

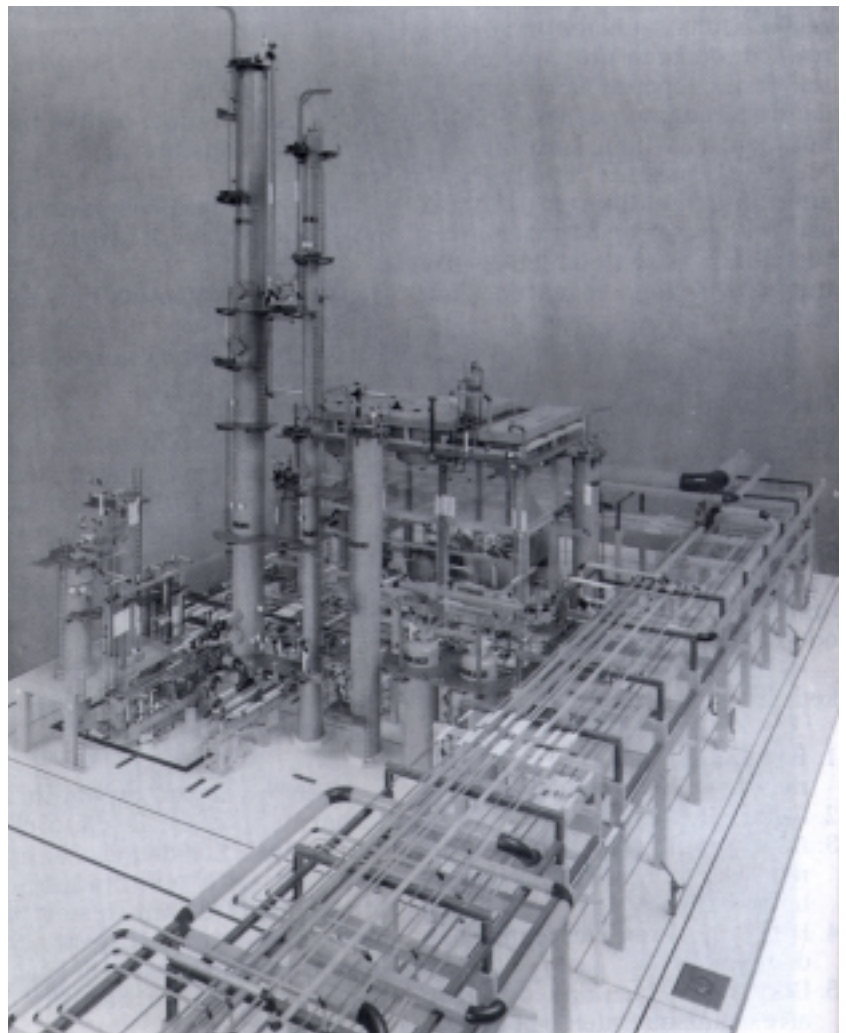
PROZESU-INJINERUTZA

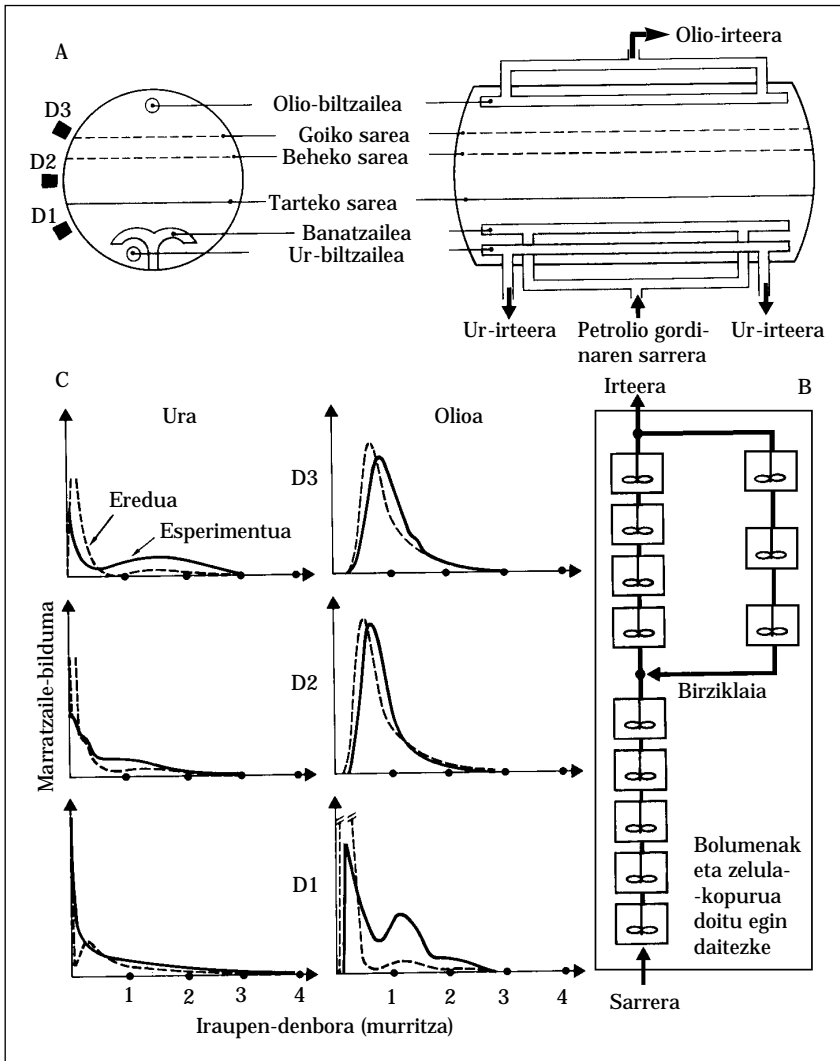
Andoni Sarriegi Eskisabel

**Joan zen ekainean, Karlsruhe-n (Alemanian), gai honetaz egin zen Munduko IV. Kongresuak, beste behin ere argi eta garbi irakatsi zuen, fabrikatutako ekoitzi edo produktua eta dagokion industri sektorea edozein izanik ere, prozesu-injinerutza (prozesuen azterketa eta diseinu zientifikoa alegia) prozesu-mota guztiei aplikagarri zaiela. Arlo honetan adibidez, injinerutza kimikoak aurkeztu eta proposatutako prozesu-injinerutzak ekarritako metodo eta kontzeptuek, orokorki aplikatzeko ere balio izan dute eta ikuspegi berritzaile bezain aplikazio unibertsalduna proposatu dute. Ildo honetatik, ingurugiroa babesteko hartu beharreko gero eta neurri estua-
goek eta fabrikatutako ekoitzien kalitate-betebeharrek eta, zer esanik ez, nazioarteko lehiari aurre egiteko enpresek duten gero eta arazo konplexuagoei erantzun beharrak, areagotu egin dute guzti honen garapena. Guzti horrek beraz, diseinu eta prozesu egokien garapena zorrotz lantzea ekarri du.**

EDOZEIN industri iharduera, materia eta energiaren eraldaketan oinarritzen da. Kimikatik hasi eta metalurgia, konposite-industria, petrolioarena, elektrokimika, botikagintza, oihalgintza, larru-industria, papergintza eta abarretatik pasaz, nekazaritza eta elikagaien industriaraino erabilitako prozesuek, neurri