

## **Proiect ROMANA-„Alocarea optimală a resurselor prin structurarea de sisteme adaptive folosind metode de analiză neliniară”, contract nr. PCE 236/2021**

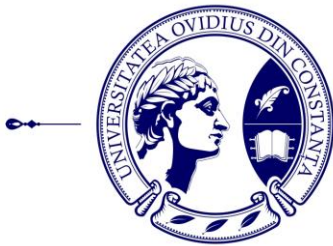
### **ETAPA 1-2021- Colectarea de date, evaluare termodinamică și analiza multiscalară preliminară**

#### **Livrabil 1: Diagrame fluxuri energetice și materiale pentru România**

Potrivit unui raport recent al Națiunilor Unite [1], populația umană este de așteptat să ajungă la 8,5 miliarde în 2030, 9,7 în 2050 și 10,9 în 2100. Având în vedere necesitatea evidentă de a asigura standarde de viață decente cât mai multor oameni, discuția despre „creștere durabilă” devine un element prioritar pentru politicieni, economiști și opinia publică în general. În 2015, 193 de țări au aprobat „Agenda 2030 pentru dezvoltare durabilă”, stabilind mai multe „obiective durabile” care urmează să fie îndeplinite cel târziu în 2030 [2]. În acest cadru, este destul de clar că este necesar ca analiștii să folosească un indicator de mediu (sau un set de indicatori) care să sugereze evoluția și starea reală a mediului care să arate dacă o țară sau o regiune îndreaptă în direcția corectă. Pe de altă parte, seturile de date disponibile sunt adesea prefiltrate de considerente puțin obiective (și uneori complet neștiințifice), mai ales din cauza intereselor politice și economice implicate. De fapt, de peste șaptezeci de ani, PIB-ul (Produsul Intern Brut) este principalul instrument adoptat de agențiile economice, organizațiile politice, instituțiile statului și mass-media pentru a evalua „starea” unei comunități.

Referindu-ne în special la problema managementului resurselor naturale, informațiile care s-ar putea extrage din PIB pot duce la raționamente înșelătoare: să luăm, de exemplu, cazul defrișărilor. Având în vedere că recoltarea arborilor și comercializarea lemnului acestora li se atribuie o valoare economică, contribuția acestora la PIB va fi pozitivă, deși acest lucru ar putea fi un dezastru din punct de vedere al durabilității. În acest context, în ultimii ani au fost elaborați mai mulți indicatori, având ca scop înlocuirea sau completarea PIB-ului [3]: Indicele bunăstării economice durabile [4], Amprenta ecologică [5], Bunăstarea subiectivă [6], Indicele dezvoltării umane [7], Raportul ” Living Planet” [10]. În ciuda tuturor eforturilor intelectuale, problema este departe de a fi rezolvată: fiecare dintre indicii de mai sus se concentrează doar pe unele aspecte ale problemei sau – mai rău – se bazează pe aspecte total subiective precum „fericirea unei populații”. Oricum ar fi, PIB-ul este în prezent principalul instrument pentru procesele decizionale ale majorității țărilor.

Motivul activității este de a folosi cantitatea foarte mare de date disponibile de la mai multe instituții naționale și private pentru a deriva un indice de sustenabilitate bazat pe consumul de exergie al fluxurilor



de materiale, energie, forță de muncă și capital implicate în echilibrul unei comunități, considerat ca un sistem termodinamic „închis” în limitele stabilite de analist.

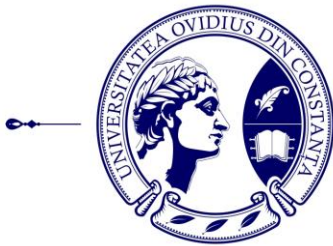
În prezent, pentru majoritatea țărilor sunt disponibile bilanțuri energetice naționale, care prezintă un bilanț precis și suficient de dezagregat al tuturor fluxurilor de materiale și energie dintr-o țară. Acest lucru se datorează faptului că se utilizează doar Prima Lege a Termodinamicii și se neglijează „calitatea” fluxurilor implicate, fiind dificil să se obțină perspective utile ale Legii a doua.

