

# ELS SENSORS QUÍMICS

## Un nou concepte en instrumentació analítica

SALVADOR ALEGRET

Membre de la Secció de Ciències i Tecnologia de l'Institut d'Estudis Catalans  
Professor de la Universitat Autònoma de Barcelona

### SUMMARY

A brief introduction to science and technology of chemical sensors is presented. Complementary concepts such as computers and sensors, chemical sensors and biosensors, receptors and transducers, and methodologies and technologies, are discussed and their relationships are made clear in order to delimit the scope of this new R + D field. Finally, a short description about current research on chemical sensors and biosensors carried out at Catalonia is commented.

### ORDINADORS I SENSORS

La irrupció dels ordinadors en multituds d'àmbits de la nostra societat, tan vitals com ho són els d'ordre econòmic, social, polític, cultural, artístic i, sobretot, els de tipus científic i tècnic, ha fet que hom hi vegi una veritable revolució, d'un impacte superior al que tingué en el seu moment la Revolució Industrial.

L'ordinador ha esdevingut un centre neural, una mena de cervell, que regula, ajuda, calcula, coordina, controla, avalua, comunica o decideix, cada vegada més, des d'aspectes puntuals molt quotidians fins a altres de repercussió i abast mundial. De fet, l'ordinador no tan sols assisteix l'home en multitud de feines –amb una gran rapidesa, fiabilitat, integritat, seguretat o privacitat–, sinó que el substitueix en un gran nombre de tasques d'una forma que fins fa ben poc era inimaginable. Els ordinadors comencen a ésser uns ginys ubics.<sup>1</sup>

1. Un fet il·lustratiu d'això és, per exemple, que locucions d'introducció recent com 'disseny assistit per ordinador' (*Computer Aided Design, CAD*) o 'manufacturació assistida per ordinador' (*Computer Aided Machining, CAM*), sorgides de la introducció de l'ordinador en uns camps concrets, ja comencen a semblar obsoletes per ésser a hores d'ara redundants en si mateixes, car tant el disseny com la fabricació, en llurs múltiples vessants, són impensables avui dia sense la presència activa dels ordinadors, de les tecnologies que els produeixen o de les ciències informàtiques que els programen.

Uns dels usos més generalitzats dels ordinadors a les societats desenvolupades és la gestió d'informació de naturalesa molt diversa, la qual és guardada de forma jerarquizada en bases de dades, de fàcil accés i disseminació a través de les xarxes telemàtiques d'abast mundial. Mai com ara, gràcies als "cervells ordinadors i computadors", no hi ha hagut tanta informació disponible, fàcilment accessible i ben gestionada. I també mai com ara no hi hagut, alhora, la necessitat de generar dades de forma contínua, perquè els "cervells electrònics" puguin construir els seus propis sistemes d'informació i de coneixement i puguin intervenir en un sistema exterior de forma immediata i eficient. Atesa l'alta velocitat de processament de les dades que presenten els ordinadors actuals, un dels passos limitants, per tal que aquests ginys puguin prendre més o menys ràpidament les decisions més oportunes, és la forma en què pròpiament l'ordinador adquireix les dades o senyals de l'exterior que li permetran de reaccionar. Aquesta tasca d'adquisició de dades sovint l'han de fer de la mà de l'home, d'una forma més aviat lenta, que impossibilita, doncs, reaccions immediates.

En aquest context hom ha redescobert uns dispositius que són capaços de subministrar de forma contínua als "cervells electrònics" informació del món exterior, tot dotant aquests d'una mena de "sentits", d'uns anàlegs de la vista, l'oïda, el tacte, el gust o l'olfacte. Aquests dispositius, alguns d'ells coneguts des de fa temps en llur versió analògica, són anomenats ara *sensors*. Com és sabut, hi ha sensors de temperatura, de pressió, d'acceleració, de radioactivitat, de llum, de so, etc. (*sensors físics*). També hi ha sensors d'alguns dels components sòlids, líquids o gasosos de molts dels sistemes materials d'interès biomèdic, ambiental o industrial (*sensors químics*). I sense deixar aquest context, hom pot parlar també dels *actuadors*, uns dispositius d'acció mecànica (vàlvules, motors, bombes, pinces, braços, articulacions, etc.) que, tot fent el paper d'unes "extremitats", permeten a l'ordinador d'intervenir en el seu entorn exterior.

