
Innovacions en l'enginyeria d'aliments.

Tecnologies emergents

Innovations in food engineering. Emerging technologies

REBUT: 28/1/2011 ACCEPTAT: 22/2/2011

ALBERT IBARZ, VÍCTOR FALGUERA

Universitat de Lleida. Departament
de Tecnologia d'Aliments

RESUM: *Els tractaments que reben els aliments s'enfoquen principalment a obtenir uns productes amb una major vida comercial, però que abans de res siguin segurs per al consumidor.*

Les tecnologies tèrmiques són les que més àmpliament s'han aplicat per aconseguir aquestes finalitats; no obstant això, aquest tipus de tractaments incideix negativament sobre certs components del mateix aliment, disminuint el seu contingut en vitamines i altres nutrients, així com en característiques sensorials, que el fan menys atractiu quant al color i a les propietats texturals.

Les tecnologies no tèrmiques són una alternativa als tractaments tèrmics, amb la finalitat d'obtenir un producte final de millor qualitat sensorial, però sense deixar de banda la seguretat. Aquestes tecnologies alternatives a la tèrmica poden produir aliments sense la presència de microorganismes perillosos, mantenint al mateix temps les característiques sensorials i nutritives.

PARAULES CLAU: *Tecnologies emergents, irradiació ionitzant, escalfament IR, escalfament dielèctric, escalfament òhmic.*

ABSTRACT: *Food processing technologies generally serve to extend a product's shelf-life and, above all, to make a product safe for consumption.*

Thermal technologies are the most commonly used, but this type of treatment can have a negative impact on certain food components, diminishing vitamin and nutrient content. They can also affect sensorial characteristics (colour, texture, etc.), making them less attractive.

Non-thermal technologies are an alternative to thermal treatments, developed with the purpose of obtaining a final product of better sensorial quality without neglecting microbial safety. These alternative technologies can produce foods without dangerous microorganisms whilst maintaining sensorial and nutritional qualities.

KEYWORDS: *Emerging technologies, ionising irradiation, IR heating, dielectric heating, ohmic heating.*

Correspondència: Albert Ibarz, Departament
de Tecnologia d'Aliments, Universitat de Lleida,
av. Rovira Roure, 191,
25198 Lleida, Espanya.
Tel.: 973 702 555.
A/e: aibarz@tecal.udl.cat

INTRODUCCIÓ

Rep el nom de procés el conjunt d'activitats i/o operacions industrials que tendeixen a modificar les propietats de les matèries primeres, a fi d'obtenir productes que serveixin per cobrir les necessitats de la societat. Aquestes modificacions que es realitzen a les matèries primeres naturals van encaminades a l'obtenció de productes que tinguin una major acceptació al mercat, o bé que presentin majors possibilitats d'emmagatzemament o transport.

Analitzant els diferents processos de la indústria alimentària s'observa que cadascun d'aquests és compost de diferents etapes, algunes de les quals es repeteixen en tots. Cada una d'aquestes etapes es denomina *operació bàsica o unitària*, i són comunes a un gran nombre de processos industrials. Les operacions individuals tenen tècniques comunes i es basen en els mateixos processos científics; això fa que l'estudi d'aquestes operacions s'unifiqui i el tractament de tots els processos resulti més senzill.

Dins de les operacions unitàries se'n poden distingir diferents tipus, depenent de la naturalesa de la transformació duta a terme. Així, cal distingir entre etapes físiques, químiques i bioquímiques:

a) Etapes físiques: mòlta, tamissatge, mescla, fluïdització, sedimentació, flotació, filtració, rectificació, absorció, extracció, adsorció, intercanvi de calor, evaporació, assecatge, etc.

b) Etapes químiques: refinació, pelada química.

c) Etapes bioquímiques: fermentació, esterilització, pasteurització, pelada enzimàtica.

Per tant, el conjunt d'etapes físiques, químiques i bioquímiques que tenen lloc en els processos de transformació dels productes agrícoles constitueixen les denominades operacions unitàries de les indústries alimentàries. La finalitat de les operacions unitàries és la separació de dos o més substàncies presents en una mescla, o bé l'intercanvi d'una

propietat a causa d'un gradient. La separació s'aconsegueix mitjançant un agent separador, que és diferent depenent de la propietat que es transfereixi.

Segons la propietat transferida, les operacions unitàries es poden classificar en diferents grups, ja que els canvis possibles que pot experimentar un cos són definits per la variació que experimenta la seva massa, la seva energia o la seva velocitat.

Així, les operacions unitàries es classifiquen segons l'esquema:

- operacions unitàries de transferència de matèria;
- operacions unitàries de transmissió de calor (d'energia?);
- operacions unitàries de transport de quantitat de moviment.

A més de les operacions unitàries englobades a cada un dels apartats esmentats, existeixen aquelles de transferència simultània de calor i matèria, i altres operacions que no es poden englobar a cap d'aquests apartats i que reben el nom de complementàries.

Altres autors realitzen una classificació diferent de les operacions unitàries, de tal manera que les agrupen segons la seva finalitat (per exemple, si són operacions de conservació o de separació). D'aquesta manera, una classificació alternativa seria:

- operacions unitàries preliminars;
- operacions unitàries de conservació;
- operacions unitàries de separació;
- operacions unitàries com a tècniques auxiliars.

Per analogia amb altres branques de l'enginyeria, es poden donar diferents definicions de l'enginyeria dels processos alimentaris. Així, segons una d'aquestes definicions, enunciat per l'Institut d'Enginyers Químics dels Estats Units, «l'enginyeria dels processos alimentaris comprèn la part de l'activitat humana en la qual els coneixements de les ciències físiques, naturals i econòmiques s'apliquen de manera que als productes agrícoles se'ls fa experimentar una modificació en la seva

composició, contingut energètic o estat físic».

D'altra banda, el professor Cathala (fundador de l'Institut d'Enginyeria Química de Tolosa) la defineix com «la ciència de concebre, calcular, dissenyar, fer construir i fer funcionar les instal·lacions on s'efectuen, a escala industrial i de la manera més econòmica possible, els processos de transformació dels productes agrícoles».

Però a causa de les seves característiques específiques, sobretot quant al producte acabat, s'hi ha d'afegir que l'aliment final obtingut ha de ser microbiològicament segur i ha de tenir una vida comercial com més extensa millor.

Per tant, l'enginyer de les indústries alimentàries haurà de conèixer els principis bàsics de l'enginyeria de processos i ser capaç de desenvolupar noves tècniques per a l'elaboració dels productes agrícoles. Així mateix, ha de tenir suficient capacitat per poder dissenyar els aparells que s'han d'utilitzar en un procés determinat.

