

4. Sostenibilitat i anàlisi de sistemes

4.1 Introducció

L'anàlisi de la sostenibilitat que farem es basa en tres conceptes que cal considerar. El primer està determinat per l'evolució del mateix concepte *desenvolupament sostenible*, que hem comentat en el primer capítol de la tesi. En la majoria de definicions que hem vist d'aquest concepte, s'interpreta que la sostenibilitat s'ha de donar en unes determinades dimensions per poder considerar-la com a tal. Així, es parla de la dimensió social, econòmica i mediambiental, que són ni més ni menys que una simplificació del sistema que forma l'espècie humana (amb totes les seves dimensions), juntament amb el medi ambient en el qual vivim (el planeta Terra), reconeixent la profunda interrelació que existeix entre els dos subsistemes (Brundtland 1987, Selman 2000) i considerant el sistema com un conjunt d'unitats interrelacionades, tal com el va definir Bertalanffy (Bertalanffy 1968). Per tant, per analitzar la sostenibilitat, és imprescindible utilitzar una visió sistèmica, transversal i multidisciplinària, en contraposició a l'anàlisi clàssica, basada en el paradigma newtonià-cartesià, desenvolupat arran de la revolució científicotècnica que va començar al segle XIV (Crombie 1974). La clàssica resposta per a cada problema que planteja el desenvolupament humà consisteix a trobar una solució dins de cada disciplina específica en la qual són coneguts els efectes negatius del problema. Aquest procediment clàssic origina, en general, solucions parcials, que moltes vegades produeixen altres efectes no desitjats en diferents elements del sistema, ja sigui en el present o pertorbant l'evolució d'aquests elements en el futur. Cal un canvi de paradigma: el pas del paradigma newtonià-cartesià al paradigma sistèmic, el pas de les anàlisis disciplinàries a les anàlisis multidisciplinàries.

El segon concepte, derivat del primer, es basa a considerar el sistema objecte d'anàlisi com un sistema complex, ja que està format per una gran quantitat d'elements amb múltiples interrelacions, les quals moltes vegades no són conegudes. Aquest sistema es caracteritza per la seva complexitat, i aquesta complexitat planteja greus reptes de tipus social i ecològic. El concepte *desenvolupament sostenible*, aplicat als sistemes, representa l'evolució d'un

sistema extremadament complex, l'objectiu principal del qual és perdurar a través del temps (supervivència). L'aparició del concepte *desenvolupament sostenible* i la seva evolució en els últims vint anys demostren la preocupació existent, com a mínim en el món acadèmic, pel fet que l'evolució actual del sistema complex humanitat - medi ambient ocasiona molts problemes i fins i tot pot provocar el col·lapse i la destrucció del mateix sistema si segueix evolucionant sota l'actual model de desenvolupament, basat en el consum intensiu de recursos i la consegüent generació de residus (Brown 2006). Existeixen indicis negatius evidents de l'efecte d'aquest tipus de desenvolupament antropogènic sobre el medi ambient, que fins i tot afecta els cicles naturals: cicle de l'aigua, amb la seva degradació permanent; cicle del carboni, amb l'augment de la seva concentració en el reservori atmosfèric; el cicle del nitrogen, amb els problemes de degradació del sòl cultivable per l'augment de la concentració de nitrogen, etc.

Com a tercer concepte, s'ha de considerar l'estat actual del sistema i el seu passat. La revolució científicotècnica, que indubtablement ha produït una enorme evolució del sistema humanitat, ha concedit a la tecnologia un gran poder, ja que l'ha considerat l'eina més eficaç per resoldre els problemes del desenvolupament humà i li ha donat un caràcter quasi místic (Batalla 1991). Observar l'evolució de tot el sistema en el nostre passat recent comporta que ens adonem que, a pesar dels grans avenços científics i tècnics que han tingut lloc, els problemes de la humanitat no han disminuït, sinó tot al contrari, han augmentat, ja que tenim majors desequilibris a tots els nivells entre el nord i el sud, més desigualtat en el repartiment de riquesa i altres problemes prou coneguts per tothom (Brown 2006). Això ens indica que ens trobem davant d'un sistema complex amb un alt grau d'incertesa.

