

TECNOLOGIES EMERGENTS PER A LA INDÚSTRIA ALIMENTÀRIA

Mercè Raventós

Universitat Politècnica de Catalunya

Introducció

Es pot dir que la indústria alimentària comença en el moment en què s'inventa la primera eina, i d'això, ja en fa molts anys. Avui, com ahir, l'objectiu fonamental continua essent preparar, preservar, condicionar i transformar en aliments les matèries primeres que la terra i el mar ens ofereixen.

Amb el temps, el progrés tècnic ha fet possible no tan sols el desenvolupament de procediments originals per a la conservació dels aliments, sinó també l'aplicació de nous criteris inherents a les necessitats i tendències dels nous consumidors. De fet, subministrar aliments a la població és encara una preocupació fonamental per a l'home al segle XXI, i, en aquest sentit, la tecnologia hi té un paper molt important.

Són els professionals de les indústries alimentàries els que contribueixen que els aliments siguin, alhora, *produïts en quantitat suficient* per abastar una població creixent; *segurs* per garantir una qualitat que doni confiança als consumidors; *econòmics*, o al cost mínim, perquè siguin assequibles a la majoria de la població, i *sans* i màximament adequats tant des del punt de vista *nutricional*, amb una durabilitat òptima que en permeti una distribució fàcil sense que es malmetin, com des del punt de vista *organolèptic* (fent referència al sabor, olor, color i textura, entre d'altres). Tot plegat, sense oblidar l'interès per l'aplicació de tecnologies que siguin cada cop més respectuoses amb el medi ambient.

El gran desenvolupament de la indústria alimentària iniciat al segle XIX i completat al segle XX la configura com el primer sector industrial en la majoria dels països del món. El desenvolupament de línies de producció cada cop més grans exigeix l'aplicació de coneixements i tècniques que ja s'empren en altres àrees de l'enginyeria més consolidades (industrial, química, etc.). Així mateix, l'interès per diversificar els productes i millorar-ne la qualitat impulsa en la indústria d'equips una forta activitat per a la indústria alimentària per tal de donar suport a les exigències de les noves tecnologies.

La demanda creixent d'aliments mínimament processats que, a la vegada que segurs, conservin les característiques originals i alhora respectin les exigències mediambientals justifica el desenvolupament de certes

tecnologies per a la conservació i la transformació dels aliments.

Així, emergeixen nous processos que utilitzen tractaments no tèrmics i que, per tant, no malmeten els components termosensibles dels aliments, com l'*alta pressió hidrostàtica* (APH) i els *polsos elèctrics d'alta intensitat de camp* (PEAIC), que es presenten breument en aquest article, o la mateixa irradiació d'aliments. De fet, els nous mètodes no tèrmics de conservació d'aliments són objecte d'una recerca intensa a fi d'avaluar-ne el potencial com a procés alternatiu o complementari als mètodes més tradicionals de conservació d'aliments.

D'altra banda, la indústria agroalimentària està cercant les millors tècniques de separació per tal d'obtenir extractes naturals de gran puresa, que són utilitzats en una gran diversitat d'aplicacions. Això és degut a què les tecnologies actuals per a l'obtenció d'extractes alimentaris generalment utilitzen dissolvents orgànics, que comporten un cert risc per la seva toxicitat, el seu poder inflamable i els residus que generen. Per això, es continuen desenvolupant tecnologies més respectuoses amb el medi ambient, que representin menys risc per a la salut i que garanteixin una qualitat superior dels productes, com és el cas de l'*extracció amb fluids supercrítics*. Es presenten aquí breument l'extracció amb fluids supercrítics i les tecnologies de membranes.

Referent a les *membranes* amb permeabilitat selectiva, és a dir, les que només deixen passar a través seu determinades molècules, presenten sens dubte un gran interès per a la indústria alimentària. Ja s'apliquen des de fa anys, tot i que es continuen considerant com una tecnologia emergent perquè contínuament en surten nous materials i noves aplicacions. Algunes de les membranes disponibles separen les molècules d'aigua de la resta de components dels aliments líquids, amb la qual cosa s'aconsegueix una concentració d'aquests components. Altres membranes poden separar molècules per grandària, i així s'obté alhora concentració i fraccionament.

D'altra banda, la concentració d'aliments líquids, quan es duu a terme per congelació, implica una reducció de la temperatura del producte de manera controlada amb l'objecte d'aconseguir una congelació parcial fins a obtenir una barreja de cristalls de gel en un fluid

concentrat. Aquests cristalls de gel, si s'han format en condicions apropiades, seran molt purs, és a dir, contindran molt poc producte incorporat. La separació d'aquests cristalls purs de gel, ja sigui per centrifugació o per alguna altra tècnica, porta a aconseguir un producte cada vegada més concentrat.

Pel que fa a la *concentració per congelació*, que és aplicable a molts aliments, ja s'utilitza comercialment per concentrar suc de taronja, vinagre, cervesa i vins; també s'ha utilitzat per a la concentració d'extracte de cafè i te, xarops de sucre o productes lactis, com ara la llet o el xerigot. La crioconcentració permet obtenir els millors resultats en la concentració de begudes alcohòliques. Es tracta, doncs, d'una tecnologia emergent que té com a avantatges principals les baixes temperatures del procés i l'absència de la interfície líquid-vapor en la separació. Aquesta operació a baixa temperatura permet, encara més que en la tecnologia de membranes, la concentració d'aliments tèrmicament sensibles, sense que es produeixi cap pèrdua de qualitat, d'aromes o de components volàtils, com succeïa en l'evaporació. Cal treballar força encara per tal d'obtenir equips que resultin viables des del punt de vista industrial.

Actualment, també és important l'aplicació de tecnologies senzilles per a l'elaboració de *productes mínimament processats*, que permet obtenir aliments, com ara fruites i verdures, que poden ser consumits directament sense modificar-ne les característiques originals.

Igualment, hi ha altres aspectes molt importants que són clarament emergents i que, si bé no són tractats específicament, cal no oblidar. Per exemple, totes les tecnologies que permeten millorar el control i l'automatització dels processos i, en concret, l'ús dels biosensors, que tant està ajudant a garantir la seguretat dels processos; les noves tècniques de bioluminescència, o el tractament per imatges, o la visió artificial, entre d'altres; les tècniques avançades d'envasament d'aliments com a operació necessària per protegir els aliments en la seva conservació; els nous materials que s'estan desenvolupant, sobretot plàstics polimèrics; els films flexibles que permeten modificar l'atmosfera de l'envàs, per exemple en fruites i verdures; els envasos actius; els envasos intel·ligents, etcètera.

