

Energetikaren historia, oinarriak eta ondorioak zibilizazioentzat

ALAIN ULAZIA MANTEROLA

IN eta Jariakinen Mekanika Saila eta ILCLI (UPV/EHU)

(History, foundations and consequences for civilizations of Energetics)

DOI: 10.1387/gogoa.15644

Abstract

Energetics is strengthening as a complex system analysis which embraces physics, biology, ecology, sociology and economy. Considering energy as an universal principle and a wherever-present being that is able to support many transformations, it is a really significant invariant in any kind of process due to its conservation law. In this article, firstly we narrate the history of energy through its unification phases. Starting with the philosophical concept of Aristotle, we will explain how mechanical work and heat, feed and metabolism, and even matter were added to the unifying concept, and how it was related with entropy or the order/disorder of a system. At the end we will introduce these energetic ideas in the analysis of our oil-based over-energized society, in order to deconstruct the myth that relates welfare with the maximization of energy consumption and to emphasize that there are more suitable energetical indexes.

Keywords: energy, energetics, entropy, society.

Sarrera

Aristotelesek beti izan zuen printzipio unibertsalenak zein ziren jakiteko nahia, izan ere, beretzat lehenbizi ezagutu beharreko gauzak printzipioak eta kausak dira. Hauetatik eta hauen bidez ezagutu daitezke beste gauza guztiak, baina ezinezkoa da beste gauza horietatik hauek zuzen, eratorrez, ezagutzeari. Beraz, printzipio nagusi hauek, «unibertsalak», zailenak izaten dira ulertzeko, gure zentzumenetatik urrunen daudelako, baina errealitatea ezagutu

ahala «zientzia bakar» baten «printzipioak eta kausak» ezarri beharko lituzkete (Aristoteles, *Metafisika*, 4., II):

Horrela, bada, osasuntsu den guztiaren zientzia bakarra dagoen bezalaxe, gainerako gauzetan ere gauza bera gertatzen da. Izan ere, gauza bati buruz esaten direnak ez ezik izaera bakar bati dagozkionak ere aztertzea bada zientzia bakar baten ardura, hauek ere, nolabait, gauza bakar bati dagozkiola esaten baita. Argi dago, beraz, «den guztia den aldetik» aztertzea ere zientzia bakar bati dagokiola. Alabaina, zientziari dagokio nagusiki kasu guztietan lehenengo dena, gainerakoen sostengu den hori, zeinarengatik izendatzen baitira besteak. Beraz, hori substantzia baldin bada, substantziei buruzkoak dira filosofoak ezagutu beharreko printzipioak eta kausak.

Unibertsalenaren bilaketa honek *energetikan* topatzen du berebiziko ikerketa eremu bat, hau da, unibertso bizigabea eta bere baitako bizidunak sortu dituzten transformazioen azterketa. Ezertxo ere ezin da honetatik apartatu: prozesu oro bere baitako energia eraldaketan arabera analiza daiteke; objektu oro edo edozein informazio bit, bere energia edukiaz baliozta daiteke eta etorkizuneko energia transformazioekiko bere ekarpen potentzialaz. Lurrean transformazio hauek eguzki erradiazioetik datoz finean, petrolioa bera ere garai bateko fotosintesiaren metatzailea baita. Energetikoki, ur-jauzi bat, haize turbinaren biraketa, mitin bat edo zaldi karrera bat, jatorrian, eguzkiaren erreakzio termonuklearretatik datoz. Edozeren hondoan dagoen energia komun hau naturan eta gizartean energia eraldaketak aztertzearen alderdi bat baino ez da, eta ororen batasun ikuspegiak sortu ohi duen liluraren zati bat bakarrik. Izan ere, hori bezain interesgarria da batasun honen barneko adierazpen partikular kontagaitzak azalratzea eta konparatzea, hauek sortu dute-eta bizi garen munduko heterogenotasun itzela.

Aniztasun hau medio, energetikaren gaia azterketa-eremu oso zabala da eta bere barnean askotariko jakintza-arloak hartzen ditu. Fisika eta giza zientzietatik hasita, oso bestelakoak ere hartzen ditu, besteak beste, ingeniari-tzaren eta kudeaketa-zientzien zenbait adar. Energia-zientzien edo energetikaren zabaltasun honek eragina izan du historikoki gaia aztertzen aritu direnengan, ez dutelako inoiz araubide zehatz bat eduki: batzuetan bakarka aritzen ziren, besteetan paraleloan, geroxeago ideiak lotu eta asmakuntza berriak egiten, etab. Hala ere, XIX. mendean geroztik, patroi unibertsalak eta ikuspegi-sintetizatuak aurkitzeko ahalegina handitu egin zen: Mach (1896), Brody (1945), Cardwell, (1971), Lindsay (1975), eta azken urteetan lan erreferenteak argitaratzen ari den Smil (2003, 2008).

Energia, berez, hitz konposatu greko batetik dator. Aristotelesek idatzi zuen lehenbizikoz, *in* eta *ergon* (lana) batuz *energeia* sortzeko esanahi zinetiko batekin. Aristotelesen arabera, edozein objekturen existentzia objektuaren funtzioarekin erlazionatua dagoen *energeia* bidez mantentzen da. Gre-

koentzat energiaren adierak egungoak baino eremu kontzeptual zabalagoa hartzen zuen. *Energiein* hitzak ekintzan egotea esan nahi zuen, etengabeko higiduran, lanean, produkzioan, aldaketan, ekinean. *Energiearen* ondorengo kontzeptu klasikoa orokorpen filosofiko bat izan zen, eraldaketa prozesu guztiak barne hartzen zituen intuizio bat, potentzialetik errealizatorako aldaketa. Zentzua klarki holistikoa eta kualitatiboa zen, eta energiaren kontzeptua ezer gehiago findu gabe egon zen ia bi milurtekotan zehar. Bien bitartean Erromak, Islamak, Txinak, eta Erdi Aroko Europak eguneroko hainbat arazo energetiko ebatzi zituzten, eta euren gizarte konplexuak ez zituzten soilik giza eta animalia indarraz mugitu, uraren eta haizearen energia zinetikoa eta egur-ikatzaren ahalmen kalorikoa erabiltzen ere asmatu zuten.

Beroa, elikadura eta entropia

Nahiz eta aurrerapen teknikoak egon, energiaren ulertze sistematikoan pauso urriak eman ziren zientziaren berpizkundeko hastapenetan. Atera kontuak, Galileo bezalako zientzialari batentzat beroaren kausa higidura zen, baina beroa bera ilusio bat baino ez zen (Galileo 1623)¹:

«Higidura beroaren kausa da» proposizioaz ditudan ideiak plazaratu behar ditut, hau egia nolatan den azalduz. Baina lehenengo beharrezkoa izango da niretzat «beroa» deritzogunari buruz berba batzuk esatea, honi buruzko ohiko kontzeptzio komuna egiatik oso urrun dagoela uste baitut, beroa egiazko gertaera bat dela edo berotua izan den materialean egon dagoen kualitate bat dela uste den heinean.