Termenul de exergie este atribuit slovenului Zoran Rant [8] și înseamnă literalmente „muncă tehnică disponibilă extern”, adică cantitatea netă de energie care poate fi utilizată în scopuri tehnice reale, neglijând cantitatea degradată (și care devine indisponibilă) în procesele inevitabil ireversibile care compun orice lanț de conversie și se evidențiază printr-o creștere a entropiei. Metoda analizei exergetice a fost dezvoltată în anii '70 de Gaggioli, Moran, Fratzscher, Bayer, Szargut și mulți alții [9]. O mulțime de lucrări publicate utilizează aplicarea metodei de analiză exergetică („EA”) ca bază pentru studiile efectuate pe sisteme industriale și țări, dar, deși metoda analizei exergetice reprezintă, fără îndoială, un pas înainte spre evaluarea exploataării resurselor primare care alimentează consumul final de energie, prea mulți factori sunt totuși excluși din imagine atunci când se iau în considerare bilanțurile exergetice ale unei întregi comunități, o țară sau în general un sistem complex: cu referire specifică la modelarea fluxurilor complexe de informații care sunt implicate în interiorul unei societăți moderne, este foarte limitantă neglijarea de exemplu a circulației resurselor financiare sau a circumstanțelor socio-economice în care se dezvoltă o societate și, desigur, impactul dezvoltării tehnologice asupra mediului.

Problemele cheie sunt din nou așa-numitele „externalități” (muncă, capital, costuri de mediu): ele nu sunt luate în considerare în mod explicit în contextul unei simple EA. Având în vedere aceste considerații, algoritmul EA a fost extins prin „internalizarea externalităților” care se poate face prin adoptarea unei contabilități monetare bazate pe a doua lege (Thermo-Economics, TE) sau prin analiza exergie extinse bazată exclusiv pe resurse (EEA). Această din urmă, constă în asocierea purtătorilor de energie, tuturor fluxurilor care contribuie la lanțul său de aprovizionare și producție, la Costurile de Muncă, Capital și Remediere, exergia primară încorporată a acestora, eliminând astfel din imagine recursul direct la considerentele monetare. De fapt, principala diferență dintre TE și EEA este că primul duce la un cost, cel din urmă la un cost exergetic primar „fără capital”. EEA a fost aplicată cu succes pentru diferite societăți și s-a dovedit a fi un indicator realist, riguros și consistent al consumului de resurse.

Scopul acestei lucrări este de a investiga fezabilitatea utilizării EEA ca indicator de sustenabilitate. Acest livrabil constă din următorii pași:

- 1) Introducerea unei noi proceduri pentru EEA bazată pe exploatarea seturilor de date foarte dezagregate disponibile în prezent de la instituțiile naționale și private, pentru a îmbunătăți acuratețea modelului;
- 2) Analiza societății românești, pentru a extrage noi perspective utile pentru a evalua critic tendința de distrugere a exergiei și a exergiei extinse a României față de cea a PIB-ului.
- 3) O comparație a tendințelor EE a României și a altor indicatori de sustenabilitate (IDU, Amprenta ecologică și Biocapacitate).



*Analiza exergetică: termoeconomică, conținut cumulativ de exergie, analiza exergetică extinsă*

Prima metodă bazată pe exergie propusă în literatură pentru analiza instalațiilor industriale, a fost Thermoeconomics (Exergo-Ökonomie în Germania) [10,11], Rant 1955 [8]. Scopul său a fost de a găsi un compromis între o analiză pur termodinamică, care implică exergie, și o analiză pur economică, care implică costuri monetare; în TE, costul monetar al unei mărfi, al unui proces de producție etc. este alocat conținutului de exergie al fiecărui flux implicat. TE ia astfel în considerare costurile de capital și forța de muncă și apoi transformă fiecare flux de exergie în costul său monetar. Costul pe unitatea de exergie al unui produs se obține prin însumarea costurilor de capital (CAPEX) și de funcționare (OPEX) ale tuturor componentelor implicate. Chiar și din această descriere simplificată ar trebui să fie clar că este dificil să se aplice TE la analiza unei țări sau a unui sistem care include mărfuri „necomercializabile”: de exemplu, TE nu poate face față în mod satisfăcător cu ceea ce a ajuns să fie cunoscut sub numele de „capital natural”.