Tractaments per altes pressions en la conservació i la transformació dels aliments

Definició del procés

S'entén per alta pressió la tecnologia amb què els materials són tractats a pressions entre els 100 MPa i 1.000 MPa. Atès que el medi utilitzat per transmetre la pressió acostuma a ser l'aigua, el tractament d'altres pressions també s'anomena usualment *alta pressió hidrostàtica* (APH). En incrementar la pressió, es produeix un descens en el volum de l'aigua, però molt petit en comparació amb el descens de volum que poden experimentar els gasos. El descens de volum de l'aigua és, aproximadament, del 4% a 100 MPa,

del 7% a 200 MPa i de l'11,55% a 400 MPa, a una temperatura de 22 °C.

Com que l'alta pressió s'utilitza en els aliments per millorar-ne la qualitat microbiològica i les característiques fisicoquímiques i sensorials, s'han d'escollir les condicions de tractament més adequades, segons quin sigui l'objectiu prioritari. Com ja s'ha dit, les pressions utilitzades generalment en el tractament d'aliments per APH acostumen a ser d'entre els 100 MPa i els 1.000 MPa. El temps d'aplicació de la pressió pot oscil·lar entre uns pocs minuts i algunes hores i la temperatura de tractament pot anar dels -20 °C als +90 °C. En la taula 1 es presenten els principals efectes del tractament d'alta pressió en els aliments.

TAULA 1
Efectes principals del tractament d'alta pressió en els aliments

Pressió (MPa)	Efectes
> 200 MPa	Influència sobre la cinètica enzimàtica Modificació de les propietats físiques de les proteïnes Alteració de la membrana dels microorganismes
> 300 MPa	Inactivació enzimàtica irreversible Mort dels microorganismes
> 400 MPa	Gelificació dels midons Desnaturalització de les proteïnes
> 500 MPa	Mort de les espores bacterianes Inactivació dels enzims

Camp d'aplicació

Entre els nous mètodes de conservació dels aliments, l'alta pressió és probablement la tecnologia més desenvolupada comercialment. L'atractiu principal d'aquesta tecnologia és que, en poder-se realitzar el tractament a temperatura ambient, es conserven els paràmetres de qualitat del producte original.

Quan un aliment és sotmès a alta pressió, s'hi observen principalment els efectes següents: modificació del volum del sistema, modificació de l'estructura del midó i les proteïnes, modificació de l'activitat enzimàtica i inactivació dels microorganismes. En la taula 1 es mostren les condicions generals de pressió en què es manifesten aquests efectes, tot i que, a la pràctica, aquests efectes són molt variables segons l'aliment tractat i cada cas particular requereix un estudi concret.

Inicialment, l'avantatge principal del tractament d'alta pressió era que es podia utilitzar com a substitut parcial o total del tractament tèrmic quan l'objectiu era la destrucció microbiana. Per exemple, en les aplicacions a temperatures inferiors als 50 °C, s'aconsegueix una inactivació de les cèl·lules vegetatives microbianes sense alterar l'aroma, el sabor o el color dels aliments, tot i que hauríem de matisar aquesta afirmació i afegir que, depenent del tractament utilitzat i del producte inicial, poden aparèixer alguns canvis en les característiques organolèptiques.

De fet, les aplicacions de l'alta pressió van més enllà de la inactivació de microorganismes, depenent de les combi-

nacions de pressió, temperatura i temps que s'utilitzin. Paral·lelament a l'objectiu de reduir la càrrega microbiana inicial, les matèries primeres també es poden tractar amb la finalitat de conservar-ne o millorar-ne la funcionalitat per a l'elaboració posterior de derivats. D'altra banda, l'efecte de l'alta pressió sobre les propietats físiques dels aliments pot conduir a l'obtenció de nous productes amb textures molt diferents de les que estem acostumats a percebre.

Durant els últims anys s'han fet molts estudis sobre la pressió i els seus efectes; paral·lelament, també es comercialitzen diversos productes tractats per alta pressió; però cal continuar amb la investigació per tal de trobar nous camps en què l'alta pressió sigui competitiva. A més, atès que les matèries primeres i els productes finals són molt variats, els efectes no són iguals en tots els aliments, i per aquesta raó és necessari assajar aplicacions concretes.

La cambra d'alta pressió i el seu tancament

Un equip industrial d'alta pressió consta bàsicament d'una cambra de pressió i el seu sistema de tancament, un sistema de generació de pressió, un sistema de control de la temperatura i un sistema de manipulació del producte, que pot estar més automatitzat o menys.

La cambra de pressió és el component més important d'un equip d'alta pressió. En molts casos, és un cilindre construït amb un aliatge d'acers (figura 1). L'ús d'aquestes cambres generalment està limitat a pressions de treball d'entre els 400 MPa i 600 MPa. En cas que es requereixin pressions superiors, s'utilitzen dissenys de cambres construïdes amb acers especials multicapa. En la figura 2 es mostra l'esquema d'un equip multicambra per al tractament de líquids.

Generació d'alta pressió

Quan la cambra és carregada amb l'aliment que es vol tractar, es tanca i s'omple amb el medi de transmissió de pressió. En la majoria d'aplicacions de pressió isostàtica, el medi transmissor de la pressió és simplement aigua potable amb un petit percentatge d'oli soluble per tal de lubricar les bombes i evitar la corrosió (figura 3).

Per aquest motiu, les parts internes de la cambra, els tubs, les vàlvules, l'intensificador de pressió en contacte amb l'aigua, els agents químics de neteja o l'aliment mateix han d'estar protegits de la corrosió, raó per la qual és necessari utilitzar l'acer inoxidable.

L'alta pressió es considera una tècnica amb molt de futur com a mètode per preservar els aliments i fins i tot modificar-ne la funcionalitat i millorar-ne les propietats reològiques i sensorials.