Eta ondoren nagusitu zen marko newtondarraren indar eta masak ere ez zuten energiak inbariante gisa hartzen duen ardatza erakusten, eta ondorioz ikuspegi heuristikoa falta zen lurrun-makinaren hobekuntzarako edo izaki bizidunen energetikaren azterketarako. Bernoulli berak ere, bere lege famatua, fluidoentzako energia kontserbazioa ezartzen zuena, *descensus actualis* eta *ascensus potentialis* bezalako partikula multzoen altuera birtualen baturaren kontserbazio gisa formulatu zuen, Huygensen indar bizien (*vis viva*) teoria ez baitzen zientifikotzat jotzen. Newtonen marko ukaezinetik kanpora, makinei eta motorrei buruzko eta bizidunen metabolismoari buruzko galdera zehatzek eta esperimendu praktikoek ezarri zuten energetikaren hasierako funtsa zientzia gisa. Beranduago etorriko ziren legeak eta eredu teorikoak, XIX men-

¹ In accordance with the promise which I made to Your Excellency, I shall certainly state my ideas concerning the proposition «Motion is the cause of heat,» explaining in what way it appears to me to be true. But first it will be necessary for me to say a few words concerning that which we call «heat,» for I strongly suspect that the commonly held conception of the matter is very far from the truth, inasmuch as heat is generally believed to be a true accident, affection, or quality which actually resides in the material which we feel to be heated.

dean erregaiak, motorrak, beroa, garraioa, erradiazioa, elektrizitatea, nutrizioa, metabolismoa, lana, fotosintesia, eta eboluzioa aztertzen hasi zirenean.

Zalantza gabe Watt izan zen bide honen aitzindari nagusia. Bere lurrun-makinak produkzio industrialara irauli zuen, eta lurrun neurgailu baten asma-kuntza ximpleak, motorren zikloen ikerketa zorrotza ahalbidetu zuenak, ireki zion atea termodinamikari eta lehenengo motorrari. Bitartean, Carnotek (1824) hurbilketa guztiz abstraktu bat aplikatu zuen edozein motako motorren azterketan berotik energia zinetikoa nola sortzen zen azaltzeko. Motor termiko ideal baten errendimendu maximoa,

$$1 - (T_{\text{hotz}}/T_{\text{bero}}),$$

bero foku hotzaren (T_{hotz}) eta beroaren (T_{bero}) arteko arrazoiak emana zeterren, eta % 100eko errendimendua ezinezkoa zen foku hotza zero absolutuan egonda soilik lor zitekeelako. Segituan etorri zen termodinamikaren oinarri heuristikoa ezarri zuen motor idealaren zikloaren deskribapena Watten diagramaren arabera. Lavoisierrek eremua zabaldu zuen orduan eta *kalorikoa* deitu zuen bero fluxu neurtezin baten mamu intelektuala atera zuen plazara. Teoria honen arabera naturako gorputz guztien molekulek bi indarren arteko oreka jasaten zuten, elkar hurbilarazten zituzten erakarpenarena eta elkar urruntzen zituzten kalorikoarena. Solidoen, likidoen eta gasen arteko bereizkuntza honen arabera ezar zitekeela pentsatu zuen, egoera bakoitzak zeukan kaloriko kantitatearen arabera.

XIX. mendearen erdialdean eman ziren biosfera ziklo handien deskribapenak bioenergetika planetarioa azalduz. Orduantxe lotu zen CO_2 eta ur produkzioa elikagaien oxidazioarekin metabolismo heterotrofikoa duten izakien energia produkzioaren oinarrian. Horrela, arnasketa erritmo metabolikoaren eta elikaduraren araberakoa zen. Mayer (1842) medikua izan zen une honean energetikaren printzipio orokorren genesis gaizatu zuena Asiako itsas espedizioetan lanean ari zela. Tropikoko pazienteen odola alemaniarrena baino kolore biziagokoa zela oharturik, tenperatura epelengatik haien gorputz metabolismoak energia gutxiago behar zuenez odola gutxiago oxidaturik izango zutela pentsatu zuen. Baina zer gertatzen zen lan mekanikoarekin? Hau ez al zen berdina European edo tropikoetan? Zentzudunena lan indar hori ere odol oxidaziotik zetorrela pentsatzea zen, eta beraz lana eta beroa baliokideak eta eraldagarriak izan behar ziren.

Baliokidetza estimazio kuantitatiboak egin zituen Mayerrek orduan, eta energia kontserbazioaren ideia fenomeno natural guztietara hedatu zuen, lan mekanikoa, bizidunen metabolismoa, argia, elektrizitatea eta magnetismoa kontserbazio horren pean batuz. Giharrak motorrak bezalakoak ziren: ugaztunek jandakoaren energia balioa % 20ko efizientziaz bihurtzen zuten lan eta bestea bero gisa galtzen zen. Hara hor termodinamikaren lehen printzipioa edo energiaren kontserbazio lege ospetsua gudan gorpuztua, energia

ez dela sortzen ez deuseztatzen dioskuna. Azkenean, beroaren eta lan mekanikoaren arteko baliokidetzak Joule aurkitu zuen bere laborategian termometro oso zehatzen bidez errotatxo batekin irabiatutako uraren tenperatura neurtuz. Ordutik badakigu kaloria bat (ur litro baten tenperatura gradu bat igotzeko behar den beroa) 4.184 Joule dela (adibidez, polea batetik zintzilikatuta dagoen 0.40 kg-ko pisu bat metro bat erortzean poleari transmititzen zaion energia mekanikoa).

Geroxeago, Thomson eta Kelvinek planetako energia zinetikoen jatorrian Eguzkia dagoela eta naturak energia mekanikoa xahutzeko joera duela idatzi zuten. XIX mendearen erdialde honetan Clausiusek (1850) beroaren teoria mekanikoa garatzeari ekin zion, eta Carnoten ziklo batean lortu ahal den lan maximoa soilik bero fokuen tenperaturaren menpekora dela frogatu zuen, eta ezin dela egon bero fluxu positiborik foku hotz batetik foku bero batera. Ideia hauei jarraituz iritsi zen Clausius sistema baten desordena maila neuritzen duen *entropia* kontzeptura: unibertsoak daukan energia konstantea da, baina honen banaketa ez denez uniformea eta bertako eraldaketek uniformetasuna bilatzen dutenez, entropia totalak beti joko du maximoa. Izaki bizidun bat espazio jakin batean gorpuzten den gradu goreneko ordena zati bat dela esan daiteke, baina halaberrez degradatzen joango da eta azkenean lurrean eta espazio zabalean barreiatu geratuko.