handiko erronka ekonomikoa jartzen dute begibistan. Herrialde garatuetako prozesu-industriek, balio erantsi industrialaren % 25 inguruko ekarpena egiten dutela estimatzen da. Industria hauek planteatutako arazoak ere ugari eta izaera anitzetakoak dira. Bestalde, prozesuek berek ere, merkatu-eskaerei erantzun eta lehiarekiko laster batean egokitu beharra dute.

Edozein prozesu industrialetan prozesuaren diseinu egokia behar-beharrezkoa da. Prozesu-injinerutzak zeresan handia du horretan.





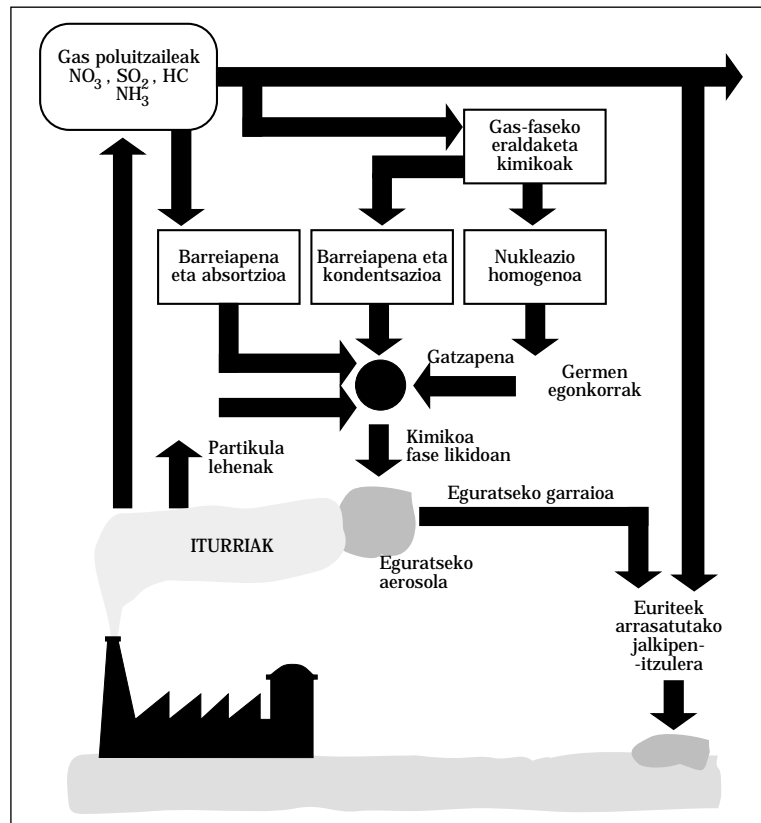
Iraupen-denboren banaketa-ereduak, oso egokiak dira aparatu industrial batzuk estrapolatzeko. Irudi honetan, petrolio gordinetan (A) ur gazia oliotik bereizteko gailu elektrostatikoa (bateragailua) ageri da. Aparatuaren kanpokaldean kokatutako hiru zundek (D₁, D₂, D₃) pultsu erradioaktiboaren pasadizoa erregistratzen dute. Fluxua, serieko hiru nahasgailu-multzoren bidez modelatzen da eta horietako batek fluido atzerantz itzul erazten du kurben berri zenbait maximoren bidez emateko (B). Erantzun-kurba teorikoak, Nancy-n puntu-puntu jarritako software elkarreragile bati esker lortzen dira. Hemen, egokieneratze-fasean zehar iritsitako komunztadura egiaztatzen da (C). Metodo honek, diseinu-hobekuntzak iradokitze ere aukera ematen du.

ehun bat gara daitezke eta horietatik agian hamar-hamabi bat baino ez dira iritsiko merkatal prozesuan sartzera.