El més important d'aquest procés és que permet la inactivació de microorganismes i enzims amb una màxima

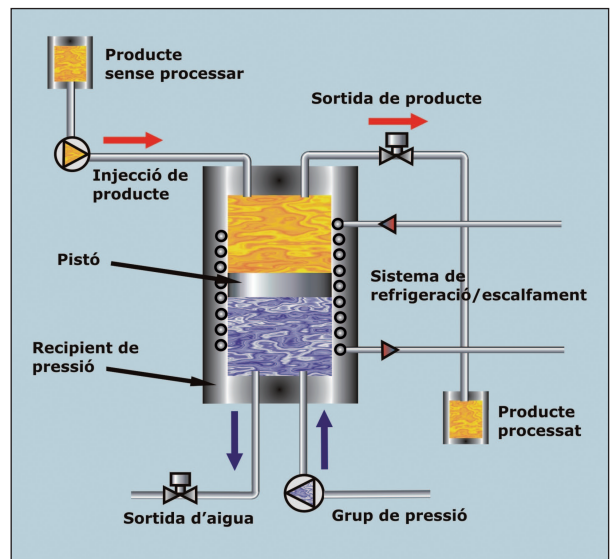


FIGURA 1. Tractament d'alta pressió de productes líquids a granel. FONT: Edicions UPC.

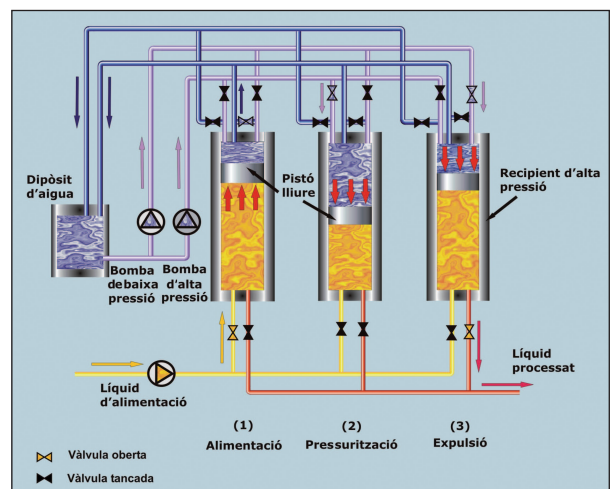


FIGURA 2. Equip multicambra per al tractament de líquids. FONT: Edicions UPC.

retenció de les vitamines i dels components responsables del sabor, el color i l'aroma, cosa que fa que l'aliment sigui de més qualitat. Aprofitant els avantatges que aquest procés ofereix, cal continuar la recerca per tal de determinar les millors condicions de processament per a cada tipus d'aliment.

També són necessàries més investigacions respecte dels canvis que es poden presentar durant la vida útil dels aliments tractats per alta pressió i dels seus efectes sobre els nutrients. Les investigacions de l'acció de l'alta pressió sobre els enzims també s'haurien d'ampliar, atès el comportament complex que presenten quan són sotmesos a aquest tractament.

La tecnologia d'equips existent ha de continuar millorant amb la finalitat de superar dificultats tècniques i abaratir costos. L'adopció de l'alta pressió per part de la

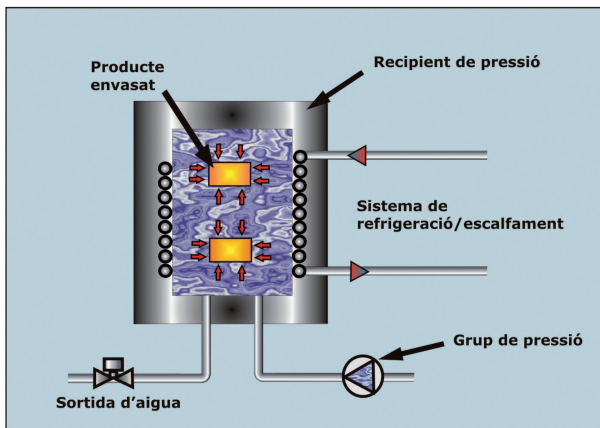


FIGURA 3. Tractament d'alta pressió per a aliments envasats.
FONT: Edicions UPC.

indústria alimentària es veurà molt afavorida quan es desenvolupin equips continus.

El problema principal que la tecnologia d'alta pressió planteja és l'alta inversió associada a la seva implantació a la indústria, cosa que repercuteix en un preu elevat dels productes al mercat en comparació amb els que són processats per mètodes tradicionals com el tractament tèrmic. És poc probable que els consumidors estiguin disposats a pagar un preu més elevat per aliments habituals que segueixen un mètode de producció diferent, llevat que la qualitat del producte sigui substancialment superior. Per aquest motiu, és possible que els esforços en la investigació es dirigeixin cap al desenvolupament de nous aliments, aprofitant la capacitat d'aquest procés per produir canvis en la textura dels aliments.

Polsos elèctrics d'alta intensitat de camp en la conservació d'aliments

Es tracta d'una tècnica desenvolupada per a la conservació dels aliments mitjançant un procés no tèrmic, de manera que s'obté un producte de gran qualitat semblant al producte fresc. Aquesta tècnica cada cop és més estudiada i perfeccionada, atesa la importància d'estabilitzar aliments sense variar-ne la qualitat original (s'ha de tenir en compte que els processos tèrmics són molt eficaços per a la conservació d'aliments i molt utilitzats a la indústria alimentària per a la inactivació enzimàtica i microbiològica, però solen tenir efectes negatius, com l'alteració de les propietats organolèptiques i la pèrdua de nutrients termolàbils dels aliments).

En aquesta tècnica s'aprofita la propietat que tenen els aliments fluids, que consten principalment d'aigua i nutrients, de ser molt bons conductors elèctrics per les altes concentracions de ions que contenen i per la capacitat de transportar càrregues elèctriques.

No va ser fins al 1967 que Sale i Hamilton van observar que la inactivació de la població bacteriana depenia principalment de dos factors: la intensitat dels polsos elèctrics i el temps de tractament (la durada del pols pel nombre de polsos). També la temperatura és un factor que cal tenir en

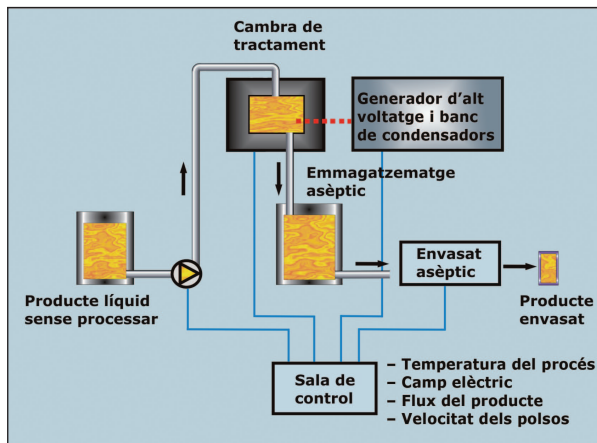


FIGURA 4. Esquema d'una planta de tractament.
FONT: Edicions UPC.

compte en el tractament, ja que a més temperatura, millor és l'efecte d'inactivació de microorganismes.