Horrela bada, sistema baten entropia aldaketa sistemak daukan tenperaturekiko sartutako beroaren proportzioan gertatzen da, hau da, sistema itxi oso hotz batean (erabateko ordena zero absolutuan geneukake) bero kantidad handia sartzeak desordena handia dakar. Alderantziz, oso bero dagoen sistema batetik bero apur bat ateratzeak apur bat ordenatuko du sistema. Praktikan sistema itxi bateko energia erabilgarria beti urritzen ari dela esan nahi du honek. Egurra entropia baxuko edo kalitate altuko energia forma kontzentratu bat dela esan daiteke, eta erretzean, modu itzulezin batean, desordena handiko energia baten forma hartzen du ke eta bero barreiatu legez. Prozesuaren bukaeran entropia hazi egin da halaberrez. Horra hor beroaren posizio berezia energien ontologian: beste energia guztiak bihur daitezke bero, baina beroak ezin ditu osoki beste energia formak hartu beti geldituko baita zerbait bidean.

Termodinamikako bigarren legea deritzon hau da akaso giza gogamenak garatu duen orokorpen fisiko zabalena, eta honetaz oharturik, laster aplikatu zuen Gibbsen (1906) kimikara energia askearen nozio garrantzitsua ezartzeko: tenperatura eta presio konstantean gertatzen den erreakzio batetik atera daitekeen lan maximoa. Energia askearen aldaketa sistemaren energia edukia aldaketari (entalpia) tenperatura eta entropia aldaketaren arteko biderkadura kenduta lortzen da, azken hau lan erabilgarri gisa aprobe-txa ezin daitekeena baita. Halaz, elementu batzuetatik konposatu kimiko bat eratzeke energia aske zehatz bat behar da eta, alderantziz, erreakzio espontaneo batean energia askearen aldaketa negatiboa da. Entropia kontzeptuaren

urrezko garaiotan, kimikarako ez ezik ekonomiak aztertzeko ere erabili zen bigarren legea gizarte mota ezberdinak, ehiztaria eta nekazaria, nomada, industrialia, eta abar, *per capita* zuten energia kontsumoaren arabera sailkatuz, hauek lortzen zuten antolakuntza eta barne ordena maila horren arabera bailitzan.

Energetika orokorraren oinarriak ezartzen

Testuinguru honetan idatzi zuen Ostwald (1892) kimikari alemaniarrek *Energetika Orokorraren Oinarriak* deituriko manifestua energiaren kokapen epistemiko berezia eta bakarra azpimarratuz. Honela hasten zen testua:

Espazioa, denbora eta energia dira zientziaren adar guztietan neurketa barne hartuz aplikazioa duten kontzeptuak. Lehenbiziko bien garrantzia inolako zalantzarik gabe hartu da aintzat Kanten garaitik. Hauetatik haraindi energiak bere leku propioa dauka bere transformazioaren legeek eta bere kontserbazio kualitatiboak fenomeno naturalen domeinu guztien artean erlazio neurgarri bat ezarri dezaketelako. Espazio eta denborarekin batera sailkatzeko daukan eskubide eksklusiboa, energiak gain, zientziaren arlo guztietan aplikazioa daukan beste kontzeptu orokorrik ez izatean datza. Denbora edozein kasutan jarioan eta espazioa edozein kasutan geldik ikusten ditugun bitartean, energia bi moduetan agertzen zaigu. Azken finean gertatzen den oro energia aldaketa baino ez da.²

Energiaren muineko kokagune epistemiko honek ikatzarekiko geroz eta menpekoago zen gizartean laster erregaien ahitzeari buruzko beldurrak aineratu eta energia aurreztearen aldeko argumentuak plazaratu zituen. Soilik eguzki erradiazioan oinarritutako ekonomia iraunkorraz hitz egiten hasi ziren, eta energia fluxu naturalen aprobetxamenduaz erregai fosilen aurrean, hots, energia berriztagarriei buruz (Soddy, 1912). Baina mende horretako lehen hamarkadako kontuak baino ez ziren izan, petrolio aurkikuntzek sekulako gorakada izango baitzuten segituan. Gainera, hamarkada horretan energiak orduan eta kokagune kontzeptual zentralagoa bereganatu zuen: Einsteinek frogatu zuenez materia energia (E) zen azken batean, eta edozein masa

² The concepts that find application in all branches of science involving measurement are space, time, and energy. The significance of the first two has been accepted without question since the time of Kant. That energy deserves a place beside them follows from the fact that because of the laws of its transformation and its quantitative conservation it takes possible a measurable relation between all domains of natural phenomena. Its exclusive right to rank along space and time is founded on the fact that, besides energy, no other general concept finds application in all domains of science. Whereas we look upon time as unconditionally flowing and space as unconditionally at rest, we find energy appearing in both states. In the last analysis everything that happens is nothing but changes in energy.

kantitate (m) eta energiaren arteko baliokidetzat bat ezarri zuen bere ekuazio famatuaz, $E = mc^2$. Alimalekoa zen materia gramo batek aska zezakeen energia, zeina argiaren abiaduraren karratuarekiko proportzionala baitzen, oraindik prozesu hau burutzeko moduez arrastorik ere ez zeukaten arren. Erreketa gisako erreakzio kimiko batean funtsezko legea da masa kontserbazioarena, bakarrik lotura kimikoen energia baita askatzen dena eta ez materia berarena. Aldiz, egun dakigunez, uranioa fisionatzean eta honek bere masaren % 0.1a soilik galtzean masa bereko ikatza erretzean baino 270.000 aldiz energia gehiago lortzen da.

xx. mendearen lehen erdiak aurrerapen antz ekarri zituen bioenergetikan. Bizidunen energia orekak aztertu ziren esperimentu kalorimetriko ezberdinen bidez, eta ondorioz Rubner (1902) giza metabolismoaren azalpen sistematiko bat eskaintzeko gai izan zen. Gero, metabolismo basalaren erritmoaren eta heterotrofoen gorputz masaren arteko erlazio alometrikoak (gorputz zatien hazkundeari dagozkionak) deskubritu zituzten, zeinak eskala energetikoen azterketa liluragarriei eman zien bide, fotosintetik hasi eta konbertsio heterotrofoetara. Orduan formulatu zuen Lotkac (1925) energia maximoaren legea ere. Bizidun batentzat ez da konbertsio errendimendu altuena garrantzitsuen, baizik eta energia erabilgarriaren fluxu biziena, hots, potentzia maximoa garatzea. Beraz, izaki bizidunek eta ekosistemek ez dute energia ahalik eta errendimendu onenarekin eraldatzen, potentzia maximoa eskuratzeko optimizaturiko erritmoetan baizik.

