt crític** aquell element d'una instal·lació, equip o sala, que presenta un menor nivell de seguretat higiènica, en relació a la resta d'elements.

S'entén per **nivell de seguretat** d'una instal·lació, equip o sala la suma de les probabilitats que es produeixi un accident higiènic en cada un dels elements que la componen. En conseqüència, com més baix sigui el nombre d'elements i més baixa la probabilitat que es produeixi un accident higiènic en cadascun d'ells, més elevat serà el nivell de seguretat higiènica del conjunt.

La presència de **microorganismes** en un aliment pot ésser causa de la no qualitat d'aquest, especialment en el cas que el puguin alterar o es tracti de microorganismes patògens o tòxics. Les mesures higièniques destinades a evitar l'entrada de microorganismes en els aliments seran especialment importants.

La presència d'**aus, mamífers o altres animals** pot ésser una causa important de contaminació, a partir dels excrements d'aquests, de la pèrdua de plomes o de pèl, o de les destrosses efectuades en cercar menjar. Cal evitar la presència voluntària o accidental d'aquests, per a millorar el grau de seguretat higiènica.

Els **insectes** són un element que pot generar importants contaminacions, com a conseqüència de la presència, en els aliments, d'individus vius o morts, restes del seu cos, deixalles de menjar o bé destrosses efectuades en infestar el producte. Evitar-ne la presència no és tasca fàcil. La principal directriu per aconseguir-ho és que no existeixi menjar al seu abast, o espai on amagar-se i fer els caus. En el cas que la directriu citada no es pugui aconseguir en la seva totalitat, cosa que passarà quasi sempre a la pràctica, és recomanable implantar un programa de control d'insectes i, també, d'aus, rosegadors i altres mamífers. Aquest inclourà tots els edificis i les àrees que els envolten. Constarà, fonamentalment, de mesures d'inspecció i de protecció de tipus físic, adequades i compatibles amb l'activitat de la planta. En el cas que aquestes no fossin suficients, es pot contemplar la possibilitat de la utilització de mesures químiques o biològiques. Aquestes s'utilitzaran sempre com a últim recurs i, entre altres, compliran els següents requisits: les substàncies utilitzades no seran tòxiques; els tractaments es faran amb la periodicitat màxima indispensable; la seva utilització no contaminarà el producte processat ni emmagatzemat; seran manipulades únicament per persones específicament entrenades; s'emmagatzemaran en locals específics i fora de l'abast del personal no encarregat d'aquesta funció; estaran d'acord amb la legislació de l'estat.

La **pols** és un element especialment preocupant, des del punt de vista higiènic, atès que és molt probable que contami el producte processat o emmagatzemat. Caldrà implementar les mesures adequades per a evitar la formació o, en tot cas, la presència de pols en una instal·lació alimentària. Per això és recomanable reduir al màxim els punts de generació de pols; i en el cas dels punts que inevitablement en produeixin, implementar un sistema eficaç d'extracció, en el mateix punt de generació.

Els **gasos** contaminaran tots els productes que es trobin a l'atmosfera que els conté. En conseqüència, cal evitar la formació i presència de gasos

estrany o inadequat a l'atmosfera de les plantes alimentàries. En el cas de punts que generin inevitablement aquests tipus de gasos, cal equipar-los amb un sistema d'extracció que garanteixi la no contaminació de l'aire de la sala.

Les **substàncies tòxiques** són aquelles que poden produir alteracions en el metabolisme humà, encara que siguin ingerides a dosis molt baixes. Són així un element de contaminació especialment preocupant, atesa la gravetat de les conseqüències de la seva presència en un aliment. Per a garantir que la probabilitat de contaminació amb substàncies tòxiques sigui zero, només hi ha una via: suprimir totalment la presència de substàncies tòxiques en la totalitat de la planta alimentària, els magatzems, els elements de transport, i les seves instal·lacions annexes. Si no es fa així, la probabilitat que es produeixi l'accident no serà mai zero i, en conseqüència, el que succeeixi només és qüestió de deixar passar el temps suficient. En aquest sentit, cal recordar el principi de Peter que afirma: "tot el que pot succeir, succeeix", i també que d'altres autors opinen que Peter era un optimista. Com a exemple del que pretenem dir posarem les plantes alimentàries en què s'utilitzen termòmetres de mercuri: només cal preguntar quants se'n compren cada any per a saber quants se'n trenquen i, en conseqüència, considerar la importància del que estem exposant.

Arribat aquest punt, cal saber diferenciar entre substàncies tòxiques i càustiques; les darreres no poden causar greus accidents més que en el cas que es trobin en quantitat molt elevada en l'aliment, fet molt poc probable. Com a exemple de substàncies tòxiques que sota cap concepte no caldria que es trobessin presents en una instal·lació alimentària, hi pot haver: el mercuri, el plom, el cadmi i els pesticides, desinfectants, insecticides o raticides d'elevada toxicitat.

En el cas de substàncies no alimentoses d'ús alimentari, com ara desinfectants, insecticides, detergents, etc., cal evitar la possibilitat de contaminació del producte amb elles. Per això serà recomanable emmagatzemar-les separadament, i fer-les utilitzar exclusivament per personal entrenat i especialitzat; cal prevenir, en tot moment, tot tipus de contaminació del producte que s'està processant o està emmagatzemat. En cap cas aquestes substàncies podran ésser tòxiques.

Les **deixalles**, tant de substàncies alimentoses com no, estaran en tot moment situades a l'interior de contenidors adequats, tancats i adequadament senyalitzats. Entre altres característiques de disseny dels contenidors, es tindran en compte les següents: el material serà resistent a la corrosió en les condicions d'utilització; inert i resistent a les possibles sol·licitacions mecà-

niques i d'adherència del producte a contenir; la seva forma i dimensió en permetran fàcilment el buidatge i la neteja total.

### **3. HIGIENE DELS EDIFICIS, INSTAL·LACIONS I EQUIPS**

#### **3.1. Ubicació dels edificis destinats a processar o emmagatzemar productes alimentaris**

La planta s'ha de localitzar a una zona d'orografia regular i clima estable, per a evitar problemes relatius a canvis dràstics de temperatura, vents forts i inundacions per desbordaments de rius. Pensem, per exemple, que les conseqüències derivades d'una inundació en una planta alimentària poden causar greus problemes d'higiene, durant molt de temps després de l'accident.

És important considerar les comunicacions amb l'exterior. La planta ha d'estar a una zona de fàcil accés i comunicació. La mala comunicació de la planta alimentària amb l'exterior, així com el no disposar, en les zones immediates d'influència, de tots els serveis complementaris per al funcionament d'aquesta, poden ésser causa de problemes higiènics en el producte, com a conseqüència de reparacions realitzades per operaris no especialitzats, o amb materials poc adients, o amb peces no originals adaptades de manera improvisada.

D'altra banda, l'establiment s'ha de situar en una parcel·la dotada d'espai suficient per a allotjar-hi totes les activitats presents i futures de la planta de processament i/o emmagatzemament d'aliments. En cas contrari, l'amuntegament dels equips o la seva situació o dimensió inadequada poden ésser causa de greus problemes de contaminació del producte processat o emmagatzemat.

És molt important disposar d'una font de subministrament segura d'aigua de qualitat adequada, així com amb un cabal suficient per a cobrir les necessitats actuals i futures. En cas contrari, l'estalvi exagerat d'aigua o la seva deficient qualitat, poden ésser causa de problemes de contaminació del producte processat.

S'ha de preveure també el sistema de depuració de les aigües residuals produïdes. En cas d'haver-se d'instal·lar una planta de depuració, cal destinar un espai adequat a aquesta funció, degudament allunyat i aïllat, per a garantir que no causarà cap problema de contaminació al producte.



És convenient que, a les rodalies i altres zones d'influència, no hi existixin focus de plagues o de contaminacions –microbianes, físiques (pols) o químiques (olors, gasos oxidants)– com ara els abocadors d'escombraries o determinades activitats.

Les característiques de l'atmosfera de la zona han d'ésser adequades a l'activitat a desenvolupar i, en tot cas, no han de tenir cap mena d'incompatibilitat amb aquesta.

### 3.2. Característiques de les àrees no cobertes

Els camins d'accés, les àrees d'aparcament, les zones de càrrega i descàrrega, i altres àrees no cobertes circumdants a la planta estaran recobertes d'un paviment continu (formigó o asfalt) que evitarà la formació de pols (que acabaria sedimentant-se, en part, sobre el producte) i de fang (que podria dipositar-se a les superfícies de les rodes dels carretons que circulen entre l'interior i l'exterior de la instal·lació, o a les soles de les sabates).

Les superfícies descrites estaran proveïdes dels corresponents pendents i desguassos, per a permetre la ràpida i total evacuació de l'aigua de pluja, àdhuc en casos de pluges torrencials, i evitar així la formació de tolls i la contaminació derivada dels esquitxos i el fang que s'hi acumulen. Els desguassos se situaran al punt més baix i s'equiparan amb la reixa i el sifó corresponents. La funció de la reixa és d'evitar que entrin, en el conducte de desguàs, elements sòlids de gran format que poguessin embussar-lo i invalidar-ne la funció. Igualment, la reixa ha de tenir per funció evitar la sortida dels rosegadors que poguessin viure a les clavegueres. Per aquest motiu, es recomana que la separació màxima entre les barres de la reixa sigui de 10 mm. La funció del sifó és, fonamentalment, la d'evitar la sortida d'olors, gasos i insectes procedents de la xarxa de clavegueres.

A les àrees exteriors convé mantenir un constant bon estat de neteja i no convé l'acumulació de ferralla, ni de cap altre tipus d'estris inservibles ja que es convertiran, ràpidament, en l'habitatge d'insectes i rosegadors.

És recomanable ajardinar la superfície exterior no dedicada a cap utilitat concreta. D'aquesta forma, es redueixen les temptacions d'utilitzar-la com a magatzem d'estris inútils (equips substituïts, palets inservibles, envasos retornables que ja no s'utilitzen, etc.). Al mateix temps, també es dona a l'entorn de la factoria un aspecte agradable que pot convidar i predisposar, les persones que hi treballen, a seguir pautes correctes de comportament higiènic. En el disseny del jardí cal tenir en compte, com és lògic, els con-

dicionaments higiènics. Per això no sembla adequada la plantació d'arbres fruiters que atrauran una gran quantitat d'insectes durant el període de maduració de la fruita, o bé de plantes fortament aromàtiques o que desprenguin pol·len o fulles en determinades èpoques del seu cicle vital. Una gespa sembla una solució d'ajardinament força adequada en nombroses situacions, ja que no sembla que presenti cap dels inconvenients anomenats anteriorment i manté un aspecte verd i agradable durant la quasi totalitat de les estacions de l'any.

Les deixalles sòlides que hi pugui haver se situaran sempre en contenidors totalment tancats, de forma que s'eviti la sortida de pudors, o de trosos de deixalles, com a conseqüència de l'acció del vent o de determinats animals, i que es converteixi en un focus d'atracció de rosegadors, insectes i ocells. Aquests contenidors es buidaran i netejaran, com a mínim, una vegada cada dia, i es mantindrà en perfecte estat de neteja tota l'àrea que els envolta.

### 3.3. Tipus d'edificació

Quan ens plantejem el tipus d'edificació que allotjarà els magatzems i el procés productiu, bàsicament dubtarem entre una edificació d'una sola planta o de diverses. En la presa de la decisió hi intervindran diferents tipus de condicionaments. Intentarem exposar aquí únicament els que tenen una significació higiènica.

Les edificacions de diverses plantes ens permetran la circulació de productes aprofitant l'acció de la gravetat, però presentaran, sovint, problemes de circulació limitats al funcionament i les possibilitats dels muntacàrregues, a la més petita versatilitat de les instal·lacions, a les dificultats d'ampliació, i a la possibilitat de contaminació des del pis superior, a partir de goteres als forjats o de fuites en els conductes d'evacuació de les aigües residuals.

Les edificacions en una sola planta permeten la instal·lació de tot tipus de maquinària, ja que aquesta no està suportada per l'estructura de l'edifici; és més fàcil racionalitzar el moviment dels materials i la distribució dels processos; és més fàcil la ventilació i extracció de gasos i pols; es pot fer un aprofitament millor de la llum natural. Sembla aquesta, en principi, una solució més higiènica, però volem insistir en el fet que, en determinats casos, considerant que en aquest aspecte intervenen molts altres tipus de factors, pot ésser adequat el triar la construcció d'un edifici de diverses plantes.