Aquests tres conceptes formen el marc conceptual de referència per analitzar una determinada problemàtica d'un sistema, des del punt de vista de la sostenibilitat.

Avui dia resulta evident la necessitat de preveure futurs impactes dels models de desenvolupament, els quals ocasionen problemes importants, tant en el medi ambient com en la humanitat.

Hi ha moltes variables que influeixen sobre la humanitat, les quals moltes vegades no podem controlar, i això dóna lloc a una gran incertesa davant el futur. Com que el futur no està predeterminat, encara que l'atzar i la incertesa hi tinguin un paper important, és necessari intervenir com a humanitat en aquest procés i fer el nostre paper (Ekeland 1996). És necessari actuar buscant la responsabilitat individual i col·lectiva dins la globalitat que ens envolta, cosa que constitueix un model d'acció ciutadana que Morin anomena *estratègia ecològica d'acció* (Morin i Naïr 1998). En aquesta estratègia els individus són actors de canvi d'una societat en construcció i tenen el poder de generar noves accions que permetin produir els canvis necessaris. Les accions puntuals dels individus són una forma d'actuar sobre la globalitat del planeta, que a la vegada actua sobre la dimensió local. És imprescindible, per tant, tenir en compte la necessària connexió entre la dimensió local i la dimensió global, les quals, en conjunt, formen el sistema complex planetari en què viu la humanitat.

Per tot això, és essencial que els processos de decisió i els decisors, tant en l'àmbit individual com col·lectiu, analitzin una problemàtica des del punt de vista sistèmic (tot el conjunt, tot el sistema) i des del punt de vista multidisciplinari (econòmic, social i mediambiental), preveient els possibles impactes a llarg termini, i no es basin en raons purament econòmiques i a curt termini, com moltes vegades sol passar. Neix la necessitat de preveure el futur, i és més necessari que mai fer-ho, a causa del procés de globalització en què estem immersos, que es caracteritza per la seva complexitat i en el qual es plantegen, com ja hem comentat, grans reptes de tipus social i ecològic.

Per poder preveure el futur és necessari crear models de comportament dinàmic (temporal) dels sistemes complexos en què està immersa la humanitat, per identificar les forces motrius dels diferents problemes de caràcter global, regional o local i, aplicant les diferents hipòtesis d'evolució de les variables del model, preveure com evolucionarà el sistema. Amb aquesta metodologia s'estableix un procés mitjançant el qual s'aprèn el funcionament del sistema i la seva evolució, per la qual cosa estem en millors condicions en el present per prendre decisions que afectaran el nostre futur, ja que som més conscients de les repercussions que aquestes decisions tindran.

En aquest marc de treball aplicarem els principis bàsics de la teoria general de sistemes (Bertalanffy 2003), que ens permetran donar la necessària visió sistèmica i matemàtica per afrontar l'anàlisi dels problemes que plantegen actualment els models de desenvolupament. Així mateix, comentarem algunes de les principals metodologies de representació dels sistemes complexos desenvolupades a finals del segle XX, la dinàmica de sistemes (Forrester 1968, Drew 1995), l'econometria (Mesarovic 2000, Susiarjo 2006) i les xarxes complexes (Steve 2001, Montoya et al. 2006). Finalment, analitzarem la utilitat dels escenaris de futur com a eina de previsió davant de la incertesa que caracteritza el futur.

4.2 Sistemes

Abans d'introduir les principals metodologies de representació dels sistemes complexos, és necessari analitzar el concepte de *sistema* i introduir la teoria general de sistemes.

En parlar de *sistema* hem de tenir en compte una totalitat les propietats de la qual no són atribuïbles a la suma de les propietats de les seves parts o components. El problema de les parts i el tot ja va ser discutit a l'antiguitat per Hesíode (segle VIII a. C.) i Plató (segle IV a. C.). Ara bé, és a partir de la Segona Guerra Mundial que va agafar empena l'estudi dels sistemes, amb l'interès que va despertar el treball interdisciplinari, i amb la constatació de l'existència d'analogies en el funcionament dels sistemes biològics i automàtics. La formulació científica de la teoria de sistemes és atribuïble al biòleg L. von Bertalanffy, que als anys cinquanta del segle passat, el segle XX, va proposar la teoria general de sistemes (TGS) com a mecanisme d'integració entre les ciències naturals i socials i com un mecanisme bàsic per a la formació de científics.