Honelako prozesua instalatzeak, bere funtzionamendu egokiaren ikerkuntza eta ekoizien kalitate-kontrola egin ondoren ere, kontrolagailu konplexuak eta zenbakizko simulazio-ereduak eskatzen ditu. Azkenik,

Laborategiko datuetatik abiatuta diseinatutako instalazioek ordea, teknikoki eta finantzarioki estrapolazioaldi arriskutsua izaten dute. Laborategitik fabrikara, ohizkoak dira mila askotako eskala-faktoreak eta zenbait kasutan hamarmilakako askotakoak izatera ere hel daitezke. Laborategiko mila ideia onen artean,

Atmosfera, "erreaktore" erraldoi legez har daiteke. Bertan, poluitzaile primarioak eraldatu egiten dira eta poluitzaile sekundarioak sortzen dituzte, multzo osoa konbekzio- eta barreiapen-higidurek garraiatzen dutelarik. Prozesu elkartu guzti hauen ulermenak eta eredu matematiko baten bidez egindako deskribapenak, industri prozesu bateko metodo berberetara jotzen du, kasu honetan erabili beharreko espazio-eskala askoz ere handiagoa izan arren. Prozedetikak beraz, ingurugiro-injinerutzan azaltzen diren arazoak konpontzeko zeregin garrantzitsua izan dezake.



beste eskakizun absolutu bat ere badu: prozesuek fidagarriak, mantenerazak, seguruak eta poluitzen ez dutenak izan behar dute, baina aldi berean gizakiarentzat eta ingurugiroarentzat ia arriskurik gabek.

Zer-nolako erantzuna eman izan die ordea, ohizko industriak arazo hauei? Oro har eta orain arte, salbuespenak salbu, ez oso zuhurra. Arlo bakoitzak bere teknikak garatu ditu eta nagusiki fabrikatu behar zituen ekoiztietan murgildu da buru-belarri, beti ere "ofizioaren" zentzuan oinarrituta. Arlo desberdinen artean gainera, oso gauza amankomun gutxi zegoela zirudien. Aldez aurretik behintzat, zerikusi handirik ez zen nabaritzen "kimikari", "zementugile" edo "jogurtgileen" artean. Pentsamolde honek jada ez du deusik ere balio egungo industriaren premiei egoki erantzuteko. Injinerutzako zientziak hain zuzen ere, "industri sistemak" aztertze behar diren kontzeptu eta erremintak eskaintzeko garatu dira. Gaur egun, "prozedetika" izenez baitaiatu den prozesu-injinerutza, prozedura guztiei orokorki aplikatu dakiekeen metodologia da, eskuartean edozein ekoizti eta iharduera-mota delarik ere.

Prozedetikak beraz, zeharkako eta disziplinarreko ikuspegia proposatzen du eta hasierako kontzeptuen agerpena ezezik, oso eragile diren ikerkuntzen garapena ere errazten du. Kasu honetan, "injinerutza kimikoa" metodoak orokortzea baino ez da. Transformazio kimikoa prozesu konplexua da eta eskala ekoizleak

puntura jartzeak, arazo latzak planteatzen ditu; izan ere, bertan erreazio kimikoak, bero- eta materia-trukeak, fluido- eta solido-trukeak, materialen portaera, etab. nahasten bait dira.