O metodă independentă de o abordare monetară a fost dezvoltată de Jan Szargut în 1967 [12] și ulterior rafinată de Szargut însuși, Antonio Valero și colegii [13,14]. „Costul” unui bun fizic se exprimă numai în ceea ce privește conținutul său exergietic, luând în considerare întregul lanț de aprovizionare, de la „cradle to grave”. Valoarea adăugată în cadrul lanțului de aprovizionare este luată în considerare prin adăugarea costului exergetic al procesului la exergia materiilor prime (CExC, Conținut cumulativ de exergie).

Metoda EEA a fost prezentată pentru prima dată în Gliwice [15] și dezvoltată în continuare în lucrările ulterioare [16,17]. Rațiunea de bază este atribuirea valorilor exergietice echivalente externalităților conform următoarelor ipoteze fundamentale:

- a) Notând cu  $\dot{E}_{in}$  [W] fluxul total de exergie în sistemul-Țară, o parte din acesta este în mod necesar cheltuită pentru a asigura supraviețuirea și creșterea populației: această porțiune se numește „exergia muncii”  $\dot{E}E_L$  și se calculează ca  $\alpha\dot{E}_{in}$ ,  $\alpha < 1$  unde  $\alpha$  este un coeficient econometric nespecificat de teorie care trebuie derivat din bugetul țării [17] studiate;
- b) Circulația monetară M2 este convertită în așa-numita exergie extinsă a capitalului prin intermediul unui alt factor econometric  $\beta$ :  $\dot{E}E_K = \beta\dot{E}E_L = \alpha\beta\dot{E}_{in}$ . Acest al doilea parametru econometric  $\beta$  este, de asemenea, extern teoriei și trebuie extras din datele de circulație monetară pentru țară.
- c) Sistemul-Țara este subdivizat în 7 sectoare:
  - Domestic (DO): activități consumatoare de energie pentru supraviețuirea și creșterea populației umane;
  - Extractivă (EX): implică procesele de exploatare și exploatare în carieră;
  - Conversia (CO): include conversia energiei, centralele termice și electrice, rafinăriile de petrol, alte rafinării și industriile chimice de bază;
  - Industrial (IN): include toate activitățile de producție care generează valoare adăugată materiilor prime;
  - Transport (TR): acoperă serviciile de transport, comerciale și private;
  - Terțiar (TE): include sectorul comercial, financiar și tot sectorul de servicii (Guvern, școli, poliție etc.);
  - Agricol (AG): Recoltare, silvicultură, pescuit.



- d) Sistemul schimbă fluxuri de materie și energie cu două sectoare suplimentare: Mediul, din care sunt extrase materiile prime, și celelalte țări sau societăți grupate colectiv într-un sector generic numit străinătate.

Exergia extinsă a unei mărfuri generice este calculată astfel:

$$EEc = CExC_m + CExC_e + EE_l + EE_k + EE_{env}$$

#### Indicele de dezvoltare umană (IDU)

Indicele Dezvoltării Umane (IDU) a fost introdus pentru prima dată de Programul Națiunilor Unite pentru Dezvoltare (PNUD) în 1990 în Raportul HDR-1990 [7]. Motivul din spatele IDU este de a oferi un indicator alternativ al bunăstării unei țări bazat pe un set de parametri socio-economici: potențialul de îmbătrânire, alfabetizarea și venitul pro capita [18]. IDU este normalizat între 0 și 1: cu cât valoarea sa se apropie mai mult de 1, cu atât este mai mare nivelul de trai în țara respectivă. Este rezultatul agregării a trei indici [18].

- **Viață lungă și sănătoasă.** Se bazează pe speranța de viață, definită ca „numărul de ani pe care un nou-născut s-ar putea aștepta să îi trăiască dacă tiparele predominante ale ratelor de mortalitate specifice vârstei la momentul nașterii ar rămâne aceleași pe toată durata vieții copilului” luând în considerare 20 de ani și 85 de ani ca valori limită. Datele sunt preluate din „perspectivele populației mondiale” publicate anual de ONU. Odată ce datele pentru o anumită țară sunt disponibile, indicele dimensional este calculat astfel:

$$I_{sănătate} = \frac{\text{valoare reală} - \text{valoare minimă}}{\text{valoare maximă} - \text{valoare minimă}}$$