L'aparició de la TGS té l'origen en la incapacitat de la ciència per tractar problemes complexos, ja que el mètode científic basat en el reduccionisme va fracassar davant fenòmens complexos a causa de diversos factors, el principal dels quals va ser el gran nombre de variables que intervenen en els fenòmens. I és que el problema de la complexitat és patent en tractar amb fenòmens en què intervenen variables humanes, econòmiques, tecnològiques i naturals que, a més, estan

fortament interrelacionades i en les quals l'home, com a subjecte, té un paper molt important.

La TGS apareix per abordar el problema de la complexitat. Bertalanffy defineix un sistema com un conjunt d'elements en interacció entre si i de manera conjunta amb el seu entorn, i que, encara que pot ser dividit en parts, adquireix entitat en la mesura en què les parts s'integren en la totalitat. Aquesta definició fa entendre que en tot sistema poden diferenciar-se unes parts o elements organitzats que el formen, cosa que implica que el sistema està estructurat. La dinàmica del sistema la defineixen les interrelacions que s'estableixen entre els elements que el formen, i entre aquests i l'entorn del sistema.

Tota problemàtica o fenomen es pot considerar com un determinat estat o evolució dels estats del sistema, i cada element del sistema constitueix una representació simplificada d'alguna seva característica. Ara bé, cada element adquireix significat en la mesura en què constitueix una part integrant del tot; per tant, l'estudi o anàlisi de qualsevol element aïllat del sistema és sempre parcial. Sempre que es faci l'estudi de qualsevol fenomen s'han de tenir en compte, necessàriament, les relacions que el fenomen com a sistema estableix amb els altres fenòmens que té en el seu entorn, a més de considerar les relacions que s'estableixen entre els nivells jeràrquics del sistema. A cada nivell de la jerarquia apareixen propietats emergents que no es poden explicar a partir dels components del nivell inferior, ja que són resultat de la interacció. La TGS pretén estudiar el problema de la complexitat a través d'un pensament basat en la totalitat, d'un pensament sistèmic que es basa en la utilització del sistema com un tot irreductible (Checkland 1999, Wiley 1999).

Fins al dia d'avui s'han desenvolupat diverses metodologies per a la representació i resolució dels sistemes complexos, totes basades en la modelització, és a dir, basades en la construcció de models més o menys complexos, que s'executen en ordinadors, aprofitant l'elevada capacitat de tractament de la informació i la rapidesa de càlcul que permeten aquestes tecnologies. Per *modelització* podem entendre, en general, l'aplicació d'expressions matemàtiques i lògiques que defineixen les relacions quantitatives existents entre les variables de sortida i les variables d'entrada d'un determinat problema per aconseguir un model. Un model és una estructura conceptual que utilitza l'ésser humà per donar sentit, de manera

simplificada, a un conjunt de dades que ens arriben de forma no ordenada (Gell-Mann 1995). Per tant, el concepte de *model* ha de ser entès com una representació, necessàriament simplificada, d'un fenomen o procés i, en general, d'un sistema. Des del punt de vista de la modelització, podem definir el sistema com un conjunt d'elements vinculats entre si per diverses relacions que s'estableixen entre si. Per Margalef, un sistema consisteix en elements idealment separables i en les interaccions entre aquests elements (Margalef 1991). Bertalanffy defineix un sistema com un conjunt d'unitats interrelacionades (Bertalanffy 1968). Hi ha moltes definicions de *sistema*; ara bé, de totes en podem extreure uns aspectes fonamentals del concepte:

- L'existència d'elements diversos i interconnectats.
- El caràcter d'unitat de tot el conjunt.
- L'existència d'objectius associats a tot el conjunt.
- La integració del conjunt en un entorn.