Un equip de processament d'aliments que utilitzi camps elèctrics d'alta intensitat té un cert nombre de components, com un generador de polsos d'alt voltatge (amb generador de corrent, condensador i interruptor); una cambra de tractament; un sistema de control de dades del procés; diverses sondes de temperatura, voltatge i corrent; un equip d'envasament asèptic, i un sistema de refredament de la cambra (figura 4).

El principi físic de la destrucció de microorganismes per l'aplicació de polsos elèctrics es basa en la deformació o destrucció de la paret cel·lular quan se li aplica una intensitat de camp elèctric, que dóna lloc a la permeabilització de la membrana per la formació de porus que poden ser irreversibles o reversibles, segons si s'excedeix o no un determinat llindar d'intensitat de camp elèctric.

Els efectes que provoca l'aplicació d'una descàrrega elèctrica d'alta intensitat de camp sobre un aliment (element conductor) col·locat entre dos elèctrodes són:

- Destrucció mecànica de la membrana cel·lular dels microorganismes quan s'aplica una descàrrega elèctrica de polsos curts de pocs microsegons i alt voltatge (20-80 kV/cm).
- Electròlisi de substàncies, depenent de la composició de l'aliment i el material de l'elèctrode.
- Calor produïda per l'efecte Joule. L'any 1992 es va demostrar que aquesta calor no era la responsable de la destrucció dels microorganismes, sinó que era la diferència de potencial entre tots dos costats de la membrana la que produïa la ruptura; tanmateix, la calor sí que afavoria el procés de destrucció.

La destrucció dels microorganismes per camps elèctrics depèn de la intensitat de camp elèctric aplicada, el temps de tractament (l'amplitud del pols pel nombre de polsos), la temperatura de tractament, la conductivitat, el pH i la força iònica de l'aliment i del tipus de microorganisme, la seva concentració i l'etapa de creixement.

La tecnologia per polsos elèctrics d'alta intensitat de camp (PEAIC) presenta, de moment, una sèrie de limitacions, com són:

— La poca disponibilitat d'unitats comercials. Els dos primers equips disponibles són la unitat de Pure Pulse Technologies, Inc., i la de Thomson-CSF.

— La presència de bombolles d'aire a la cambra. Això provoca problemes operatius i de seguretat, ja que poden produir espurnes i malmetre el producte i la cambra. És necessari, per tant, crear el buit, i l'ús en productes sòlids que continguin bombolles d'aire queda limitat.

— L'aplicació limitada: els productes que tenen una conductivitat elevada no són aptes, ja que presenten una resistència massa baixa i necessitarien molta energia per aconseguir un camp elèctric específic.

— La grandària de les partícules de l'aliment. És per a aliments líquids i la grandària màxima de les partícules ha de ser menor que l'espai de la zona de tractament a la cambra, per tal de mantenir una operació correcta del procés.

— La falta de recursos per mesurar amb precisió la distribució del tractament. Això provoca que els resultats obtinguts no siguin del tot fiables, ja que encara és difícil saber amb precisió quin és l'efecte de les condicions particulars del procés.

— Resulta menys efectiva per als enzims i les espores.

Extracció amb fluids supercrítics

La indústria agroalimentària està cercant la millor tècnica de separació per obtenir extractes naturals de gran puresa, que són utilitzats en una gran diversitat d'aplicacions; alhora, cal garantir que tant els productes extractats com els extractes en si no provoquin cap risc per a la salut pública i que siguin d'una qualitat excel·lent.

L'extracció amb fluids supercrítics (ESC) és una tècnica de separació de substàncies dissoltes o incloses dins una matriu. Es fonamenta en la capacitat que tenen determinats fluids en estat supercrític (FSC) de modificar el seu poder dissolvent.

L'ESC dona resposta a la demanda d'obtenció de compostos sense risc per a la salut pública i d'una gran qualitat; ja està plenament implantada a escala comercial en l'obtenció del llúpul per a l'elaboració de la cervesa i l'obtenció d'aromes i sabors d'espècies i herbes aromàtiques i cafè sense cafeïna i te sense teïna. En aquests casos s'utilitza el diòxid de carboni (CO_2) com a FSC. A més, diversos processos es troben en fase d'expansió, com ara l'obtenció de begudes sense alcohol, productes animals sense colesterol i olis de llavors.

El poder dissolvent dels FSC pot ser elevat, depenent de les condicions de pressió i temperatura aplicades que permetin la dissolució selectiva de substàncies determinades en l'FSC. Les substàncies seleccionades se separen fàcilment de l'FSC. L'extracció es realitza sense canvis de fase, simplement variant les condicions de pressió i/o temperatura dels FSC. En la figura 5 es mostra l'esquema

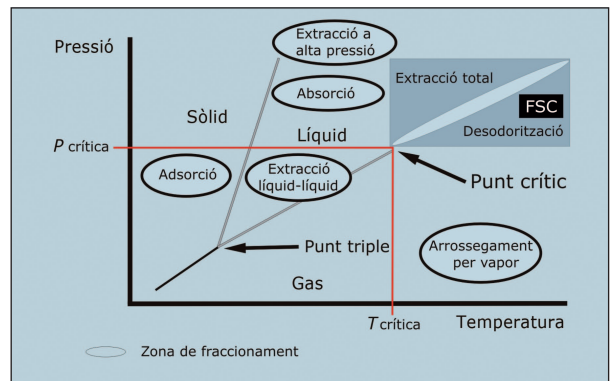


FIGURA 5. Esquema representatiu del diagrama de pressió-temperatura dels estats de la matèria. FONT: Edicions UPC.

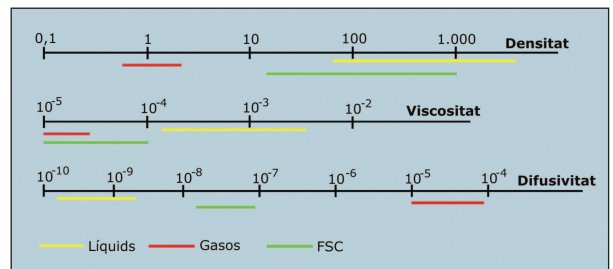


FIGURA 6. Propietats físiques dels diferents tipus de fluids. FONT: Edicions UPC.

representatiu del diagrama de pressió-temperatura dels estats de la matèria, en què es pot veure que l'FSC sempre es troba per sobre de la seva temperatura i pressió crítiques.