L'objecte fonamental de l'enginyeria dels processos alimentaris és estudiar els principis i les lleis que segueixen les etapes físiques, químiques o bioquímiques dels diferents processos, a fi de poder abordar el disseny dels aparells en els quals es duen a terme industrialment les esmentades etapes de fabricació. Posteriorment, s'han d'encaminar els estudis cap als processos de transformació de matèries primeres agrícoles en productes acabats, o que els conservin de manera que puguin romandre sense cap canvi per llargs períodes de temps.

La finalitat de l'enginyer d'aliments és arribar a produir aliments que satisfacin les demandes del consumidor. En aquest sentit, els aliments han de ser fàcils d'emmagatzemar i de preparar i, al mateix temps, d'alta qualitat. Per això, cal tenir en compte que el consumidor demana que l'aliment tingui una textura i una aparença adequades. Les característiques organolèptiques, que són les que percep el con-

sumidor, són ahora les que requereixen una major cura. Una altra característica que demana el consumidor és que l'aliment sigui fresc, ja que els productes frescos són els que millor conserven les característiques i els nutrients propis de l'aliment, i si pot ser que sigui *natural*, és a dir, que no contingui additius. A causa que qualsevol tractament incideix negativament en les característiques sensorials i nutritives de l'aliment, també són preferibles aliments *mínimament processats*. El consumidor busca aliments més saludables des del punt de vista nutricional, i això fa que estiguin prenent una gran importància en els darrers temps els aliments que contenen prebiòtics i probiòtics, així com els components nutricionalment o els aliments mínimament envasats, sota atmosferes controlades o modificades.

És evident que la indústria alimentària ha de tenir en compte aquestes demandes per part del consumidor. Fins fa poc temps, la forma més usual d'obtenir un aliment segur era realitzar-hi tractaments tèrmics, que com s'ha comentat incideixen negativament en la qualitat nutritiva i sensorial del producte acabat. Per això, la indústria ha de respondre amb el desenvolupament de tractaments més suaus, amb un escalfament menys intens, a més d'introduir-hi una menor quantitat d'additius, la qual cosa fa que l'aliment sigui considerat més *orgànic*. La tècnica d'utilitzar mètodes combinats és una bona alternativa per aconseguir una menor incidència sobre els deterioraments que els tractaments convencionals causen sobre l'aliment. El consumidor també està preocupat per les possibles malalties provocades per alguns constituents dels aliments, com poden ser la sal, el sucre i els greixos saturats, que poden provocar problemes cardiovasculars, i això ha fet, per exemple, que en la conservació dels aliments aquests compostos siguin menys utilitzats. Així mateix, és important que de l'aliment s'eliminin tots aquells microorganismes que el puguin enve-

rinar. Per tot això, les noves tecnologies han de retenir o millorar l'efectivitat de la conservació i produir aliments segurs. Les tecnologies tradicionals de tractament d'aliments conserven l'aliment, o bé perquè inhibeixen el creixement dels microorganismes, o bé perquè els inactiven, encara que algunes tecnologies conserven l'aliment a causa que restringeixen l'accés dels microorganismes cap al producte.

Algunes de les alternatives estudiades inclouen l'aplicació d'additius naturals o bé tecnologies físiques de processament. En aquesta presentació es realitzarà una breu exposició d'alguns d'aquests tractaments físics, que en els últims anys han experimentat un increment important i han donat pas a les denominades tecnologies emergents, les quals es troben en fase de consolidació. Com que en altres articles de la revista *TECA* algunes d'aquestes tecnologies ja han estat presentades, aquí es farà una exposició breu d'aquelles que poden ser més innovadores i que puguin aportar noves perspectives en els nous tractaments dels aliments.

IRRADIACIÓ IONITZANT D'ALIMENTS

La irradiació ionitzant, com altres tipus de tractament d'aliments, és un mètode que serveix per tractar aliments amb l'objectiu d'aconseguir que siguin més segurs per al consumidor i també per augmentar el temps perquè es mantinguin en bones condicions. És a dir, s'utilitza per sanejar els aliments i allargar-ne els temps de conservació. És un mètode que no pretén substituir els tractaments convencionals, sinó que més aviat es pot utilitzar com a complement als esmentats tractaments.

La irradiació ionitzant d'aliments no és una nova tecnologia de tractament, ja que els seus inicis poden datar-se a finals del segle dinou, encara que no és fins a la dècada dels quaranta del segle vint que apareix el terme *irradiació*. Poden distingir-se tres etapes o períodes ben dife-

renciats en la història de la irradiació d'aliments. El període que va de 1890 a 1940 representa els inicis de la física de la irradiació i de les diferents fonts utilitzades, tot això lligat als primers tractaments d'aliments amb radiació. El període de 1940 a 1970 es correspon amb una etapa d'intensa investigació i desenvolupament en l'aplicació de la radiació al tractament d'aliments, i a l'estudi de la salubritat dels aliments irradiats. A partir de 1970 han aparegut una sèrie de reglamentacions de control i aplicació de la irradiació d'una forma segura, ja que s'ha relacionat el tractament de processament d'irradiació amb l'energia nuclear; això ha portat que moltes vegades s'hagi confós l'aliment irradiat amb el radioactiu, que són coses completament diferents: el primer és el tractat amb radiació, mentre que el segon es refereix al potencial radioactiu de l'aliment.

La irradiació ionitzant ha estat la tècnica de tractament d'aliments més estudiada durant més de cent anys, i existeixen infinitat de documents que corroboren que és un procés segur, pràctic i beneficiós. Tanmateix, existeix un corrent contrari al tractament d'aliments mitjançant la irradiació, que nega la realitat de fets contrastats i substitueix aquesta realitat científica per la sospita temerosa. Aquest rebuig que experimenta la irradiació no és únic en la història del processament d'aliments. La mateixa pasteurització, que avui en dia és un tractament convencional i assimilat per part del consumidor, també va tardar a aplicar-se d'una forma general a causa dels detractors que va tenir no només en els seus inicis; en alguns casos va tardar més d'un segle a aplicar-se i fins i tot avui en dia en alguns països no està encara disponible.

Es denomina radiació ionitzant el conjunt d'emissions de partícules subatòmiques i radiació electromagnètica d'origen nuclear o atòmic que en interaccionar amb la matèria és capaç de produir-ne la ionització. En altres paraules, és la radiació que en incidir sobre la matèria produeix la pèrdua d'electrons, la qual cosa

comporta la producció d'ions. La radiació és una forma d'energia, i qualsevol persona rep radiació natural del Sol i d'altres components naturals del medi ambient. Igual com altres formes d'energia radiant, les ones de radiació utilitzades per tractar els aliments formen part de l'espectre electromagnètic (figura 1).