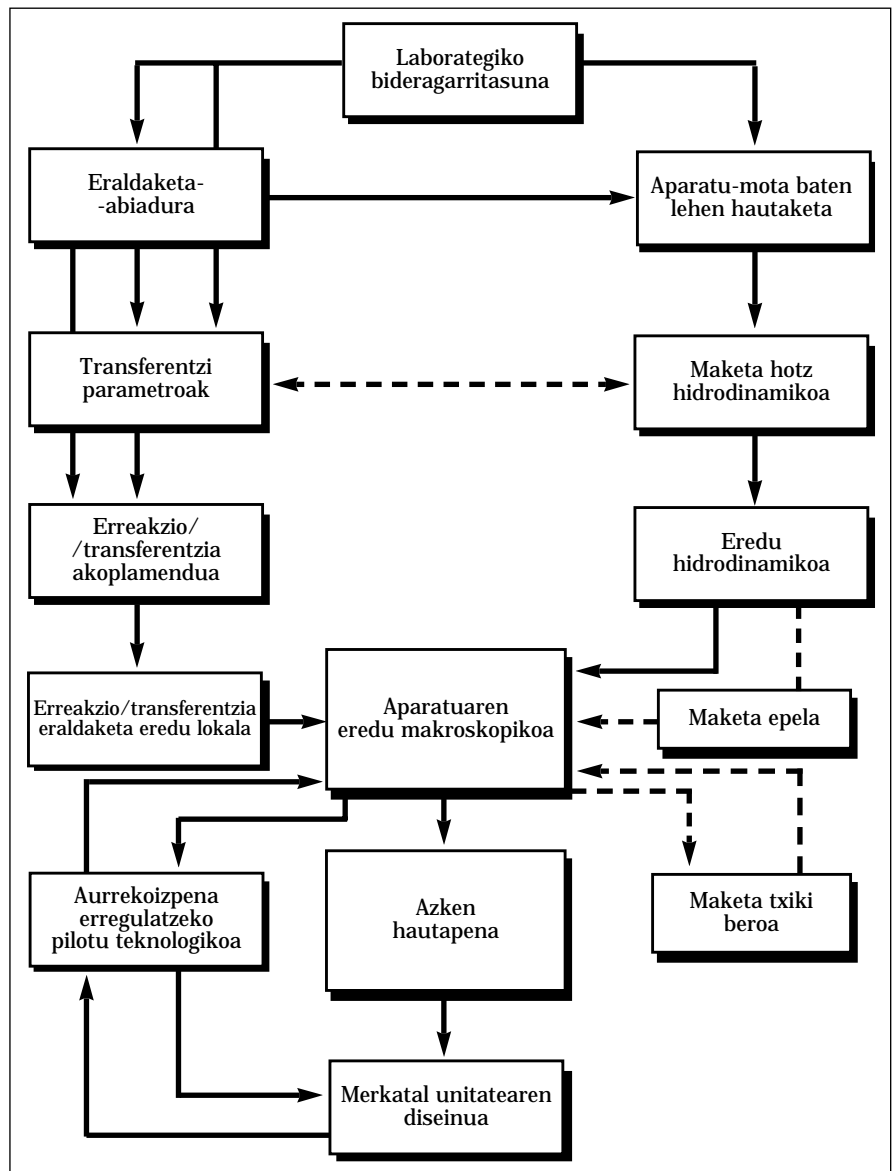
Guzti hori ebazteko, irtenbide berriak asmatu behar izan dira eta ez ohizko kimika, termoteknia eta mekanikako konbinazio soilak. Disziplina berri hau, halako ezagumendu-multzo eta langintza batzuetan oinarritzen da. Estatubatuarrak nahaste horri, "paradigma" izena eman diote eta batzuk behintzat aipatuko dira hemen.

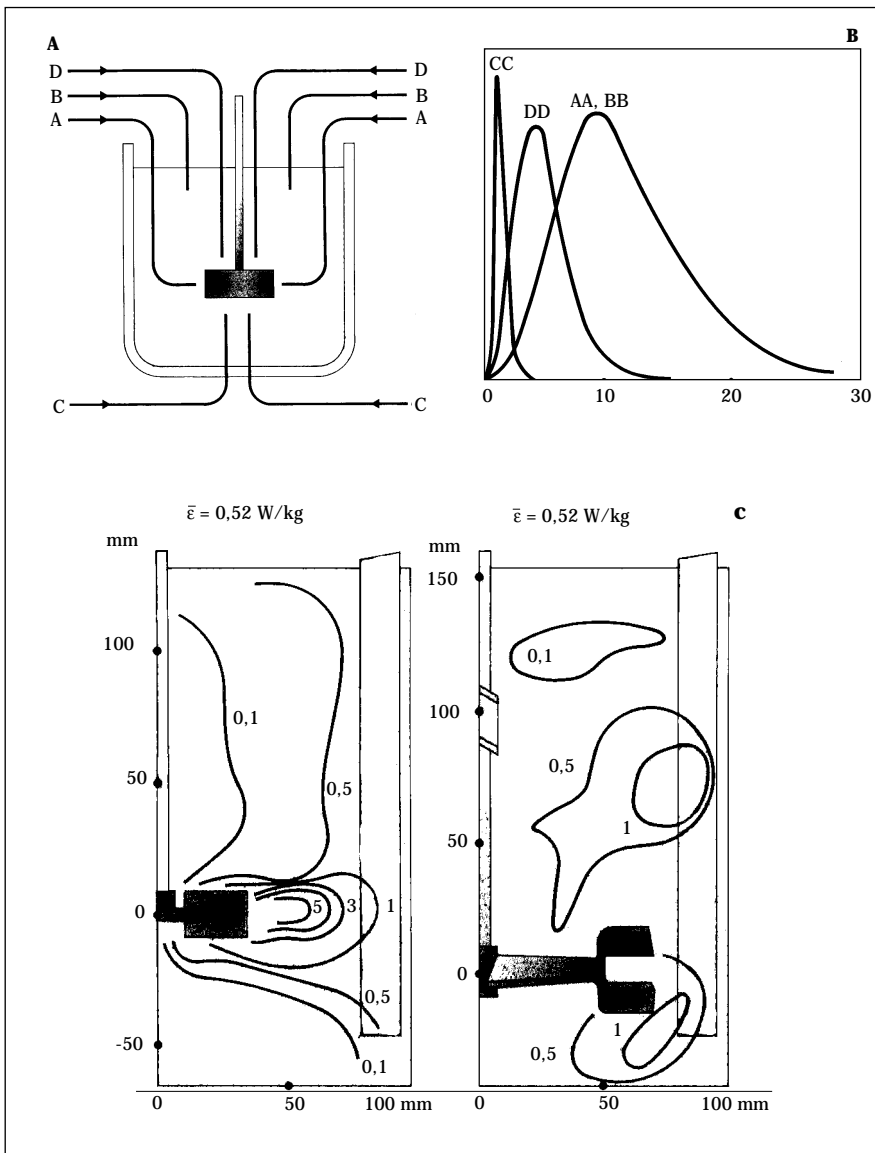
Hasteko, "eragiketa unitarioa" aipa daiteke. Kontzeptu hau, 1915ean jada A. D. Little estatubatuarrak proposatu zuen, distilazioa, iragazketa, lehorketa, etab. bezalako eragiketarik izendatzeko. Interesgarria da, noski, eragiketa guztion berenezko azterketa, eskuhartzen duten subs-