Segons Carbonell, els sistemes complexos són aquells sistemes dels quals no es té un coneixent total i precís, o aquells sistemes que no tenen un comportament lineal, o aquells que presenten una incertesa en les seves dades, o que tenen característiques canviant (Carbonell et al. 2000).

Un sistema pot tenir diferents nivells de resolució segons el grau de detall amb què s'intenti analitzar, i a cada grau de resolució li correspondrà un model amb un grau de desagregació diferent. Si el sistema resulta massa complex per aconseguir la reproducció completa de tots els seus elements i les seves relacions, s'introdueix un element subjectiu dins l'aparent objectivitat dels models. És el constructor del model qui determina quins són els elements més importants que cal considerar i quines són les interrelacions que estableixen aquests elements. Amb això podem tenir diferents models d'un mateix sistema, encara que el grau de resolució sigui el mateix. La modelització necessàriament comporta una reducció de la complexitat del sistema.

Els models es realitzen a partir de les dades disponibles o de les dades seleccionades d'un sistema, les quals hem de matematitzar de manera quantitativa,

cosa que és bàsica, ja que les matemàtiques ens permeten descriure el món natural i trobar regularitats en el seu comportament i ritmes a vegades invisibles a l'experiència humana (al sentit comú). A més, són capaces de reduir l'aparent complexitat del cosmos en una sèrie de teoremes numèrics bàsics (Margalef 1991).

Quan apliquem diferents hipòtesis de comportament al model d'un sistema, el que estem fent és simular el comportament del sistema sota la hipòtesi considerada, amb la qual cosa podem preveure els canvis en el sistema en el transcurs del temps. La simulació ens permet conèixer millor el funcionament del sistema i experimentar amb diferents situacions que s'hi puguin produir. A més, ens permet entendre molts dels problemes dels sistemes en què intervé la humanitat, els quals generalment són problemes de gestió del sistema, ja siguin problemes d'organització, de control, de presa de decisions, etc. I finalment, i no per això menys important, ens ajuda a prendre decisions.

4.3 Etapes d'anàlisi i disseny de sistemes

L'anàlisi de sistemes tracta bàsicament de determinar els objectius i límits del sistema que analitza, caracteritzar-ne l'estructura i el funcionament, marcar les directrius que permetin arribar a uns objectius proposats i avaluar-ne les conseqüències. Les etapes que cal seguir a l'hora d'analitzar els sistemes són:

- Conceptualització: consisteix a obtenir una visió del sistema, identificant-ne els elements bàsics i les relacions d'aquests entre si i amb l'entorn.
- Anàlisi funcional: descriu les accions o transformacions que tenen lloc en el sistema. Aquestes accions o transformacions s'especifiquen en forma de processos que reben unes entrades i produeixen unes sortides.
- Anàlisi de condicions: reflecteix totes aquelles limitacions imposades al sistema que restringeixen les possibles solucions. Aquestes deriven, a vegades, dels mateixos objectius del sistema:
 - Operatives, com són les restriccions físiques, ambientals, de manteniment, de personal, de seguretat, etc.

- De qualitat, com ara fiabilitat, manteniment, seguretat, convivència, etc.

Ara bé, altres vegades les constriccions són imposades per limitacions en els recursos utilitzables:

- Econòmics, reflectits en un pressupost.
 - Temporals, que suposen uns terminis per complir.
 - Humans.
 - Metodològics, que comporten la utilització de tècniques determinades.
 - Materials, com espai, eines disponibles, etc.
- Construcció de models: realització d'un model prototip del sistema.
- Validació del model, a fi de comprovar si l'anàlisi feta del sistema és correcta i per evitar errors de construcció del model. És un pas imprescindible. Per fer la validació s'ha de comprovar que:
- L'anàlisi sigui consistent i completa.
 - Si l'anàlisi es planteja com un pas previ per fer una proposta d'acció, s'haurà de comprovar que els objectius proposats siguin correctes i realitzables.

Els models, una vegada construïts, poden ser avaluats directament pels usuaris o experts en el sistema, per validar l'anàlisi que se'n faci.

El disseny de sistemes s'encarrega de desenvolupar les directrius proposades durant l'anàlisi per trobar la configuració del model que tingui més possibilitats de satisfer els objectius plantejats. El procés de disseny d'un sistema complex sol fer-se de manera descendent:

- Disseny de nivell alt (o descomposició del sistema que es pretén dissenyar en subsistemes menys complexos).