Majoritàriament, la irradiació s'ha utilitzat en el camp de la medicina, com és el cas dels raigs X i de la radiació nuclear en la detecció i el tractament de malalties, en l'esterilització d'equip mèdic, en els aparells, en els productes farmacèutics i en la producció d'aliments esterilitzats per a dietes hospitalàries especials. L'emissió de radiacions ionitzants és una característica comuna de molts àtoms que són inestables. Aquests àtoms denominats *radioactius* es transformen per convertir-se en àtoms estables, la qual cosa s'aconsegueix alliberant energia en forma de radiació. El tipus de radiació alliberada pels àtoms radioactius pot ser de quatre tipus:

— Partícules alfa (α): àtoms d'heli, que contenen dos protons i dos neutrons.

— Partícules beta (β): electrons o positrons procedents de la transformació en el nucli.

— Radiació gamma (γ): radiació electromagnètica de l'extrem més energètic de l'espectre de radiació.

— Neutrons: partícules sense càrrega.

La capacitat de penetració en la matèria d'aquestes radiacions és diferent, de tal manera que per a les partícules α aquesta capacitat és limitada, ja que, per exemple, poden quedar retingudes per làmines de paper. Les partícules β són una mica més penetrants, podent travessar la làmina de paper, però el cos humà les reté. La radiació γ és més penetrant; travessa el cos humà i làmines de diferents metalls, encara que queda retinguda per làmines de plom. Els neutrons, com que no tenen càrrega elèctrica, són molt penetrants; travessen tots els materials que retenen les radiacions anteriors, però poden quedar retinguts per murs de formigó de suficient gruix.

Quan s'irradia una cèl·lula, la radiació pot actuar de forma directa sobre el material genètic o sobre les macromolècules, encara que també pot actuar de manera indirecta sobre l'aigua continguda en l'interior de la cèl·lula o bé quan les molècules ionitzades interaccionen amb la matèria que l'envolta.

Les fonts de radiació ionitzant que s'apliquen en la indústria alimentària són els raigs X, feixos d'electrons i radiació γ . Els raigs X són una radiació electromagnètica de molta energia, motiu pel qual el

seu poder de penetració és elevat, i presenta un espectre de radiació continu amb un valor màxim de 5 MeV. Els raigs X usualment s'obtenen mitjançant el bombardeig d'una placa metàl·lica amb un feix electrònic d'alta potència. La radiació és produïda amb isòtops radioactius, que en la indústria alimentària solen ser els radioisòtops de ^{60}Co i ^{137}Cs . El feix d'electrons és un conjunt de partícules d'alta energia carregades elèctricament, de fins a 10 MeV. Perquè els electrons tinguin una energia elevada es porten a un accelerador lineal que els confereix alts voltatges i s'obtenen electrons amb una velocitat propera a la de la llum. L'avantatge que presenten davant la radiació γ és que el feix electrònic es produeix en una màquina elèctrica i es pot encendre i apagar com una bombeta. Tanmateix, el seu poder de penetració és més reduït, d'uns 5 a 10 cm.

Les plantes de tractament d'aliments, qualsevol que sigui el procés aplicat, consten de diferents elements que són comuns a totes. De tal manera que l'etapa diferencial sol ser la pròpia del tractament realitzat. És important tenir present que la zona on s'emmagatzemen els productes a tractar ha d'estar separada de la zona d'emmagatzematge dels productes ja tractats, ja que en cas contrari pot existir contaminació encreuada. En qualsevol planta de tractament es poden distingir els elements que es descriuen a continuació: a) Zona d'emmagatzematge dels productes a tractar. Que generalment es troba prop de la zona de càrrega als dispositius de tractament. b) Zona de càrrega. En aquesta zona es carreguen els productes a tractar en caixes adequades, que es col·loquen en una cinta transportadora. c) Cinta transportadora. Serveix per transportar els productes a tractar des de la zona d'emmagatzematge fins al punt de tractament. Aquesta cinta també porta els productes irradiats fins a la zona d'emmagatzematge de productes tractats. El moviment de la cinta ha de permetre que els productes rebuin la dosi adequada. d) Zona d'irradiació. És l'element prin-

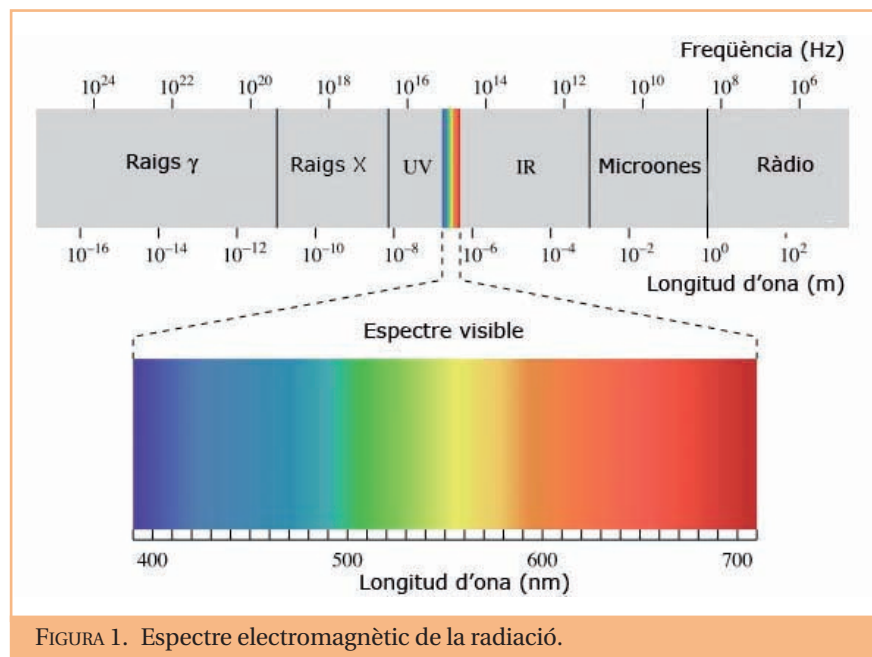


FIGURA 1. Espectre electromagnètic de la radiació.