### 3.4. Distribució i separació de les diferents àrees de la planta

En una planta de producció les primeres matèries van transformant-se progressivament en producte acabat, a través del seu pas consecutiu pels diferents processos i àrees de treball. És important establir el recorregut de les diferents primeres matèries per dins la planta; quins subproductes hi haurà després del procés; i quines separacions, entre àrees de producció, convindrà realitzar. Intentarem donar alguns criteris bàsics i fer algunes reflexions sobre aquest tema.

Convindrà que el desplaçament de les diferents matèries i productes, dins la planta, sigui el menor possible. Aquest criteri es basa en la consideració que qualsevol element d'una instal·lació pot contenir punts crítics en relació a la higiene i, en conseqüència, com més curts siguin els desplaçaments més poc nombrosos seran els punts crítics i, en definitiva, la probabilitat que succeeixi un fet contrari a la higiene serà més petita.

Convindrà separar aquelles àrees que presentin diferents necessitats pel que fa referència a les característiques de la seva atmosfera (contaminació microbiana, física o química, temperatura o humitat relativa). A les àrees, contigües del procés, en què no es necessitin condicions atmosfèriques diferents, no convé, des del punt de vista higiènic, realitzar una separació física (paret), atès que hi introduiríem un element innecessari que incrementaria el risc de contaminació, per la presència de punts crítics en aquest. Això és: si no és necessària cap separació física, la incorporació d'aquesta suposa incrementar els punts de risc i, per tant, augmentar la probabilitat de contaminacions.

En el cas de les àrees que sí que necessiten de separació, aquesta serà adequada i eficaç, és a dir: no es limitarà a una paret de separació física, sinó que es preveurà que no es perdi l'eficàcia d'aquesta separació com a conseqüència de les portes de comunicació, dels sistemes de ventilació o bé d'altres punts de comunicació que poguessin existir entre les àrees.

Lligat a aquest aspecte, convindrà que la separació entre les àrees amb diferent nivell de contaminació sigui màxima. La raó és ben senzilla: com més gran i eficaç sigui aquesta separació, més difícil serà que es produeixi una contaminació entre una àrea i l'altra, ni que sigui accidentalment. Aquest criteri acostuma a tenir per conseqüència la conveniència de separar al màxim l'entrada i els magatzems de primeres matèries, de la sortida i els magatzems de producte elaborat; s'eviten així possibles contaminacions creuades. Cal evitar també la contaminació transmesa pel sistema de ventilació o d'aire condicionat. En conseqüència, caldrà conèixer bé quina és la pro-

cedència de l'aire que entra a l'àrea menys contaminada; i evitar, en tot cas, que procedeixi d'una àrea de contaminació superior.

Pel que fa a les contaminacions a partir del personal o dels estris de les sales de contaminació més elevada, s'establiran les mesures adequades per a evitar que això pugui succeir. Algunes d'aquestes mesures poden ésser:

- \* Allunyar físicament, al màxim possible, les dues àrees a separar.

- \* Eliminar les vies d'accés directe entre les àrees de contaminació molt diferent.

- \* Formar, informar amb casos concrets i exemples, i demanar, a les persones que treballin en aquestes àrees, que sota cap motiu es desplacin d'una àrea a l'altra, per a evitar així la contaminació que podrien traslladar.

- \* Fer que el color del vestit de feina sigui clarament diferent a les dues àrees, per a induir el compliment de la mesura anterior i per a fer més fàcil i evident el control. En el cas d'implantar-se aquesta mesura, convé fer alguna indicació, a les portes d'accés de les corresponents àrees.

- \* Separar el vestuari de les persones que realitzen el seu treball a les dues àrees; fent que el camí d'accés a l'àrea de treball, des de la sortida del vestuari, no es creui ni passi per àrees de contaminació superior a la de treball.

- \* Col·locar rentadors i desinfectant de mans, d'accionament no manual, a l'entrada de les sales, amb assecadors d'un sol ús.

- \* Marcar, de forma ben visible, tots els estris no fixos de les àrees, per a evitar que es puguin portar d'una a l'altra, i transportar junt amb ells la corresponent contaminació.

Convindrà situar les instal·lacions i serveis complementaris (vapor, aire comprimit, electricitat, aigua gelada, freda o calenta, etc.) en un lloc adequat i racional. Així, convé recordar que qualsevol superfície (especialment si no és plana i llisa), és una font potencial de problemes higiènics a causa de la brutícia i altres elements antihigiènics que pot allotjar. Per això convé reduir la superfície i extensió dels diferents elements al màxim possible. En conseqüència, es procurarà que la situació dels serveis industrials sigui aquella que permeti un mínim desplaçament de cada un dels fluids fins el seu punt d'utilització. Les conduccions de totes les instal·lacions, incloses les elèctriques, es situaran de forma que la seva neteja sigui fàcil de realitzar; en cas contrari, la brutícia acumulada sobre elles pot fer augmentar sensiblement el risc de contaminacions en el producte.

La forma, la distribució, i les característiques de les edificacions, han d'estar supeditades a les necessitats del procés que s'hi duu a terme a dins. El contrari és una situació aberrant que pot ésser la causa d'importants problemes d'higiene.

### 3.5. Paviment

En la construcció d'un paviment s'han de tenir en compte, entre d'altres, les següents consideracions:

– El paviment ha d'ésser resistent a tots els materials que puguin, de forma sistemàtica o accidental, ésser abocats sobre seu. En fer aquesta consideració, a més de les característiques d'agressió química i física que pot tenir el producte acabat, hem de considerar les de les primeres matèries o els additius que s'utilitzen en cada àrea i, també, les dels materials de neteja i desinfecció emprats, encara que aquests circulin per un circuit tancat.

En el cas de productes àcids o alcalins, sovint presents en determinades àrees de les indústries alimentàries, cal pensar a recobrir el paviment amb un material resistent a aquests productes. Les llosetes de gres ajuntades amb un material resistent als àcids; o bé, el recobriment del paviment amb una capa de resina epoxi, del gruix adequat, poden ésser una solució apropiada d'aquestes situacions.

– El paviment ha d'ésser resistent als efectes originats per canvis bruscos de temperatura que es puguin produir a diverses àrees refrigerades o caldejades de la fàbrica. En aquests casos, cal pensar, per exemple, en resines de poliuretà, tolerants a altes i baixes temperatures, i prou resistents als atacs químics.

– La superfície del paviment serà impermeable a qualsevol matèria que, de manera continuada o accidental, hi pugui entrar en contacte. La situació contrària podria originar greus problemes higiènics, com a conseqüència del deteriorament del paviment o de la contaminació microbiana generada a l'interior d'aquest.

La superfície del paviment haurà d'estar dissenyada de tal manera que impedeixi que els operaris que hi circulen pel damunt rellisquin. D'aquesta manera s'augmentarà la seguretat del treball.

– La superfície del paviment n'haurà de permetre la fàcil i total neteja i desinfecció, adequada al tipus d'activitat que es duu a terme en aquella àrea. Per això, caldrà que el paviment sigui llis, sense racons, esquerdes, entrants o sortints. És necessari l'arrodoniment dels angles d'unió entre les parets i el paviment, amb una superfície llisa i corba, de radi de corbatura superior a 2,5 cm (vegeu la figura 1). D'aquesta manera es facilitarà notablement el procés de neteja en aquestes zones, i se n'augmentarà l'eficàcia. En el cas que aquest arrodoniment es vulgui fer amb perfils de material adequat, per a evitar l'acumulació de brutícia o la instal·lació d'insectes, en l'espai que resta entre la unió del paviment amb la paret i el perfil, cal reco-

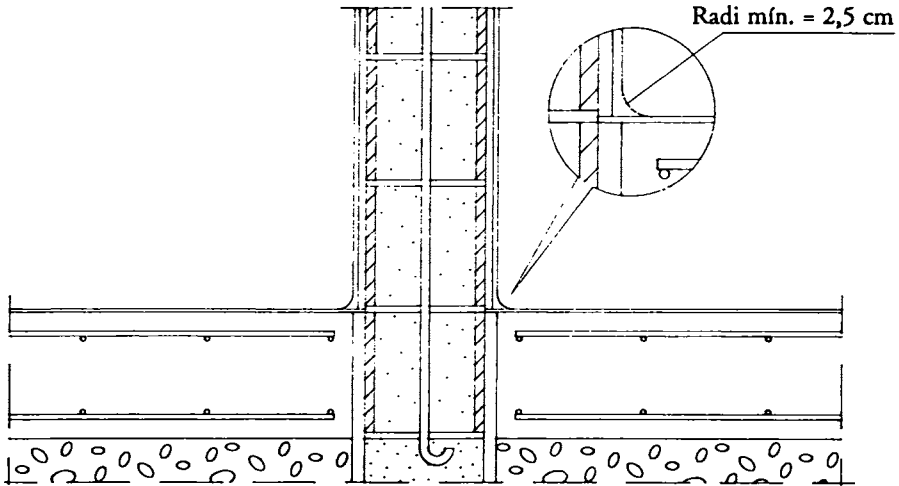


FIGURA 1. Detall de trobada entre paret i paviment (secció) (cedit per CEINAL, S.A.)

manar el massissament d'aquest, o bé garantir el segellament de les unions del perfil posat.

– El paviment ha d'ésser capaç de suportar els pesos i altres sol·licitacions mecàniques (pas de carretons, moviment de màquines, arrossegament de determinats materials o envasos, colpejament amb determinats materials) a què es pugui veure sotmès, bé de forma continuada o accidental. En aquest sentit, a més de les característiques de l'estructura o del terreny que suporta el paviment, i de les característiques resistents del forjat o del paviment, s'han de tenir en compte les característiques resistents de la seva capa superficial. En aquest punt, cal recordar que els problemes de contaminació derivats de la pols, o dels racons, que genera el deteriorament d'un paviment amb una resistència al rodament inferior a la que necessiten els carretons mecànics que hi circulen pel damunt són molt més freqüents del que seria desitjable.

– El paviment ha d'ésser capaç de desaiuar immediatament tots els líquids que, de forma sistemàtica o accidental, hi puguin ésser abocats a sobre. Per això, en el cas que es prevegi aquesta possibilitat, s'ha de dotar el paviment dels corresponents pendents i desguassos. Pendents de l'1-2% acostumen a ésser prou adequats per a la finalitat assenyalada. Els desguassos s'hauran de col·locar sempre en el punt més baix del pendent i, entre d'altres, haurien de complir les següents condicions (vegeu la figura 2).

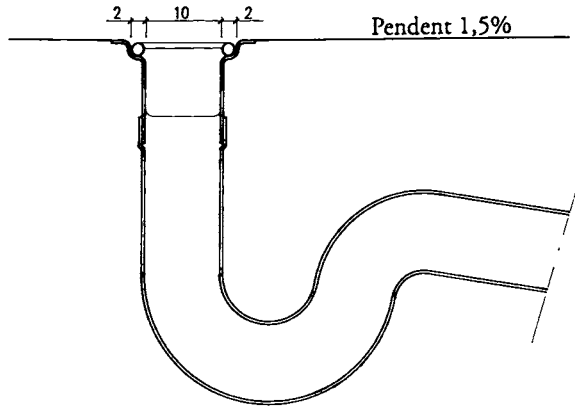


FIGURA 2. Detall d'un desguàs sifònic (cotes en cm) (cedit per CEINAL, S.A.)

\* Estaran dotats d'una reixa dissenyada de forma que eviti la retenció d'aigua al seu voltant. Igualment, s'ha de preveure que la dimensió més petita de les obertures sigui com a màxim de 6 mm i que el seu pes total sigui, com a mínim, de 2 kg. Aquests dos últims aspectes tenen la finalitat d'evitar que els rosegadors que viuen a la xarxa de clavegueres puguin entrar a la planta alimentària.

\* La reixa serà fàcilment desmuntable i netejable, sense racons ni caires angulosos.

\* Tindran un sifó, permanentment ple d'aigua, per a evitar la sortida d'olors, gasos i insectes procedents de la xarxa de clavegueres.

\* Seran perfectament netejables i inspeccionables fins al sifó. Els caires i les unions seran arrodonits per a facilitar-ne la neteja i dificultar la fixació de la brutícia. El radi mínim de curvatura, recomanable als caires i cantons arrodonits, serà de 2,5 cm.

– El nivell del paviment de les sales estarà per sobre del nivell de l'exterior, per tal d'evitar l'entrada d'aigua de pluja, pols, o altre brutícia present al paviment exterior. 30 cm poden ésser un desnivell suficient per a la funció assenyalada.