tantzien izaera kontutan hartu gabe. Horrela, beren efikazia zehazten duten legeak ezartzea lortzen da eta ondorioz, ekipo industrial egokiak diseinatzen dira. Adibidez, nahaste mekanikoaren eragiketa sakon azter daiteke. Upela batean egin ohi da eragiketa hau, gailu biratzaile baten bidez. Garrantzitsua da erabilpen bakoitzerako nahasgailu-mota egokia hautatu eta dimentsiotzea, nahasteak izan behar duen erreologiaren, gas-burbuilien fineziaren edota partikula solidoek mantendu beharreko esegiduraren arabera. Horretan, upe-laren tamainak, irudiak, proportzioek, nahaste-potentziak, potentzia horren barreiadura-eritmo berdinbanatuak eta beste parametro garrantzitsuek badute zerikusirik.

Prozesu-injinerutza aipa daitekeen bigarren "paradigma" aipagarria, "ikuspegi sistemikoa" dateke. Usariozko zientzien ikuspegi analiti-

Laborategian ezarritako bideragarritasunetik merkatal unitatea diseinatu arteko prozesu baten garapenerako metodologia ideala, zuhaitz gisa irudika daiteke (A). Zuhaitzaren ezker aldeak eraldaketaren eredu mikroskopikoa ezartzeko beharrezko neurrien segida adierazten du. Eskuin aldekoak berriz, materiaren (fluido edo solidoaren) zirkulazioa eredutzatze aukera ematen duten frogen kateamendua. Bi neurri-motak paraleloki adierazten dira eta "bide errealeko" metodoa deitu ohi zaio. Historikoki petrokimika astunarekiko eragiketarako jarri zen (B). Kontua ordea, balio izaten segitzen duen ala ez jakitea da.





Prozesuak zerikusi handia du azken produktuaren kalitatean. Zenbait laborategitan aztertutako test gisako erreakzio honetan zehar, sodio sulfatozko eta bario klorurozko "hauspeaketaz" lortutako bario sulfatozko partikulen tamaina erregulatu nahi da. Estatu Batuetako Du Pont de Nemours elkarteak ikertzaileek bi erreaktiboak irabiagailuarekiko (A) zuten elikadura-tutuen posizioa aldatu zuten eta kristalaren batezbesteko tamaina eta banaketaren zabalera, batez ere banaketa geometriko honen baitakoa zela konstatatu zuten (B). Hau upeleko energiaren difusio-erritmoaren banaketak duen eraginaren bidez esplikatu daiteke; izan ere, erreaktiboek molekula-eskalan duten nahastearen efikazia baldintzatu egiten bait du eta horrenbestez nukleazio-prozesua ere bai. Difusio-erritmo hau halaber, irudian azaltzen den irabiagailu-motak (C) ere baldintzatzen du. Isolerroak, energiaren (ϵ) difusio-erritmoaren eta geometria desberdineko bi irabiagailuekin lortutako bere batezbesteko balioaren (ϵ) arteko zatidurari dagozkio.

koak, deskonposatu, zatitu eta egitura mikroskopikoetan kontzentratzen zituen materialak. Ikuspegi sistemoak egituren eta portaeren ikuspegi orokorra lortzera jotzen du. Sistema oso ugarien erantzun-dinamikaz arduratzen da, hala nola katalizatzaile-aleaz, distilazio-zutabeaz edota ekoizpen-lantegiak, hau da, lortu behar den helburu batekiko antolatutako multzoek. Bestela esanda, basoa zuhaitza baino gehiagotzat du. Ikuspegi hauek adibidez, asko aztertu ditu J. de Rosnay-k *Le microscope* izeneko obran.

Prozesu-injinerutzaren oinarri den hirugarren "paradigma" edo ezaugarri-multzoa, erreakzioen eta transformazio-prozesuen arteko akoplamentuei dagokie, solido/gasaren eta bi fluido nahasgaitzen arteko bereziki. Erreakzio katalitikoetan adibidez, hurrenez hurren transferentzia eta erreakzioa gertatzen dira. Lehena erraza eta bigarrena zaila badira, az-

kenekoak kontrolatzen du eraldaketa-abiadura, hots, "erregimen kimikoa". Alderantziz bada berriz, difusiozkoa da.