La figura 6 permet comparar les propietats físiques de líquids, gasos i FSC, com ara la densitat, la viscositat i la difusivitat.

Els compostos químics més utilitzats com a FSC són el propà i el CO_2 , perquè presenten propietats químiques més assequibles; el CO_2 és el més utilitzat en la indústria alimentària.

En la figura 7 es presenta un esquema simplificat d'un procés d'extracció sòlid-líquid de forma discontinua. L'extracció contínua o de flux es realitza en processos d'extracció líquid-fluid, en què la matèria primera que s'ha d'extraure està en la fase líquida, com el que es mostra en la figura 8. En aquest sistema s'eliminen els temps morts de càrrega i descàrrega, la pressurització i la despressurització i, per tant, el processament és més eficaç i ràpid.

El procés d'extracció es realitza bombant contínuament a contracorrent matèria primera i FSC, que queden en contacte el temps necessari per separar el component volgut. L'extracte queda solubilitzat per l'FSC, surten junts de l'extractor i s'expandeixen, i a través d'una vàlvula de descompressió es redueix el poder dissolvent de l'FSC, fet que origina la precipitació de l'extracte en el separador, d'on és retirat sense residus de dissolvent, ja que aquest s'evapora. L'FSC és recomprimit i s'envia de nou a l'extractor, de manera que és reciclat.

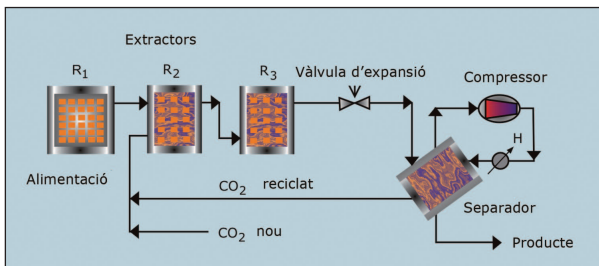


FIGURA 7. Procés simplificat de l'extracció supercrítica discontinua (sòlid-fluid).

FONT: Edicions UPC.

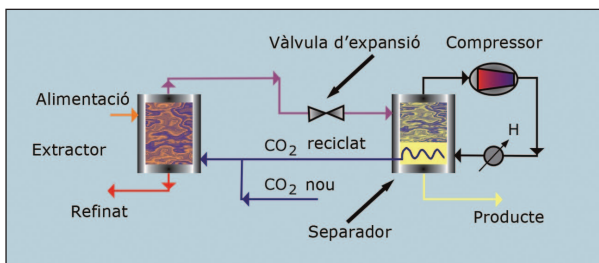


FIGURA 8. Procés simplificat de l'extracció supercrítica contínua (líquid-fluid).

FONT: Edicions UPC.

Aplicacions de l'extracció supercrítica a la indústria alimentària

- Extracció de colorants naturals.
- Extractes d'espècies (vainilla, pebre, nou moscada i molts d'altres).
- Extracció d'olis essencials.
- Extracció d'aromes i sabors.
- Eliminació de greixos animals (llet, rovell d'ou).
- Eliminació d'àcids grassos lliures.
- Desodoració i desacidificació d'olis i greixos.
- Fraccionament de l'oli de fetge de bacallà.
- Extracció de proteïnes sense greixos.
- Extracció d'èsters d'àcids grassos.
- Extracció del colesterol d'olis de peix i de carns vermelles.
- Fraccionament dels àcids grassos de la llet i de la mantega i aïllament del colesterol.
- Desgreixament d'aliments.
- Refinació d'olis naturals.
- Purificació de monoglicèrids.
- Separació de fosfàtids (lecitina i d'altres).
- Extracció d'olis i greixos vegetals (llavors de cotó, gira-sol, oliva, ametlla, coco, blat i blat de moro).
- Extracció de midó sense greixos.
- Obtenció de cacau desgreixat en pols.

Aplicacions de l'extracció supercrítica a les indústries de begudes

- Extracte de llúpul.
- Extracció d'aromes i sabors per a begudes suaus.

— Descafeïnament de cafè, desteinament de te i recuperació de la cafeïna.

- Extracció de components aromàtics de suc de fruita.
- Reducció del contingut alcohòlic.
- Inactivació de la pectinesterasa del suc de taronja.
- Desalcoholització de begudes alcohòliques.

L'ESC a la indústria alimentària i amb CO₂ com a dissolvent està plenament establerta, sobretot en processos de descafeïnament de cafè i desteinament de te, extracció de llúpul, extracció d'aromes i sabors d'espècies i herbes aromàtiques i separació del colesterol de la mantega, la carn i el rovell de l'ou. També està essent objecte de nombroses investigacions i desenvolupaments.

L'ESC és una tècnica de separació emergent, ja que és respectuosa amb el medi ambient i pot substituir progressivament molts dels processos d'extracció realitzats amb dissolvents orgànics.

L'ESC presenta un futur encoratjador en processos d'extracció i separació de principis actius de productes naturals, entre altres coses, perquè l'ESC es pot eliminar de manera ràpida i total (sols cal variar la pressió i la temperatura), però cal desenvolupar sistemes continus d'extracció amb més capacitat de treball perquè aquesta tècnica resulti competitiva. A continuació, se'n sintetitzen els principals avantatges:

— L'excel·lent qualitat i puresa dels productes que s'obtenen, que no es malmeten, per les temperatures moderades de treball i també per la neutralitat del dissolvent supercrític utilitzat, el CO₂.

— La rapidesa d'extracció i separació de les fases, amb l'esgotament total de la substància a extraure, per l'elevada difusivitat, la baixa viscositat i l'enorme poder dissolvent del CO₂ supercrític. Per tant, es redueixen els costos de separació.

— L'extracte s'obté lliure de residus de dissolvent, perquè el CO₂ s'evapora a pressió atmosfèrica; és una alternativa neta als dissolvents orgànics, amb els quals la separació de l'extracte, freqüentment, es realitza per destil·lació i per no malmetre'l, es moderen les temperatures necessàries i, per tant, queden restes de dissolvent, encara que sigui en quantitats inferiors a les legislades.

— La possibilitat de modificar la selectivitat i capacitat dels dissolvents, variant les condicions d'operació (pressió i temperatura), dóna un ampli marge d'ús de cada dissolvent, amb la possibilitat de fraccionar els diferents extractes durant l'extracció.

— L'econòmic cost de separació, ja que només es necessita reduir la pressió o la temperatura lleugerament per aconseguir la separació del CO₂ i l'extracte.