### 3.6. Parets de tancament i envans

Alguns dels principals aspectes, des del punt de vista higiènic, que cal tenir en compte en el disseny de parets de tancament i envans de separació són els següents:

– Les parets de tancament i els envans que separen àrees de temperatura diferent disposaran del sistema d'aïllament tèrmic adequat, per a evitar la condensació de vapor d'aigua a la cara corresponent a l'àrea més calenta. Si això no és així, entre d'altres fenòmens, s'afavorirà el creixement de fongs - i fins i tot de bacteris- i/o el descrostament de la pintura, sobre la cara en què es produeix la condensació. Aquest fet acabarà contaminant el producte que es processa o s'emmagatzema dins el local afectat.

– La superfície de les parets serà llisa, sense esquerdes, racons, entrants o sortints. Les trobades entre parets seran arrodonides, amb un radi mínim de curvatura de 2,5 cm (vegeu la figura 3). La superfície serà també fàcil i totalment netejable. Per això caldrà recobrir les parets de materials impermeables i resistent a les agressions mecàniques que poguessin patir; i resistent a àcids i àlcalis, quan hi puguin anar a parar, de forma continuada o accidental, materials d'aquesta naturalesa. Les cantonades i els escaires de les parets tindran unions arrodonides, quan se'n vulgui facilitar la neteja.

Com a materials de recobriment de les parets s'han utilitzat tradicionalment rajoles de material ceràmic. Hem d'assenyalar que aquest tipus de recobriment pot presentar, en determinats casos, problemes de tipus higiènic derivats de la seva poca resistència als impactes mecànics, amb el consegüent descrostament de part de la paret; de la dificultat de neteja eficaç

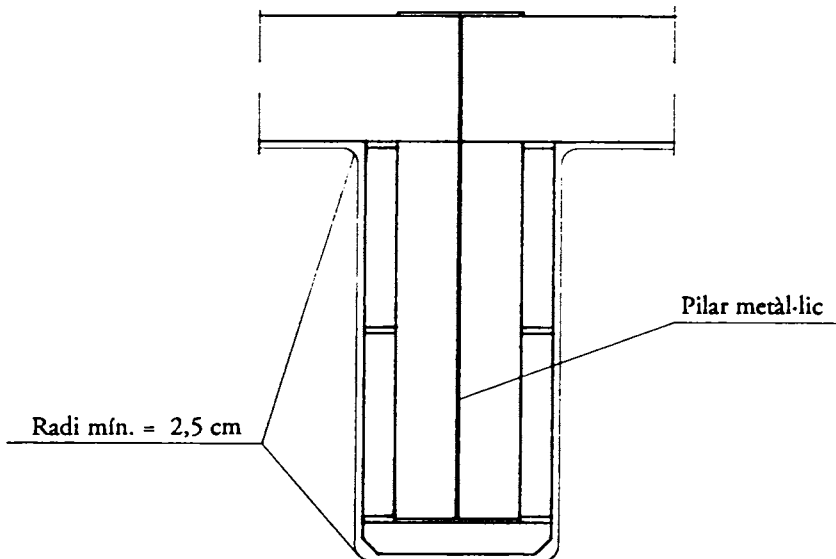


FIGURA 3. Detall de trobada entre parets (planta) (cedit per CEINAL, S.A.)



de la zona corresponent a la junta entre rajoles; o de l'existència de l'espai buit que resta entre les rajoles i la paret que recobreixen, el qual pot ésser utilitzat amb relativa facilitat d'habitable per part de determinats insectes.

La utilització de recobriments a base de ciment finament lliscat sobre la paret, pot donar bons resultats; especialment si es recobreixen de pintura epoxi, que els confereix una total impermeabilitat i una bona resistència als àcids i àlcals.

Segur que pensant amb criteris higiènics clars i coneixent les característiques dels diversos materials, hom pot trobar, per a cada cas, una solució adequada al recobriment de les parets.

– Les parets de tancament seran totalment impermeables, per a impedir l'entrada d'aigua o d'humitat procedent de l'exterior o del terreny sobre el qual descansen. Les conseqüències totalment desfavorables, des del punt de vista de seguretat higiènica, de la presència d'aigua o d'humitat a les parets, ja han estat comentades en aquest mateix apartat.

### 3.7. Portes

Les portes han de complir els mateixos requisits demanats a les parets que les contenen. Es procurarà que no s'hi acumuli fàcilment la brutícia, a causa del sistema d'obertura, o bé que aquesta no es transmeti fàcilment com a conseqüència de la seva utilització. Les portes de funcionament automàtic permeten de millorar sensiblement els problemes d'higiene relacionats amb la seva utilització.

Un altre aspecte important és que el període d'obertura de la porta sigui el menor possible. En cas contrari, es perd notablement la funció aïllant, entre dues àrees, de la paret en què es troba la porta. En el cas de portes automàtiques, es procurarà que els moviments d'obertura i tancament siguin el més ràpids possible, amb la porta oberta únicament el temps estrictament necessari. En el cas de portes d'ús manual, aquestes estaran dotades d'un sistema mecànic de tancament. En els casos en què convingui evitar, d'una manera estricta, el pas d'aire d'un costat a l'altre de la porta, es poden instal·lar cortines d'aire, que entren automàticament en funcionament quan s'obre la porta.

En el cas de les portes destinades a comunicar la planta amb l'exterior, per a l'entrada o sortida de mercaderies, pot ésser indicada la instal·lació de molls exteriors, dotats de portes d'abric, que permetin, a mode de cordó umbilical, comunicar directament el magatzem amb l'interior del camió,

sense necessitat que el camió entri dins el magatzem. D'aquesta forma s'evita la possibilitat de contaminació amb la brutícia acumulada a les rodes del camió, o amb gasos del seu tub d'escapament. Igualment s'evita l'entrada d'insectes o altres elements de l'exterior, durant l'operació d'entrada o sortida del camió. En el cas de productes conservats a temperatures especials, s'evita el salt tèrmic que suposaria el contacte amb l'aire de l'exterior.

### **3.8. Finestres i altres orificis situats a les parets de tancament**

Agrupem, en aquest punt, totes les finestres practicables i d'altres orificis que permeten comunicar l'interior de la planta amb l'exterior (com pot ésser el cas dels extractors dinàmics o estàtics). Alguns dels principals aspectes higiènics que és important remarcar d'aquests elements són:

- Cal protegir-los amb una tela mosquitera, perfectament ajustada, d'1,2 mm de llum com a màxim. En cas contrari (si no hi ha protecció), quan les finestres estiguin obertes, o els extractors aturats, podran entrar insectes o altres tipus d'animals (petits rèptils, ocells, etc.).

Els extractors poden ésser un bon exemple del següent element de reflexió: la base del disseny higiènic és el coneixement profund de cada una de les parts i elements que configuren una planta de processament o emmagatzemament d'aliments. Sobre aquesta base de coneixement, és fàcil l'aplicació de criteris i solucions higièniques adequades. A les nombroses plantes de processament d'aliments en què els extractors dinàmics, i especialment estàtics, no tenen protecció contra l'entrada d'insectes, la causa d'aquesta manca de seguretat higiènica s'ha de cercar més en el desconeixement del fet que a no conèixer o voler aplicar la mesura de protecció.

- El material de les finestres serà llis, fàcilment netejable i sense racons. El vidre pot ésser un material poc adequat, atès que, com a conseqüència del seu trencament, pot produir una contaminació del producte. A les instal·lacions en què el procés portat a terme garanteixi que aquest tipus de contaminació no es pot produir o bé no pot arribar al producte final, no seria gaire important aquesta recomanació. Els vidres irrompibles no presenten els problemes esmentats.

- En relació a les finestres, les cartel·les interiors i exteriors associades a elles són un element antihigiènic força curiós. En el cas d'existir, es converteixen en el magatzem d'una sèrie d'objectes insòlits i poc higiènics, com ara envasos de begudes, eines, envasos oberts de lubricant, papers, calçat de treballs especials, mostres del producte oblidades i, en tot cas, de pols i bru-

tícia. La forma més pràctica, i d'altra banda l'única eficaç, de netejar aquests magatzems improvisats, (que poden ésser causa directa o indirecta de contaminació del producte) és eliminar la superfície horitzontal. Per això és recomanable l'eliminació de les cartel·les o bé el seu disseny amb una inclinació mínima de 60°, que impedeix d'anar-hi deixant objectes.

– En determinades sales s'hi prohibirà l'entrada directa de llum solar, per a evitar els problemes d'escalfament localitzat, l'efecte hivernacle, o l'acció desfavorable de la llum sobre el producte.

### 3.9. Sostres

Els sostres són moltes vegades ignorats des del punt de vista higiènic. Cal recordar, al respecte, que la pols, greix i vapors presents a l'atmosfera de la sala de treball contactaran amb el sostre, i hi quedaran fixats en part. Aquestes incrustacions, passat un cert temps, aniran desprenent-se de les superfícies del sostre i cauran, amb gran perill de contaminació del producte. Per a evitar tot això, cal que els sostres estiguin recoberts amb materials impermeables, llisos, i dissenyats de forma que se'n faciliti la neteja i s'eviti l'acumulació de brutícia o la formació d'amagatalls per als insectes. Per aquesta raó, per exemple, la pintura intumescent que s'utilitza per a donar protecció contra el foc a les estructures metàl·liques, s'hauria d'evitar, en la mesura del possible, sobretot a les zones de producció, atesa la seva característica fortament porosa, no llisa, i la possibilitat d'escrostonament.

S'evitaran els falsos sostres, ja que poden generar la creació d'un espai, entre ells i la coberta, en què es puguin amagar els insectes i els rosegadors i fins i tot fer-hi el seu habitatge. El problema fonamental de l'espai que queda entre el fals sostre i la coberta és que habitualment no és accessible a les persones, i no pot ésser inspeccionat ni netejat, cosa que possibilita els problemes higiènic assenyalats anteriorment (pensem que un principi higiènic bàsic és evitar l'existència d'espais on no es pugui accedir).

La construcció de falsos sostres accessibles, amb una alçada lliure superior a 2 m, totalment aïllats de l'exterior, amb il·luminació fixa i adequada i limitats per superfícies llises i sense racons, pot servir per a la conducció de fluids de servei (aigua, electricitat, aire comprimit, vapor, etc.), i pot ésser considerada correcta, des del punt de vista higiènic, sempre que s'hi practiqui un programa de neteja i desinfecció adequat i periòdic.

Els elements penjats o sobresortints del sostre (bigues, llums, conduccions, etc.) poden ésser superfícies en què s'acumuli més fàcilment la pols.

En conseqüència, caldrà evitar-ne la implantació, en especial a les sales en què es processa el producte ja que la caiguda de la pols o altres elements de brutícia podria fer-los anar a parar directament dins el producte. En aquest aspecte, és important tenir clar que les lluminàries estaran preferentment encastades al sostre, o bé subjectes directament a ell. Es procurarà que no estiguin penjades (tot i que aquesta mesura pogués suposar un estalvi de llum), per a evitar així l'acumulació de pols en la seva part superior. En el cas que, per motius d'estalvi energètic, en sales amb el sostre molt alt, convingui tenir les lluminàries penjades del sostre per a apropar-les a la zona de treball, el sistema de subjecció serà rígid, per a evitar que el moviment pendular afavoreixi la caiguda de la pols. Igualment, la seva part superior es dissenyarà de forma que la pols no s'hi pugui acumular. En tot cas, els llums estaran protegits per un element que n'eviti la caiguda en cas de trencament.

Pensem que la caiguda d'un llum pot generar la formació de trossets de vidre o l'escampada per la sala de determinats elements tòxics que puguin contenir (com pot ésser el mercuri). Tot això pot constituir un problema higiènic important, que pot implicar, moltes vegades, que s'hagi de llençar tota la producció d'una fabricació o, encara pitjor, la contaminació d'una partida de producte que s'envii al mercat.

De la mateixa manera s'ha de tenir en compte, també, que elements com terrabastalls o passarel·les elevades estaran construïts amb materials continus més que amb reixes foradades, que podrien permetre el pas d'elements contaminants als dipòsits o contenidors o línies de procés situats a la seva part inferior.

Les passarel·les també disposaran d'un sòcol d'uns 10 cm d'alçada que eviti la caiguda de brutícia acumulada a la seva part superior. Les baranes de les passarel·les seran massisses, i en cas d'ésser de perfils buits interiorment, es garantirà totalment el segellament d'aquests. En cas contrari, les cavitats d'aquests perfils servirien d'amagatall i habitatge a determinats insectes.

En el cas de sostres formats per la part inferior de la coberta, és especialment important que l'aïllament tèrmic sigui l'adequat, per a impedir fenòmens de condensació de vapor d'aigua com a conseqüència de la diferència de temperatura entre l'exterior i l'interior de les sales.

### **3.10. Cobertes**

Les cobertes es construiran amb materials no tòxics i de forma que es garanteixi la no entrada d'aigua ni d'altres elements de l'exterior. La coberta

serà resistent a les agressions físiques i químiques que pugui patir, tant des de l'exterior com des de l'interior.