principal de qualsevol planta, és la zona potencialment més perillosa i és necessari que estigui aïllada del personal que opera la planta. Per a això la cel·la de tractament es troba recoberta per parets de formigó de 2 m de gruix que protegeixen els operaris. A l'interior de la cel·la es troba situada la font de radiació. A causa del fet que l'aigua és un dels millors blindatges per a la radiació procedent de la desintegració del ^{60}Co o el ^{137}Cs , la font radioactiva es troba submergida en una piscina, i s'eleva per control remot quan els aliments que s'han de tractar es troben en la cambra de tractament. En el cas de l'accelerador d'electrons la màquina s'encén quan entra el producte. El recorregut que realitza el producte ha d'assegurar que aquest rep la dosi calculada per a la finalitat del tractament; per a això, la velocitat de la cinta transportadora ha de ser tal que el temps que el producte està en l'interior de la cambra de tractament sigui l'adequat. Quan el producte és de grans dimensions o molt dens, se'l fa voltar i es passa de nou per la radiació amb la finalitat d'assegurar un tractament adequat. e) Per a plantes que utilitzen accelerador d'electrons és necessari que es disposi d'una cambra per al circuit de refrigeració. Aquests acceleradors solen ser compactes, i en el

mercat se'n troben diferents models, amb una gamma de potència diferenciada. Un d'aquests models posseeix una potència de 35 kW i emet electrons amb energies d'entre 3 i 10 MeV, encara que també existeixen models amb potències de 80 i 150 kW. En el cas de fonts de ^{60}Co o ^{137}Cs , s'ha de disposar d'una piscina per poder emmagatzemar aquestes fonts, que consisteixen en barres que contenen les càpsules del material radioactiu. Aquestes barres es guarden sota aigua desionitzada en una piscina sota terra a uns 4 m de profunditat, per garantir la seguretat dels operaris. Quan es tracta el producte, aquestes barres s'eleven verticalment fora de la piscina, i una vegada acabat el tractament es tornen a submergir en la piscina. f) Zona de descàrrega. En un punt de la planta allunyada de la zona de càrrega, on es rep el producte tractat. g) Zona d'emmagatzematge. Prèviament a l'emmagatzematge definitiu, el producte ha de ser etiquetat de manera adequada i realitzar un mesurament de la dosi rebuda. A continuació es duu al magatzem, on es guarda sota condicions adequades perquè no existeixi recontaminació del producte tractat; per això aquesta zona ha d'estar allunyada de la zona on s'emmagatzema el producte no tractat.

h) Laboratori de control. On es controla la dosimetria en tots els punts de la planta. És necessari mesurar la dosi rebuda pels productes, encara que també és imprescindible mesurar la radiació que rep el personal que treballa en la planta. A la figura 2 es mostra una planta típica de tractament amb ^{60}Co .

Per a cada producte alimentari les dosis de radiació permeses depenen de les seves pròpies característiques i de l'objectiu perseguit. Això suposa que les dosis per a l'eliminació d'insectes, per a la pasteurització i per a l'esterilització seran diferents. De manera que es consideren tres categories d'irradiació segons sigui la dosi utilitzada: dosis baixes, mitjanes i altes. Es pot destacar que, segons la dosi de radiació, el tractament sol rebre diversos noms. Així, l'eliminació de microorganismes patògens no esporulats i de paràsits fins a un nivell imperceptible es denomina *radiopasteurització*. El tractament dels aliments amb radiació ionitzant a fi d'incrementar la seva vida mitjana reduint el nombre de microorganismes alteradors (pasteurització) rep el nom de *radurització*, mentre que si l'eliminació per irradiació de microorganismes es realitza a nivells d'esterilització es denomina *ra-*

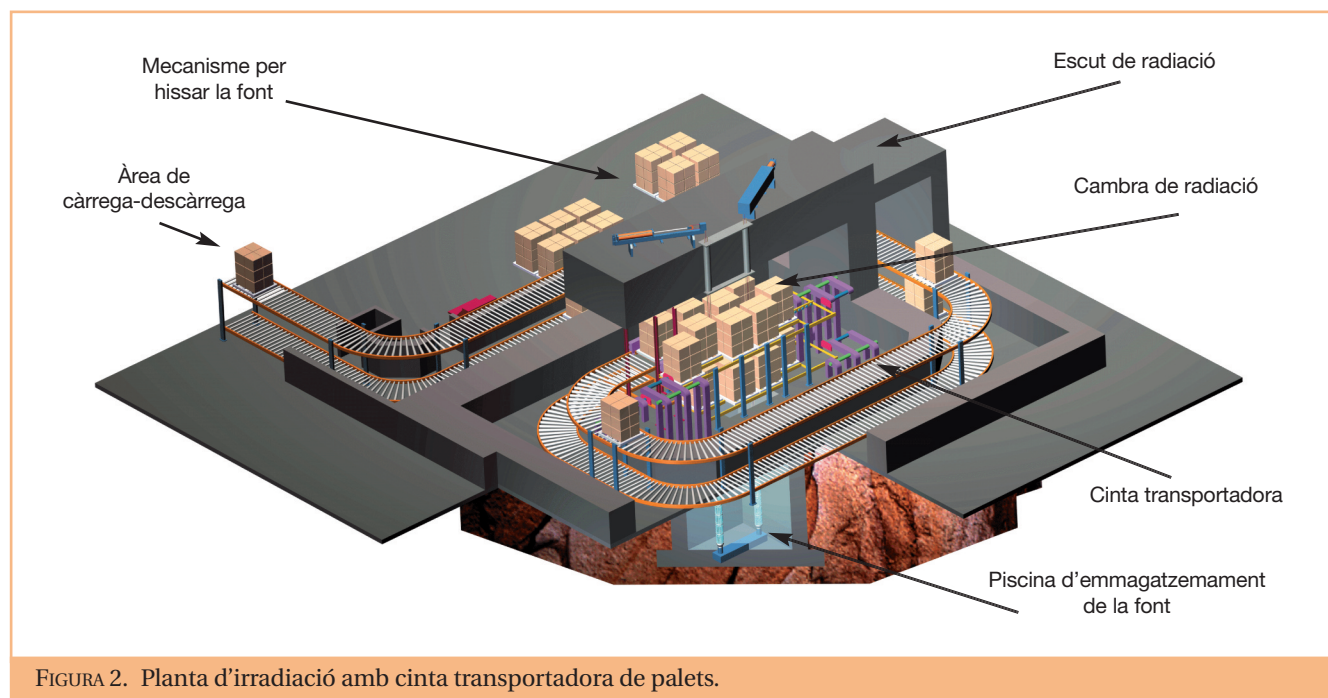


FIGURA 2. Planta d'irradiació amb cinta transportadora de palets.

dioesterilització. A la taula 1 es mostren les dosis utilitzades per irradiar aliments i les aplicacions de cada cas.

La irradiació és un mètode de tractament que és eficaç per a la destrucció de paràsits i bacteris, tant patògens com no patògens, i en menor grau de virus. Els mecanismes d'inactivació són deguts al dany que la irradiació produeix al material genètic, tant de forma directa com indirecta. Així, la radiació ionitzant pot col·lidir directament sobre el material genètic de la cèl·lula i provocar una lesió en l'ADN, encara que també pot incidir sobre una molècula adjacent que posteriorment reacciona amb el material genètic. En els tractaments tèrmics, la inactivació dels microorganismes a una determinada temperatura segueix una cinètica de primer ordre. D'una manera anàloga, en el cas de la irradiació s'ha observat que el nombre de microorganismes presents en un aliment irradiat disminueix amb la dosi aplicada segons una cinètica també de primer ordre:

$$N = N_0 \exp (-k D),$$

en la qual N_0 és el nombre de microorganismes presents a l'aliment per al temps inicial, N el nombre de microorganismes que sobreviuen, D és la dosi aplicada i k és la constant cinètica de destrucció del mi-

croorganisme a causa de la radiació. Per a una pasteurització es necessiten dosis entre 1 i 10 kGy, mentre que per a l'esterilització del producte són necessàries dosis entre 15 i 50 kGy.