Hogeita hamargarren hamarkadan metodo zientifikoa aldatuko zuen olatu bat sortu zen. Ehundaka urte erredukzionismo eta banatze etengabearen aritu ondoren, apurka sistema orokorren hurbilketen formulazioak agertu ziren barne analogietan, konplexutasun dimentsio-anitzetan, ziklo ez-linealetan, eta emaitza probabilistikoetan oinarrituta. Hala sortu ziren biosferaren eta ekosistemaren ideia indartsuak, zeintzuek zientzia biologikoak aberastu zituzten egun daukaten tresna epistemiko garrantzitsuenetako batekin. Meknika kuantikoaren sortzaileen ohiko kezka filosofikoei jarraiki Schrödingerrrek izaki bizidunen portaera termodinamiko arraroa seinatu zuen, ordena bikain bat sortzen eta mantentzen baitute karbonoan oinarrituriko gai desordenatuen bitartez. Bigarren legearen itxurazko bortxatze hau sistema irekien oreka gabeko termodinamikaren ideiaz azaldu zuen. Bizidun sistemek, izan zelulak, animaliak, gizakiak edo zibilizazioak, ordena eta antolakuntza oso berezietan mantentzen dute euren burua, entropiaren noranzko naturalari denbora tarte batean kontra eginez, kanpotik energia aske asko, elikagaiak eta elementu estrukturalak bereganatuz, eta hauek prozesatuz egoera entropiko txikiagoak garatzeko. Honi *negentropia* deitu zion Schrödingerrrek, bizidunak entropia negatiboaren sorgailuak bailiran. Ideiok berebiziko garrantzia lortu dute egun: adibidez, *arriskuaren teorian* eta kudeaketan negentropia antolakuntza portaera efikazera bultzatzen duen indarra da eta iragar daitekeen egoera egonkor baterantz garamatzana; edo biologoek ere erabili dute kon-

tzeptua bizitzaren norabide edo helburuaren oinarritzat sen moral eta kooperatiboen izaera esplikatzeko.

Mende Erdialdean erregaien prezio merkeengatik analisi ekonomikoan ez ziren holako ideia asko barneratu. Beranduxeago, Hubbertek 1962an plazaratu zuen petrolio ustiaketaren pikoa aurrezaten zuen eredu famatua, eta Odumek 1971an ingurumenarekiko, boterearekiko, eta gizartearekiko hurbilpen *ekoenergetikoa* aurkeztu zuen. Ikuspegi hau finduz *energia* kontzeptua bataiatu zuen («embodied energy» edo gorpuztutako energia) energia mota bateko unitateetan adierazia, maiz «eguzki emjouleetan». Halaz, eguzki energiaren, oinarri komun bera ezartzen zaie energia mota guztiei, eta eguzki energia transformatuta energia mota bat lortzeko zenbat eguzki emjoule behar diren kalkulatu da. Adibidez, ikatz unitate bat 6.800 eguzki unitate dira, edo materia organikoaren ohiko energia unitate batek 1.000 eguzki unitate inguru duela kalkulatu da. Kontzeptu honek azterketa ekonomikoetarako oinarri komun bat eskaintzen du egun, eta *berriztagarritasunaz* ('renewability') berba egiteko aukera ematen, honela definiturik: prozesu batean erabiltzeko energia totaletik berriztagarria denaren portzentajea. Laburtuz, energiaren unibertsaltasunaren baitan energia motak honen iturriaren arabera sailka daitezke, eta materiaren baitan gorpuztu gabeko eguzki erradiazioa bezalako energia mota baten menpe adierazi guztiak. Izan ere, karbono kate organikoetan metatutako energia guztiak erradiazio honen fotosintesian baino ez dute euren jatorria.

Halako kontzeptuek indarra hartu zuten 1973-74ko lehen petrolio krisiaren ondoren, energiaren arazoaren azterketek ikaragarritzko bultzada izan zuten eta. Hala eta guztiz ere, hasieran erregaien prezioari buruzko arazo partikularregiak tratatu zituzten ikerlariak ikuspegi zabalago eta sistematikagoen kaltetan, eta egindako aurreikuspen orok ez zuten asmatu. Bigarren energia krisiak (1979-81) egoera globalaren azterketa energetiko hobeak azaleratu zituen, aukera teknikoak, inplikazio ekonomikoak eta ingurugiro arazoak aintzat hartuko zituen eta. Hainbat diziplinarteko ikerketa ahalbidetu zituen honek: geoenergetika, energetika atmosferikoa, sistemen ekologia, giza elikadura; eta energiaren ustiaketa eta kontsumoak kliman, elikaduran, eta beraz ekonomian eta gizartearen, lituzkeen ondorioak aztertzeraino. Energia kontzeptuaren zalantzagabeko unibertsaltasunaren baitan, heterogenotasun zabal honek sintesi lana erruz zailtzen du euren diziplinetan buru-belarri ari diren ikerlarien arteko loturetan, eta orokorpen lan hau beharrezkoa den arren, zuhurrak izan beharrek daukagu sistema konplexuen energetika orokorrarentzat erabateko teoria bat aldarrikatzen duen edozeinen aurrean. Energia eta gizartearen arteko harremanak aztertzean kontuan izan behar da hau, ezin gara energiak erabateko printzipio gisa leukakeen lilura absolutistaren erori, eta zibilizazioen jarraibide historikoak ondo identifikatu behar dira teoria sendoagoak eraiki baino lehen.

Energia gizartean: jarraibide orokorrak

Gizakiok eguzki fluxuaren kudeatzaile geroz eta bikainagoak bihurtu gara nekazaritzaren jaiotza ezkeror. Lurrari lotutako komunitate sedentarioek eta hauen hazkunde demografikoak nekazaritza intentsifikatu behar izan zuten, manufaktura dibertsifikatu, ezagutza eta jabetza pribatuak metatu, eta egi-tura hierarkikoak ezarri hori kudeatzeko. Hala sortu ziren zibilizazioak.

Janari produkzioaren forma estentsibo nagusiek, artzaintzak eta nekazari-tza nomadak, nekazaritza intentsiboarekin batera iraun dute mendeetan zehar, energia gutxiarekin bizi daitekeela frogatuz. Artzaintzan, esne, gazta, odol eta haragi produkzioak lan gutxi eskatzen du (entzuna da artzainek baserritarrek baino lan gutxiago egiten zutela), eta populazio dentsitate baxuei eusteko gai da. 0.015-0.15 animal unitate/ha-rekin belardiek 0.8-2.7 pertsona/km² giza dentsitateari eutsi diezaioke. Nekazaritza nomadak, oihan eremu bat erre eta bertan landatuz eremuz eremu dabilenak, bere lana 15-30 aldiz biderka dezake elikadura energia gisa, eta gai da 10-30 pertsona/km² mantentzeko. Baina populazio hazkundeak nekazaritza intentsiboa ekarri zuen. Animalia indarrak gol-datzen hastea izan zen jarduera intentsiboaren hastapena, batez ere zaldiaz. Zaldi batek ia 10 gizonen lana egin zezakeen, baina ikaragarri jaten zuen, toki batzuetan laborantza-lurren laurdena hauek elikatzeko erabiltzeraino. Gurean bezala, idietan oinarrituriko baserri lanean, lur-sailen %7a nahikoa zen gana-duok mantentzeko.

