



# Fusio nuklearra: hurbilago, baina urrun

Artiboko



**Fernando Plazaola\***

**G**izartea garatu ahal izateko, energi iturriak funtsezkoak dira, denok dakigunez. 1970.eko hamarkadan petrolioaren krisiak mendebaleko gizartea larritu zuen eta energi iturri berri eta zaharren garapena areagotu egiten zuen. Eta gaur egun ere, energi iturriak eta hauen inguruko arazoak gizartearen kezka nagusietakoak dira. Saillapen zabal bat egin eta, energi iturriak bi motatakoak direla esan dezakegu:

- i) energi kopuru handiak ekoizteko gai direnak: fisioko zentral nuklearrenak eta erregai fosilenak, hain zuzen ere. Teknologikoki oso garatuak, ikuspegi ekonomikotik oso emankorrak, eta hurrengo bi mendeetarako energi iturri sendotzat har ditzakegunak, baina ingurugiroarekiko kaltegarriak izan daitezkeenak edo direnak (Txernobil, hondakin erradioaktiboak, euri azidoa, berotegi efektua ...)
- ii) energia alternatiboak; printzipioz garbiak diruditenak, ingurunari erasotzen ez diotenak (nahiz azken bolada honetan energia eolikoak eztabaida sortu duen), baina egungo gizartearen egiturak behar dituen energi kopuru itzela sortzeko gai ez direnak.

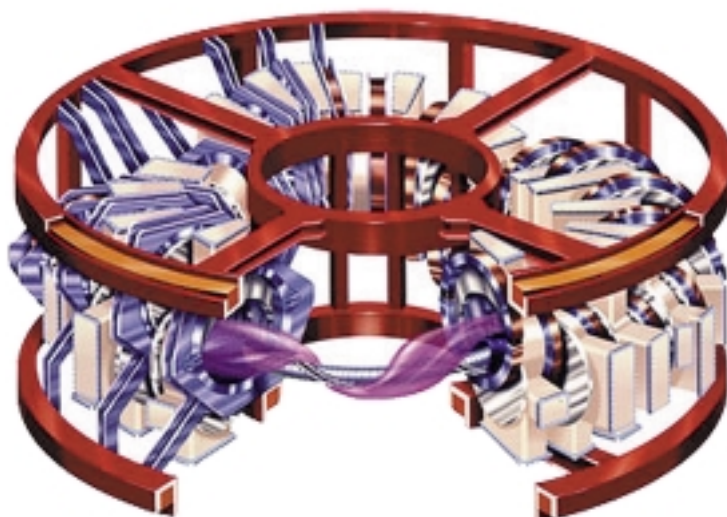
Energi iturriari buruzko eztabaida horretan, hainbatetan aipatzen da etorkizunean energi dentsitate itzelak sortzeko gai izango den energi iturri birjinala, izarrek igortzen duten energian oinarriturikoa, izango dugula, hots, amaigabea eta garbia. Gero eta hurbilago dagoela esan arren beti urrun dagoena. Bai, fusio nuklearraren sortzen den energiaz ari naiz. 1952. urteaz geroztik jakin badakigu Lur planetan ere energia hori sor daitekeela. Baina, zoritxarrez, horren froga H lehegai-luaren eztabaarekin batera izan

genuen, eta frogatze bortitz horrek kezka ere ekarri du berekin energia hori garbia dela, edo (i) motako beste energiak baino garbiagoa dela, entzuten dugunean zalantza egitea ez da harriztekoa. Ondorengo lerroetan fusio nuklearra zer den eta energi iturri bilakatzeko eragozpenak zeintzuk diren aztertzen saiatuko naiz. Eta bereziki, fisio nuklearraren aldean fusio nuklearra garbia zergatik den azalduko dut.