Kimika ordea ez da honetan dabilen bakarra. Sistema biziak ere badute zerikusirik erreakzio/birrintze motako eragiketekin.

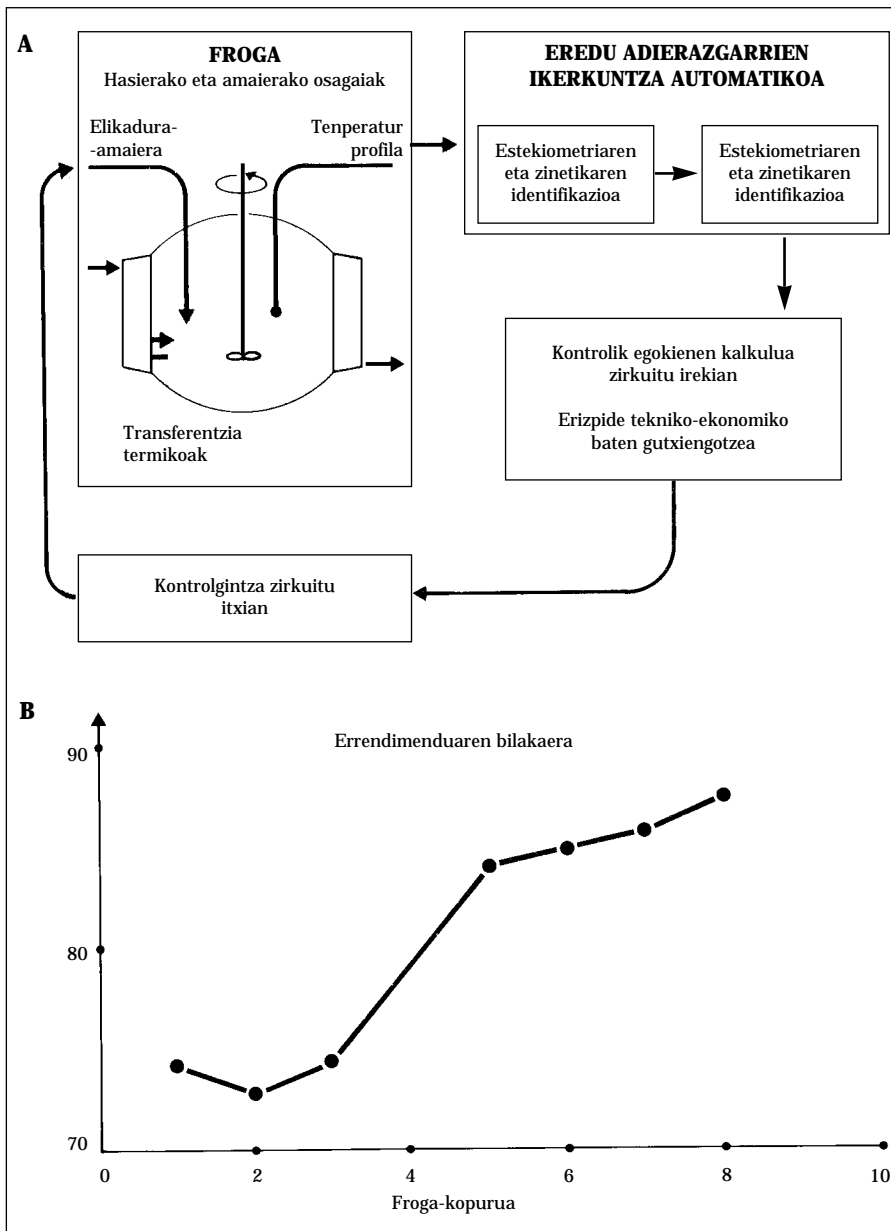
1970ean adibidez, A.C. Nevo-k eta R. Rikmenspoel-ek, oxigeno-kontsumotik eta ATP protoplasmako energi bektorearen barreiapenetik abiatuta, espermatozoiden flagelaren luzera ateratu zuten. Natura beraz, erregimen kimiko eta difusiozko erregimenaren arteko mugan doitzen da. Beraz, aipatutakoa, prozedetikako kontzeptu batek natur zientzietan duen balio heuristikoa adibidea baino ez da.

Prozesu-injinerutzako metodoetan bi ezaugarri garrantzitsu nabarmentzen dira: beren unibertsaltasuna eta beren eskalaniztasun-izaera. Beraz, nola sistema industrialei hala

fenomeno naturalei aplikatu dakizkizke, baldin eta prozesuan zehar materialaren eta energiaren eraldaketarik baldin badute. Baina prozesu-injinerutzan garrantzitsua den beste gai bat ere sartzen da hemen, hots, dimentsio gabeko zenbakien arteko harreman unibertsalak egoteak ematen duen oinarria alegia. Honek, iturraz oso desberdin diren arazo multzo ugari tratatzeko aukera eskaintzen du.

Mekanika eta termologian ongi ezagutzen den ikuspegia den arren, injinerutza kimikoak asko aberastu du transformazio-eragiketetan esku hartzen duten dimentsiorik gabeko zenbaki ugari sartuz.