Preferentment seran inclinades, ja que la possibilitat de formació de goteres, si han estat ben construïdes, serà més petita. A través del seu disseny es procurarà que no s'hi acumuli brutícia. Els baixants d'aigua se situaran, sempre que sigui possible, per la part exterior dels tancaments.

### 3.11. Pilars

Els pilars tenen una funció fonamental des del punt de vista estructural de l'edifici. No obstant això, constitueixen un element que pot donar problemes de tipus higiènic quan es troben a l'interior d'una sala. Aquests problemes poden derivar de la limitació de moviments i de posicionament d'equips que ocasiona la presència d'un element inamovible al mig d'una sala; o bé de la brutícia acumulada a les superfícies i racons del pilar. En conseqüència, cal reduir al màxim el nombre de pilars vistos a l'interior de la planta de producció o dels magatzems. En el cas que n'hi hagi, s'ha de procurar reduir al màxim l'existència de punts de neteja o accés difícils en la seva superfície.

Per a aconseguir això, pot ésser adequat seguir els següents criteris:

- \* Procurar que la secció dels pilars sigui circular i, en conseqüència, que la seva forma sigui cilíndrica.

- \* Procurar que l'interior del pilar estigui totalment farcit, no existint-hi cap tipus de cavitat o espai buit que pugui allotjar animals.

- \* El material de recobriment dels pilars serà llis, impermeable i netejable.

- \* Les unions del pilar amb el paviment i el sostre seran arrodonides, tal com ja s'ha indicat per a envans i parets.

- \* Els pilars no encastats es trobaran a una distància mínima de 20 cm de l'envà més proper, per a facilitar la neteja d'ambdós elements, i de l'espai existent entre ells.

### 3.12. Il·luminació

La il·luminació de les sales de processament d'aliments i dels magatzems té un paper important dins la problemàtica del nivell de seguretat higiènica de les instal·lacions. Els elements bàsics d'aquesta afirmació són els següents:

\* Les empreses són gestionades per persones i cal pensar que un principi lligat a la naturalesa humana podria ésser: "únicament es neteja la brutícia que es veu". En conseqüència, una il·luminació correcta i completa pot augmentar les zones visibles i, per tant, contribuir decisivament a un millor estat de neteja de tota la planta.

\* La il·luminació d'una sala té gran influència sobre el grau de cansament de les persones que hi treballen. Un elevat cansament dels treballadors pot afavorir l'aparició de problemes higiènics relacionats amb l'activitat de les persones. En conseqüència una il·luminació adequada, amb colors escaients, pot col·laborar en el bon nivell de seguretat higiènica de la instal·lació.

En relació amb tot això s'ha de procurar potenciar els següents aspectes: evitar les zones d'ombra; evitar els fenòmens d'enlluernament; evitar l'excessiu contrast entre la il·luminació d'unes zones i unes altres de la sala, (en cap cas la diferència d'intensitat d'il·luminació serà superior a cinc vegades la dels voltants); utilitzar colors relaxants i reservar els agressius per a senyalitzar situacions de perill.

Per a acabar aquest punt, volem fer un comentari una mica menys acadèmic, però no per això menys representatiu: una de les eines fonamentals de l'inspector que vigila l'estat de seguretat higiènica és la llanterna. Amb l'ajut d'aquesta, detecta la presència de rosegadors (a través de la seves defecacions), insectes, o brutícia. En conseqüència, si a la planta no existissin racons foscos i zones mal il·luminades, no s'hi trobarien, probablement, els defectes de seguretat higiènica prèviament esmentats.

### **3.13. Ventilació i contaminació ambiental**

La funció de la ventilació és renovar periòdicament l'aire de les sales de treball per a reduir-ne la contaminació en gasos dissolts i partícules en suspensió procedents de l'activitat industrial realitzada.

Per a dur a terme aquesta funció, caldrà disposar de la instal·lació adequada per a fer les renovacions d'aire pertinents. En termes generals, es considera que sis renovacions per hora en treballs sedentaris i deu renovacions per hora en treballs que exigeixin esforços físics superiors als normals són les adequades, com a mínim, per a la ventilació d'una sala de treball tanca (6).

Des del punt de vista higiènic cal tenir en compte que el nivell de contaminació de l'aire que s'aspira a la sala de treball sigui l'adequat i que l'ex-

pulsió de l'aire de la sala de treball a l'exterior no pugui causar cap problema higiènic.

La presència de gasos (aromes, oxidants, vapor d'aigua, etc.) o de partícules en suspensió (pols), pot ésser la causa d'importants problemes higiènics. Aquests elements, per contacte o sedimentació sobre el propi producte o sobre la instal·lació, poden ésser la causa de contaminacions en el producte que es processa o emmagatzema. Per a eliminar-ne l'efecte, cal reduir al màxim la seva concentració i, per a aconseguir-ho, s'hauran de reduir al mínim possible les fonts contaminants de gasos o de partícules en suspensió, i implantar les mesures adequades per a l'extracció localitzada d'aquests en el punt en què es produeixen.

Tanmateix, la presència de microorganismes a l'atmosfera de la sala de treball o del magatzem pot ser causa d'importants problemes de contaminació de l'aliment. Per a controlar-ne la presència a l'aire de les sales cal tenir presents els següents principis:

\* La contaminació microbiològica de l'aire d'una sala és proporcional a la contaminació de les superfícies directament en contacte amb aquest aire. En conseqüència, és absurd pensar a reduir directament la contaminació microbiològica de l'aire si paral·lelament no es redueix la contaminació microbiològica de les superfícies directament en contacte amb aquest.

\* La contaminació microbiològica de l'aire d'una sala serà, com a mínim, igual o superior a la de l'aire que entra a la sala. En conseqüència caldrà controlar, amb rigor, les possibles entrades d'aire a les sales, conèixer la seva procedència i contaminació i, en el cas que sembli oportú, donar-li els tractaments adequats. En aquest aspecte, les sales on convé una contaminació microbiana especialment baixa és recomanable tenir-les totalment tancades, i enviar-hi aire esterilitzat (per filtres, radiació ultraviolada, o altres sistemes) mitjançant impulsió, mantenint en tot moment una petita sobrepressió per a evitar l'entrada d'aire procedent d'altres sales.

No voldríem acabar el punt de la contaminació microbiològica de l'aire sense recomanar, una vegada més, l'aplicació de mesures higièniques harmòniques. En cas contrari, el nivell de contaminació correspondrà a la situació més desfavorable que es doni en relació a la contaminació. També volem recordar que per a resoldre els problemes d'higiene, no es pot desconèixer o ignorar cap dels elements de la instal·lació.

Per a il·lustrar el que estem intentant explicar, no podem resistir la temptació d'exposar el cas que tinguérem ocasió de conèixer en una instal·lació d'envasament que tenia seriosos problemes de contaminació per fongs. Per a resoldre'ls, es condicionà la sala d'envasament (amb la corres-

ponent inversió econòmica que això implica), fins a fer-la totalment estèril; però els problemes de contaminació continuaven existint. Finalment, es descobrí que la causa de la contaminació era l'aire comprimit que, en una modificació feta a la instal·lació, es bufava directament sobre el producte en el moment de l'envasament per a evitar que les molles del producte impedisin una soldadura perfecta de l'envàs. La solució fou senzilla: posar un filtre esterilitzant a la sortida de la línia de l'aire comprimit. Sembla que l'única gran dificultat fou el pensar-hi.

### 3.14. Equips i instal·lacions

L'adequat disseny higiènic dels equips i instal·lacions és un aspecte fonamental de la seguretat higiènica d'una planta de producció. Aquest aspecte arriba al seu grau màxim en el cas de superfícies directament en contacte amb l'aliment.

Segons es cita al document americà 'Sanitary Design' (1), els principis fonamentals del disseny higiènic d'equips i instal·lacions destinades al procés de productes alimentaris, es poden resumir en els punts següents:

1. Totes les superfícies en contacte directe amb el producte alimentari han d'ésser inertes davant aquest, sense intercanviar cap matèria amb ell en les condicions d'utilització.

2. Totes les superfícies en contacte directe amb l'aliment hauran d'ésser llises, no poroses i polides; sense defectes, forats o esquerdes que puguin retenir partícules de producte, bacteris, etc.

3. Totes les superfícies en contacte directe amb l'aliment hauran de poder ésser inspeccionades visualment, o bé l'equip s'haurà de poder desmuntar fàcilment per a la inspecció, o bé estarà demostrat que el sistema de neteja emprat elimina la possibilitat de contaminació per bacteris o insectes.

4. Totes les superfícies en contacte directe amb l'aliment hauran d'ésser fàcilment accessibles per a la neteja i la desinfecció, o bé fàcilment desmuntables. Si s'utilitzen tècniques de neteja sense desmuntatge, haurà de comprovar-se que les superfícies hagin estat dissenyades especialment amb aquest propòsit.

5. Totes les superfícies en contacte directe amb el producte hauran d'estar disposades de manera tal que l'escorriment per gravetat sigui total.

6. Les instal·lacions i equips han d'estar dissenyats de forma que protegeixin de contaminacions exteriors el producte que contenen.



7. L'exterior o les superfícies que no estan en contacte directe amb el producte han d'estar dissenyades de forma que evitin la caiguda de sòlids, líquids i bacteris sobre el producte, així com el seu contacte amb altres equips, terres i parets.

### *Ubicació*

La ubicació dels equips, en relació al paviment, les parets, el sostre i d'altres equips té influència sobre la seguretat higiènica de les plantes de producció. L'existència d'un espai reduït entre els equips, o entre aquests i les parets, el paviment o el sostre que els envolta, pot ésser la causa de la dificultat de neteja de determinades àrees, de l'existència de racons en què s'acumularà la brutícia o bé de la impossibilitat d'inspecció de certes zones. En conseqüència, cal mantenir una distància mínima entre les parts perifèriques dels elements fixos existents en una planta alimentària, de forma que es permeti la neteja, la inspecció i l'accés a totes les superfícies d'aquests.

A títol d'exemple, donarem alguns valors de les distàncies mínimes recomanables entre els equips i els elements fixos dels seus voltants.

\* La distància al paviment dels equips hauria d'ésser, com a mínim, de 15 cm.

\* La distància a les parets dels equips hauria d'ésser, com a mínim, de 90 cm.

\* La distància al sostre o als altres equips hauria d'ésser, com a mínim, de 45 cm.

En el cas que convingui no deixar cap espai entre un dels costats d'un equip i alguna de les parts de la sala en què es troba, cal que la unió entre ambdós sigui completa; que no quedi cap espai lliure on es pugui acumular la brutícia o que pugui servir de refugi als insectes.

### *Materials*

El tipus de material utilitzat i la qualitat de les superfícies són els dos criteris bàsics d'una concepció higiènica dels equips de fabricació (2). En determinar les exigències relatives a les superfícies, sempre hem de tenir en compte si es tracta de superfícies en contacte directe amb el producte o de

superfícies que no ho estan. En aquest sentit la major atenció s'ha de centrar a les superfícies en contacte amb l'aliment, però també és importantíssim satisfer les exigències higièniques de les superfícies no en contacte amb el producte.

Els materials que s'utilitzin en la construcció de l'equip hauran d'ésser de tal naturalesa que es garanteixi que resistiran totes les sol·licitacions físiques i químiques previsibles a través del processament de l'aliment o de la neteja de l'equip. Garantint, en tot cas, la no contaminació del producte que es processa.

En l'elecció, des del punt de vista higiènic, del material o els materials adequats a la construcció d'un equip, s'ha de tenir en compte la combinació d'una sèrie de paràmetres fonamentals que hauran de tenir els materials:

\* La superfície del material ha d'ésser resistent a les agressions químiques del producte processat i dels materials de neteja i desinfecció emprats. En cas contrari es produïria una corrosió progressiva del material que implicaria una contaminació del producte i una progressiva degradació de les superfícies de l'equip que en poc temps hauria d'ésser renovat.

\* La superfície del material ha d'ésser resistent a les agressions físiques i a les sol·licitacions tèrmiques del procés. En cas contrari els fenòmens d'abradió, impacte o altres poden permetre el pas d'una quantitat sensible de material de superfície al producte que es processa.

\* La superfície del material ha d'ésser resistent a les condicions d'humitat i al poder de corrosió de l'atmosfera de la sala de treball en què es trobarà l'equip. En cas contrari es desencadenarà un procés de corrosió que pot ocasionar greus contaminacions en el producte i, en tot cas, escurçar sensiblement la vida útil de l'equip.