Bi nukleo arinek, adibidez hidrogenoak edo bere isotopoek —deuterioak eta tritioak—, bat egiten dutenean, erreakzio nuklear horretan energia askatzen da. Nukleoak oso pisutsuak izanez gero, berriz, energia askatzeko era bakarra nukleoaren zatiketetan datza (fisio nuklearra). Bigarren prozesurako, fisiorako alegia, neutroi bakar batek eraso egin eta uranio edo plutonio bezalako nukleo pisutsuetan fisioa eragin dezake. Fusiorako, berriz, elkar aldaratzen duten nukleo bi batu behar dira, hots, bi nukleo horien aldarapen elektrostatikoa gainditu, nukleoak batzeko gai izan daitezten. Ohar gaitzkeenez, fusio-prozesua ez da batere erraza. Izarrek masa handia (itzela) dutenez, erakarpen grabitatorioari esker izarraren masa guztia konfinatzeko gai dira eta, berari esker,

nukleoaren arteko batzeak energia-andana igortzen du espaziorantz. Lur planetan, horrelako konfinamendu grabitatoriorik gerta dadin ezinezkoa da; beraz, nukleoaren konfinamendu hori bestela egin behar da. 1952. urtean, lehen aipatu legez, konfinamendu hori lortu zuten. Bertan, Fusiorako erregaia konfinatzeko fisioko lehegailu nuklearra leherrarazi zuten eta sorturiko eztanda-uhin horren eraginez eragindako fusio-erreakzioek fisioko lehegailuak baino 50 aldiz energia gehiago askatu zuten.

Fusio-erreakzioak, era kontrolatua zein kontrolgabea, lortzea ez da berehalakoa. Egun garatzen ari diren fusio-erreakzioetarako teknologian lehenengo urratsa fisioko erregaiaren elektroien eta ioien zopa lortzea da, **plasma** hain zuzen ere. Plasma gure planetan agerian ez dagoen materiaren beste egoera da, laugarrena hain zuzen ere. Lurrean ez aurkitu arren, unibertsoaren % 99 plasma-egoeran dago. Solido bat berotuz likido bihurtuko da eta, areago berotuz, lurrundu egingo da, gas bihurtuta. Berotzen jarraitzen badugu, temperatura 11.000 °C-ra (plasmaren barne-partikulen batez besteko energia zinetikoa 1 eV-koa dela adierazten du) iristean gasaren atomoak



CIEMATen, TJ-II fusio-erreaktorearen eskema.

## Estatubatuarren bidea

Artikuluaren deskribatzen den fusio-programa, ITER proiektuari dagokiona hain zuzen ere, ez da fusioa lortzeko bakarra. Beste bidea ere badago, konfinamendu inertzialarena, hain zuzen ere, bereziki Estatu Batuetan garatzen ari dena eta European garapen txikia duena, zeren konfinamendu inertzialerako potentziako laserrak behar baitira, eta hauek teknologia sekretuak direnez (interes militarra dago haien atzean), ikerketak ez dira argitaratzen; beraz, hor egiten den ikerketa sekretupean gordetzen da. Estatu Batuetan, ikerketa-mota hori, Lawrence Livermore Laborategian (hainbat sekretu militarren laborategia, hain zuzen ere) egiten ari da eta jakina da potentzia altuko 60 laserrek fusioa lortzeko helburuarekin dihardutela eta 2003. urterako potentziako 200 laser eraikiko direla. Kasu honetan, konfinamendu magnetikoan ez bezala, konfinamendu-denborek oso laburrak behar dute izan, nanosegundo baten inguruak hain zuzen ere. Beraz, Lawson-en irizpidearen arabera, plasmek oso oso dentsitateak izan behar dute erreaktore hauetatik etekina lortu ahal izateko. Fusiorako kontzeptu fisikoa kasu honetan ere erraza da ulertzen, barnean erregaia daraman milimetro diametro inguruko pilota bati potentziako laserrek era ahal den homogeneoenean erasotzen diote pilotaren erradioa txikiagotuz nukleoaren artean fusioa gerta dadin. Hala ere, konfinamendu magnetikoaren kasuan ez bezala, konfinamendu inertzialaren kasuan, fusiorako bidea noraino urratu den ez da ezagutzen, zein baliotan dagoen fusio-parametroa?, "break-even" hurbil edo urrun dago? Ikerlariek ez diete galdera hauei erantzuten, ikerketa sekretupean egiten baita.