Els efectes que produeix la irradiació depenen del tipus d'aliment que s'està tractant, a més de les condicions del medi. Aquests efectes depenen dels processos radioinduits, ja que es veuen afavorits per la presència d'oxigen, per l'augment del pH, per l'augment de la temperatura i pel contingut en aigua. Als productes alimentaris secs i deshidratats, la irradiació directa resulta més efectiva, ja que la disponibilitat d'aigua és menor i, per tant, la formació de radicals lliures és menor. També és recomanable irradiar a temperatures de congelació ja que l'aigua no es troba en forma líquida, la qual cosa elimina el procés de radiòlisi. A més, és millor irradiar els aliments envasats sota buit o en atmosfera modificada, en absència d'oxigen o amb nivells molt baixos. Quant al pH, la irradiació d'aliments amb un valor inferior a 4,5 és més segura, i es necessiten dosis de radiació menors que si el pH fos superior. És important ressaltar que la irradiació, de la mateixa manera que altres tractaments, només arriba a ser efectiva amb aliments que es troben en bones condicions sanitàries i d'higiene. La irradiació mai no

millorarà aquells aliments que es trobin fortament alterats.

La irradiació es pot aplicar per controlar microorganismes patògens i perjudicials, al mateix temps que pot allargar la vida comercial de carns, peixos i mariscs, fruites i verdures, ous i ovoproductes, tubercles i bulbs, i també en desinfestació de llavors, llegums, fruits secs i productes deshidratats, en espècies, herbes i condiments, en productes lactis, en vins i licors, i també s'ha utilitzat com a tractament de quarantena.

ESCALFAMENT INFRAROIG

Els espectres electromagnètics dins de les longituds d'ona infraroges (IR) es poden dividir en tres parts: ones llargues, ones mitjanes i ones curtes. Les ones curtes apareixen quan les temperatures estan per sobre de 1.000 °C; les ones llargues apareixen per sota de 400 °C i les ones mitjanes entre aquestes temperatures. Per als aliments, aquesta tècnica s'ha utilitzat en moltes aplicacions, ja que les ones llargues són un dels principals mecanismes de transmissió de calor als forns ordinaris o altres equips d'escalfament. Tanmateix, la utilització d'ones curtes és nova en la indústria alimentària.

El principal component de l'equip IR per a escalfament és el radiador, del qual existeixen diversos tipus i formes. Aquests aparells es poden dividir principalment en radiadors escalfats amb gas (ones llargues) i radiadors escalfats elèctricament. D'aquests últims, es poden trobar escalfadors metàl·lics tubulars/plans (ones llargues), escalfadors ceràmics (ones llargues), escalfadors de tub de quars (ones mitjanes i curtes) o escalfadors de tubs halogenats (ones ultracurtes). La velocitat de transmissió de calor depèn de la temperatura de les superfícies d'escalfament i dels materials que la reben, de les propietats superficials dels dos materials i de la forma dels cossos emissors i receptors. Les ones absorbides es transformen en calor i la temperatura del

TAULA 1. Irradiació d'aliments, dosi i aplicacions		
Dosi	Dosi absorbida (kGy)	Aplicació
Baixa (< 1 kGy)	0,04 - 0,10	Inhibició de germinació de tubercles i bulbs
	0,03 - 0,20	Esterilització d'insectes, larves i ous
	0,50 - 1,00	Control de la maduració de fruites i hortalisses
Mitjana (1 a 10 kGy)	1 - 3	Mort d'insectes
	1 - 7	Radiopasteurització (eliminació de patògens)
	2 - 10	Radurització (pasteurització)
Alta (10 a 50 kGy)	15 - 50	Radioesterilització
	10 - 50	Descontaminació d'additius i espècies
Nota: La unitat de radiació absorbida és el gray (1 Gy = 1 J/kg).		

material augmenta. Quan les ones penetren al material les vibracions i rotacions de les molècules canvien. Les dues vibracions fonamentals que tenen lloc són estirades i torsions. L'estirada implica un descens o un augment de la distància entre àtoms, i la torsió significa un moviment dels àtoms. Quan la llum infraroja incideix en una molècula, absorbeix energia i la vibració canvia. Quan la molècula retorni al seu estat inicial, l'energia es transformarà en calor.

L'interès actual en els centres industrials d'aplicacions d'escalfament en ones IR curtes (longituds d'ona al voltant d'1 m) i IR intermèdies (al voltant de 10 m) és que a aquestes longituds d'ona es fa possible iniciar i assolir les temperatures de treball en segons, al mateix temps que ofereixen una transferència ràpida d'altres quantitats d'energia i un excel·lent control del procés. D'altra banda, en alguns materials alimentaris l'ona IR curta demostra una profunditat de penetració de fins a 5 mm. La tecnologia IR ha estat subestimada en el camp alimentari, malgrat el seu gran potencial. Les principals aplicacions comercials de l'escalfament per IR són l'assecatge d'aliments de baixa humitat (alguns exemples són l'assecatge de pa ratllat, cacau, farines, grans, malta, productes de pasta i te). Sovint la tècnica s'utilitza com una part del procés sencer molt freqüentment a l'inici per accelerar el primer augment de la temperatura de la superfície. Aquests processos són la fregida, l'enfornada i l'assecatge. L'escalfament radiant s'utilitza en forns de rostida i enfornada i també s'utilitza per encongir les pel·lícules d'envasament.

La majoria de les aplicacions d'IR dins de l'àrea dels aliments van venir durant els anys de 1960 a 1970 des dels Estats Units, la Unió Soviètica i països de l'est d'Europa. Durant els anys 1970 i 1980 l'Institut Suec d'Alimentació i Biotecnologia (SIK) va realitzar molt treball bàsic aplicant aquesta tècnica en l'àrea d'aliments. Més recentment el treball s'ha dut a terme al Japó, Taiwan

i altres països. La major part d'aquest treball encara és de naturalesa experimental. Les aplicacions són principalment de les àrees següents: assecatge d'hortalisses i peix, assecatge de pasta i arròs, escalfament de farina, fregida de carn, torrada de cereals, cafè i cacau, enfornada de pizza, galetes i pa. La tècnica també s'ha utilitzat per a la descongelació, la pasteurització superficial de pa i la pasteurització de materials envasats.