- **Cunoștințe.** Indicele este format din doi parametri: 1) numărul mediu de ani petrecuți în activități educaționale de către adulții de peste 25 de ani; 2) anii de școlarizare așteptați pentru copiii de vârstă școlară. Indicatorii sunt normalizați având în vedere o valoare minimă de 0 și o valoare maximă de 15 pentru anul școlar mediu și 18 pentru anii așteptați de școlarizare. Indicele se calculează pornind de la cei doi parametri descriși la 1) și 2), calculând pentru fiecare dintre aceștia o valoare a indicelui, conform ecuației și eventual o medie aritmetică pentru a obține valoarea indicelui legat de cunoștințe,  $I_{educație}$ . Datele sunt preluate din baza de date UNESCO și de la institute de statistică.
- **Standard de trai decent.** Acest indice se bazează pe venit; se măsoară prin logaritmul VNB-ului (Venitul Național Brut) pro capita ajustat prin paritatea puterii de cumpărare (PPA). Valoarea minimă PPP este considerată 100\$, cea maximă 75000\$. Indicele se calculează astfel:

$$I_{venit} = \frac{\ln[\text{venit real}] - \ln[\text{venit minim}]}{\ln[\text{venit real}] - \ln[\text{venit minim}]}$$

IDU global este calculat luând media geometrică a indicilor tridimensionali  $I_k$ :

$$HDI = \sqrt[3]{I_{sănătate} + I_{Educație} + I_{venit}}$$

IDU este utilizat pe scară largă în domeniile sociale, economice și, de asemenea, legate de energie, ceea ce nu înseamnă că indicele este lipsit de critici [18]: în ultimii 20 de ani a primit mai multe evaluări negative din partea comunității științifice, legate de concepția sa, metodologia sa, calitatea datelor colectate, ipotezele care stau la baza și, cel mai important, faptul că nu conține nicio referire la starea mediului.



### *Amprenta ecologică și biocapacitatea*

Conceptul de contabilitate EF a fost dezvoltat în anii 1990 [5]. Este un indicator ecologic al cărui scop este să evalueze dacă o societate consumă resurse regenerabile și elimină deșeurile într-un ritm „durabil”. Sursele „neregenerabile” sunt luate în considerare doar pentru impactul lor asupra capacității bioproductive. FE este definită ca suprafața bioproductivă care ar fi necesară pentru a menține un consum durabil de resurse regenerabile și este calculată ca, consum (kg) ori randamentul producției (hectare/kg) conform ecuației:

$$EF_{\text{Producție}} = \frac{P}{Y_w} \cdot EQF$$

Unde P este producția (sau recolta) în tone pe an,  $Y_w$  este randamentul mediu mondial în tone pe hectar pe an și EQF este un factor de echivalență [19]. În esență, EQF este raportul dintre productivitatea globală medie a unui anumit tip de teren împărțit la productivitatea globală medie a întregii suprafețe productive ale planetei. EF al producției este calculat pentru fiecare produs (de exemplu, grâu, culturi, orez etc.) prin echivalentul calculat în ecuația anterioară, și apoi contribuțiile individuale sunt însumate pentru o anumită țară. Metoda ia în considerare și importurile și exporturile: suma algebrică a EF total de import și export se adaugă la EF de produse pentru a obține EF total [5]:

$$EF_{\text{Consum}} = EF_{\text{Producție}} + EF_I - EF_E$$

Unde  $EF_{\text{Consum}}$  este amprenta ecologică netă a țării și  $EF_I - EF_E$  este valoarea netă a EF din importuri. Tendința EF este adesea asociată cu cea a altui indicator, BioCapacitatea (BC). BC măsoară productivitatea diferitelor ecosisteme dintr-o zonă considerată (de exemplu, teren arabil, pășune, pădure etc.) [5] și poate fi măsurată în mod similar cu EF în hectare ca:

$$BC = A_n \cdot \frac{Y_n}{Y_w} \cdot EQF$$

Unde  $A_n$  este suprafața țării n pentru un anumit produs în hectare,  $\frac{Y_n}{Y_w}$  este raportul dintre randamentul mediu național pentru un anumit produs și randamentul mediu mondial, ambele măsurate în tone pe hectar pe an și EQF este același factor de echivalență. Toate produsele luate în considerare sunt apoi însumate pentru a obține parametrul BC al Țării.