Goldaketaz gain ureztapen sistema izan zen nekazaritza intentsiboaren beste osagai nagusia. Hor daude noria islamiarrak, edo Arkimedesen torlojua, ura ponpatzeko edo ubide batera igotzeko giza edo animalia indarra behar zuten errendimendu baxuko antzinako gailuak. Hala ere, hauek mugitzen erabilitako giza edo animalia energia 20 aldiz biderkatu zitekeen ondoren jasotako uztaren kalorietan. Ongarriak materia organikoaren birziklatzean oinarritzen ziren soilik, baina berriz ere ia 20 aldiz biderka zitekeen uztaren balio energetikoa ongarritze lanean erabiliarekin konparatuta. Eta intentsifikazioaren azken elementu nagusi gisa uztaren errotazioa zegoen. Nitrogenoa zekarten lekaleak oinarritzko haziekin txandakatu ohi ziren. Intentsitate baxuko praktikek 1-2 pertsona/ha mantentzen zituzketen bitartean, Txinako eta Europako laborantza jarduera intentsuenek, ureztapena, birziklapena eta uzta errotazioa medio, 7 pertsona/ha baino gehiago elika zezaketen, eta dieta vegetariano xumeagoekin 12 pertsona/ha (Smil 2008, 13. kapitulua).

Gizarte tradizionalak giza lanean eta biomasaren erreketan oinarritu ziren. Antzinako gizarte guztiak giza indarrak mugitu zituen. Esklabotza zen Egipto eta Erromaren motorra, baita Grezia berarena ere. Askatasun indibidualaren kontzeptua garatu zuten filosofoen gizarteari esklabotza lan merkeak ematen zion arnas. Gerretan atxikitako bihankakoek lauhankakoek baino gutxiago jaten zuten eta jarduera malguagoak hartu zituzketen lanean.

Horrela bada, 50-100 W-ko lan erritmoetan oinarrituriko esklabotza gizarteak ziren hauek, jende askorekin jarduera bateratuen gehienez 30 kW-ra heldu zitezkeenak. Hau iraunkorki gaudituko zuen eta zibilizazio jauzi bat suposatuko zuen potentzia erabilgarria ibaietako erroten eta haize-erroten zabalkundearekin bakarrik etorri zen. Ura eta haizearen fluxuaren aprobetxamendua izan zen neurri handi batean Erdi Aroko gizarteak antzinatekoen gainetik ipini zituen, energia fluxu konstante hauek seriean produzitzeko eta lan egiteko modu industrialei eman zielako bide. Hasierako errota txikiak 4 kW-ko potentzia izan ohi zuten, baina erromatarrek jada lortu zuten 20 kW-ko errotarik eraikitzea, eta XVIII menderako 100 kW-koak fabrikatu ahal izan ziren.

Hasierako haiek alea ehotzeko erabili baziren ere, laster bilakatuko zen higadura zirkularra mailuen, hauspoen edo bestelako gailuen mugimendu, Gipuzkoa eta Bizkaiko burdinoletan bezala. Malda handiko gune euritsuetan eta toki haizetsuetan urak eta haizeak eginkizun erabakigarria burutu zuten industrializazio prozesuan eta energia iturri boteretsuagoen zain laga zituen etorkizunerako garatuta zeuden serieko fabrikazio teknika hauek. Garai honen garrantzia ahaztu egiten da askotan, eta egungo industria teknika guztiak petrolio eta gero etorri direla ematen du, aurreko herentziarik izango ez bagenu bezala. Adibidez, Gipuzkoako industria, burdin biguna eta altzairua fabrikatuz, instalazio hidraulikoei loturik egon zen. Industria hark zuen garrantziaren erakusle da biztanleria aktiboaren %30i lana ematen zion lantegi mordoak aurkitzea ibaiertzetan. Soilik xv. mendean, Gipuzkoan bertan energia hidraulikoa erabiliz burdina egin eta lantzeko 200 burdinola baino gehiago azaltzen dira dokumentaturik.

Industria-aurreko zibilizazioek erregai fosilak apur bat ezagutzen zituzten arren euren bero energia biomasaren erreketatik lortzen zuten batez ere. Hala ere, egur lehorra su irekietan erretzean zeukaten errendimendua oso baxua zen. Egur-ikatzak ere galera asko zituen, kg bat lortzeko 5 kg egur tratatu behar ziren eta. Eskabide honek baso-soiltze bortitzak eragin zituen Europa eta Asian siderurgia eta egur-ikatz produkzioaren errendimendua asko hobetu arren XVIII mendera arte. Orduan ugalduta ziren dena aldatuko zuten ikatz meategiak. Aldaketa historikoa gertatu zen: batetik, kokea sartu zen industrian, eta bestetik lurren-makina erabateko garrantzia hartzen hasi zen. Halaz, zibilizazio berriek eguzki fluxuaren aldiuneko metaketak erabiltzeari laga eta erregai fosiletan metatutako hornidura itzelak ustiatzeari ekin zioten. Nekazari lana hainbeste energetizatu zen ezen produkzioen hazkuntzak populazioaren hazkunde demasa ekarri baitzuen, merkataritza jarduera erruz bizitu eta giza arazo globalizazioa eragin arte. Atera kontuak: 1800. urtean biomasa potentziaren kontsumoa erregai fosilena baino ia 100 aldiz handiago zen, eta 2000. urtean hamarkoiztu egin du erregai fosilena biomasa-rena. Gainera petrolio, gasa, eta ikatzaren erreketak industriaurreko biomasa-rena baino askoz ere efikazagoa da (Smil 2003).

Guzti honek izugarritzko per capita energia kontsumoa ahalbidetu dio mendebaldeko gizarteari. Badirudi halako ahalmen energetikoak edozein sistemari neurriko abantaila ebolutiboa eta ongizatea lekarkiokeela. Zentzu honetan, ez da ahaztu behar, gizadiak 16 aldiz biderkatu duela bere petrolio produkzioa XX. mendean bakarrik. Egungo energia altuko zibilizaziook ez ziren agertuko seguru asko erregai fosilen energia dentsitatea gabe, petrolioaren eramangarritasunagatik ez balitz, eta elektrizitatearen malgutasuna ez balego tartean. Baina energia kontsumo altuko zibilizazioak planetaren populazioaren zati txiki baina ez du suposatzen; atera kontuak, planetaren erdi pobreena energia kontsumo osoaren %10az soilik jabetzen da. Gainera, zenbait kalkuluren arabera, kontsumitzaileen urteko per capita energia kontsumoak hirukoiztu egiten du ondo bizitzeko behar den kontsumoa (100 GJ). Itzela da beraz giza desberdintasuna: kalkulu batzuen arabera, gehiengo handi bat eratzen duten giza komunitate pobreek euren egungo energia kontsumoa boskoiztu beharko lukete gure kanonetan «ondo» bizitzeko.