TRACTAMENT AMB RADIOFREQUÈNCIA

L'escalfament per radiofreqüència (RF) o alta freqüència (HF) es descriu d'una manera més correcta com a escalfament per RF dielèctric, i és una tecnologia de processament tèrmic ben establerta que ha trobat aplicacions en moltes àrees. En termes molt simples, l'escalfament d'aliments per radiofreqüència sorgeix de la conversió directa d'energia elèctrica en calor dins del volum del mateix aliment. Aquesta energia és proporcionada per un camp elèctric d'alta freqüència aplicat entre plaques d'un condensador (l'aplicador de RF). En termes elèctrics, els aliments són dielèctrics (materials que augmenten la càrrega emmagatzemada en un condensador) que posseeixen un factor dielèctric de pèrdues significatiu (una indicació de la quantitat d'energia que es dissipa). Les bandes de freqüència de ràdio i de microones ocupen seccions adjacents de l'espectre electromagnètic, amb les microones tenint freqüències més altes que les ones de ràdio. L'actual punt de divisió de les dues bandes de freqüència està definit d'una manera imprecisa, amb, per exemple, algunes aplicacions al voltant de 900 MHz estant referides com a RF (telèfons mòbils), i algunes com a microones (escalfament dielèctric). Tanmateix, l'energia utilitzada per generar i transmetre els camps elèctrics d'alta freqüència es pot utilitzar per distingir-los. Els sistemes de RF generalment es basen en vàlvules elèctriques d'alta potèn-

cia (per produir la potència de RF), les línies de transmissió (per transportar l'energia de RF) i els aplicadors en forma de condensadors; mentre que els sistemes de microones utilitzen magnetrons (per generar les microones), guies d'ones (per transportar les microones) i cavitats (en les quals s'apliquen les microones).

Existeix un nombre relativament petit de bandes de freqüència acordades i reconegudes internacionalment que es poden utilitzar per a l'escalfament per RF i per a microones. Aquestes són conegudes com a bandes industrials, científiques i mèdiques (ISM, per les seves sigles en anglès). Les regulacions de compatibilitat electromagnètica (EMC) fixen límits molt baixos per a qualsevol emissió fora d'aquestes bandes, i, en la majoria de països, la conformitat és una obligació legal. En conseqüència, virtualment tot equip de procés d'escalfament per RF operarà a una de les tres freqüències ISM permeses. Val la pena ressaltar que la longitud d'ona de les freqüències de ràdio és substancialment més gran que la de les freqüències de les microones (11 m a 27,12 MHz comparada amb només 12 cm a 2.450 MHz). És aquesta diferència la que condueix a un nombre significatiu d'avantatges de la RF sobre les microones, particularment per a aplicacions industrials de processament d'aliments. Els sistemes disponibles per a la producció i la transferència de potència de RF als aplicadors dielèctrics d'escalfament es poden dividir en dos grups diferents: l'equip més generalitzat convencional d'escalfament per RF i el més recent equip d'escalfament per RF de 50 Ω. Encara que l'equip convencional s'ha utilitzat amb èxit durant anys, les sempre estrictes regulacions EMC, i la necessitat de millora del control del procés, estan conduint a un augment de la utilització dels sistemes d'escalfament per RF basats en la tecnologia de 50 Ω.

L'escalfament per radiofreqüència ha estat utilitzat en la indústria de processament d'aliments durant

moltes dècades. La postenforada amb RF de galetes i cereals i l'assecatge per RF d'aliments són aplicacions ben establertes. Més recentment, l'equip de descongelació per RF ha demostrat beneficis substancials sobre tècniques convencionals i sobre sistemes comparables de temperament per microones. A més, com que la preocupació del públic sobre temes de seguretat alimentària continua creixent, i com la demanda de menjars preparats augmenta, els processos de pasteurització i esterilització amb RF guanyen cada dia en importància. A la figura 3 es mostra un esquema típic d'una planta de processament per RF, on es pot veure que l'aliment es diposita a sobre d'una cinta transportadora i passa a través de dos elèctrodes.

PROCESSAMENT AMB MICROONES

Les microones són un tipus d'ona electromagnètica amb una banda de freqüència de 300 MHz a 300 GHz. El terme *microona* és una mica enganyós ja que la seva longitud d'ona al buit es troba en l'interval entre 1 m i 1 mm. El seu nom apunta més aviat a la seva longitud d'ona dins de la matèria, on pot tenir una longitud de micròmetres. A la pràctica, per a les aplicacions d'escalfament amb microones no s'utilitza tot l'espectre de microones, sinó que existeixen algunes bandes de freqüència discretes que s'han fixat a part de les d'aplicacions de telecomunicació per a aplicacions industrials científiques i mèdiques (tam-

bé denominades ISM). Les bandes de freqüència ISM més importants i més utilitzades són 915 MHz i 2.450 MHz, en què un cert nivell de radiació limitat ha estat tolerat per altres aplicacions (com a dispositius de comunicació).

Els sistemes creadors de microones són compostos de les parts següents: magnetró, conductors d'ones i aplicadors de microones. Al magnetró l'energia elèctrica rebuda de la xarxa es transforma en microones. Un magnetró és un tub al buit amb un càtode central emetent electrons de potencial altament negatiu, que està envoltat per un ànode estructurat. La potència de sortida d'un magnetró es pot controlar tant amb el corrent del tub com amb la força del camp magnètic. La potència màxima, generalment, està limitada per la temperatura de l'ànode; límits pràctics a 2,45 GHz són aproximadament 1,5 kW i 25 kW per a ànodes refredats per aire o aigua, respectivament. A causa de la seva mida més gran, els magnetrons de 915 MHz poden aconseguir potències més altes per unitat. Les eficiències dels magnetrons moderns de 2,45 GHz estan en l'interval d'aproximadament 70 %, més limitades per la densitat de flux magnètic dels imants econòmics de ferrita utilitzats, mentre que l'eficiència total de les aplicacions d'escalfament amb microones és més baixa a causa de les càrregues no equilibrades. Per a la conducció d'una ona electromagnètica es poden utilitzar línies de transmissió (per exemple, línies coaxials) i conductors d'ones. A freqüències més altes, com les microones, els conductors d'ones te-

nen pèrdues més baixes i, per tant, s'utilitzen per a aplicacions de potència. Principalment, els conductors d'ones són conductors buits normalment de secció transversal constant, pel qual les formes rectangulars i circulars són les de major ús pràctic. El conductor d'ones es pot utilitzar com un aplicador de l'escalfament amb microones, quan el material que serà escalfat s'introdueix pels orificis de la paret i el conductor d'ones acaba en una càrrega acoblada. Aquesta configuració es denomina un dispositiu de viatge d'ones, ja que el lloc de màxim camp canvia amb el temps. Una radiació a través dels orificis només té lloc si les línies de corrent de la paret es tallen i els orificis excedeixen de certa dimensió, que es pot evitar. El més comú en el camp alimentari industrial i domèstic són els dispositius d'ones fixes, en què les microones irradien mitjançant una sèrie d'orificis (que tallen els corrents de la paret) o antenes de banyes (formades especialment amb obertures en els extrems) de conductors d'ones. Cal distingir entre tres tipus d'aplicadors pel tipus de configuració del camp: aplicadors de camp propers, aplicadors de mode simple i aplicadors multimodals.