## SENSORS QUÍMICS I BIOSENSORS

De sensors químics n'hi ha des de fa molt temps. Són ben coneguts els elèctrodes redox, els elèctrodes selectius d'ions, especialment l'elèctrode de pH, i els diversos tipus de detectors associats a la instrumentació analítica o d'altra classe. El que ha passat és que des de l'adveniment i la popularització dels ordinadors hom ha impulsat de forma sistemàtica la recerca i el desenvolupament en el camp dels sensors, tan físics com químics, i dels actuadors, atesa l'extraordinària innovació que representa el seguiment continu per un ordinador de paràmetres físics i químics d'un procés complex i, com a conseqüència d'això, la possibilitat d'intervenir-hi de forma profitosa, és a dir, controlant-lo.

D'altra banda, el redescobriments dels sensors, especialment dels sensors químics, de la mà dels sistemes informàtics, ha fet que, per comptes d'integrar-se més i més uns i altres, els sensors esdevinguessin en realitat un objecte d'interès per ells mateixos, pel que representen de concepte nou dins el camp de

la instrumentació. En oposició, unes vegades, en complementarietat, altres, al concepte que representen els gran equips analítics –d'alt cost, de manipulació especialitzada i de confinació en ambients condicionats–, els sensors químics representen una nova classe d'instrumentació analítica, caracteritzada per unes dimensions petites, un cost baix, una utilització fàcil i una generació d'informació fiable en temps real. Són uns instruments analítics ideals per a fer mesuraments *in situ*, fora del laboratori, al peu d'un procés, com veurem més endavant. Hi ha qui veu, anàlogament al que ha passat amb els ordinadors personals, el futur d'aquests instruments lligat als productes de consum i a la utilització individual, per exemple, per al diagnòstic i control de certes malalties (sensor de glucosa per a diabètics) o de paràmetres clínics (sensors d'alcohol, de colesterol, etc.), per a la seguretat i el confort domèstics (sensors de fums, de fuita de gas, etc.) o per al control de la qualitat i de l'estat dels aliments.<sup>2</sup>

Un sensor químic està format per dues parts. Un component de reconeixement molecular, que interacciona selectivament amb un determinat component de la mostra, i un component instrumental, format bàsicament per un *transductor* del senyal produït en l'esdeveniment de reconeixement (figura 1). Ambdues parts poden trobar-se físicament separades o integrades en el transductor pròpiament dit, el qual, segons el cas, converteix els senyals primaris de reconeixement

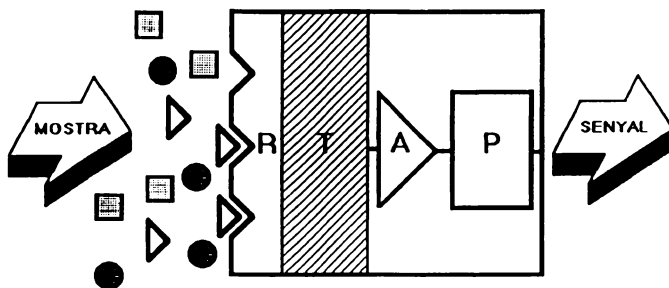


FIGURA 1. Diagrama esquemàtic del funcionament d'un sensor químic. Només un component de la mostra és reconegut pel sistema de reconeixement o receptor (R). El senyal associat al procés de reconeixement és convertit en un senyal elèctric pel transductor (T); aquest senyal és amplificat i condicionat (A), i posteriorment és processat i presentat en forma de dada (P). El receptor pot interaccionar amb l'anàlit per mitjà de mecanismes físics, químics o biològics.

2. Un cas emblemàtic del que diem són els ingents esforços que s'estan duent a terme al Japó per aconseguir un sensor d'ús massiu per al control de l'estat de frescor del peix, atesa la importància que té en la dieta d'aquest país el peix cru i l'elevat cost d'aquest.

(electroquímics, òptics, tèrmics o màssics) en senyals secundaris normalment del domini elèctric.

És, doncs, aquesta configuració tan simple de reconeixement + transducció la que ha permès el disseny d'una instrumentació de característiques pràctiques tan innovadores en el camp de l'anàlisi química com són els sensors químics. És clar que l'aspecte més fonamental d'aquest disseny és la generació amb una intensitat suficient d'un senyal entre un substrat (analit) i un *receptor* selectiu d'aquest (component de reconeixement del sensor). Com més simple i fiable sigui el procés de reconeixement, més ho serà també el dispositiu resultant. Els altres aspectes associats al procés sensor, com la conversió (transducció) dels senyals primaris en altres senyals més idonis per a llur processament, transmissió o emmagatzemament, són igualment importants, però ja tenen un tractament molt més desenvolupat i efectiu, mercès als avenços constants i continuats de la microelectrònica i de l'optoelectrònica.