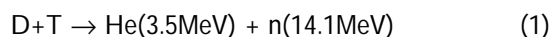
elektroiak galtzen hasiko dira eta elektroi negatiboz eta ioi positiboz osaturiko zopa bilakatuko da. Halere, egoera honetan ez da oraindik fusio-erreakziorik gertatuko, ioi positiboen arteko aldarapen-indarra baitago. Baina plasma areago berotuz gero, ioi edo nukleo horiek abiadura (energia zinetiko) galanta har dezakete eta abiadura horri esker gerta daiteke indar aldaratzailea gai ez izatea nukleoaren arteko talkak eragozteko. Esperimentalki frogaturik dago hori posible dela, baina horretarako plasmaren tenperaturak itzela izan behar du, gutxienez 100 milioi gradukoa (10 keV). Temperatura horretan fusio-erreakzioak gertatzen has daitezke, baina bakar batzuk gertatzea ez da nahikoa, tenperatura horretara iristeko erabiliriko energia ikaragarria izan baita. Komenigarriena da denbora-unitateko fusio-erreakzioen kopurua handia izatea. Beraz, fusio-erreakzioak gertatzeko probabilitatea handia izan dadin, plasmaren dentsitateak ere handia izan behar du. Hala ere, etorkizuneko erreaktoreetarako esperimendatzen ari den (1) adierazpeneko fusio-erreakzioa gertatzea (dagoeneko fusio-laborategietan lortuak) ez da baldintza nahikoa fusioa energi iturri berri gisa hartzeko.

Ikusten ari garenez fusioak zurgatzen duen energia oso handia da eta, jakina, fusioko zentral batean fusioan lorturiko energiak kontsumiturikoa baino askozaz ere handiagoa behar du izan.

Bestalde, jakin badakigu edozein gorputz bero ingurune hotzago

batean murgildurik badago, difusio edo barreiapen atomikoaz arin hoztuko dela. Prozesu hau oso larria izan daiteke plasmaren kasuan. Beraz, nola edo hala plasma konfinatu beharra dago plasma beroa mantentzeko, hots, aipaturiko barreiapen atomikoa gerta ez dadin. Fusio-plasmak hain bero egon behar duenez (100 milioi gradutik gora), konfinamendua ezin daiteke, botiletan egiten den antzera, hormak erabiliz egin. Botila horiek horma fisikorik ezin dezakete eduki. Horren ordez konfinamendu magnetikoa erabiltzen da, hau da, eremu magnetikoaren lerroek osatzen dute horma. Eremu-lerroek plasmaren barnean oso arin higitzen diren partikula kargatuak (elektroiak zein ioiak) konfinatu behar dituzte "donut" antzeko eskualde itxian, fusio-energia probetxugarria lortu arte. Konfinamenduaren arazoa ez da batere xumea, eta egun erabiltzen den teknologia zientzialari errusiarrek garaturiko TOKAMAK kontzeptuarena da. Honela, konfinamendu-denbora definitzen da, eta plasma beroak kanpotik energiaz elikatu gabe bero irauten duen denbora adierazten du.

Hiru parametrok mugatzen dute fusio-erreakzioen probetxugarritasuna: plasmaren tenperatura, dentsitatea eta konfinamendu-denbora. Hiru gai horien biderkadurari fusio-parametroa deritzo. Fusio-parametroaren balioa fusio-erreaktorea energi iturri legez erabilia izan dadin aspaldidantik kalkulaturik dago. Lawson-ek



*Adierazpen honek hidrogenoaren isotopoek, deuterioak (D) eta tritioak (T), bat egiten dutenean, erreakzio nuklear horren ondorioz, He atomo bi aldiz ionizatua (alfa partikula) eta neutroi bat (n) sortzen direla esan nahi du. Sorturiko He-ren energia zinetikoa 3,5 MeV-ekoa da (plasma berotzeko erabilia) eta neutroiarena, berriz, 14,1 MeV-ekoa (konfinamendutik ihes egingo duena eta energia elektrikoa sortzeko erabiliko dena-*



Artxibokoa



**1952. urteaz geroztik jakin badakigu Lur planetan ere fusio nuklearraren bidez energia sor daitekeela. Baina, zoritxarrez, horren froga H lehegailuaren eztandaekin batera izan genuen, eta frogatze bortitz horrek kezka ekarri du berekin.**