Prozedetikarekiko aipatutako den azken paradigma berriz, hauxe da: arazo osootasunezko ikuspegiari lehenetsuna ematea, hots, prozesu baten baldintza guztiak aldi berean kontutan hartzea, azken produktuaren eta inguruaren azterketarako teknikak barne direla. Propietate bikainak lituzkeen produktu berri baterantz bideratutako laborategiko sintesi-prozesu dotore batek, arrazoi



Eragiketa eten edo ez-jarrai baten etekina, kontrolaren baitakoa da: errektibo-kontzentrazio, tenperatur eta fluxu-profil, erreazio-denboraren arabera. Kontrol egokienaren bidea zehazteko Nancy-n garatutako jatorrizko metodoan, joera-eredua erabiltzen da (kutxa beltz antzekoa); sistemarentzat (A) egitaraututako frogetan zehar gero eta gehiago hobetzen eta osatzen joaten dena. Hasieran ezezaguna den erreazio kimikoen sarea, bere burua eginez joaten da eta abiapuntu erreazio kimiko batetik abiatuta oharren berri ematen du. Orduan, eredu zinetiko batek eragiketa-baldintza onenak ikertzeko aukera ematen du. Lege fisikoetan oinarritutako eboluziozko metodo honek, froga bidez baino askoz ere lehenago lortzen du metodorik egokiena edo optimoena. Kasu honetan, garatzen ari den industri ekoizti baten fabrikazio-etekina nabarmen hazi da bederatzita froga soil eginda (B).

askorengatik porrot egin lezake: merkaturik ezagatik, kostu izugarriagatik, korrosioari eusten ez dion ekipamenduagatik, behar adina segurtasun ezagatik, etab.engatik. Kimikotzat jotzen zen arazoa adibidez, azken finean materialen erresistentzia-akoa edota elektrikoa suerta daiteke. Hemen ez dago usuariozko ikuspegi disziplinabakardunarekin ibiltzerik!

Adibidez, 1925az geroztik, kimikariek azido azetiko (ozpina) karbono (II) oxidoa metanolarekin erreazio katalitiko bidez fabrikatzearen atzetik zebiltzan, baina prozesuak industrialki ez zuen funtzionatzen, ekipamenduen korrosioa zela bide. Irtenbidea, aleazio berezi batek ekarri zuen, hots, Hastelloy izeneko molibdeno eta nikelzkoak hain zuzen ere, eta 1960tik aurrera aplikatu zen prozedura hori industrian.

Zeintzuk dira beraz prozedetikari dagozkion industri erronka nagusiak? Hona batzuk:

- Lehena metodologikoa da. Nola garatu azkar eta ekonomikoki prozesu berri bat, hots, nola pasa laborategitik fabrikara, nola diseinatu ekipa egokiak? Posible al da petrokimika astunak mende honetako bigarren hamarkadan, injinerutza kimikoko lehen kontzeptuak sortu zirenean, erabilitako eskema klasikoa beste arlo batzuetara aldatzea? Arazo larria honakoak dakar: erdugintza matematikoak esperimentazioarekiko. Bestela esanda, arrunt bihurtuko ote dira laborategiko datuetatik abiatuta osoro diseinatutako fabrikak, instalazio pilotu edo frogalekurik egin gabe? Transformazio bakunentzat fluido

bakun, etab. entzat) posible dela dirudi, baina konplexuentzat urrun ikusten da. Nolanahi ere, diseinatzaileek gero eta gehiago oinarritu beharko dute prozesu-injinerutzan.

- Kalitate-kontrola dugu hurrengo puntua. Lehia baino ez dagoen mundu honetan, produktuaren kalitate-maila zorrotza bermatzeko gai diren industrialek bakarrik dira. Hemen, lehengaiek badute garrantzia, baina baita prozesuak berak ere. Fabrikazio jarraitako kateetan, ekoiztien estatistika-laginen bidez sarreraren izaera aleatorio eta prozesuaren akats sistematikoak harrapatuz "prozesuaren estatistikazko kontrola" (*Statistical process control*) eratzeko metodoa erabil daiteke, eta duela urte batzuek geroztik garatzen ari da industrian. Hemen ere ordea, "bide erreala" eredu tapen egokirantz zideratzen duten mekanismoak zorrotz ulertzea da kontua. Kalitate-kontrolak, noski, energi gastua ez du behin ere ahaztu behar eta zentzu honetan, 1974az geroztik, prozesu-injinerutzak izugarri lagundu du hori murrizten. Arlo honetan, bereziki aipatu be-



Prozesu-baldintzak ezin dute edozein izan ikuspegi ekonomiko zein ekologikotik.

harra dago Energiaren Kontrolerako Frantziako Agentziaren (AFME) egitarau-markoa.