La recerca i el desenvolupament en sensors químics estan, doncs, principalment dirigits cap a l'obtenció de receptors d'ions i, especialment, de molècules, cada vegada més i més selectius. També cal implementar (immobilitzar) els receptors sobre els transductors més adients, sense que uns i altres perdin llurs característiques de funcionament. Hi ha tot un ventall de possibilitats d'immobilització dels receptors sobre els transductors. Des d'immobilitzacions simples per adsorció, per atrapament dins d'un gel o d'una matriu polimèrica, o per entrecruament dels receptors entre si per mitjà d'agents bifuncionals, fins a immobilitzacions complexes per unió covalent directa entre el receptor i el transductor. També cal fer esforços en el desenvolupament de nous transductors dels cada vegada més sofisticats senyals produïts pels nous materials receptors. De totes formes, la clau de volta és el poder disposar de materials de reconeixement prou selectius: lligands macrocíclics, ionòfors, polímers, ceràmiques, compòsits, etc., amb modificacions estructurals o bé de superfície o de matriu; de materials que reconeguin determinats substrats sigui quin sigui el mecanisme (sorció, difusió, reacció, catàlisi, etc.).

Ara bé, els receptors sintètics, fins ara, en general, presenten un grau de reconeixement limitat. Tot i així, cada vegada més, hom aconsegueix materials molt reeixits per al desenvolupament de sensors per a aplicacions molt concretes. Aquesta limitació féu que hom considerés la possibilitat d'implementar sobre els transductors materials biològics de reconeixement molecular (*bioreceptors*) (taula 1), molt més selectius que els de tipus sintètic. Aquests sensors químics que incorporen material biològic en llur construcció són coneguts com a *biosensors*. Per tant, biosensor no vol dir un sensor de substàncies biològiques sinó un sensor constituït per elements biològics (figura 2). Això darrer ha significat un concepte molt innovador, tant al camp dels sensors químics com al de la instrumentació analítica en general.

Els biosensors són les peces clau del que ja es coneix com a bioinstrumentació analítica. Constitueixen un camp multidisciplinar de R + D i un mercat molt atractiu. Originàriament la recerca en aquest camp provingué de l'àrea biomèdica.

Diverses n'han estat les causes. El mercat clínic és el més important de les anàlisis químiques. És un mercat receptiu a dispositius simples, de fàcil utilització, malgrat que siguin de vida curta o, fins i tot, d'un sol ús. És un mercat suficientment gran per a recobrar en un termini curt les inversions efectuades. El biosensor fou pensat per a acaparar el mercat de les anàlisis o proves clíniques efectuades fora del laboratori, realitzades a la consulta mèdica o pel mateix pacient, com el conegut biosensor de glucosa a la sang, per a l'autocontrol de diabètics –ja comentat–, el qual es distribueix des de fa poc al nostre país. Hom pot assegurar que els biosensors, gràcies a llur connexió natural amb el potent mercat que els és propi, han aconseguit un estadi de R + D molt més madur que el dels sensors químics més convencionals, les inversions en el desenvolupament dels quals tenen un retorn molt més lent.

Actualment, els biosensors no són patrimoni exclusiu de la recerca biomèdica. La indústria alimentària demana mètodes ràpids per a l'estimació de la caducitat, el deteriorament o la contaminació dels aliments. A la indústria en general, a la biotecnològica en particular, li cal controlar d'una manera fiable productes en medis molt complexos. Les polítiques de control ambiental generen necessitats analítiques molt particulars sobre uns contaminants d'una gran