1957. urtean kalkulatu zuen fusio-parametroaren balioak  $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$  (Lawson-en irizpidea) baino handiagoa behar duela izan energi zikloaren etekina % 35ekoa izan dadin. Kanpotik berotu gabe, plasma Lawson-en irizpidearen baldintzapean mantentzea lortzen denean, **ignizio-puntua** lortu dela esan ahal izango dugu. Gaurko plasmak puntu horretatik urrun daude, eta erabiltzen den beste parametro oso garrantzitsua energi irabazpenarena da, hots, fusioak sorturiko energia eta fusiora iristeko erabiltzen den energiaren arteko arrazoa, **Q** faktorea deiturikoa, hain zuzen ere.  $Q=1$  denean fusioan sorturiko energia bertara iristeko energiaren berbera izango da eta puntu honi "**break-even**" deritzo. Agerian dagoenez, fusio-erreaktorea merkatuan lehiatzeko modukoa izan dadin  $Q \gg 1$  lortu beharko litzateke. Eta hori lortzeko arazoetariko bat da plasma sortu, berotu eta konfinatu ahal izateko, energia asko erabiltzen behar dela.

Belaunaldi honetako esperimintuek "**break-even**" inguruko egoera lortu nahi dute, eta hortik oso

hurbil daudela esan genezake,  $Q = 0.9$  gainditu da, hain zuzen ere. Hurrengo belaunaldiko erreaktoreetan ignizio-baldintzetako plas-



**Fusio-nuklearrean erabiltzen den plasmaren barnean oso arin higitzen diren partikula kargatuen konfinamenduaren arazoa ez da batere xumea, eta egun erabiltzen den teknologia zientzialari errusiarrek garaturiko TOKAMAK kontzeptuarena da.**

mak lortzea espero da. Horretarako, dagoeneko martxan dago ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) proiektua, Europako Batasuna, Errusia, Japonia eta Estatu Batuek parte hartzen zutena. Aurten bertan, eta ipinitako epean, barne-erreaktorearen diseinua amaitu da, eta berehala erabakiko da erreaktore esperimintal horren kokapena non egongo den (Europak eta Japoniak dute aukerarik handiena). ITER proiektuaren partaideak lau zirela goian idatzi dut, baina orain hiru dira, duela bi hilabete Estatu Batuek proiektua utzi egin baitute. Askotako arazoak egon daitezke, baina han lan egiten duten zientzialarien arteko zurrumurruen arabera, Estatu Batuetan fusio-teknologiaren lidergo faltan eta erreaktorea han kokatzeko aukerarik ez izatean datza arazoia.

Aipatu beharra dago belaunaldi honetako erreaktoreekin ignizio-rako beharko liratekeen parametroak independenteki lortu direla, baina denak batera, aldi berean, ignizioa lortzeko moduan ez. 400 milioi graduko tenperatura,  $10^{21}$  partikula/ $\text{m}^3$ , eta segun-



## Fusio-erreaktoreak sare elektrikora lotzean, noizbait lotzen badira, energi iturri agortezina lortuko dela esan dezakegu, horrek dakarren guztiarekin.

do bat baino konfinamendu-denbora handiagoak lortu dira. Eta iaz, 1997an Edimburgon kokaturiko Europako Batasunaren JET erreaktorean 16 MW-eko fusio-potentzia lortu zen; gaur arte lorturiko potentzia handiena. Gainera, aipatu behar da ere potentzia hori deuterio + tritio plasma batean lortu zela, eta ez JET diseinaturik dagoen deuterio + deuterio plasman. Baina egia da oraindik ez dela egoera egonkorrean fusioko plasmarik lortu. Eta ez dakigu horrelako plasmak nola jokatuko duen (hau da ikuspegi zientifikotik kezkarik handiena). Hori ezagutzen ez denez, plasma egonkorrak sortuko dituen ingenieritza-arazoak ere ez dira txikiak izango. Garapena aurreikusiten den eran jarraituz gero, ITER proiektuan eraikiko den erreaktorean ignizio-baldintzetako plasmak, hots egonkorrak, lortuko dira eta beraiek ikertu eta men-

peratu ostean, hurrengo fasean, DEMO probatarako erreaktorea eraikiko da, non benetako zentral elektriko baten beharretara egokituko den. Fusioko erreaktorea sare elektrikora lotzeko unea, gauzak aurreikusi bezala badoaz, hemendik 40 urtera gertatuko da. Epe hori oso luzea iruditu arren, 1980ko hamarkadan aurreikusirikoa baino laburragoa da. Hala ere, ohar gaitezen egin nahi dena "laborategian izar bat eraikitzea" dela, eta, ikuspegi honetatik, aipaturiko epeak luzeak al dira?