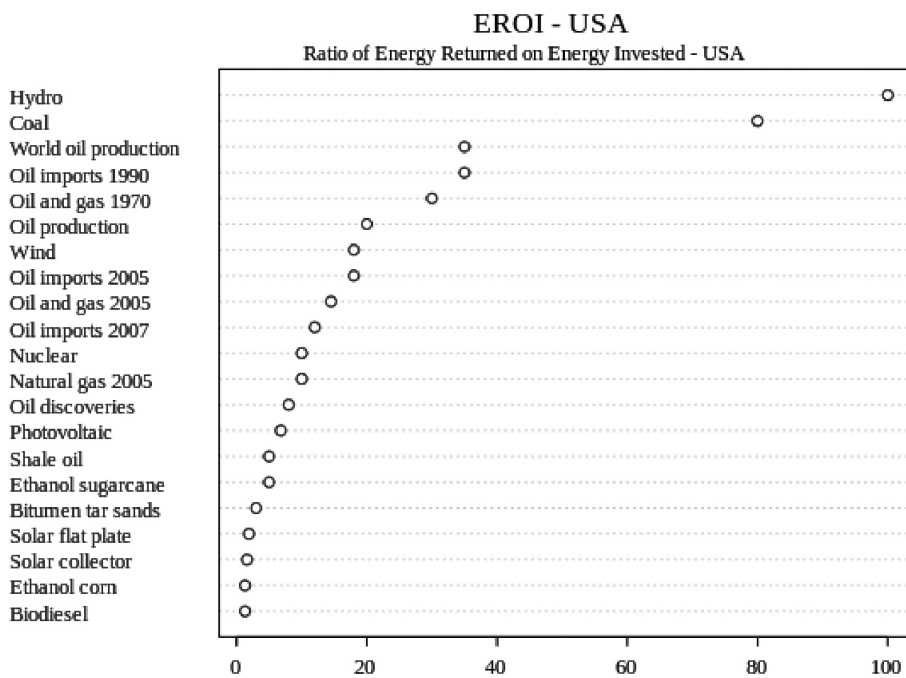
Hala eta guztiz ere, nabarmendu behar da energia gehiago kontsumitzeko aukerak ez duela bizimodua hobetzen. WECen (World Energy Council) azken datuek diotenez amerikar bakoitzak ia 8 tona petrolio baliokide darabiltza urteko, 4 batez besteko europarrak, eta ia 1 garapen bideko herriar batek (WEC 2015). Baina aski frogatu da amerikarrak ez direla europarrak baino askoz zoriontsuago, alderantziz akaso kasu askotan, eta beharbada ezta afrikarrak eta hegoamerikarrak baino hobeki bizi direnak ere. Nekazaritzan energia gehiago erabiltzeak ez du esan nahi aurrerabide ekonomikoa izango dugunik. Energia asko erabiltzen ari gara orain lur-sailen ureztapeanean eta ongarrietan, baina gizentasunera garamatzaten eta osasungarriak ez diren ganadu haragian oinarrituriko dietak sortzeko izan ohi dira produkzio hauek. Osasunarentzako talka hau gordina izaten ari da milaka urtetan batez ere zerealetan oinarritutako dieta bat izan duen giza gorputzarentzat. Berriki Osasunaren Mundu Erakundeak haragi gorriari buruz egin duen azterketa ezagunaren emaitzak gogoratzea besterik ez dago, dirudienez minbiziaren ugaritzean zerikusi zuzena baitu honen kontsumoak (Berria 2015). Gainera, nekazaritza mota honek baserri lan iraunkorarekin zerikusirik ez duen landaren erosioa, ureztapenagatik gatzitzea, eta pestizida kondarren barreiatzea dakar.

Aipatu bezala, gainezka egiten ari den egoera hau ahalbidetzen duen kontsumoa toki jakin batzuetan 8 petrolio tonaren baliokidea (ptb) da per capita, eta batzuen kalkuluen arabera (Jess 2010), pertsonako 2 ptb kontsumituta ez genuke ongizate mailarik galduko. Gastatzen dugunaren hiru laurden alferrik gastatzen ari gara ez baitigu gain-zorionik ekartzen, kontrara akaso. Izan ere, sozialki energia gehiagok ez du hobekuntzarik ekarri: alkoholismoa eta drogazaletasuna, emakumearen aurkako indarkeria eta krimen bortitzak ugariak dira zibilizazio energetizatuenetan, hein handi batean klaseen arteko barne desberdintasunak ez direlako desagertzen energia produkzioa eta banaketa

korporazio gutxi batzuen eskutan egotean. XIX eta XX. mendeko erregai eta elektrizitate konbertsioen efizientzia hobekuntzak aitzinamendu tekniko nabarmenak ekarri zituen, baina jendeek eskuragarri zituzten energia berri kantitate gehienak kontsumoaren eta eliteen gurarien aldeko iragarkiek bultzaturiko plazertxo eta emozioetara masiboki bideratu zituzten, mendebaldeko gizartean soilik agertzen diren gaixotasun mentalei bide emanez, herriaren kultura komunitarioa txirotuz, eta herri eta auzo elkartasunagatik mantentzen ziren oreka ekonomikoak ahulduz (Smil 2005, 2006).

Desberdintza, desinformazio eta demokrazia falta honek zerikusia izan dezake energia kantitate handi horiek dakartzan petrolio georafikoki toki zehatz batzuetan kontzentratua egotearekin, horren kontrola duenari botere kalkulazekin bat ematen diolako; bestela esanda, militarki hori kontrolatzeko ahalmena duenari, eta komunikatiboki horren jabetzea demokraziaren ize-nean egingo dela sinistazteko gai denari. Batetik, petrolioak energia asko metatzen du kg-ko, bai, baina horrez gain planetako kokagune zehatz batzuetan aurkitzen da batez ere, ez baitago toki guztietan antzera barreiaturik. Hor sartzen da egungo oinarriko botere banaketa geopolitikoa. Lehen zibilizazioak jaiotzen ikusi zituen Ekialde Hurbilaren giza egoerak edo Irakeko inbasioaren Chomskyrena bezalako irakurketek (Chomsky 2003) azalpen hau indartzen dute: elite sozio-ekonomiko amerikarrak hil ala bizikotzat jotzen du petrolioaren jabetza eta haren kontrolak dakarkion nagusitza geopolitikoa «estrategia inperial handia» aurrera eramateko. Petrolioan oinarritutako gizarte batek mundu mailako estrategia «inperiala» behar duela dirudi bere horretan mantendu dadin, kontrol global hori galduz gero bere egiturak segituan goitik behera etorriko liritekeelakoan dagoelako.