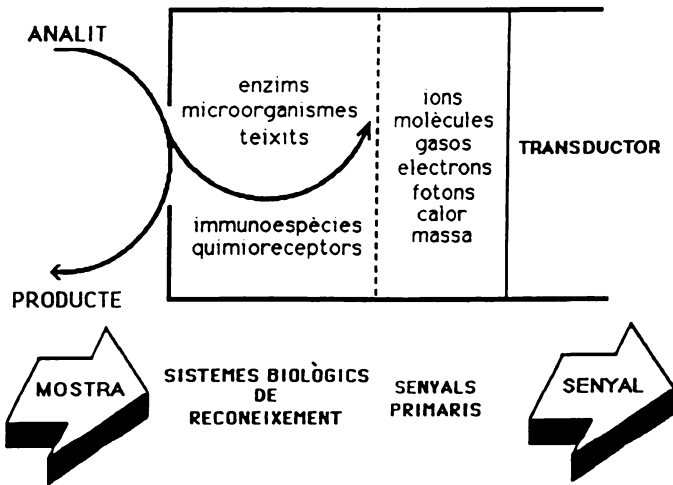


FIGURA 2. Principals sistemes biològics de reconeixement molecular o bioreceptors i tipus de senyals associats als processos de reconeixement. Tant els uns com els altres determinen les diferents estratègies actuals en la construcció de biosensors. Un biosensor és un sensor químic (figura 1) la part receptora del qual és un material biològic de reconeixement molecular (taula 1).

dispersitat estructural.<sup>3</sup> En definitiva, hi ha una gran necessitat d'informació analítica sobre uns sistemes materials molt complexos i en unes condicions molt particulars, que els biosensors, dins el context del que representen els sensors químics, poden ajudar a pal·liar en termes d'immediatesa, continuïtat, processament, fiabilitat, ubiqüitat, cost, qualitat, compatibilitat, simplicitat, robustesa, petitesa, esterilitat, etc.

## RECEPTORS I TRANSDUCTORS

El component receptor d'un sensor químic transforma selectivament determinada informació química continguda a la mostra en una forma d'energia adient per a ésser mesurada pel transductor. El component transductor és un dispositiu capaç de transformar l'energia que codifica la informació química procedent de la mostra en un senyal analític útil. El transductor en si mateix no cal que presenti selectivitat.

El component receptor pot interaccionar amb l'analit per mitjà d'un mecanisme físic, sense reacció. Són aquells casos en què ens adonem de la interacció analit-receptor, per exemple, per un canvi d'absorbància, d'índex de refracció, de conductivitat, de temperatura o de massa. Més sovint el receptor reconeix el substrat a partir d'una reacció química o bioquímica. En molts casos no és possible distingir si el receptor opera sota un principi físic o químic. Aquest és el cas dels sensors basats en processos d'adsorció.

És ben coneguda la selectivitat limitada de la majoria de les reaccions utilitzades en anàlisi química, la qual cosa obliga a fer uns tractaments previs a la mostra per tal de llevar-ne les interferències. Aquest fet ha ocasionat que només un nombre reduït de reaccions químiques siguin aprofitades com a sistemes receptors en els sensors químics, ja que aquests són dissenyats per a funcionar en mesuraments directes, sense tractament de la mostra. A la dècada passada, però, i especialment a partir dels treballs que culminaren amb l'atorgació del premi Nobel a Pedersen, Cram i Lehn (1988), s'obriren unes grans expectatives a la química analítica en reconsiderar-se el reconeixement iònic i molecular per mètodes químics. D'una forma molt elegant, amb uns procediments sintètics d'arquitectura molecular, hom ha anat obtenint uns reactius molt innovadors, formadors selectius de complexos receptor-substrat (*host-guest*), quan les espècies implicades es complementen alhora en forma i dimensions (geometria) i en grups enllaçants (energia). Des d'aleshores hom ha sintetitzat un gran nombre de molècules receptores de cations (ions metàl·lics, amoni, biperidini, etc.) i, en menor extensió, d'anions (ions halur, sulfat, fosfat, carboxilat, etc.) o de molècu-

3. Sense oblidar que el foment de la recerca en biosensors té un origen lligat a la indústria militar

les neutres (diòxid de sofre o de carboni, halometans, hidrocarburs aromàtics, etc.). Aquest és el camp d'unes molècules receptores amb unes topologies especials, amb unes cavitats hidrofíliques bidimensionals (com els polièters macrocíclics) o tridimensionals (l·ligands macrobicíclics com els criptands o els esferands), o amb cavitats lipofíliques (com els ciclofans, els calixerens, els cavitands, els criptofans o les ciclodextrines). Tot i així, aquest ingent esforç ha tingut només una aplicació molt parcial encara en la construcció de sensors químics.