— La tecnologia d'alta pressió per a l'ESC s'està desenvolupant actualment, i és cada cop més segura i econòmica. Encara que l'equipament és costós, la inversió es pot rendibilitzar amb l'excel·lent qualitat del producte obtingut.

— Existeixen altres aplicacions no extractives amb ESC que tenen un futur encoratjador a la indústria alimentària: l'esterilització, la cromatografia supercrítica, la nucleació homogènia de partícules, la inactivació o activació

TAULA 2
Avantatges i inconvenients de la separació per membranes

Avantatges	Inconvenients
<ul style="list-style-type: none"> • No és necessari escalfar l'aliment (no hi ha pèrdua de productes termolàbils). • La concentració per membranes no exigeix un canvi de fase. • Té menys costos de manteniment i mà d'obra que l'evaporació. • Té poques exigències d'espai. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inversió inicial important. • Variacions de flux del producte que es vol filtrar. • Obstrucció de la membrana, que redueix el temps de funcionament efectiu entre dues sessions de neteja consecutives. • Concentració i desenvolupament de microorganismes, si el temps de permanència i la temperatura de treball són adequats a les seves condicions.

d'enzims i l'oxidació total d'aigües residuals i residus industrials de tot tipus.

Però l'expansió dels processos ESC està condicionada pels següents inconvenients:

— La seva ràpida expansió es troba limitada pel fet que aquesta tècnica de separació necessita l'experimentació en plantes pilot per dissenyar després el procés a escala industrial.

— La confidencialitat de les empreses respecte als seus avenços, juntament amb la proliferació de patents, representen un altre obstacle per a aquesta potencial expansió a gran escala.

— La inversió inicial en equipament és molt superior a la de l'extracció convencional amb dissolvents o la destil·lació, però s'amortitza a llarg termini.

— Encara només és rendible processar extractes d'elevat valor afegit.

Tecnologia de membranes

L'aplicació de les tecnologies de membranes per a la conservació i l'obtenció d'aliments és clarament una tecnologia emergent en aquest sector. De fet, els processos de membrana s'utilitzen per concentrar un líquid o bé fraccionar-lo en dos de diferent composició.

El procés de separació es fonamenta en la permeabilitat selectiva d'un component o més d'un del líquid a través de la membrana i en un gradient de pressió hidrostàtica. Els processos de membranes de filtració més importants per a la indústria alimentària són: la microfiltració (MF), la ultrafiltració (UF), la nanofiltració (NF) i l'osmosi inversa (OI). En la figura 9 es representen els principis de separació dels tres processos més importants.

Aquests processos són cada cop més emprats a la indústria alimentària, especialment la làctia i la de begudes en general. Ofereixen molts avantatges respecte d'altres tècniques de concentració més tradicionals. L'avantatge principal n'és que la qualitat del producte en general es manté, ja que es treballa a baixes temperatures i no hi ha interfície vapor-líquid que comporti pèrdues d'aromes. A més, les separacions per membrana presenten, en general, exigències energètiques reduïdes, perquè no hi ha canvi de fase, els costos de funcionament són baixos, es necessita

poc espai i hi ha una gran flexibilitat d'operació. Tot i així, les membranes tenen tendència a embrutar-se a mesura que el producte es concentra i la viscositat s'incrementa, la qual cosa limita les concentracions que s'hi poden assolir. Generalment, amb els processos de membrana només s'assoleixen concentracions d'entre el 40% i el 45%, en comparació amb el 80% que es pot arribar a obtenir pel sistema tradicional de l'evaporació.

Els motius més importants expressats pels professionals del sector per a la utilització d'aquesta tecnologia per part de la indústria alimentària són:

— Millora de la qualitat dels productes (nutricional, bacteriològica i funcional).

— Reducció dels costos de producció, augment del rendiment, automatització dels processos i flexibilitat.

— Nous productes i solució als problemes mediambientals.

En la taula 2 es resumeixen els principals avantatges i inconvenients de la separació per membranes. Respecte als materials que s'utilitzen en els processos de membranes, poden ser molt diferents, ja que tant el material com les configuracions ofereixen moltes possibilitats. Per això, es poden establir diferents classificacions segons l'element de referència.

Un d'aquests pot ser la natura de la membrana: *biològica* o *sintètica*. Aquests dos tipus de membranes són molt diferents quant a estructura i funcionalitat.

A la natura existeixen mecanismes que compleixen la definició de membrana i són considerats barreres biològi-

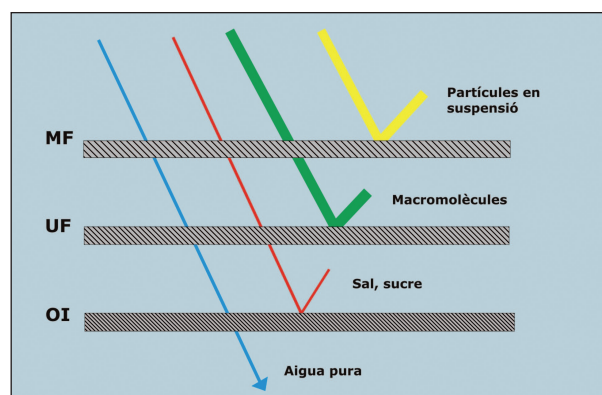


FIGURA 9. Principis de separació per membranes.
FONT: Edicions UPC.

ques. Tenen una important funció reguladora celular o d'intercanvi entre el medi intern dels éssers vius i el medi extern.

Fins ara s'ha estat capaç de crear sintèticament, amb polímers o compostos inorgànics, membranes sintètiques que poden ser utilitzades en un gran nombre de processos dins la indústria. Entre les membranes sintètiques, s'hi poden distingir les polimèriques i les inorgàniques.

Les *membranes polimèriques* o *orgàniques* estan fetes d'una gran varietat de polímers. Les membranes polimèriques hidròfobes solen ser de politetrafluoroetilè (PTFE, tefló), polivinil de fluor (PVDF), polipropilè (PP), polietilè (PE), polisulfona (PSF) o polièstersulfona (PES), mentre que les hidròfiles estan fetes d'èsters de cel·lulosa que són biodegradables, policarbonats (PC) o poliàmides (PA). En general, les membranes hidròfobes presenten més problemes d'embrutiment irreversible que les hidròfiles; per aquest motiu, són més utilitzades les segones en processos industrials de separació. El desavantatge d'aquestes membranes és la baixa resistència a la temperatura i al pH.