Energia kantitate handien kontrola, jabetza edo eskuragarritasuna, hau da, 'energia harrapaketa' oinarri duen energia-ongizate harreman sinplista gainditzen duen ikuspegirik badago hala ere. Azkenaldian, EROI indizea ('Energy Return On Investment') indarra hartzen ari da gizarte batek oinarri duen energi motarekin daukan ongizate harremana aztertzean. Energia iturri batek bere bizi denboran sortzen duen energia berau martxan jartzeko behar izan denarekiko konparatzen du EROI indizeak (Costanza 2013, Murphy eta Hall 2010). 1. Irudian ikus daitezke indize honen balioak teknologia ezberdinentzat 2010an Estatu Batuetarako egindako estimazio batean. Adibidez, ur turbina batek materialak meategitik ateratzeko, makina fabrikatzeko, garraiatzeko, hodiak egin eta lurperatzeko, etab., behar den energia 100 aldiz itzultzen du bere ohiko bizi denboran. Hidraulikoa da, izan ere, EROI onena duen energia iturria. Petrolioak 40ko indizea dauka, baina txikitzen ari da petrolio lortzeko behar den energia geroz eta handiagoa baita. Eolikoaren indizea 20koa da eta igotzen ari da, eta eguzki energiari 5-10 kalkulatzen zaio. Zalantzak fotovoltaiakoan daude, zenbaitzuek silizio zelula bat urtu eta fabrikatzeko behar den beroa gero horrek emango duen argindarra baino handiagoa dela baitiote. Hau da, 1 baino txikiago den EROIa.



1. Irudia

Murphy eta Hall (2010). Energia iturri ezberdinen EROI indizea. Wikimediatik hartua.

Arazo latza hori edozein zibilizazioentzat: erromatar zibilizazioaren kolapsoa EROIaren bidez azaldu duten historialariak badaude, esklaboen (erromatarren energia iturria) matxinadek haiek kontrolatzeko guda energia handiak eskatu zituztelako eta EROIa 1tik jaitsi zelako. Zentzu honetan, eta arrazonomendua beste muturrera eramanda, EROI altuko energia motetan oinarrituriko gizarteak izango lirateke egonkorrenak eta hobekien bizi direnak. Norvegia (ia argindarraren % 100a) eta Kanadaren (argindarraren % 56a 2006an) kasuetan hau erabat baieztatzen da, energia hidraulikoak garrantzia handia baitu euren energi gastu globalean. Eta ez da kasualitatea izango WECek bere azken txostenetako batean 2050erako energia hidraulikoaren potentzial globala bikoiztu egingo dela aurreikustea (WEC 2015).

Zerbitzuen eta ongizatearen produkzioa lan ahalmenaren arabera de-
nez, EROI altuagoko ekonomiek hedapen eta dibertsifikaziorako ahalmen
handiagoa dute. Giza zibilizazioaren hedapena eta bere bizimodu materia-
laren aberastea EROI altuagoko energia iturriak eskuratzeko izan duen ge-
roz eta abilezia handiagoarekin lotua dago. Biomasetik eta animalia indarretik
haizearen eta uraren energiara, eta hortik erregai fosiletara pasatzean,

zibilizazio modernoak *per capita* aberastasuna hazi du (batzuentzat besteentzat baino gehiago) gai ez-energetikoak produzitzeko eskuragarri duen energia hazi baita. EROI altuagoko iturrietara pasatzeak aniztasun kultural eta soziala ere emendatu du energia iturriak babesteko energia gutxiago gastatu behar baita. Lehen, geneukan egur-ikatz urria, edo lanerako zaldia edo idia, ondo zaindu eta babestu beharreko ondasun preziatuak ziren, eta haien zaintzak asko lotzen zuen familia espazio geografiko txiki batera. Orain energia gehiago dugu eskura energia beraren lorpen eta zaintzarako beharrean beste hainbat gauzatarako erabili dezakeguna. Izan ere, gizarteen arteko eta barneko gatazka asko energia soberakinak harrapatzeko eta kontrolatzeko lehia- ren bidez esplikatuta daitezke. Eta lehia horretan barne EROI altuena duenak abantaila handiarekin jokatzeko du.

Garrett (2012) ikertzaileak EROI eta inflazioa lotzen ditu, energia kontsumo historikoa eta ongizate global metatua konparatuz. Hazkunde ekonomikoaren eredu termodinamiko integral honen arabera, EROI globala inflazio globalaren alderantziz proportzionala da, hau da, EROIa hobetzeak inflazio txikiagoak sortuko lituzke mundu mailan, eta alderantziz (ibid., 14 or.)³:

Zibilizazio globala inoiz heltzen bada ustiapen prozesuan kontsumitzen duen adina energia kontsumitzera, inflazio presioa %100koa izango da eta zibilizazioaren ongizatea kolapsatzear legoke. Zibilizazioak egiten duen edozein zabalkunde lanek geldialdi bat mantentzeko soilik balio du.

Beste ikerketa batzuen arabera, badago EROI minimo bat, 1 baino handiagoa, gizartea mugitzeko beharrezkoa dena. Janari produkzioari, ospitaleei, unibertsitateei, lantegiei, garraioari eta eraikuntzari eta gizarte modernoaren beste beharrei eusteko behar den energia sistemak gutxieneko EROI bat behar du. Weißbachek (2013) kalkulatu duenez, Estatu Batuentzat eta Europar Batasunarentzat gutxieneko hori 7koa da. EROI baxuagoak ezin dio gure ekonomiaren konplexutasunari edo gure 'bizi-mailari' eutsi. Askok argumentu hau darabilte energia berriztagarrien EROI baxuak gure gizartea ezingo lukeela mantendu esateko. Estatu batuetako gaur egungo batzuetako EROI indizea 40 ingurukoa da, eta aldaketa klimatikoagatik etorkizun hurbilerako aipatzen diren planetan bezala energia *mix*-aren % 50a energia berriztagarriena balitz, % 30a erregai fosilak eta % 20a nuklearra izaki, EROIa 25era jaitsiko litzateke. Ez dakigu EROIaren horrelako bat-bateko erorketa bat jasateko gai izango ote zen mendebaldeko gizartea.

³ If global civilization ever gets to the point that it expends as much energy during the extraction process as it is able to consume in return, then the inflationary pressure is 100%, the EROI value is unity and civilization wealth is on the verge of tipping into collapse. Any expansion work that civilization does serves only to maintain a standstill.

Beraz, zibilizazioaren ongizatea nahiz kolapsoa modu kuantifikatuan ulertzeko modua eman dezake indize honek. Beste gauza bat da energia sorkuntzaren teknologia bakoitzari dagokion indizea kalkulatzeko erabili beharreko irizpideen arazoa, energia nuklearraren kasuan edo petrolioaren kasuan gordinagoa bihurtzen dena. Lehenengoarentzat zabor nuklearra gordetzeak eta zaintzeak milurtetan dakarren kostua energetikoki ebaluatzea oso zaila da eta edozein kasutan bere indizea hutsaren pare ipiniko luke, eta bigarrenagoarentzat geostrategia eta ekintza militarrek petrolio putzuen kontrolerako eskatzen duen inbertsio energetikoa ere zenbatezina da. Berdintsu gertatzen da hainbat nazio gatazkatsu zeharkatuta hodietatik iristen zaigun gas naturalarekin ere. Horrela ikusita, badirudi energia berriztagarriak EROIaren kalkulu garbiagoa eta objektiboagoa ahalbidetzen dutelako nabarmentzen direla besteengandik, momentuz datu ofizialen arabera indize txikiagoa duten arren.