\* Sota cap concepte, el material utilitzat pot ésser tòxic, o contenir elements tòxics. En cas contrari, les possibilitats que aquests arribessin a parar dins el producte processat, encara que fossin molt baixes, serien prou elevades per a recomanar rigorosament la seva no utilització.

\* La rugositat de la superfície del material ha d'ésser adequada al procés que es duu a terme i a les necessitats del sistema de neteja implementat. Qualsevol superfície aparentment llisa, en realitat no ho és. De fet, si l'examinem amb un microscopi de suficients augments, hi observarem l'existència d'ondulacions o irregularitats (vegeu la figura 4). La rugositat és la magnitud que defineix i mesura aquest fenomen i dona informació sobre la grandària de les irregularitats de la superfície, que la fan allunyar-se del concepte de superfície llisa ideal.

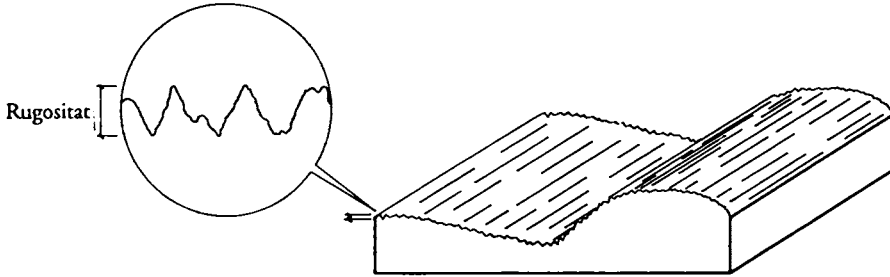


FIGURA 4. Representació esquemàtica de la superfície

Hi ha dos paràmetres per a mesurar la rugositat de les superfícies, segons la norma ISO/R68 o British Standard BS 1134/1972 (3):

$R_a$ : Desviació tipus.

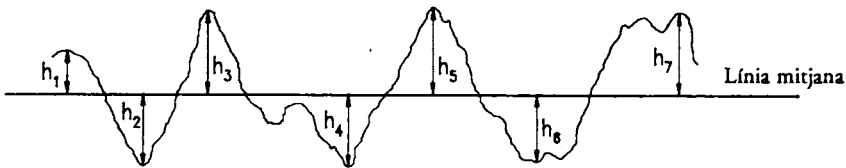
És el valor mitjà aritmètic de la desviació entre el perfil i la línia de referència (línia mitjana central), tot al llarg de la mostra estudiada (vegeu la figura 5).

$R_z$ : Alçada de deu punts d'irregularitats.

És la distància mitjana entre els 5 pics més alts i les 5 depressions més profundes en la línia prescrita de mostreig, mesurades des d'una línia paral·lela a la línia de referència que no creua mai el perfil (vegeu la figura 6).

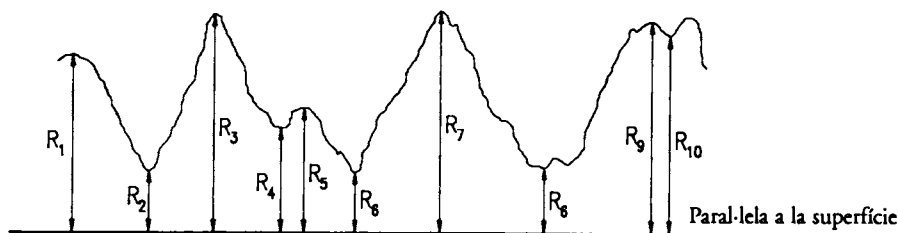
Ambdós valors s'expressen en  $\mu\text{m}$ .

En general es pot afirmar que com més petita sigui la rugositat, més petita serà l'adherència del producte sobre la superfície i més fàcil la seva



$$R_a = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n}{n}$$

FIGURA 5. Representació esquemàtica de la rugositat calculada com a desviació tipus ( $R_a$ )



$$R_z = \frac{(R_1 + R_3 + \dots + R_9) - (R_2 + R_4 + \dots + R_{10})}{5}$$

FIGURA 6. Representació esquemàtica de la rugositat calculada com l'alçada de 10 punts d'irregularitat ( $R_z$ )

neteja. A les instal·lacions netejades per sistemes sense desmuntatge es recomana (4) que la rugositat sigui inferior a 1,6  $\mu\text{m}$ .

El Real Decreto 397/1990 (5) dona la següent relació de materials autoritzats per a l'ús en contacte amb els aliments i productes alimentaris, utilitzables, per tant, en la construcció d'equips per a la indústria alimentària:

“3.1. Metales y sus aleaciones:

- a) Metales nobles, níquel y cromo.
- b) Aluminio y sus aleaciones.
- c) Fundición y acero moldeado, forjado o laminado.
- d) Acero recubierto de cromo, estaño o zinc.
- e) Aceros inoxidable.
- f) Hojalatas electrolíticas o estañadas en caliente.
- g) Zinc y sus aleaciones.
- h) Estaño y sus aleaciones.
- i) Cobre y sus aleaciones.

3.2. Vidrio, cerámica, mármol y cemento:

- a) Vidrios: vidrio, vitrocrystalinos, cristal y otros vidrios al plomo.
- b) Materiales cerámicos, porcelana, vitreus, lozas, azulejos y otros materiales cerámicos de construcción, gres y alfarería, recubiertos o no de esmaltes cerámicos.
- c) Metales recubiertos de esmaltes cerámicos vitrificados.
- d) Mármol y otros materiales pétreos.
- e) Derivados del cemento.

### 3.3. *Compuestos celulósicos:*

a) *Papel y cartón, impregnado o no.*

b) *Película de celulosa regenerada.*

c) *Materiales estratificados compuestos por varias capas de diferente naturaleza, en los que la capa que confiera las propiedades mecánicas sea de naturaleza celulósica.*

### 3.4. *Maderas, corcho, cueros y pieles y fibras naturales:*

a) *Madera.*

b) *Corcho.*

c) *Cueros y pieles.*

d) *Tejidos y fibras vegetales o animales.*

### 3.5. *Materiales varios:*

*Productos aportados en la soldadura, pegado, sellado, ensamblado y otras operaciones análogas utilizadas en buena práctica de fabricación."*

Això, amb tot, no suposa, en cap cas, que tots aquests materials estiguin indicats en la construcció de tot tipus d'equips per a la indústria alimentària. En cada cas s'hauran de cercar aquells materials més idonis a la construcció de cada equip o instal·lació en particular. Molts dels materials indicats en la relació anterior, com ara: coure, fusta, suro, cuir o teixits vegetals, estan indicats únicament en situacions molt particulars, i en tots els altres casos estan totalment contraindicats, atesa la contaminació que podria provocar la seva utilització.

En conseqüència, recomanem al lector que, abans de triar els materials, estudiï bé les condicions de funcionament i neteja dels equips o instal·lacions, i les característiques particulars d'aquells entre els quals vulgui fer la tria.

Únicament a manera d'exemple, a l'apartat següent donarem algunes dades generals d'alguns dels materials emprats en la construcció d'equips alimentaris.

#### a) *Acers inoxidables*

Les superfícies en contacte amb el producte són, moltes vegades, d'acer inoxidable o d'algun altre material amb resistència similar a la corrosió.

Els acers inoxidables són, en essència, aliatges de crom i ferro, o de crom, ferro i níquel amb, en alguns casos, petites addicions de molibdè i titani, per tal d'imprimir-los determinades propietats físiques, químiques o mecàniques. De forma general, es pot dir que el caràcter inoxidable d'aquest tipus de material és tant més gran com més elevat és el seu contingut en crom.

Les característiques genèriques que aconsellen la utilització de l'acer inoxidable són:

- Resistència a les accions corrosives de la majoria dels productes manipulats a la indústria alimentària, com a conseqüència de la formació d'una fina pel·lícula d'òxid de crom, que passiva la superfície per simple contacte amb l'oxigen de l'aire.

- Inalterabilitat i duració.

- Elevada resistència mecànica, que permet suportar fortes càrregues.

- Fàcil polibilitat, que permet obtenir, en processos de neteja, residus bacterians similars als del vidre o porcel·lana (materials considerats com els més llisos, però que són, en realitat, altament fràgils).

- Nul·la contaminació dels productes.

- Notable contribució a la disminució del pes de l'obra en conjunt, ja que les seves característiques mecàniques són molt superiors a les d'altres materials emprats correntment en la construcció, i es poden emprar, en conseqüència, en gruixos mínims.

Per la seva estructura cristal·lina, els acers inoxidables es classifiquen en tres grans grups:

- Martensfítics

Són, en general, aliatges de crom i ferro, en unes proporcions de crom que poden variar entre 11-18%. El contingut de carboni pot variar entre 0,1-1,2%. La seva propietat característica és la seva trempabilitat.

Són acers especialment indicats per a les aplicacions que requereixen una elevada duresa o resistència. Per contra, són els acers menys resistents a la corrosió.

- Ferrfítics

Són aliatges de crom i ferro, amb el contingut de crom de l'ordre del 15 al 27 per cent. El contingut en carboni, en general, és menor del 0,12 per cent.

Són acers no trempables, però són més resistents a la corrosió i l'oxidació que els anteriors, fins i tot a altes temperatures.

- Austenfítics

Són aliatges de níquel (del 6 al 26 per cent), crom (del 16 al 30 per cent) i ferro. El contingut en carboni és variable per a cada tipus (comprès entre el 0,03 i el 0,25 per cent).

No són acers trempables, però presenten una bona ductilitat, i són els que reuneixen millors condicions de resistència a la calor i a la corrosió.

Normalment, els acers inoxidables més utilitzats a la indústria alimentària són els acers d'estructura austenfíca: AISI 304, AISI 316 o AISI 321, ja que

pel seu contingut en níquel són més resistents a la corrosió i són, a més, fàcilment soldables i mal-leables, i conserven les seves propietats fins i tot a temperatures realment baixes.

El tipus AISI 304 s'utilitza normalment externament, per a protegir els equips de l'atmosfera, l'aigua i en algun cas concret dels líquids que puguin esquitxar. A les parts dels equips i instal·lacions que estan en contacte amb el producte, aquest tipus d'acer inoxidable tolera la majoria d'aliments que no contenen àcids i també les solucions de neteja més comunes.

El tipus AISI 316 s'utilitza per a les parts en contacte amb aliments més agressius com suc de fruites, vinagres o salses, o bé parts sotmeses a una neteja amb elements més corrosius.

El tipus AISI 321 s'utilitza en totes les aplicacions del 304 on es necessiti una soldadura més forta i duradera.

#### *b) Gomes i plàstics*

Les gomes i plàstics es poden utilitzar, primordialment, com a juntes, sempre que siguin prou resistents al producte, a les baixes temperatures, i als agents de neteja i desinfecció. En el cas d'utilització d'aquests elements, és fonamental comprovar prèviament que no es produeixi cap migració, de monòmers o additius continguts en el plàstic, cap a l'aliment.

#### *c) Casos particulars*

Finalment, i com a casos concrets, s'han de citar alguns dels materials que no s'haurien de fer servir mai a una indústria alimentària, excepte en ocasions molt comptades, per raons higièniques:

– Materials porosos com la fusta són difícils de desinfectar i assecar. Se n'ha d'evitar la utilització en elements auxiliars com són els mànecs de ganivets, serres, etc., als pilons, taules i d'altres elements on habitualment s'hi ha utilitzat aquest material.

– Materials tòxics com el plom o el cadmi s'haurien d'eliminar totalment de la indústria alimentària, ja que poden anar a parar al producte (en aquest sentit, s'haurien de substituir totes les canonades de plom, pintures a base de plom o esmalts que continguessin antimoni, per elements equivalents, exempts de materials tòxics).

### *Alguns exemples concrets*

Amb la intenció d'aportar alguns exemples concrets de l'aplicació dels criteris higiènics al disseny d'equips i instal·lacions, i de proposar alguns elements de reflexió sobre els equips i instal·lacions més habituals a la indústria alimentària, hem inclòs en aquest capítol alguns comentaris sobre aquests últims.

#### *a) Canonades*

El material de què estiguin construïdes s'adaptarà als principis de la higiene esmentats a l'apartat Materials d'aquest capítol.

La part interior de les canonades, en contacte directe amb el fluid que transporten, serà totalment llisa, sense racons ni sortints, i amb la rugositat adequada. Per a afavorir aquests punts, els tubs i colzes metàl·lics es construiran per estirament del material i no per corbament i soldadura. En cas d'unió de tubs a través de la soldadura, aquesta es farà de forma que quedi totalment llisa, tant per la part interna com per l'externa. Això només es podrà aconseguir mitjançant la utilització d'equips especialitzats en aquesta funció. La secció més adequada serà la circular i es procurarà que la canonada tingui secció constant en tot el seu recorregut. Aquesta recomanació únicament es podrà obviar en el cas que sigui un condicionant del procés a dur a terme i quedi garantida totalment la seva neteja.