Les *membranes ceràmiques* o *inorgàniques* estan fetes de materials com l'alúmina (Al_2O_3), l'òxid de zirconi (ZrO_2) o l'òxid de sílice (SiO_2). Són membranes rígides que permeten un flux de cinc a deu vegades més gran que les polimèriques. Resisteixen els productes químics i es poden netejar fàcilment sense malmetre'n la capa superficial. Toleren temperatures elevades i, per tant, es poden esterilitzar. Aquestes propietats les fan molt adequades per a aplicacions biotecnològiques. Un altre avantatge és la seva llarga vida, fins a deu anys, comparada amb la vida útil de les membranes polimèriques: d'un any per a les hidròfiles i de dos o tres anys per a les hidròfobes. El desavantatge de les membranes ceràmiques és el seu cost elevat.

Existeixen també les membranes *semiceràmiques*, que consisteixen en una matriu polimèrica banyada per una capa de material inorgànic.

En tot procés de membrana existeixen tres corrents:

— *Aliment*: dissolució que es vol tractar.

— *Permeat*: corrent que és capaç de passar a través de la membrana. Està constituït pel dissolvent i alguns soluts. És ric en substàncies amb tendència a travessar la membrana.

— *Retingut* o *concentrat*: corrent que no ha passat a través de la membrana. Ha perdut part de la dissolució aliment i, per tant, hi augmenta la concentració de substàncies que no poden travessar la membrana.

El corrent d'interès del procés pot ser el permeat, el retingut o ambdós, depenent de l'objectiu de la separació:

— *Concentració*: el component volgut es troba en una concentració baixa en el corrent de l'aliment, i és el dissolvent (permeat) el que s'elimina per tal d'augmentar el component que es vol concentrar.

— *Purificació*: les impureses o els components no volguts s'eliminen en el corrent del permeat o en el retingut.

— *Fraccionament*: quan una barreja se separa en dos components volguts o més.

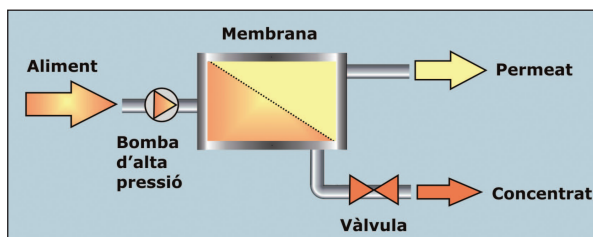


FIGURA 10. Representació esquemàtica d'un procés de separació per membrana.

FONT: Edicions UPC.

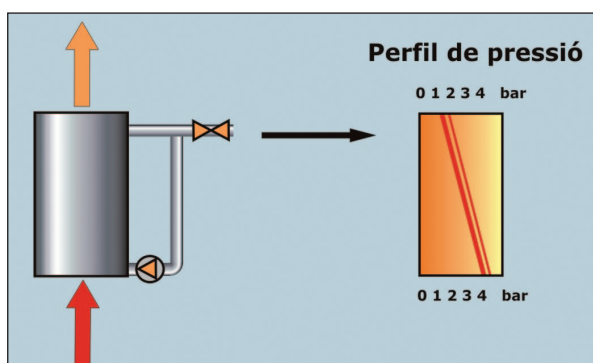


FIGURA 11. Distribució de la pressió al llarg de la membrana. Pressió transmembrana.

FONT: Edicions UPC.

En la figura 10 es representa l'aliment, el permeat i el concentrat. Si l'objectiu del procés és concentrar, el corrent d'interès és el retingut o concentrat. Si es vol purificar, el corrent d'interès és o bé el retingut, o bé el permeat, segons quin contingui les impureses que es volen eliminar. Si es vol fer un fraccionament, els dos corrents, el retingut i el permeat alhora, poden ser d'interès.

La separació es dona gràcies a la facilitat que té la membrana de transportar un component d'una de les fases a través seu. El transport a través de la membrana s'efectua per l'acció d'una força impulsora. En la figura 10 es pot veure, doncs, el procés general de separació per membranes, en què es distingeixen els tres corrents. L'aliment és separat en un corrent més concentrat, o retingut, i en un corrent menys concentrat, o permeat. En la figura 11, a més, es veu la distribució de la pressió, que és màxima a l'entrada de l'aliment i mínima a la sortida.

La tecnologia de membranes ha estat objecte d'un gran interès els darrers anys, gràcies sobretot a la indústria química. Aquesta dedica una gran part del seu consum energètic a processos de separació i concentració de substàncies, la qual cosa crea, com a conseqüència, una gran demanda de tècniques avançades de separació que siguin netes, respectin el medi ambient i comportin un gran estalvi energètic.

El rang d'aplicació de les membranes a la indústria és molt ampli (com es pot veure en les taules 3 i 4) i el seu nivell de vendes és també alt; tanmateix, presenten encara una sèrie de problemes tècnics i econòmics, que són motiu d'estudi i de recerca amb vista a augmentar l'efectivitat d'aquesta tecnologia.

L'aplicació de la tecnologia de membranes, com a procés, ha anat evolucionant a mesura que s'han desenvolupat millores en les propietats físiques i químiques de les membranes, en les aplicacions i en l'enginyeria del procés. Això fa que per a un bon nombre d'aplicacions alimentàries resultin millors tècnicament i econòmicament que altres tecnologies convencionals.

Les membranes més aplicades a la indústria alimentària són les de microfiltració i ultrafiltració, en bona part perquè poden treballar a altes temperatures tot garantint una desinfecció i una esterilització perfectes dels sistemes en què es manipulen els aliments, alhora que en mantenen les qualitats organolèptiques.

La indústria làctia és una de les indústries principals en què s'aplica la separació per membranes. S'utilitza l'osmosi inversa per concentrar la llet abans de l'evaporació i de la fabricació de formatge. El factor de concentració està limitat per la precipitació del fosfat de calci. En la concentració del xerigot obtingut en el processament de la llet, es pot utilitzar l'osmosi inversa per separar les proteïnes, la lactosa i les sals, i així reduir el cost de transport, mentre que la ultrafiltració es pot utilitzar per al fraccionament i per produir un concentrat de proteïnes de gran valor. La ultrafiltració s'utilitza també per a la concentració de proteïnes de la llet i per a la normalització proteica de la llet destinada a la producció de formatge, iogurt i altres productes lactis. La nanofiltració s'utilitza per a la dessalinització parcial del xerigot i la microfiltració s'aplica per a la reducció del nombre de bacteris a la llet desnatada i al xerigot, i també per reduir el contingut de greix del xerigot

destinat a la producció de concentrats proteics. En aquestes aplicacions, les petites molècules, com les sals o la lactosa, passen a través de la membrana d'ultrafiltració, mentre que les proteïnes queden retingudes en el concentrat.