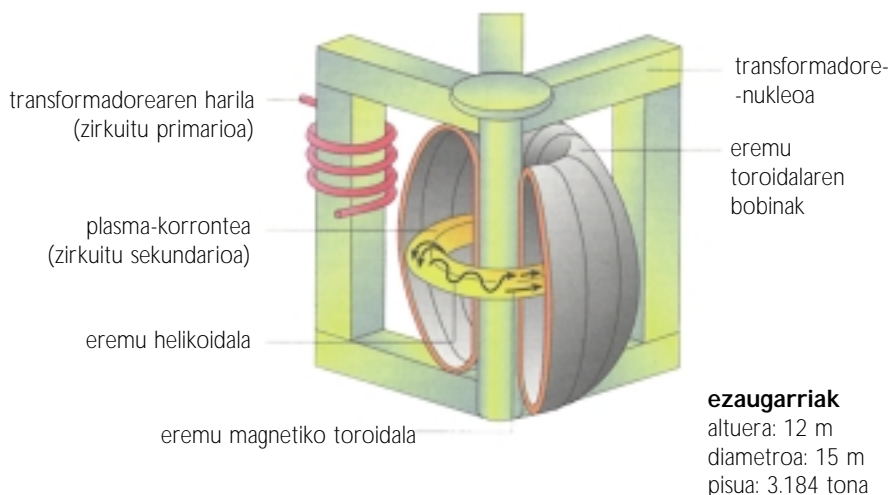
Demagun fusio-erreaktorea lor daitekeela eta lortu egiten dela (konfinamendu magnetikoarena, hain zuzen ere). Ikus dezagun gaur eguneko energi iturriekiko zeintzuk diren abantailak eta desabantailak. Desabantaila nagusia kostua da. Fusio-erreaktoreetarako hasierako inbertsioa itzela izango da (ikerketa ere nazioarteko mailan egiten ari da), egungo

edozein energi iturrik behar duena baino askoz handiagoa. Hori oztupo ikaragarria izango da egungo erregai fosilen eta fusio nuklearreko zentraleri aurre egiteko. Gainera, jakina da azken bi energi iturriek energia arazo (teknologiko) barik eta merke ekoitz dezaketela.

Abantailen aldetik, lehenengoa erregaiarena da. Deuterioa itsasoan eta ibaietan oso hedatua dago eta merkea izateaz gain agortzeko arriskurik ez du. Bigarren abantaila etorkizuneko fusio-erreaktoreen segurtasunari dagokio; fusio-erreakzioetan erregaia eteten bada fusio-erreakziorik ezin daiteke gerta, gainera konfinamendu magnetikopeko fusio-erreaktoreetan erregaia aldiari aldi ekoizten denez, fusio-erreaktorea eskuetatik ihes egitea ezinezkoa da, hots, fisioko zentraletan gertatzen ez den bezala (Txernobil kasuko), fusio-erreaktoreetan "desentxufatzeak" ez du arazorik sortzen. Beraz, fusio-erreaktoreak ez du eztanda egiteko edo urtzeko arriskurik.

Fusioaren aldekoek saltzen duten eran, garbitasuna beste abantaila nabaria da. Fisioko zentral nuklearrek eta erregai fosilen zentralak ingurunea mendetarako kaltetu dezakete. Denon gogoan daude Txernobil eta Harrisburg-eko fisioko zentral nuklearretan gertaturikoak, hondakin erradiaktiboak (gaur egun pil-pilean dagoen gaia, beraiekin zer egin?), berotegi efektua, euri azidoa... Fusio-erreaktoreak, berriz, horrelako kalterik ezin sor dezaketela diote. Horrek zer esan nahi duen ondo-

JETeko tokamak-aren eskema.





rengo lerroetan laburki aztertuko dut, fisioko erreakzioekin erkatu-rik.