La utilització de l'energia de les microones en el processament d'aliments es pot classificar en sis operacions unitàries: (re)escalfament, enforada i (pre)coccio, temperament, escaldat, pasteurització i esterilització, i deshidratació. Encara que els seus objectius difereixen, aquests propòsits s'estableixen amb mitjans similars: un augment de la temperatura. Tanmateix, per a cada ús especial (diferent de l'escalfament pur amb microones), s'han de tenir en compte els diferents avantatges i desavantatges. Els forns de microones són un lloc comú a les cases i estan establerts com a dispositius d'ús diari. La seva principal funció és el reescalfament d'aliments prèviament cuits o preparats. La combinació relativament nova de microones amb altres sistemes d'escalfament (per exemple, convencional, infraroig o raig d'aire) hauria

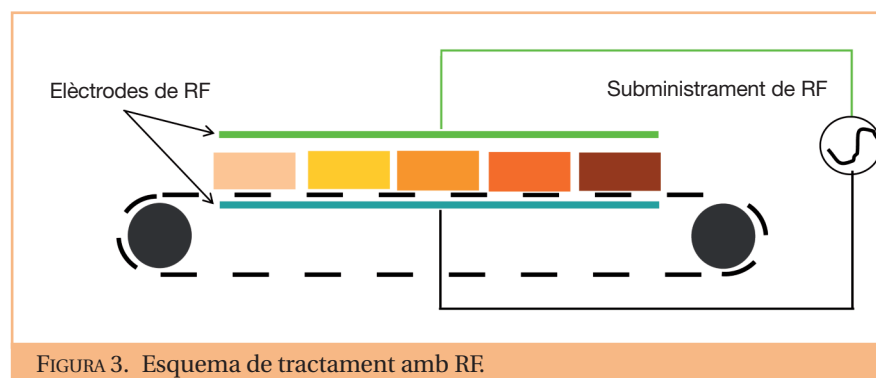


FIGURA 3. Esquema de tractament amb RF.

d'incrementar el seu potencial perquè sigui un dispositiu complet de cocció, que podria reemplaçar els forns convencionals. Desgraciadament, a la indústria la distribució dels processos amb microones encara està lluny d'uns nombres elevats. Només un nombre relativament baix d'aplicacions amb microones es pot trobar a l'actual producció industrial, comparat amb el seu alt i indiscutible potencial. Aquestes aplicacions reeixides de les microones cauen dins d'un gran espectre de tot tipus de processos tèrmics alimentaris. Els avantatges més destacats de l'escalfament amb microones són l'acceleració assequible i els estalvis de temps i el volum possible davant l'escalfament de la superfície. Les raons del fracàs de les aplicacions industrials de les microones van des dels alts costos energètics, que s'han d'equilibrar mitjançant qualitats del producte més altes, fins al conservadorisme de la indústria alimentària i als relativament baixos pressupostos per a la recerca, o l'absència del coneixement enginyeril de les microones i dels models complets d'escalfament amb microones i les seves prestacions de càlcul.

ESCALFAMENT ÒHMIC

El concepte d'escalfament òhmic d'aliments no és nou. El segle XIX es van patentar diversos processos que utilitzaven corrent elèctric per a l'escalfament de fluids. A començaments del segle XX, la pasteurització «elèctrica» de la llet es va aconseguir passant llet entre plaques paral·leles amb una diferència de voltatge entre elles, i sis estats als Estats Units tenien pasteuritzadors comercials elèctrics operatius. L'escalfament òhmic es basa en el pas d'un corrent elèctric altern (CA) a través d'un cos com ara un sistema alimentari format per un líquid amb partícules que serveix com a resistència elèctrica, en la qual es genera calor. El voltatge del CA s'aplica als elèctrodes en ambdós extrems del cos del producte. La velocitat d'es-

calfament és directament proporcional al quadrat de la força de camp elèctric i a la conductivitat. La força del camp elèctric es pot variar ajustant l'espai entre elèctrodes o el voltatge aplicat. Tanmateix, el factor més important és la conductivitat elèctrica del producte i la seva dependència de la temperatura.

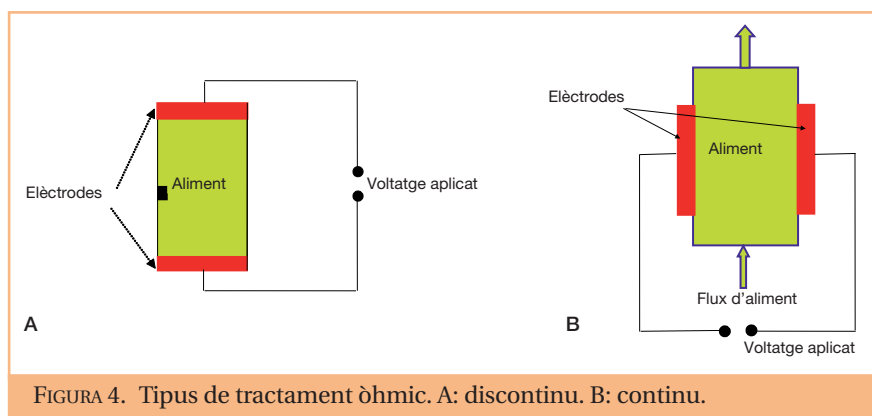
El procés d'escalfament òhmic posa a l'abast als processadors d'aliments l'oportunitat de produir productes nous, amb alt valor afegit, autoestables, amb una qualitat prèviament no aconseguida amb les actuals tècniques d'esterilització. Les aplicacions que s'han desenvolupat inclouen el processament de menjars preparats a punt per menjar (*ready-to-eat*) amb un alt valor afegit per a l'emmagatzemament i la distribució a temperatura ambient; l'escalfament de productes alimentaris previ a l'esterilització en llaunes, i la producció higiènica de menjars preparats a punt per menjar amb un alt valor afegit per a l'emmagatzemament i la distribució a temperatura de refrigeració. L'escalfament òhmic també es pot utilitzar per a l'escalfament de productes alimentaris d'acidesa alta, com ara salses basades en tomàquet, previ a l'envasament en calent, amb considerables beneficis per a la qualitat del producte. Altres aplicacions potencials inclouen l'escalfament ràpid de productes alimentaris líquids, que són difícils d'escalfar mitjançant tecnologies convencionals. Altres possibles aplicacions potencials per a l'escalfament òhmic inclouen l'escaldat, l'evaporació, la deshidratació, la fermentació i l'extracció.