Els sucres de fruita es concentren des del contingut original de sucre del 10-16% fins a un 60% per al transport i l'emmagatzematge. Aquesta concentració es pot fer amb osmosi inversa, que redueix el consum energètic i millora la qualitat organolèptica del suc, i amb altres tècniques convencionals, com ara l'evaporació, la qual, però, té la limitació del baix rang de concentració a què arriba (un 24%).

Per a l'obtenció de sucre de canya o de remolatxa, cal fer una clarificació del suc per eliminar-ne les partícules col·loïdals i en suspensió, cosa que es pot fer per ultrafiltració. També s'aplica osmosi inversa per a la preconcentració del xarop.

En la clarificació del vi existeixen diferents etapes de filtració, des de la de desbast fins a la d'esterilització, que poden ser substituïdes per una etapa de microfiltració. També es pot utilitzar l'osmosi inversa per concentrar el vi i accelerar-ne el procés de precipitació tartàrica, o per obtenir vi i cervesa amb un contingut baix d'alcohol. La microfiltració normalment s'utilitza per esterilitzar en fred la cervesa.

En els escorxadors, el residu principal que s'hi obté és la sang, que es pot recuperar, separar i purificar mitjançant membranes d'ultrafiltració. La gelatina, d'origen animal, rica en proteïnes col·loïdals i formada a partir de la hidròlisi del col·lagen, es pot fer per ultrafiltració, amb la qual s'obtenen millors resultats que amb l'evaporació i l'assecat tradicionals.

TAULA 3
Aplicacions de processos de membrana a la indústria alimentària (1)

Procés Aigua, llet i begudes	Aplicació
Tractament d'aigua per al consum humà	— Potabilització d'aigua per al consum humà (NF) — Desinfecció, clarificació i desmineralització de l'aigua (MF, UF, NF) — Dessalinització d'aigües marines (OI)
Tractament d'aigua d'ús industrial	— Clarificació, desinfecció i esterilització d'aigües residuals (MF, UF)
Producció d'aigua de qualitat	— Aigua ultrapura per a la indústria electrònica (OI) — Aigua de refrigeració per a torres de refredament, condensadors i bescanviadors de calor (OI) — Aigua per a calderes i per al rentat de gasos (OI)
Indústria làctia	— Concentració de la llet, per eliminació d'aigua, sals minerals i lactosa (UF, OI) — Producció de ferments lactis amb l'eliminació dels inhibidors del creixement cel·lular i concentració de la biomassa fins als nivells del producte comercial — Extracció i concentració de les proteïnes del xerigot adequades per a les indústries cosmètica i farmacèutica com a emulsionant (UF, OI)
Indústria làctia: elaboració de formatges	— Estandardització de la llet per donar-li el contingut proteic adequat (UF)
Indústries de fermentació	— Clarificació i estabilització del most i el vi (UF) — Clarificació i esterilització de la cervesa (UF, MF) — Purificació de molècules actives i microorganismes en procés de fermentació (UF) — Concentració del vi per accelerar-ne la precipitació tartàrica (OI) — Eliminació de tartrats en el vi (MF) — Desalcoholització del vi i la cervesa (OI)
Begudes	— Clarificació i esterilització dels sucres de fruita després de la premsada, per suprimir les etapes convencionals següents de filtració (UF, NF) — Preconcentració dels sucres (OI) — Recuperació dels colorants i les aromes de les aigües residuals — Ajust de l'acidesa dels sucres

TAULA 4
Aplicacions de processos de membrana a la indústria alimentària (II)

Procés/indústria Altres indústries alimentàries	Separació/aplicació
Processament de carn i peix	<ul style="list-style-type: none"> — Tractament dels purins. Separació de la biomassa (UF) — Tractament de la sang. Preconcentració del sèrum sanguini (UF, OI) — Concentració de proteïnes en la fabricació de gelatines — Concentració-recuperació de proteïnes de la salmorra residual del curat de carns i peixos — Concentració-recuperació de proteïnes de les aigües de rentat de carns i peixos — Eliminació de pèls i pell d'animals en l'aigua residual dels confitats
Processament de fruites i hortalisses	<ul style="list-style-type: none"> — Bioreactors amb membrana per a la conversió de residus de patata — Recuperació de proteïnes vegetals — Recuperació de productes del processament — Recuperació de productes i subproductes d'aigües de rentat (sucres, olis essencials, proteïnes)
Processament dels ous	<ul style="list-style-type: none"> — Concentració d'albúmina d'ou fins a valors del 40% d'extracte sec — Deshidratació parcial abans de l'assecat (UF)
Processament del sucre	<ul style="list-style-type: none"> — Desmineralització de melasses — Recuperació de sucre de les aigües de rentat abans de l'etapa d'evaporació-concentració — Preconcentració de xarop (OI) — Clarificació dels primers extractes de remolatxa (UF) — Concentració de dissolucions diluïdes de remolatxa
Processament d'olis i greixos	<ul style="list-style-type: none"> — Preparació de proteïnes vegetals — Recuperació d'olis d'aigua de rentat — Recuperació de dissolvents — Refinació d'olis comestibles (ajust de l'acidesa, descoloració)

Aquests exemples d'aplicació de les membranes en processos de separació evidencien que aquesta tecnologia presenta molts avantatges i que la seva utilització continuarà augmentant amb el desenvolupament de nous materials i tecnologies. Cal destacar que la qualitat del producte obtingut amb aquesta tècnica, gràcies al fet que no es produeixen canvis de fase i que es treballa a temperatures reduïdes (< 50 °C), generalment és superior a la qualitat aconseguida per mitjà d'altres tecnologies com l'evaporació. ■

Bibliografia

- FELLOWS, P. J. *Food processing technology*. CRC, 2009. 913 p. ISBN 978-1-4398-0821-4.
- RAVENTÓS, M. *Indústria alimentària, tecnologies emergents*. Edicions UPC, 2003. 206 p. (Politext, Agroalimentària; 140) ISBN 84-8301-561-7.
- *Industria alimentaria, tecnologías emergentes*. Edicions UPC, 2005. 210 p. (Politext, Agroalimentària; 164) ISBN 84-8301-790-3.