D'altra banda, com és sabut, el reconeixement molecular és la base de l'organització i la comunicació biològiques. La comunicació química entre cèl·lules i òrgans, per mitjà de sistemes moleculars complementaris, és un procés de vital importància, responsable de l'organització i la protecció dels organismes i de la regulació de llur metabolisme. Aquest tipus de reconeixement, optimitzat per l'evolució biològica, és el que ha estat utilitzat per al desenvolupament dels biosensors (taula 1). En efecte, interaccions entre enzims i substrats o inhibidors, entre anticossos i antígens o haptens, entre receptors diversos i hormones, fàrmacs i neurotransmissors, entre fragments de DNA, etc., han donat peu a sistemes biosensors diversos, alguns dels quals ja tenen implementacions comercials, especialment els biosensors enzimàtics i, en menys extensió, els immunosensors.

TAULA 1. Reconeixement molecular en sistemes biològics.

<i>Bioreceptors</i>	<i>Substrats</i>
Enzims, microorganismes	Substrats
Teixits d'animals o plantes	
Anticossos	Antígens, Haptens
Quimiorceptors	Agonistes
Receptors	Hormones
Lecitines	Oligosacàrids
Avidina	Biotina
DNA	DNA, RNA

Deixant de banda la part receptora de natura física, química o biològica, suara comentada, els sensors químics i els biosensors acostumen a ésser classificats segons el principi de funcionament del component transductor. Ja hem dit que el transductor no cal que sigui selectiu. De vegades el transductor ho és, i aleshores òbviament és considerat de fet com un sensor químic, malgrat que no incorpori cap part receptora diferenciada o que transductor i receptor hagin estat integrats en un sol component. Sovint, però, l'element transductor i el receptor es troben separats, amb o sense elements *separadors*.

Recentment la IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) ha donat les pautes concretes per a classificar els sensors químics<sup>4</sup> segons el mecanisme de transducció que han donat lloc a coneguts dispositius<sup>5</sup> òptics, electroquímics, elèctrics, sensibles a la massa, magnètics, termomètrics o d'altres tipus (taula 2).

TAULA 2. Principals sistemes i dispositius transductors utilitzats en la construcció de sensors químics i de biosensors (4,5).

<p><i>Dispositius òptics</i></p> <p>Basats en el mesurament de l'absorbància, la reflectància, la luminescència, la fluorescència, l'índex de refracció (p. ex. els basats en la ressonància de plasmons superficials), l'efecte optotèrmic i la dispersió de la llum.</p> <p><i>Dispositius electroquímics</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensors voltamperomètrics (p. ex. elèctrodes inerts químicament, elèctrodes actius químicament o elèctrodes modificats).</li> <li>• Sensors potenciomètrics (p. ex., elèctrodes selectius d'ions, elèctrodes potenciomètrics de gasos, elèctrodes redox o elèctrodes de metall/òxid de metall).</li> <li>• CHEMFETs (sensors basats en transistors d'efecte de camp sensibilitzats químicament).</li> <li>• Sensors potenciomètrics d'electròlit sòlid per a gasos.</li> </ul> <p><i>Dispositius elèctrics</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensors de metall-òxid-semiconductor.</li> <li>• Sensors de semiconductor orgànic.</li> <li>• Sensors de conductivitat electrolítica.</li> <li>• Sensors de permitivitat elèctrica.</li> </ul> <p><i>Dispositius sensibles a la massa</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispositius piezoelèctrics.</li> <li>• Dispositius d'ona acústica superficial.</li> </ul> <p><i>Dispositius magnètics</i></p> <p><i>Dispositius termomètrics</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensors catalítics.</li> </ul> <p><i>Altres</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensors radiomètrics.</li> </ul>
---

4. Vegeu A. Hulanicki, S. Glab i F. Ingmann, 'Chemical Sensors. Definitions and Classification', *Pure & Appl. Chem.*, 63 (1991) 1247-1250.

5. La IUPAC considera el terme 'dispositiu' (*device*) més genèric que els de 'sensor' o 'transductor'. Tant els sensors com els transductors són dispositius. Normalment la integració d'un receptor i d'un transductor dona lloc a un sensor químic. Quan un transductor per si sol, sense necessitat d'elements receptors addicionals, ja és prou selectiu, hom també l'anomena sensor.