Ondorioak

Energiaren kontzeptuak, kategoria unibertsal gisa, espazio eta denborarena bera ere gainditu dituela esan daiteke, fisikan beroa eta materiarekin batera, ekosistemarekin, elikadurarekin, eta ondorioz gizarte eta ongizatearekin ere oinarritik lotu baita. Ekosistemetan energia eta aberastasun naturalaren arteko lotura argia da, baina gizarte modernoek zerbitzu eta gai kontsumigarrien ugartasuna ildo honetan interpretatzea akatsa litzateke. Alderantziz, gizarte kapitalista gain-energetizatuaren baitan oinarritzko kontzeptu sozial eta ekonomikoetan alfabetatu gabeko eta komunitate baliorik gabeko jende masak hazten eta gizentzen ari dira komunikabideek emozio humanoek izendatzaile komun baxuena bilatzen duten bitartean, eta giza aniztasun intelektuala historiako maila ahulenean egon daiteke. Ezin frogatu, baina batek zioena gogorarazten du honek: historian zehar giza inteligentzia totalak konstante dirau, baina giza populazioa hazten eta hazten ari da. Hazkunde ustez mugagabe honetan, energia kontsumitzeko ahalmenak beharrean negentropia bezalako kontzeptuek, energia gisako unitateek, eta EROI bezalako indizeek zibilizazioen kalitatearen ideia argiagoa ekarri beharko lukete, prozesu oro, fabrikazioa, garraioa, meatzaritza, giza-lana, etab., eta ez kontsumo energetikoarena soilik, ipini daitekeelako energia erabileraren unitate komun baten menpe.

Erreferentzia bibliografikoak

ARISTOTELES (1997), *Metafisika*. Itzulpena: Javier Aguirre Santos. EHUko argitalpen zerbitzua: Klasikoak Bilduma.

BERRIA (2015), 2015-11-3 atzitu: http://www.berria.eus/paperekoa/1816/006/001/2015-10-27/haragi_prozesatuak_minbizia_eragiten_duten_gaien_artean_sartu_ditu_omek.htm

- BRODY, S. (1945), *Bioenergetics and Growth*. New York: Reinhold.
- CARDWELL, D.S.L. (1971), *From Watt to Clausius: The Rise of Thermodynamics in the Early Industrial Age*. Ithaca, N.Y.: Cornell University Press.
- CARNOT, S. (1824), *Reflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris: Bachelier.
- CHOMSKY, Noam (2003). *Hegemony or Survival*. Metropolitan Books.
- CLAUSIUS, R. (1850), *Über die bewegende Kraft der Wärme*. *Annalen der Physik und Chemie* 79: 368-397.
- COSTANZA, R. (2013), «Energy return on investment (EROI)». Atzitia in *Encyclopedia of Earth*, 2015-09-10: <http://www.eoearth.org/view/article/152557>
- EINSTEIN, A. (1905), *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. *Annalen der Physik* 17: 891-921.
- (1907), *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*. In *Jahrbuch der Radioaktivität* 4: 411-462.
- GALILEO, G. (1623). *Il Saggiatore (The Assayer)*. Itzulpena: A. C. Danto, in *Introduction to Contemporary Civilization in the West, 1954*, vol. I, 719-24 or. New York: Columbia University Press.
- GARRETT, T.J. (2012), *No way out? The double-bind in seeking global prosperity alongside mitigated climate change*. *Earth System Dynamics* 3: 1.
- GIBBS, J.W. (1906), *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs*. London: Longmans, Green.
- HUBBERT, M.K. (1962), *Energy Resources*. A Report to the Committee on Natural Resources of the National Academy of Sciences-National Research Council. Publ. 1000-D. Washington: National Academies Press.
- JESS, A. (2010), *What might be the energy demand and energy mix to reconcile the world's pursuit of welfare and happiness with the necessity to preserve the integrity of the biosphere?*. *Energy Policy*, 38(8), 4663-4678.
- MACH, E. (1896), *Die Prinzipien der Wärmelehre historisch-kritisch entwickelt*. Leipzig: J.A. Barth.
- MURPHY, D.J. & HALL, C.A.S. (2010), *Year in review EROI or energy return on (energy) invested*. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1185: 102-118.
- LINDSAY, R.B. (1975), *Energy: Historical Development of the Concept*. Stroudsburg, Pa.: Dowden, Hutchinson and Ross.
- LOTKA, A. (1925), *Elements of Physical Biology*. Baltimore, Md.: Williams and Wilkins.
- SMITH, C. (1999), *The Science of Energy: A Cultural History of Energy Physics in Victorian Britain*. Chicago: University of Chicago Press.
- MAYER, J.R. (1842), *Die Mechanik der Wärme*. *Annalen der Chemie und Pharmacie* 42: 233.
- ODUM, H.T. (1971), *Environment, Power, and Society*. New York: Wiley.
- OSTWALD, W. (1892), *Studien zur Energetik. II. Grundlinien in der allgemeinen Energetik. Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig* 44: 211-237. Itzulpena in *Applications of Energy: Nineteenth Century*, ed. R. B. Lindsay. Stroudsburg, Pa.: Dowden, Hutchinson and Ross, 1976.
- RUBNER, A. (1902), *Die Gesetze des Energieverbrauchs bei der Ernährung*. Leipzig: F. Deuticke.
- SCHRODINGER, E. (1944), *What Is Life?* Cambridge: Cambridge University Press.
- SMIL, V. (2000), *Feeding the World: Challenge for the 21st Century*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- (2003), *Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

- (2005), *Creating the Twentieth Century: Technical Innovations of 1867-1914 and Their Lasting Impact*. New York: Oxford University Press.
 - (2006), *Transforming the Twentieth Century: Technical Innovations and Their Consequences*. New York: Oxford University Press.
 - (2008). *Energy in nature and society: general energetics of complex systems*. Cambridge, Mass.: MIT press.
- SODDY, F. (1912), *Matter and Energy*. New York: Henry Holt.
- THOMSON, W. (1853), *On the dynamical theory of heat*. Royal Society of Edinburgh Transactions 20: 261-298.
- WEC 2015 (World Energy Council), <https://www.worldenergy.org/>. 2015-09-19 atzitu. <https://www.worldenergy.org/publications/2015/2015-hydropower-status/>.
- WEISSBACH, D., RUPRECHT, G., HUKE, A., CZERSKI, K., GOTTLIEB, S. & HUSSEIN, A. (2013), *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*. Energy 52, 210-221.