Les unions desmuntables entre trams i elements que componen les canonades es reduiran al mínim possible. Cada unió és un punt crític en què es poden donar problemes higiènics com a conseqüència de l'acumulació de brutícia i microorganismes. En aquest sentit, cal recordar que la probabilitat que es doni un accident higiènic en una instal·lació és igual a la suma de les probabilitats que es doni un accident d'aquest tipus en cada un dels elements que la componen. Les unions, en conseqüència, s'han de fer de tal manera que la part interna de la canonada quedi totalment llisa, contínua i estanca, i mantingui la mateixa secció que la resta. Els mecanismes d'unió –rosques, cèrcols de pressió, etc.– es trobaran sempre a la part exterior. En aquesta qüestió és recomanable recórrer als models de disseny inclosos a les diverses normes descrites pels diferents organismes de normalització nacionals i internacionals que existeixen. A títol d'exemple adjuntem a la figura 7 un model d'unió higiènica normalitzat.

El nombre mínim d'unions desmuntables serà funció del sistema de neteja i de la freqüència d'utilització de la instal·lació:



– En el cas de sistema de neteja manual, serà convenient que tots els colzes siguin desmuntables i que els trams rectes no tinguin una longitud superior als dos metres. En cas contrari, el procés de neteja i d'inspecció seria massa dificultós.

– En el cas de canonades netejades per circuit tancat, el nombre d'unions desmuntables es reduirà a les mínimes per a permetre el muntatge de la instal·lació i per a permetre d'inspeccionar-ne els punts crítics.

Les juntes de les unions seran de material higiènic i estaran supeditades al programa de manteniment de la instal·lació, que en preveurà la substitució, programada en funció de les seves característiques i de les del procés dut a terme.

Les canonades es fixaran a través de suports rígids que evitin el seu arquejament. L'arquejament a les canonades és un fenomen desfavorable des del punt de vista higiènic, ja que originaria la formació de bosses a l'interior i acabaria impedit l'escorriment total d'aquestes. La distància màxima entre els suports serà funció del tipus de material de la canonada, de l'espessor i del pes.

Totes les canonades s'instal·laran amb un pendent mínim de l'1%. En el seu punt més baix s'hi instal·larà una sortida de drenatge i s'evitarà la

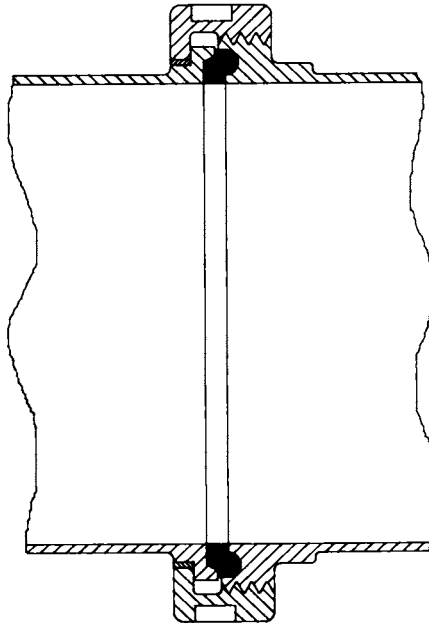


FIGURA 7. Detall d'una unió de canonades

formació de bosses que no permetin l'escorriment total per gravetat, o la implantació de vies sense sortida.

Les canonades s'instal·laran a una distància mínima de 10 cm de la paret, del sostre, dels equips o d'altres canonades. La seva distància mínima al terra serà de 20 cm. En cas contrari s'afavoriria la formació de racons o dificultats d'accés, contraris als interessos de la higiene. En el cas de canonades que circulin paral·lelament al paviment i separades de les parets o dels equips, es recomana, per a evitar dificultar el pas de les persones, que s'instal·lin preferentment a més de dos metres del paviment o, en cas necessari, entre 20 i 40 cm del paviment.

Les canonades que travessin envans o forjats, hi han d'estar totalment encastades o bé els han de creuar a través d'una obertura suficientment gran per a permetre'n la neteja i la desinfecció.

#### *b) Contenidors i dipòsits*

La superfície dels contenidors i els dipòsits serà llisa, sense racons ni sortints, i dotada de la rugositat adequada. La seva secció més idònia serà la circular. Les seccions el·líptiques, o rectangulars amb els cantons arrodonits (amb una radi de gir mínim de 3 cm), es podran utilitzar quan sigui convenient.

La forma més adient per als fons de dipòsits i contenidors serà la cònica o l'esfèrica. El fons serà inclinat, amb un pendent mínim del 4%, i dotat d'un punt més baix on s'hi situarà un conducte de sortida, equipat amb una vàlvula adequada. En aquest aspecte, és important comprovar que el conducte de sortida no sobresurt per damunt del nivell de la superfície del fons, en el seu punt més baix (vegeu la figura 8). En cas contrari s'impediria el drenatge total del dipòsit.

Tots els dipòsits i contenidors disposaran d'una tapa que protegeixi totalment el producte contingut. La forma de la tapa serà preferentment cònica, circular o oval (també podrà ésser plana, amb els cantons arrodonits), i d'una sola peça, i es preveurà quina serà la seva posició o localització quan estigui oberta. La vora de les tapes sobresortirà del perímetre del dipòsit o contenidor, corbant-se, amb l'angle adequat, per a evitar que les impureses o líquids que poguessin haver-hi a sobre puguin entrar a l'interior del contenidor (vegeu la figura 9). En el cas de tapes de dues peces, s'evitarà que la brutícia que hi pugui haver damunt entri dins el dipòsit durant l'obertura de la tapa. Per això es protegirà la línia d'eix de gir a través d'una visera dissenyada adequadament.

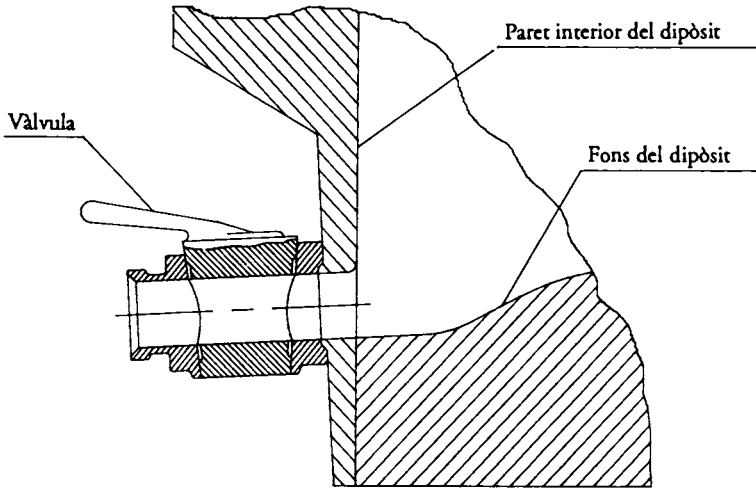
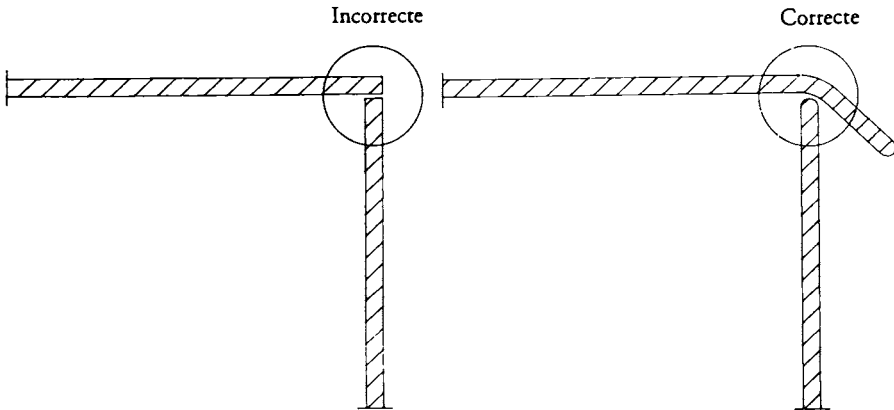


FIGURA 8. Disseny d'una sortida de dipòsit

Es procurarà que el nombre d'unions sigui el menor possible. Les unions es realitzaran preferentment mitjançant soldadura per testa, polint-se a continuació per les dues cares, fins a deixar la superfície totalment plana i amb una rugositat comparable a la de la resta del material. En cas de no ésser possible la soldadura per testa, es farà per superposició de les planxes a través d'un cordó ampli de soldadura, que es polirà, formant un pla incli-

FIGURA 9. Detall de l'extrem d'una tapa de dipòsit o contenidor  
(cedit per CEINAL, S.A.)

nat entre les dues planxes i arrodonit a les línies de trobada. El material de soldadura tindrà les mateixes característiques higièniques i resistents que la resta del material (inert enfront del producte i els fluids de neteja i desinfecció, resistència a la corrosió, resistència mecànica, etc.). Les unions de les superfícies directament en contacte amb l'aliment no es faran a través de cargols ni reblons, que determinarien la implantació de racons de difícil accés i neteja, i que, a més, podrien caure dins el producte com a conseqüència del seu desprendiment accidental.

Les juntes per a donar hermeticitat a determinats elements mòbils o desmuntables dels dipòsits o contenidors seran de material inert enfront el producte i també enfront les solucions de neteja i desinfecció. Aquestes juntes se situaran en cavitats dissenyades higiènicament, de forma que evitin l'acumulació de brutícia i permetin una fàcil i completa neteja i inspecció.

En el cas de contenidors apilables, s'evitarà que els elements contaminants que pugui arrossegar la part inferior del contenidor elevat puguin anar a parar a l'interior del contenidor situat sota seu.

És important pensar, en el cas de dipòsits, que aquests disposen d'un orifici que permet l'entrada o sortida de l'aire per a compensar la pressió durant la sortida o entrada del producte. L'esmentat orifici cal que estigui adequadament protegit per a evitar l'entrada de contaminació al dipòsit. Aquesta protecció variarà en funció del nivell de contaminació requerit a l'interior, i podrà anar des d'una protecció enfront l'entrada de pols directa o insectes, que podria ésser una malla del mateix material del dipòsit o equivalent, situada en un dispositiu o conducte que eviti la caiguda directa de líquids o pols en el dipòsit, fins a una protecció enfront l'entrada de tot tipus de partícules i microorganismes, que podria ésser la instal·lació d'un filtre esterilitzant de 0,2  $\mu\text{m}$  de porositat, dins un conducte adequat, a través del qual s'hi enviaria aire net amb una determinada sobrepressió.

### *c) Remenadors*

Els remenadors es construïran amb el mateix material que el dipòsit en què es troben, o bé amb un material de característiques funcionals i higièniques equivalents. La seva superfície serà llisa, amb una rugositat igual o equivalent a la del material del dipòsit, i sense racons ni cavitats on s'hi pugui amagar la brutícia.

El seu eix es construirà, preferentment, amb una barra massissa. En el cas que l'eix es construeixi amb un tub buit per dins, es podria donar

un greu accident de contaminació microbiològica com a conseqüència d'una perforació del tub o d'una unió no estanca. En aquest cas, el producte podria entrar a l'interior de l'eix, i restar dins seu indefinidament, sense possibilitat d'ésser netejat ni desinfectat. Aquest fet seria el si d'un important creixement de microorganismes, que contaminaria constantment el producte a través del punt de comunicació entre l'interior de l'eix i l'interior del dipòsit. Per això es recomana que el tub sigui preferentment massís.

Per les mateixes raons que s'han exposat en el cas dels contenidors i dipòsits, totes les unions fixes es faran per soldadura, i s'evitaran els cargols i reblons.

Els remenadors se situaran, sempre que sigui possible, amb el motor i reductor fora del dipòsit, i l'entrada de l'eix es localitzarà a la part superior del dipòsit. En cas contrari s'haurà d'implantar un sistema que permeti, de

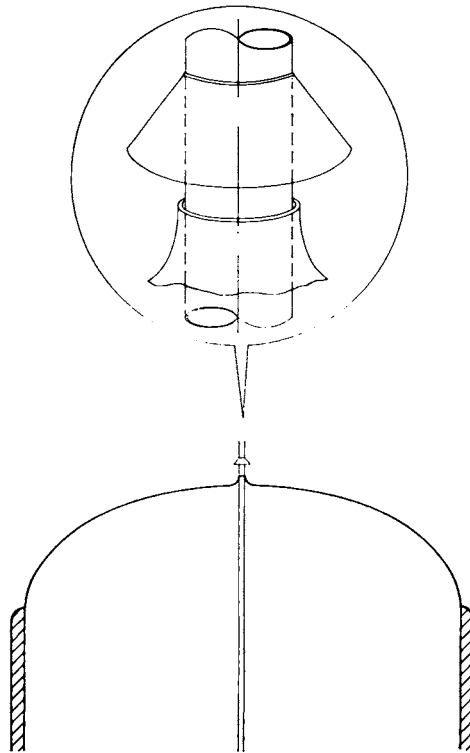


FIGURA 10. Visera protectora de l'eix remanador d'un dipòsit (cedit per CEINAL, S.A.)

forma higiènica, fer hermètic el pas d'un eix que gira, a través d'una paret estàtica.