Els *dispositius òptics* transformen canvis de fenòmens òptics, els quals fenòmens són el resultat d'una interacció de l'analit amb la part receptora. Aquests dispositius poden ésser classificats alhora d'acord amb el tipus de propietat mesurada, la qual pot ésser:

a) Absorbància, mesurada en un medi transparent, causada per l'absorció del propi analit o per una reacció amb un indicador adequat.

b) Reflectància, mesurada en un medi no-transparent, usualment amb un indicador immobilitzat.

c) Luminescència, basada en el mesurament de la intensitat de la llum emesa per una reacció química en el sistema receptor.

d) Fluorescència, mesurada com l'efecte positiu d'emissió causada per una irradiació. També pot ésser la base d'aquests dispositius l'amortiment (*quenching*) selectiu de la fluorescència.

e) Índex de refracció, mesurat com el resultat d'un canvi de composició d'una solució. Això pot incloure també un efecte de ressonància de plasmons superficials.

f) Efecte optotèrmic, basat en el mesurament de l'efecte tèrmic causat per l'absorció de la llum.

g) Dispersió de la llum, basada en efectes causats per partícules de dimensions definides presents a la mostra.

L'aplicació de molts d'aquests fenòmens als sensors químics òptics ha estat possible gràcies a l'ús de fibres òptiques en llurs diverses configuracions. Aquests dispositius també són anomenats *òptodes*. Cal que ens adonem, doncs, que les fibres òptiques, tan utilitzades actualment, no són res més que uns components instrumentals de manta aplicació en un gran nombre de sensors òptics que es basen en principis diversos.

Els *dispositius electroquímics* transformen l'efecte de la interacció electroquímica entre l'analit i l'elèctrode en un senyal útil. Aquests efectes poden ésser estimulats elèctricament o poden ésser el resultat de la interacció espontània (en condicions de corrent nul). Aquests dispositius poden ésser classificats alhora també com:

a) Sensors voltamperomètrics, que inclouen els dispositius amperomètrics, en els quals el corrent pot ésser mesurat en modalitat contínua o alterna. En aquest subgrup hom també hi pot incloure els sensors basats en elèctrodes inerts químicament, els elèctrodes actius químicament i els elèctrodes modificats. També poden ésser inclosos aquí els sensors amb font externa de corrent o sense font (sensors galvànics).

b) Sensors potenciomètrics, en els quals el potencial de l'elèctrode indicador (elèctrode selectiu d'ions, elèctrode redox, elèctrode metall/òxid de metall) és mesurat enfront del de l'elèctrode de referència.

c) Transistors d'efecte de camp sensibilitzats químicament (*chemically sensitized field effect transistor, CHEMFET*), en els quals l'efecte de la interacció entre l'analit i el recobriment actiu és transformat en un canvi de corrent entre la font i el drenador del transistor. Les interaccions entre l'analit i el recobriment

actiu són, des del punt de vista químic, similars a les que hom troba en els sensors potenciomètrics selectius d'ions.

d) Sensors potenciomètrics de gasos d'electròlit sòlid, diferents dels sensors potenciomètrics suara esmentats, car són constituïts d'electròlits sòlids i treballen a alta temperatura, i són aplicats normalment al mesurament de gasos.

Els *dispositius elèctrics* es basen en mesuraments on no tenen lloc processos electroquímics, i el senyal és produït com a conseqüència del canvi en les propietats elèctriques causat per la interacció de l'analit amb el dispositiu. És el cas de dispositius coneguts com:

a) Sensors de metall-òxid-semiconductor, emprats principalment com a detectors de gasos i basats en processos redox reversibles del gas analit.

b) Sensors de semiconductor orgànic, basats en la formació de complexos de transferència de càrrega, els quals modifiquen la densitat dels portadors de càrrega.

c) Sensors de conductivitat electrolítica.

d) Sensors de permitivitat elèctrica.

Els *dispositius sensibles a la massa* transformen un canvi de massa sobre una superfície especialment modificada en un canvi d'una propietat del material de suport. El canvi de massa és causat per l'acumulació de l'analit. Ginyes d'aquesta mena són els coneguts:

a) Dispositius piezoelèctrics, usats principalment en fases gasoses però també en solucions, basats en el canvi de freqüència d'un oscil·lador de quars, el qual canvi és causat per l'adsorció de l'analit sobre la placa de quars de l'oscil·lador.

b) Dispositius d'ona acústica superficial, basats en la modificació de la velocitat de propagació d'una ona acústica generada a la superfície d'un material piezoelèctric, la qual modificació depèn de la deposició d'una massa definida d'analit.

Els *dispositius magnètics* es basen en el canvi de les propietats paramagnètiques del gas a analitzar. Aquest grup és representat per certs tipus de monitors d'oxigen.