El disseny de l'equip és un factor crític que cal considerar. La raó dels fracassos inicials de l'escalfament òhmic per ser aplicat àmpliament a escala comercial va ser l'absència de materials inerts per als elèctrodes i l'equip de control prou precís per mantenir la temperatura dins de d'interval necessari i prou sòlid per suportar les condicions de producció comercial. Actualment, els dissenys disponibles comercialment inclouen elèctrodes que es troben

localitzats en diverses posicions al llarg de la longitud del pas de flux del producte (camp en línia), o col·locats perpendicularment al flux (camp creuat), i difereixen principalment en la distribució de la força de camp elèctric. En els primers dissenys l'efecte electrolític que provoca la dissolució dels elèctrodes metàl·lics va ser menyspreat completament, i la tecnologia de materials disponibles no permetia que estigués disponible un material adequat per als elèctrodes. Per a les tecnologies actuals, com ara el procés òhmic APV, la utilització d'un material elèctric d'elèctrode compatible amb l'aliment i la correcta densitat de corrent han eliminat els problemes de contaminació. Altres formes de superar aquest problema inclouen la utilització de freqüència d'alta potència, ja que a freqüències alternes per sobre de 100 kHz no existeix una dissolució aparent del metall.

En un sistema típic d'escalfament òhmic comercial l'aliment és impulsat a través d'una canonada vertical que conté una sèrie d'elèctrodes cilíndrics connectats a un subministrament trifàsic de 50 Hz. D'aquesta manera l'aliment flueix a través del corrent elèctric a les canonades que tenen connectats els elèctrodes. A la figura 4 es mostra un esquema típic de les dues possibles variants del tractament: continu i discontinu. El material alimentari s'escalfa ràpidament a la temperatura d'esterilització, després passa en una secció de manteniment i finalment a una planta d'envasament asèptic.

La modelització de l'escalfament òhmic és difícil a causa del caràcter especial d'aquesta forma d'escalfament, que requereix molta comprensió dels factors crítics. La velocitat d'escalfament òhmic és fonamentalment dependent de la conductivitat elèctrica dels aliments que estan sent processats, per als quals només es troba disponible una informació limitada. Si les conductivitats elèctriques de la fase líquida i de les partícules són les mateixes, la barreja es pot escalfar ràpidament i uniforme a una temperatura alta in-



dependentment de la mida de la partícula. Si la conductivitat de la partícula és més alta que la del líquid, llavors s'escalfa més ràpid i transfereix calor al líquid, que té els avantatges d'assegurar un procés adequat. Els productes particulats són l'eix central al voltant del qual es construeix una formulació d'escalfament òhmic. Al contrari de l'escalfament convencional, en el qual s'espera poca diferència en la transmissió de calor deguda als canvis d'orientació de les partícules, el model d'escalfament d'un sistema alimentari escalfat òhmicament podria veure's influït per l'orientació de les partícules. També és important el disseny del procés, una descripció completa de les condicions crítiques de processament, per assegurar la letalitat i l'optimització de la qualitat. És necessari incloure procediments de formulació en discontinu, temperatura inicial, cabal o temps de residència, temperatura de sortida i nivells de càrrega del sòlid. Se suposa que l'agitació d'un sistema continu de processament minimitza qualsevol desigualtat entre els perfils de temperatura de les partícules. Tanmateix, no existeix suficient informació publicada per indicar quina temperatura té dins una partícula i com el perfil de temperatura canvia durant un procés continu. És evident que, per a una partícula amb una conductivitat elèctrica homogènia més gran que la del líquid, la partícula s'escalfa més ràpid que la fase líquida, el seu punt més fred es dona en el seu superfície i el líquid és més fred que la partícula. La localització de la part d'escalfament més lenta

del sistema és especialment important, a causa que s'ha d'assegurar la seva letalitat tèrmica. Aquest és el factor clau per determinar el temps de processament.

TENDÈNCIES FUTURES

La indústria alimentària, igual com altres indústries, està incorporant noves tecnologies, basades en els nous avenços aconseguits per la gran tasca de recerca que s'està duent a terme en els centres d'investigació i les universitats. Cal suposar que moltes d'aquestes noves tecnologies, que avui en dia estan en fase emergent o en fase de consolidació, s'aniran consolidant i que en un futur no molt llunyà seran tecnologies usuals.

Un aspecte molt important és la modelització de moltes d'aquestes tecnologies, que en permetrà un millor coneixement, ja que s'obtiniran les condicions òptimes d'operació i d'aplicació industrial. Una altra faceta que s'ha de tenir molt present és l'aplicació de tècniques computacionals que permeten la modelització de qualsevol tipus d'operació sense necessitat de tenir un dispositiu físic, la qual cosa permetrà realitzar estudis sense una despesa efectiva de matèria primera i energia, amb què s'obindrà una millor comprensió dels mecanismes i un millor disseny del procés.

A causa que algunes d'aquestes tecnologies requereixen un millor coneixement de les propietats físiques i tèrmiques dels aliments, aquest és un camp en el qual s'ha

d'aprofundir i és una línia d'investigació oberta. Els efectes de moltes d'aquestes tecnologies sobre els microorganismes, enzims i components dels aliments és necessari que s'estudiïn en profunditat, per tal de conèixer les cinètiques de destrucció i deteriorament, cosa que permetrà un millor disseny de les operacions implicades.

Les tecnologies sensorials estan esdevenint cada cop més rellevants, sobretot amb l'aplicació de tecnologies d'imatges per ressonància magnètica, ultrasons, i totes les alternatives de visió artificial. Els sensors són indispensables en una bona operació de qualsevol procés industrial, i segurament seran incorporats per a la seva utilització en línia.

Un altre aspecte a considerar són els recobriments utilitzats en la conservació d'aliments, que permeten una ampliació de la vida comercial del producte. Dins d'aquests recobriments es podrien destacar les pel·lícules comestibles que ja s'utilitzen en certs casos, i que tindran una major aplicació en el futur.

Aquestes possibles aplicacions són un resum del potencial futur que moltes tindran, i que es dirigeixen a un millor tractament, conservació i ampliació de la vida comercial de qualsevol aliment. Amb tot això es pretén que el producte acabat sigui més segur des del punt de vista microbiològic i també amb característiques nutricionals, que tanta importància prenen en aquests darrers temps.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- IBARZ, A. (2008). «Ionizing Irradiation of Foods». A: URWAYE, Alan P. (ed.). *New Food Engineering Research Trends*. Nova York: Nova Publishers.
- IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. (2005). *Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos*. Madrid: Mundiprensa.
- RAVENTÓS, M. (2003). *Industria alimentaria: Tecnologías emergentes*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- RICHARDSON, P. (2005). *Tecnologías térmicas para el procesamiento de los alimentos*. Saragossa: Acribia.
- SATIN, M. (2000). *La irradiación de los alimentos*. Saragossa: Acribia.