El remenador s'haurà de dissenyar de forma que es pugui netejar i desinfectar eficaçment, mitjançant un sistema de neteja sense desmuntatge. En cas contrari s'haurà de poder extreure fàcilment i serà netejable de forma manual i totalment inspeccionable.

El seu disseny ha de garantir la impossibilitat que l'oli de lubricació de la caixa de reducció de la velocitat de rotació del motor elèctric que impulsa el remenador, pugui contaminar l'interior del dipòsit. Per això és recomanable la implantació de dispositius com el que es mostra a la figura 10. Aquest pot ésser un bon exemple per a demostrar que les proteccions higièniques són fonamentalment una qüestió de tenir les idees clares, pensar-hi en el moment de dissenyar l'equip i posar-hi una mica d'imaginació. Per això, el cost de construcció de l'equip de forma higiènica no ha d'ésser sempre necessàriament més car.

#### **4. HIGIENE DEL PERSONAL**

Les persones que es troben presents en una planta de processament d'aliments (ja siguin treballadors, mecànics o visitants), poden ésser una causa directa o indirecta de la contaminació d'aquests. Per a poder minimitzar el seu impacte, cal conèixer bé els diversos tipus de contaminació que es poden ocasionar. Tot seguit intentarem presentar alguns dels aspectes principals d'aquest fenomen, i donar les claus per a la seva solució.

##### **4.1. Les persones com a font de microorganismes**

Tant les persones sanes com les malaltes són portadores d'una àmplia gamma de microorganismes. Els llocs on es localitzen, preferentment, aquests microorganismes són: la cavitat intestinal, la cavitat buco-nasal, els furòn-cols i les ferides, el cabell, la superfície de la pell, la roba i les sabates.

En considerar la possible contaminació microbiològica produïda per les persones que es troben en una planta alimentària, és important diferenciar entre l'aportació de microorganismes patògens i l'aportació de microorganismes banals. Així, doncs, les persones afectades d'una malaltia transmissible, d'origen víric o microbià, poden ésser una causa potencial de contaminació dels aliments que s'estan processant. Per a eliminar aquesta possibilitat,

és del tot recomanable que s'eviti la seva presència en qualsevol sala de treball o local annex que pogués permetre algun tipus de contaminació directa o indirecta.

Les persones a què ens estem referint no tenen per què estar malaltes. Determinades persones sanes poden ésser causa de contaminació amb microorganismes patògens o tòxigens. Aquestes persones reben la denominació de "portadors". Els principals models que es coneixen d'aquest fenomen són els "portadors de *Staphylococcus aureus*" i els "portadors de *Salmonella*":

– Els primers, que representen entre el 20-30% de la població dels països occidentals, són persones perfectament sanes que posseeixen, en la flora microbiana de la mucosa de les fosses nasals, *Staphylococcus aureus*. Aquest microorganisme, com coneixerà el lector, pot produir una toxina entèrica en créixer al si de determinats aliments.

- Els portadors de *Salmonella*, d'altra banda, són molt menys nombrosos que els de *Staphylococcus aureus* i representen menys del 0,2% de la població activa. Aquestes són persones que prèviament han patit una infecció causada per *Salmonella* en el seu organisme i que continuen excretant *Salmonella*, en la seva femta, durant un cert període, que pot oscil·lar d'unes setmanes a uns pocs mesos, un cop superada la malaltia.

En el cas dels "portadors", cal establir una política de control d'aquestes persones i l'aplicació de les mesures de protecció pertinents. Això serà especialment aconsellable en totes aquelles instal·lacions on es processin aliments en què sigui possible el creixement dels microorganismes indicats, o bé aliments que, encara que no permetin el creixement d'aquests microorganismes, no rebin posteriorment cap tractament que en garanteixi la destrucció.

Les persones amb furúncols o ferides cal sotmetre-les a una disciplina especial, consistent en la supervisió del cas per una persona especialitzada i en l'establiment de les mesures oportunes per a garantir que no es produirà cap tipus de contaminació a l'aliment.

#### 4.2. Els hàbits higiènics

El coneixement i la pràctica de determinats hàbits higiènics serà un puntal fonamental per a reduir al màxim la probabilitat que es produeixin contaminacions causades per les persones que treballen en una planta alimentària.

Els hàbits higiènics formen part de la cultura de les persones. En el cas que convingui modificar aquests hàbits en algunes de les persones, cal explicar: les raons que els justifiquen (formació), els nous hàbits a adoptar (informació de les especificacions concretes i mitjans per a dur-les a terme), i el perquè de la conveniència d'adoptar-los (motivació). Si no es duen a terme eficaçment aquests tres aspectes, es corre un risc elevat que els hàbits higiènics que es volien incorporar a la cultura de les persones fracassin totalment. Únicament a títol d'introducció, ja que l'objectiu d'aquest capítol no és el de parlar de psicologia humana, direm que la seva consideració és fonamental per a l'èxit en qualsevol qüestió que afecti les persones; i que les persones difícilment acatem, a la llarga, disposicions dictades en forma d'imposició sense cap justificació que les sostingui, ni cap motivació positiva per a dur-les a terme. Afirmar que no es poden explicar les bases i raons que justifiquen determinats hàbits higiènics a determinades persones, atesa la seva escassa formació acadèmica, possiblement sigui propi de persones que coneixen poc profundament aquestes bases.

A continuació presentarem alguns dels principals aspectes a cuidar, dins els hàbits higiènics de les persones que treballen en una planta de processament d'aliments o que senzillament manipulen aliments:

\* Cal que s'extremi les pràctiques de neteja corporal. D'entre elles cal destacar: la dutxa i neteja del cabell (com a mínim diària). La neteja de les parts del cos no cobertes per la vestimenta, en especial les mans, just abans d'entrar a les sales de treball. La neteja immediata d'aquelles parts del cos que s'embrutin com a conseqüència de l'activitat laboral. La neteja de les mans, abans i especialment després d'anar al servei.

\* Cal portar les ungles retallades al màxim. L'espai que queda entre la part superior de les ungles i la pell és un espai on s'acumula fàcilment la brutícia i pot constituir una font important de contaminació.

\* Els cabells curts i recollits disminueixen la probabilitat de contaminació. La barba o el bigoti augmenten aquesta probabilitat.

\* Cal no dur cap ornament corporal, com anells, arracades, collarets, braçalets, rellotges, agulles, ungles i pestanyes postisses, etc., ja que es poden desprendre, sencers o una part d'ells, i contaminar el producte. Aquests ornaments tampoc no són recomanables des del punt de vista de seguretat de les persones, ja que les estadístiques d'accidents laborals estan plenes de referències a alguns d'aquests ornaments com a causa de l'accident, en haver quedat fortament enganxats a una part mòbil de l'equip. Per si algú ho volgués dubtar, les estadístiques de la no qualitat dels productes també descriuen els ornaments com a causa d'importants reclamacions



fetes pels consumidors, a causa de la troballa d'un d'aquests elements en el producte.

\* En el cas de portar ulleres, lentilles o altres elements necessaris per a corregir la visió, cal que es garanteixi que ni l'element en qüestió ni cap de les seves parts podrà desprendre's i anar a parar al producte que es manipula.

\* Cal que s'evitin els maquillatges sobre la pell, les laques d'ungles i els perfums. En cas contrari, tant els uns com els altres poden acabar contaminant el producte que es processa.

\* La vestimenta i les sabates laborals només s'utilitzaran dins les sales de treball, es faran servir adequadament, i es netejaran amb la freqüència adequada. Igualment, es respectaran totes les altres instruccions que tinguin relació amb la seguretat higiènica de l'aliment, del procés, o de les instal·lacions.

\* Cal no menjar, mastegar xiclet, beure ni fumar a les sales de treball. Si això es fa, la probabilitat de contaminació a partir de les restes de menjar o saliva, olors, envasos o burilles és molt elevada.

\* Cal eliminar els hàbits poc higiènics com ara rascar-se el cabell, les orelles o el nas, o en general qualsevol part del cos. En cas contrari es produiria una contaminació de les mans a partir d'aquests elements, i augmentaria la probabilitat de contaminació del producte.

### 4.3. La vestimenta de treball

La vestimenta de treball té una gran significació des del punt de vista de la higiene. A continuació intentarem fer un repàs dels seus aspectes més importants.

La contaminació de totes les superfícies d'una sala de treball ha d'adequar-se a l'activitat que s'hi duu a terme. En la mesura que, tant la pell com la roba de treball de les persones que hi treballen, són part d'aquesta superfície, aquests elements han de complir també aquesta condició. Per això és recomanable rentar-se les parts de la pell sense cobrir, especialment braços i mans, abans d'entrar a la sala de treball; i posar-se sabates i roba específica per a usar únicament dins aquestes sales. No fer cas d'aquestes recomanacions implica la incorporació a la sala de treball de brutícia i altres elements contaminants, des dels altres ambients amb què estan en contacte les persones (domicili particular, animals domèstics, transports públics, bars, cantines, etc.).

La roba de treball ha d'ésser completa, i ha d'incloure com a mínim, mitjons, pantalons, jaqueta i gorra. Algunes de les característiques que, des del punt de vista higiènic, ha de tenir aquesta vestimenta, són:

\* Estar confeccionada amb un teixit de colors clars i fàcilment netejable. Això permetrà una fàcil constatació de la presència de brutícia i facilitarà el procés de la neteja.

\* La vestimenta cobrirà la major part del cos possible. D'aquesta forma es minimitzarà la influència de la contaminació associada a la superfície de la pell. Es procurarà evitar que les persones treballin sense jaqueta o amb pantalons curts.

\* La vestimenta estarà dissenyada de forma senzilla. Serà totalment llisa per la part exterior, i ajustada al cos. Es procurarà que el final de les mànigues estigui totalment ajustat al canell. Un element elàstic col·locat a l'interior pot ésser adequat per a aquesta finalitat. Com més complicacions exteriors tingui la vestimenta, més fàcilment s'hi acumularà la brutícia. Igualment, si la roba no està ajustada al cos, anirà fregant amb més freqüència per les superfícies de la instal·lació, s'embrutarà més fàcilment i augmentarà el risc de contaminar el producte, així com el risc de seguretat personal enfront d'elements mòbils de la instal·lació.

\* No tindrà cap butxaca a la part exterior. La presència de butxaques a la part exterior determinarà un increment, molt important, de la probabilitat de contaminació del producte a partir dels objectes variats (bolígrafs, targetes, papers, clips, eines, etc.) que puguin estar dins una butxaca. Tots aquests elements poden caure, amb molta facilitat, quan la persona s'ajup.

\* No tindrà botons, gafets, ni altres elements que es puguin desprendre accidentalment.

\* La gorra protegirà la totalitat de la superfície del cabell, per a evitar-ne la caiguda sobre el producte. En el cas de persones que portin barba, aquesta es protegirà adequadament. Una funda en forma de careta agafada amb gomes a les orelles pot fer aquesta finalitat. És important ressaltar que les gorres que no cobreixen la totalitat del cabell tenen una eficàcia molt reduïda en relació a la finalitat apuntada en aquest punt. Les xarxes que recullen la totalitat del cabell poden ésser usades amb eficàcia per a evitar la contaminació dels aliments amb cabells.

\* En determinades activitats, serà recomanable utilitzar caretes que evitin la contaminació procedent de la boca o de les fosses nasals.

Les sabates han d'ésser adequades a l'activitat a dur a terme. Es procurarà que la sola estigui adaptada al tipus de paviment de la sala de treball i a les seves característiques lliscants. També es procurarà que les sabates protegeixin la totalitat del peu enfront de topades o de la caiguda de materials. El material de les sabates serà fàcilment netejable i, en funció del tipus de treball, impermeable. La seva forma evitarà l'acumulació de brutícia o fang.

S'eliminaran tots aquells elements de les sabates que es puguin desprendre, per a evitar que puguin contaminar el producte.

Finalment cal apuntar que el disseny de la totalitat de la vestimenta s'ajustarà als condicionants de: còmode, funcional i d'estètica agradable. Cal tenir present que haurà d'ésser utilitzada per persones; i que aquestes presentem uns condicionaments especials, lligats a la nostra forma d'ésser, que caldrà tenir en compte.