Els *dispositius termomètrics* es basen en el mesurament dels efectes de calor de determinades reaccions químiques o adsorcions en què intervé l'analit. En aquest grup els efectes de calor poden ésser mesurats de diverses formes; per exemple, en els anomenats sensors catalítics, la calor d'una reacció de combustió o d'una reacció enzimàtica és mesurada per mitjà d'un termistor. Els dispositius basats en el mesurament dels efectes optotèrmics, ja comentats més amunt entre els dispositius òptics, poden ésser classificats alternativament en aquest grup.

Finalment, altres propietats, com per exemple les radiacions X,  $\beta$  o  $\gamma$ , poden ésser la base per a un sensor químic sempre que siguin utilitzades per a la determinació de la composició química.

## METODOLOGIES I TECNOLOGIES

Hem d'ésser conscients que, independentment de les possibles realitzacions comercials, actualment els sensors químics, i en especial els biosensors, ja representen una metodologia analítica ben estesa, car a causa de llur simplicitat, en alguns casos són els mateixos laboratoris que es construeixen llurs propis sensors per a aplicacions molt particulars.

De tot el que repetidament ha estat dit fins ara queda clar que els sensors químics són ideals per a utilitzar-los en mesuraments directes, és a dir, sense tractament de la mostra. Són especialment adients per a mesuraments dins processos industrials, sense que calgui prendre'n mostra, en situacions de camp (*in situ*) o dins organismes vius (*in vivo*). Tot això és el que hom en diu metodologia *in line*. Essent portàtils i robusts, els sensors químics també són instruments ideals per a mesurament al peu del procés, al costat dels reactors industrials, o en circumstàncies especials, com són en laboratoris mòbils, dins ambulàncies, en les visites mèdiques, a la capçalera dels llits hospitalaris i en altres circumstàncies *ex vivo*. Situacions com aquestes han donat lloc a uns procediments de mesurament i a uns dissenys d'instrumentació globalment coneguts com *at line*. Els sensors poden ésser utilitzats sols, com en els casos acabats d'esmentar, o tot formant la part detectora d'instruments més complexos. Aquests instruments o, de vegades, el sensor únicament, poden estar connectats d'alguna forma amb el procés a seguir o controlar per tal de prendre'n mostra més o menys contínuament. És a dir, el sensor està servit per un sistema de presa de mostra automatitzat. Aquesta metodologia analítica i els instruments relacionats, a bastament utilitzats en el camp dels sensors, són coneguts com *on line*.

També ha estat dit més amunt que els sensors químics pretenen d'ésser uns instruments d'utilització massiva, d'ús personal, de vegades simplement d'un sol ús. I tot això acompanyat d'un cost baix. Cal, doncs, que la recerca i el desenvolupament en sensors químics i en biosensors siguin dirigits també cap a dissenys compatibles amb tecnologies que possibilitin una gran producció de dispositius de cost baix. En aquest sentit, té una importància cabdal que els sensors que hom pugui desenvolupar puguin ésser implementats en tecnologies planars, de capes primes microlitogràfiques, com les que hom utilitza en la fabricació de dispositius microelectrònics i de circuits impresos. Eventualment, també, els sensors poden ésser desenvolupats en tecnologies planars de capes gruixudes, les quals no necessiten inversions gaire elevades, com és el cas de les tècniques serigràfiques. També tindrà un paper important en un futur immediat la indústria de telecomunicacions posant a l'abast els sistemes de transmissió de dades i, especialment, nous tipus de fibres òptiques i xips optoelectrònics per al desenvolupament de sensors òptics de baix preu.

## RECERCA I DESENVOLUPAMENT

La recerca i el desenvolupament en sensors químics i, especialment, en biosensors estan molt desenvolupats als Estats Units i al Japó. Aquests dos països porten el lideratge en aquest camp i, per tant, no ens ha d'estranyar que les versions comercials que es van introduint al mercat provinguin d'aquests llocs. A Europa comença a haver-hi recerca bàsica i aplicada en tots els tipus de sensors químics i biosensors. Les versions comercials de biosensors d'origen europeu són pràcticament encara inexistents.

La Secció de Ciències del nostre Institut, l'any 1985, creà un grup de recerca sobre sensors químics i biosensors per a estimular els estudis en aquesta àrea de coneixement de la ciència i la tècnica. Aquest grup és el primer antecedent de recerca organitzada en aquest camp al nostre país i a l'estat espanyol. El nucli investigador inicial procedia de la Unitat de Química Analítica del Departament de Química de la Universitat Autònoma de Barcelona.