Fisioko erreakzio nuklearrek 200etik gora erradioisotopo sortzen ditu. Hainbatek, gainera, milaka urteko erdibizitza du. Adibidez aski ezaguna dugun plutonioaren isotopo batek 24.000 urteko erdibizitza du (eta ez da luzeena). Fisioko erreakzioan sorturiko erradioisotopoen kopurua hain handia izanik, haien tratamendua eta erabilera oso zaila da, ia ezinezkoa. Arrazoi horrexegatik Carlo Rubbia Nobel saridun italiarrak proposatu berri du azeleragailu baten bidez torioa fisionatzea, hondakin nuklearraren moten kopurua askoz ere txikiagoa eta tratatzen errazagoa izan dadin. Fusio nuklearraren kasuan, berriz, (1) ekuazioaren arabera sortzen diren partikula bakarrak energia handiko alfa partikulak (hots, helio-atomoak) eta neutroiak dira. Helioari fusio-hautsa deritzo, eta unibertsoan zabalduenatariko atomo egonkorra da. Alfa partikulek garrantzi handia dute plasma beroa mantentzeko eta, ionizaturik daudenez (alfa partikula legez), eremu magnetikoak konfinatzen ditu. Neutroiak ere sortzen dira (1) erreakzioan, eta hauek kargabakoak izanik konfinamendu-eskualdetik ihes egin dezakete, plasma mugatzen duen geruza aberatsarekin talka eginez. Geruza aberatsak konfinamendu eskualdea mugatzen du eta litioaz edo litioa duten konposatuez eraikitzen da. Geruza aberatsak bi funtzio ditu: i) neutroiek litio-atomoekin talka egitean tritioa sortzea, plasmarako erregaia dena, eta ii) sorturiko neutroien energia zinetiko handia zurgatzea, ondoren energia elektriko bilakatzeko. Beraz, fisioko erreaktorean erradiaktibitatea ez dago fusio-erreakzioan (ez dago hondakinik), neutroiek ingurune-ko materialekin talka egitean sorturiko trasmutazioetan baizik.

Trasmutazioen ondorioak bi motatakoak dira: 1) fusio-erreakzio-ko prozesurako onuragarriak, tritio erregaia sortuz eta 2) ikuspuntu guztietatik kaltegarriak. Bigarren honek konfinamendu magnetikoaren inguruko egituraren erabilitako materialen menpekotasuna du. Aktibitate nuklear txikiko material aproposak erabiliz, neutroiek material horietan sorturiko aktibitatea, erreaktorea gelditu eta handik ordu batera 10 milioi aldiz gutxitu daiteke, erdibizitza luzeko hondakinik sortu gabe. Hondakin hauek zentralaren barruan geratuko lirateke,

batean konfinamendu magnetiko-  
tik ihes egin lezake. Etorkizuneko fusio-erreaktore baten tritio-ihesen (gerta daitekeen istripu larrienean ere) eta zentralen inguruko populazioak jasan lezakeen erradiaktibitate-mailaren aurreikuspenek diote, kasurik okerrenean ere, erradiaktibitate maila nagusia zentraletik 1 km-ra kokatuko litzatekeela.

Fusio-erreaktoreak sare elektriko-  
kora lotzean, noizbait lotzen bada, energi iturri agortezina lortuko dela esan dezakegu, horrek dakarren guztiarekin. Erregai-fosilak eta fusio-nuklearra erabiltzen

Artibokoa



Fisioko erreakzio nuklearrek 200etik gora erradioisotopo sortzen ditu. Hainbatek, gainera, milaka urteko erdibizitza du. Adibidez aski ezaguna dugun plutonioaren isotopo batek 24.000 urteko erdibizitza du (eta ez da luzeena).

kanpora ihes egiteko aukerarik gabe. Hala ere, ez da ahaztu behar aukeraturiko materialak aproposak izan arren, ezpurutasunak izango dituztela eta, horien ondorioz, erdibizitza luzeko hondakinik ere sor daitekeela. Bestalde, tritio erregaia 12,3 urteko erdibizitza duen isotopo erradioaktiboa da, beta partikulen igorle hutsa hain zuzen ere eta igortzen dituen elektroien bidez besteko energia 5,7 KeV-koa da. Tritioa gasa denez, istripu larri

duten zentralak baino askoz ere garbiagoak izango dira. Mendetako kalteak sortzeko gai ez dira izango, baina garbitasun birjinala ere ez dute izango. Hala ere, beste motako zentralekin gertatzen ez den bezala (hauetan ondorio kaltegarriak prozesuaren intrintsekoak baitira) fusio-erreaktoreetan garbitasunaren maila hobetu egin daiteke.



\* EHUko irakaslea