#### 4.4. Serveis complementaris i context relatiu al personal

Les característiques dels serveis complementaris del personal i dels ambients on es desenvolupa la seva activitat tenen una gran influència sobre la probabilitat que es produeixi una contaminació causada per les persones que treballen en una planta.

Si les instal·lacions al servei del personal (vestuaris, serveis, etc.) no són les adequades o no tenen el nivell de neteja adequat al grau d'exigència del comportament del personal dins la planta, és poc probable que la motivació del personal sigui l'apropiada per a seguir els requeriments de les diferents especificacions higièniques que l'afecten.

Per tot això és força recomanable posar a disposició del personal les instal·lacions oportunes a les seves necessitats i procurar que les condicions i l'ambient de treball siguin el més apropiats possible.

Com hem indicat a l'apartat 4.2, la motivació de les persones és bàsica perquè aquestes es comportin seguint les pautes higièniques previstes per les especificacions del procés. A continuació, indicarem alguns aspectes dels serveis complementaris del personal i de l'ambient on es porta a terme el treball, que tenen significació en el grau de seguretat higiènica d'una planta de producció:

\* Les instal·lacions generals de la planta de producció es mantindran en bon estat de conservació i de neteja. El disseny, la funcionalitat, la il·luminació, el soroll, el color, l'olor i la temperatura seran adequats. En cas contrari, el nivell de cansament de les persones que hi treballen assolirà ràpidament valors elevats, i farà disminuir la motivació per a les qüestions higièniques i el rendiment i l'eficàcia en el treball.

\* Les situacions de conflicte laboral poden reduir el nivell de seguretat higiènica de la planta, en el cas que poguessin influir en el grau de motivació d'algunes persones sobre aquestes qüestions.

\* Els vestuaris han d'ésser amplis ( $2 \text{ m}^2$  per cada persona, com a mínim, i l'alçada del sostre de 2,30 m (6)), nets, i convenientment il·luminats, ven-

tilats i equipats. Han de disposar d'un armari per a la roba de treball i d'un altre per a la roba de carrer; ambdós, amb separació per la roba i les sabates. La part superior dels armaris ha d'estar dissenyada de forma que impedeixi l'acumulació d'objectes inútils o de brutícia. Una inclinació de 45° pot ser adequada a aquesta finalitat. Als vestuaris, ha d'existir també el nombre suficient de dutxes i lavabos totalment equipats. Tant els uns com els altres es dissenyaran de forma que la funcionalitat en sigui òptima. Es procurarà que l'estat de neteja dels vestuaris sigui permanentment correcte.

La situació dels vestuaris en possibilitarà l'entrada des del carrer, sense necessitat de passar per cap de les sales de treball. La porta dels vestuaris mai no connectarà directament amb cap sala de treball. El recorregut des del vestuari fins a la sala de treball no travessarà per cap sala amb una contaminació superior a la primera. En cas de plantes de producció amb activitats de contaminació molt diferents, pot ésser adequada la instal·lació de vestuaris separats per als treballadors de cada una d'aquestes activitats. Si no es fa així, la probabilitat de contaminacions creuades pot ésser elevada.

\* Els lavabos han d'estar instal·lats a indrets adequats (vestuaris; a l'entrada de les sales de treball; a l'interior de les sales, en llocs propers a les persones que els han d'utilitzar, etc.). No seran accionables amb les mans, ja que en cas contrari les mans es tornarien a embrutar en tancar l'aixeta una vegada finalitzat el rentat i l'aixeta estaria permanentment bruta, deixant de motivar les persones a netejar-se en aquell lavabo. Disposaran d'aigua freda i calenta regulable a voluntat o bé d'aigua tèbia. Seran fàcilment netejables i es mantindran en permanent bon estat de neteja i equipament.

Disposaran de sabó, preferentment líquid, i per a evitar els problemes ja esmentats amb les aixetes, els dispensadors de sabó no podran ésser d'accionament manual. Disposaran d'un raspall per a la neteja de les ungles, que es renovarà amb la freqüència necessària.

El sistema d'asseccament de les mans serà d'un sol ús: les tovalloles de paper semblen una bona solució, mentre que els assecadors d'aire calent no semblen gaire indicats, ja que per a assecar les mans utilitzen l'aire de la sala, que pot estar contaminat.

\* Les dutxes es situaran a l'interior dels vestuaris i estaran dissenyades i condicionades de manera funcional, respectant una certa intimitat i adaptant-se a les necessitats específiques dels usuaris. Disposaran d'aigua freda i calenta regulables, sabó líquid, i de tovalloles d'un sol ús.

\* Les cabines dels excusats tindran les dimensions mínimes adequades (1 x 1,20 m de superfície i 2,30 m d'alçada) (6). Disposaran de paper higiènic en quantitat suficient. Es mantindran en permanent bon estat de neteja

i no connectaran directament amb cap sala de treball. A la sortida de cada una d'elles existirà un lavabo totalment equipat de la manera ja esmentada.

#### **4.5. Pautes per a reduir la incidència de les persones sobre la contaminació dels aliments**

Les pautes per a reduir la incidència de les persones sobre la contaminació dels aliments ja han estat donades al llarg dels apartats anteriors. A manera de síntesi direm que el succés consistent en la contaminació d'un aliment de forma directa o indirecta, a partir de les persones que estan presents en una planta de processament d'aliments, està associat a una determinada probabilitat. Perquè es produeixin poques contaminacions, el que hem de fer és reduir al màxim el nombre de successos possibles, i, de cada un d'aquests, reduir al màxim la probabilitat que succeeixi.

D'acord amb el que acabem d'enunciar:

- \* Cal reduir al màxim la possibilitat de contacte, directe i indirecte, entre les persones que treballen i el producte que es processa.

- \* Cal formar les persones en totes aquelles qüestions que afecten la seva activitat laboral i, en especial, sobre la base que justifica les qüestions higièniques.

- \* Cal motivar les persones perquè duguin a terme la tasca encomanada.

- \* Cal especificar de forma precisa i per escrit totes les pautes a seguir, i quina és la política de l'empresa al respecte. Posar a disposició dels operaris els medis adequats per a poder-ho complir i delegar la capacitat de gestió suficient, perquè cada persona pugui fer propostes per a millorar tots els aspectes que afecten la seva àrea de treball.

No voldríem acabar aquest apartat ni aquest capítol sense fer una referència o comentari a l'engegada d'una nova instal·lació, o a les reparacions o reformes que es duen a terme mentre funciona una instal·lació. Abans d'engegar una nova instal·lació, s'ha de garantir que estigui perfectament neta, que no hi hagi elements o restes metàl·lics solts o mal fixats, i que en la seva construcció no s'hi hagi emprat cap mena de materials tòxics.

En relació a les reparacions o reformes que es duen a terme mentre la instal·lació està treballant, cal exigir als operaris i mecànics els mateixos requisits i exigències que a la resta de persones que treballen a la instal·lació. Cal eliminar la imatge absurda del mecànic fumant, sense gorra protectora del cabell, o posant les mans brutes en una superfície on s'està processant pro-

ducte, al costat dels operaris de producció (adequadament vestits i complint rigorosament els hàbits higiènics més estrictes).

## BIBLIOGRAFIA

- (1) JOWITT, R. (1980). "Hygienic Design and Operation of Food Plant". AVI Publishing Co., Inc. Westport, Connecticut, 244-245.
- (2) LANDRÉ, R. (1985). "Materiaux et surfaces". *Bulletin of the International Dairy Federation*, nº 218/1985, 3-8.
- (3) FIL-IDF (1985). "An introduction to the commercially available surface finishes of stainless steels and notes on their corrosion resistance". *Bulletin of the International Dairy Federation*, 189/1985, 3-12.
- (4) FIL-IDF (1979). "Descriptions et utilisation des systemes CIP dans l'Industrie Laitière". *Bulletin of the International Dairy Federation*, Document 117.
- (5) Boletín Oficial del Estado (27 Marzo 1990). Real Decreto 397/1990 de 16 de marzo, por el que se aprueban las condiciones generales de los materiales para uso alimentario, distintos de los poliméricos; nº 74: 8562-8564.
- (6) Boletín Oficial del Estado (16 y 17 Marzo 1971). Orden de 9 de marzo de 1971 por la que se aprueba la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

## INDEX D'AUTORS

Casal i Fàbrega, Joaquim. *Societat Catalana de Tecnologia. Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

Clotet i Ballús, Ramon. *Associació Catalana de Ciències de l'Alimentació. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.*

Màrquez, Manuel. *Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

Mestres Lagarriga, José. *CEINAL. Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.*

Peiró Botifoll, Roser. *CEINAL.*

Puigjaner, Luis. *Departament d'Enginyeria Química de la Universitat Politècnica de Catalunya.*

Raventós, Mercè. *Escola Superior d'Agricultura de Barcelona.*

Riera, Enric. *Consultor.*

Rosell i Rius, Ramon.





## TAULA

<b>Prefaci</b> .....	7
<b>EVAPORACIÓ</b> .....	9
1. Introducció .....	9
2. Funcionament d'un evaporador .....	10
3. Velocitat de transmissió de calor .....	11
4. Elevació del punt d'ebullició .....	12
5. Balanços de matèria i energia .....	14
6. Utilització del buit .....	15
7. Tipus d'evaporadors .....	17
8. Aprofitament del vapor .....	24
9. Evaporació discontinua .....	30
10. Problemes potencials de l'evaporació .....	33
11. Especificacions bàsiques d'una planta d'evaporació .....	36
Notació .....	37
Bibliografia .....	38
<b>PASTEURITZACIÓ I ESTERILITZACIÓ</b> .....	39
1. Introducció .....	39
2. Microorganismes a inactivar .....	45
3. Inactivació dels microorganismes. Objectiu .....	53
4. Transmissió i utilització de la calor aplicada .....	68
5. Càlcul dels tractaments .....	81
6. Efectes de la calor sobre components diferents dels microorganismes .....	103
7. Processament asèptic .....	108
8. L'envasament en el tractament tèrmic .....	122
9. Realització tecnològica dels processos .....	130

Notació . . . . .	140
Bibliografia . . . . .	142
<b>EXTRACCIÓ</b> . . . . .	147
I. EXTRACCIÓ SÓLID-LÍQUID O LIXIVIACIÓ . . . . .	147
1. Introducció . . . . .	147
2. Preparació dels sòlids. . . . .	147
3. Mecanismes de lixiviació . . . . .	148
4. Mètodes operatius de lixiviació. Aparells . . . . .	154
5. Equilibri . . . . .	156
6. Sistemes de contacte . . . . .	159
II. EXTRACCIONS LÍQUID-LÍQUID O EXTRACCIONS AMB DISSOLVENTS . . . . .	168
1. Definicions, selectivitat, selecció del dissolvent. . . . .	168
2. Aplicacions . . . . .	169
3. Instal·lacions i aparells. . . . .	170
4. Equilibri i coordenades . . . . .	175
5. Sistemes de contacte . . . . .	179
Bibliografia . . . . .	192
<b>FILTRACIÓ</b> . . . . .	193
1. Introducció . . . . .	193
2. Fonaments de la separació mecànica sòlid-líquid . . . . .	194
3. Filtració sòlid-líquid. Equipament . . . . .	211
Notació . . . . .	222
Bibliografia . . . . .	223
<b>BARREJA DE SÒLIDS</b> . . . . .	225
1. Generalitats. Definicions . . . . .	225
2. Classificació dels productes a efectes de barreja de sòlids . . . . .	229
3. Segregació . . . . .	231
4. Mecanismes i mètodes de barreja . . . . .	235
5. La qualitat de les barreges i la seva determinació . . . . .	236
6. Obtenció de barreges a la pràctica . . . . .	244
7. Tipus de barrejadors. Classificació. . . . .	247
8. Criteris per la selecció d'una barrejadora . . . . .	254
Bibliografia . . . . .	257

<b>TRACTAMENTS D'AIGUA. . . . .</b>	<b>259</b>
1. Introducció . . . . .	259
2. Tractaments d'aigua d'abastament d'indústries alimentàries	269
3. Tractaments d'aigües residuals d'indústries alimentàries. . .	292
4. Tendències actuals . . . . .	322
Bibliografia . . . . .	325
<b>INTRODUCCIÓ AL DISSENY HIGIÈNIC. . . . .</b>	<b>327</b>
1. Introducció . . . . .	327
2. Conceptes bàsics. . . . .	329
3. Higiene dels edificis, instal·lacions i equips . . . . .	332
4. Higiene del personal . . . . .	362
Bibliografia . . . . .	370