A l'estiu de 1993, a Prada de Conflent, dins el marc de la Universitat Catalana d'Estiu i de les XII Jornades sobre la recerca experimental en física i química als Països Catalans, organitzades per la Societat Catalana de Física i la Societat Catalana de Química, filials de l'Institut, hom aplegà investigadors de casa nostra en sensors i biosensors. Aquesta trobada posà de manifest la varietat i la qualitat de la recerca que hom està duent a terme actualment: obtenció d'anticossos i desenvolupament dels corresponents immunosensors (A. Montoya, Universitat Politècnica de València); biosensors enzimàtics i llur aplicació a la determinació de pesticides (J. L. Marty, Universitat de Perpinyà) i a altres composts d'interès ambiental (D. Barceló, Centre d'Investigació i Desenvolupament, CSIC, Barcelona); sensors potenciomètrics basats en membranes (J. Casabò, Institut de Ciència dels Materials, CSIC, Bellaterra); sensors òptics de silici (J. Calderer, Departament d'Enginyeria Electrònica, ETSET, Universitat Politècnica de Catalunya), sensors òptics basats en reaccions químiques (J. Ll. Cortina, Departament d'Enginyeria Química, Universitat Politècnica de Catalunya), i l'aplicació de la quimiometria als sensors òptics en general (R. Tauler i E. Casassas, Departament de Química Analítica, Universitat de Barcelona); transistors de silici amorf en capa prima (J. Campmany, Departament de Física Aplicada i Electrònica, Universitat de Barcelona), microsensors de silici (J. Bausells i J. Esteve, Centre Nacional de Microelectrònica, CSIC, Bellaterra) i caracterització de sensors d'aquests tipus (J. R. Morante, Departament de Física Aplicada i Electrònica, Universitat de Barcelona). El grup de la Universitat Autònoma de Barcelona, ja citat, féu un breu repàs de la seva recerca experimental durant aquests darrers anys sobre sensors electroquímics i òptics i molt especialment sobre composts conductors i llur utilització en el desenvolupament de sensors potenciomètrics de membrana, de sensors voltamperomètrics i de sensors basats en transistors d'efecte de camp sensibles químicament, amb un èmfasi especial en llur conversió en biosensors i llur inserció en sistemes automatitzats d'anàlisi (S. Alegret, Grup de Sensors i Biosensors, Universitat Autònoma de Barcelona).

Avui als Països Catalans la recerca en sensors químics i en biosensors es troba mínimament consolidada i, si bé és encara insuficient en molts aspectes, comença a tenir un reconeixement internacional.

#### AGRAÏMENTS

Aquest escrit s'ha beneficiat de les converses mantingudes al llarg d'aquests anys amb els meus col·legues del Grup de Sensors i Biosensors, de la Universitat Autònoma de Barcelona, en especial amb els professors Jordi Bartrolí, Julián Alonso i Esteve Martínez-Fàbregas, i també amb els doctores que han estat alumnes meus de doctorat: Antoni Florido, Josep M. Paulís, Esteve Martínez, Adela Orellana, M. Teresa Escalas, Francisco Céspedes i Daniel Martorell.

#### REFERÈNCIES

1. ALEGRET, S. *Sobre senyals, sensors i altres aspectes de l'anàlisi química*. Institut d'Estudis Catalans. Barcelona, 1992.
2. ALEGRET, S. Biosensors: Su utilización en los campos biomédico, ambiental e industrial. *Industria Farmacéutica*, 1991, 5(6) 33-34.
3. ARNOLD, M. A. i MEYERHOFF, M. E. Recent advances in the development and analytical applications of biosensing probes. *CRC Critical Rev. Anal. Chem.*, 1988, 20, 149-169.
4. EDMONS, T. S. ed. *Chemical Sensors*. Blackie and Son, Glasgow, 1988.
5. GÖPEL, W., JONES, T. A., KLEITZ, M., LUNDSTRÖM, I. i SEIYAMA, T. eds. Chemical and biochemical sensors, Parts I i II. Dins: GÖPEL, W., HESSE, J. i ZEMEL, J. N., eds. *Sensors: a comprehensive survey*. 3. VCH, Weinheim, 1992.
6. HALL, E. A. H. *Biosensors*. Milton Keynes: Open University Press, 1990.
7. JANATA, J. *Principles of chemical sensors*. Nova York: Plenum Press, 1989.
8. TURNER, A. P. T., KARUBE, I. i WILSON, G. S. eds. *Biosensors. Fundamentals and applications*. Oxford: Oxford University Press, 1987.

(Original rebut per a publicació  
el dia 1 de desembre de 1993)