- Hirugarren zehaztasuna, prozesuen segurtasunari eta ingurugiroa babesteari dagokio eta arlo honetan, industri prozesu oro ere iristen saiatzen den ideala, *akatsik ez izatea* edota *zero akats*, *zero gertakari*, *zero hondar* izatea izan ohi da. Arazo hauekiko populazioak duen sentiberatasun fina, botere publikoek ere jasotzen hasi behar izan dute eta azken urteotan ikerkuntz ahalegin handiak egin dira zenbait lekutan, oraindik behar adina egitetik urrun aurkitu arren.
- Laugarren erronka-mota ere azaltzen du transformazio biologikoen industrialteak, eta prozesu-injinerutzarako funtsezkoa suertatzen da berau: materia bizien kontrol-arazoa alegia.

Injinerutza genetikoak, mikrofabriken programazioa, hots, zelulena, jartzen du gure esku. Prozesu industrialgarria lortzeko ordea, nahi diren metabolitoen ekoizpenik onena lortzeko aldeko baldintzak jartzea falta da eta etapa hau, gutxienez ere, aurrekoa bezain garrantzitsua da.

Ildo honi jarraituz, prozesu-injinerutzaren presentzia bortizki eskatzen den beste arlo bat, elikagaien industriako bioeraldaketena da. Orain arte artisautzako prozesu izan direnak, bereziki industrialteza nahi litzateke, baina produktuen koalitate organolep-

tikoak gordez eta erabateko higieena lortuz (fabrika supergarbia alegia).

Oztopo hauen irtenbideak noski, ikerkuntzari arazo ugari planteatzen dizkio eta hiru bederen bai nagusiki: "bitarteko konplexuek" eskuhartu beharra, portaera erreologiko partikularraren arloa eta "propietate" bat enkarguz lortzea.

Guzti honetan sakonduz gero, *desordenaren fisika* edota *anabasaren fisika* deituaren arloan sartuko ginateke eta hor nahasteek zenbait tenperatura, presio eta baldintzetan ditzuten nolahalako portaera ezezagunen munduan murgilduko. Beraz, prozesu-injinerutzak, anabasaren fisika aztertzeko ere helburu berriak eskaintzen ditu.

Gune hauetara iritsita, *adimen artifizialaren* arloan ere hurbil azaltzen da, planteamenduen arloan ditzuten *Neurona-sareek* eskaintzen dituzten aukerak eta beste, prozedetika-ikertzaileen arreta erakartzen hasiak dira. Organo logiko txiki elkarkonektatuz osatutako *makina* hauek, gai dira sarrera-seinale jakin bati irteera-seinale jakinaz erantzuteko. Era berean, ikasi, barnea egituratu eta honek damaizkien informazioak ezagutzeko ere gai dira. Iaz, Frantziako Energia Atomikoko Komisaledgean, A. L. Allanic Nancy-ko Industria Kimikoen Goi-mailako Eskolako iker-tzaileak, horrela diseinatu ahal izan zuen erregai irradiatuaren birprozesaketa-instalazioen zuzendaritzarako sistema laguntzaile bat.

Eredu matematikoen bidezko prozesu-kontrolako sistemen ezarpe-

nak aldi berean paraleloki aurrera egitea ere itxaron beharra dago, baldin eta aldi berean sentsore adimendunak lerrokatuta garatzen badira eta eragiketa-unitateetan denbora errealean informazioa biltzera jotzen badute.

Azkenik, *portaera autoegokitzaile* deitu den metodoa ere aipatu beharra dago. Nancy-n proposatu eta prozesua "kutxa beltz" bihurtzen dute. Hasierako froga batzuen ondoren, portaera fisiko errealean oinarritutako eredu matematikoa eraikitzen da urratsez urrats eta egitasmo estatistikoko itsuak baino froga-kopuru txikiagoa eskatzen du.

Beraz, prozedetika, 2000. urteko estrategi erronka handietako gehienei ekarpen erabakiorra egiteko baldintzetan aurkitzen da, bai energi baliabide eta lehengaien arazoizko erabilpenaren arloan eta baita elikadura, osasun-babes, industri prozesuen eta produktuen segurtasun, ingurugiro-babes edota hirugarren munduaren garapenari dagozkienetan ere. Gai guzti hauek eta beste batzuek, luze eta zabal eztabaidatu ziren Karlsruhe-ko Munduko Kongresuan.

Zalantzarik ez dago noski, bai oinarritzko printzipioen arloan eta baita industri egintzengan ere, ikerkuntz ahalegin garrantzitsuak egitea derrigorrezkoa dela. Aipagarriak dira, Estatu Batuetan "Amundson" izeneko txosten famatuaren argitarapena (*Frontiers in chemical engineering*, 1988), Europar Injinerutza Kimikoko Federazio Europarreko hogeitabi lantaldeen txostena (1989) eta Frantziar Nancy-ko prozesu-injinerutzako lehen kongresu frantziarra (1987) eta beraien ondoren guzti honek izandako orientazio berria. Benetako kultur iraultza da hau. Auguste Comte-k egindako sailkapen ohoragarria, jada ez da ekoizpen-sistema industrialaren teknologiantzako marko egokia. Arlo honetan, disziplinarreko injinerutza-zientzien ikuspegiari leku egin beharrean aurkitzen da eta prozedetika, horren argitarapena baino ez da.

Zientzia berri hauen ernalkuntzak, funtsezko deituriko ikerkuntzaren (gauza naturalen) eta ikerkuntza aplikatuaren (gai industrialen) arteko bereizketa zaharraren amaiera markatzen du.