Diferența algebrică dintre EF și BC se numește „deficit ecologic” dacă este negativ, „rezervă ecologică” dacă este pozitivă. De fapt, modelul include un schimb (prin comerț) între Țările în „deficit ecologic” cu Țările cu „rezervă ecologică”, realizat prin intermediul FE de import și export.

În ciuda atractivității sale și a modului simplu și foarte intuitiv în care pot fi reprezentate rezultatele, metoda EF are propriile sale dezavantaje, întrucât include doar partea regenerabilă a fluxurilor de energie, astfel încât contribuția combustibililor fosili nu este luată. Se ține cont (în afară de BC-ul necesar pentru captarea  $CO_2$ ) și acest lucru îi limitează puternic domeniul de aplicare; de exemplu, eliminarea materialelor cu timpi lungi de biodegradare, cum ar fi metalele grele și deșeurile radioactive, nămolurile industriale și altele asemenea, depășesc limitele modelului BC. Alte preocupări au fost exprimate de comunitatea științifică cu privire la rațiunea destul de obscură din spatele calculării factorilor de echivalență, fiabilitatea surselor de date și alegerea parametrilor [5,19].

### **Metoda**

Ceea ce se propune aici este o metodă de colectare a datelor în contextul unei analize EE: cantitatea foarte extinsă și detaliată de date puse la dispoziție de autoritățile guvernamentale, agențiile de statistică,

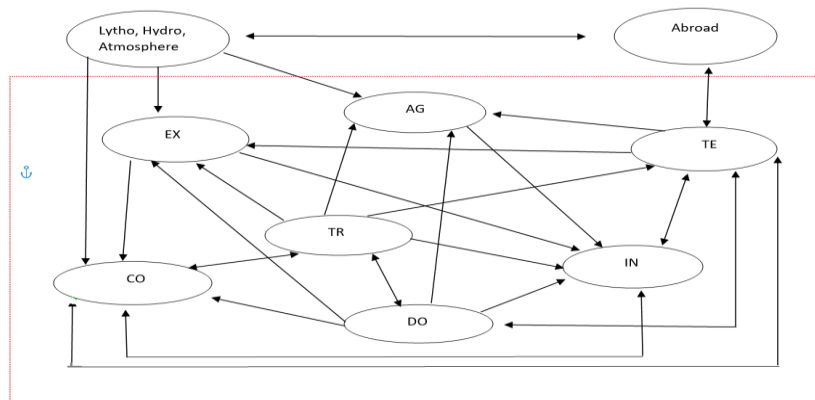


companiile de utilități, industriile etc. fac posibilă implementarea unei „baze de date” din care este posibil să se obțină rezultate mai realiste cu o acuratețe fără precedent până acum. Înainte de a continua, este necesar să risipim o obiecție ridicată la sfârșitul anilor 80 de către criticii exergiei. Obiecția spune că, deoarece sistemul se află într-o stare continuă de non-echilibru, echilibrele „instantanee” au puțin sens și astfel rezultatele sunt lipsite de rigoare. Această remarcă este, desigur, corectă din punct de vedere termodinamic, în care timpul nu este un parametru relevant, dar este cu siguranță părtinitoare atunci când se face referire la analiza la scară macro discutată aici. Motivele sunt următoarele:

- a. Fiecare analiză termodinamică a procesului areal se face sub ipoteza (explicită sau implicită) a transformărilor de cvasi-echilibru. De fapt, numai procesele destul de elementare pot fi abordate de stării de non-echilibru termic, și chiar și atunci, numai în baza unor ipoteze suplimentare oarecum stricte. Astfel, analizele exergetice ale proceselor industriale actuale sunt, în general, prezentate în literatură „la punctul de proiectare” și „într-o perspectivă de cvasi-echilibru” (adesea, această a doua afirmație este chiar omisă).
- b. Pentru a lua în considerare evoluția în timp a unei Țări (sau a oricărui alt sistem complex mare), pot fi luate în considerare o serie de bilanțuri energetice arbitrare. Dacă  $\partial t > 0$ , se obișnuiește să spunem că avem o „simulare tranzitorie”. O descriere mai bună ar fi „avem o serie de instantanee infinite aproape unele de altele ale unui fenomen complex”. Acum, această idee și practică „instantanee” este omniprezentă: turbinele cu abur și gaz, schimbătoarele de căldură, arzătoarele, reactoarele chimice... și sunt simulate „la stare de echilibru”, ceea ce înseamnă că toate instantaneele arată starea sistemului ca fiind „nevariabilă” în timp.
- c. În procesele în care starea staționară nu este considerată o bună aproximare (motoare cu ardere internă de exemplu, dar și fenomene mai fundamentale precum turbulența), instantaneele sunt luate la intervale de timp suficient de apropiate pentru a reprezenta un „continuu” și suficient de îndepărtate pentru a face modificări perceptibile. În această perspectivă medie în timp, energia este conservată în fiecare interval  $\Delta t$ . Modificările în dimensiunea și/sau masa sistemului sunt luate în considerare prin includerea unui termen de acumulare adecvat.
- d. Astfel, la fiecare  $\Delta t$  nu toată diferența  $E_{in} - E_{out}$  este distrusă: o porțiune intră în  $E_{acumulat}$ . Dar atunci când vorbim de EE (exergie extinsă), situația este destul de diferită. EE este în esență un cost și, ca orice echilibru al costurilor, fie el instantaneu, discret, cu/fără acumulare, trebuie să se apropie de zero. De fapt, termenul  $E_d$  nu apare explicit în bilanțul EE, ci este inclus în bugetul exergetic care trebuie să fie disponibil înainte de orice analiză EE. Iar bugetul exergiei poate include foarte bine acumularea.

#### *Clasificarea sectorială și fluxurile EE*

Odată ce cele 7 sectoare au fost „asamblate” prin colectarea în fiecare a activităților relevante și pertinente, următorul pas este identificarea, descrierea și cuantificarea corectă a interacțiunilor acestora. Modelul propus este prezentat în figura 2.



**Figura nr. 2.** Schema calitativă a diferitelor fluxuri materiale, energetice, monetare și de muncă între diferitele sectoare (schematică)

Sistemul „Țara” este cuprins în limitele definite de căsuța roșie; în afara chenarului, există alte două Sectoare, reprezentând interacțiunea sistemului cu „universul”. Mediul, adică lito-hidro-atmosfera, și alte Țări/Comunități/Societăți, grupate cumulativ în „În străinătate”.

Din Mediu, societatea extrage materii prime și energie primară, în timp ce cu străinătate există schimburi comerciale de materii prime, purtători de energie și produse prelucrate.

Motivul alocării fluxurilor exergetice este următorul:

- EX extrage din mediu purtători de energie primară și minereuri ca materie primă, datorită energiei și serviciilor furnizate de TE, transporturilor furnizate de TR, investițiilor financiare de la TE și lucrătorilor de la DO. Ieșirile sale sunt transmise la CO pentru procesare.
- CO transformă purtătorii de energie din EX în energie termică și electrică cu generarea de subproduse (de exemplu, cocs și funduri de rafinărie), datorită contribuțiilor DO, TR și TE. Intrările primare de energie regenerabilă (solar, eolian, energie geotermală, potențial hidro) sunt „extrase” din Mediu. Produsele sunt trimise la TR, TE, IN.
- IN generează bunuri de larg consum cu valoare adăugată. Produsele sunt expediate către TE pentru a fi vândute. Intrările sale sunt fluxuri EE de la DO (lucrători), TR, AG, energie din CO (distribuită de TE), materii prime din EX.
- AG primește exergie de la DO, TE, TR și Mediu, generând produse semifabricate care urmează să fie trimise către IN și parțial către DO.
- DO furnizează forță de muncă tuturor sectoarelor, primind bunuri și servicii de la TE, TR și, parțial, de la AG.
- TR primește produse de rafinărie de la CO, forță de muncă de la DO și aprovizionează toate sectoarele.
- TE furnizează bunuri și servicii tuturor sectoarelor: primește EE de CO și mărfuri IN și le vinde către DO și tuturor celorlalte sectoare (de exemplu, electricitatea generată în CO este vândută de companiile de utilități către toate sectoarele, taxată cu conținutul lor de EE datorită „producției” unui astfel de serviciu energetic). Schimburile cu celelalte țări („În străinătate”) reprezintă fluxuri de import/export și sunt mediate în întregime de TE.