- Disseny i implementació de cada un dels subsistemes:
 - Especificació consistent i completa del subsistema d'acord amb els objectius establerts en l'anàlisi.
 - Desenvolupament segons l'especificació.
 - Prova.
- Integració de tots els subsistemes.
- Validació del disseny.

Cal destacar que aquestes etapes d'anàlisi i disseny de sistemes van començar a desenvolupar-se i aplicar-se en l'àmbit empresarial i s'han estès a altres disciplines.

Un cop comentats els passos que s'han de seguir per fer l'anàlisi i el disseny d'un sistema, comentem quines són les metodologies que podem utilitzar per representar-lo.

4.4 Metodologies de representació dels sistemes complexos

La definició general de *modelització* inclou una gran diversitat de metodologies. Podem classificar aquestes metodologies en tres grans tipus:

- Econometria.
- Dinàmica de sistemes.
- Xarxes complexes.

Comentem les principals característiques de cada una.

4.4.1 Econometria

Etimològicament, el terme *econometria* significa “mesura econòmica”. Ara bé, el seu camp d'acció és molt més ampli. L'econometria s'ocupa de la verificació empírica de les relacions econòmiques. Aquesta disciplina estudia bàsicament les

estructures que permeten analitzar les característiques i propietats d'una variable econòmica, utilitzant com a causes explicatives altres variables econòmiques. L'objectiu dels models econòmics és la mesura, l'anàlisi i la predicció del fenomen econòmic (Tintner 1968).

L'econometria consisteix en tècniques estadístiques que intenten trobar relacions entre els diversos elements econòmics que conformen un sistema. El problema que plantegen és que no valoren les diferents propietats que poden tenir intrínsecament els elements del sistema (Pulido 1989).

Un tipus de models utilitzat per modelitzar sistemes complexos elaborats amb aquesta metodologia són els anomenats *models de tipus caixa negra*, que són aquells en què és difícil conèixer i identificar les variables que intervenen en una problemàtica (De Felipe 2004). Els models de tipus caixa negra no requereixen la identificació de totes les variables que hi ha entre l'*input* i l'*output* (Moody 1995).

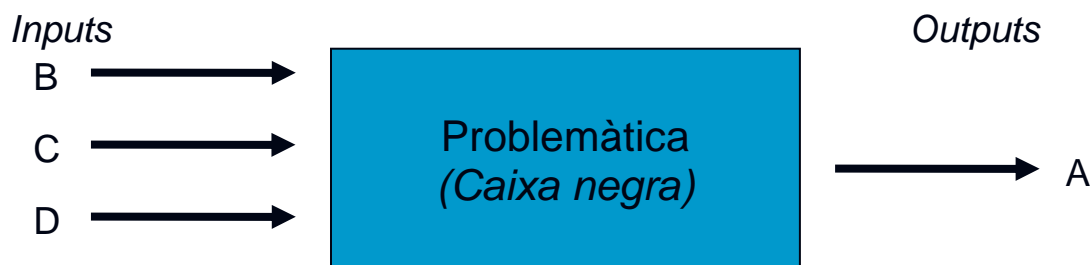


Figura 8: Model de tipus caixa negra

Font: De Felipe 2004

Com que no es coneix la relació que hi ha entre els *inputs* i *outputs* del sistema, es construeixen una sèrie d'indicadors que ens relacionin les variables que intervenen en una problemàtica. Els indicadors han de ser capaços de donar informació de la problemàtica considerada (De Felipe 2004).

Una metodologia que aplica els preceptes de la caixa negra és la metodologia GENIE (Global-problematique Education Network Initiative), desenvolupada pel Dr. M. D. Mesarovic (Mesarovic i Xercavins 2000). La metodologia GENIE

s'utilitza quan no coneixem les relacions causals entre les diferents variables que componen el sistema, les quals són representatives d'una problemàtica en particular (De Felipe 2004, Susiarjo et al. 2006). Aquesta metodologia no persegueix modelitzar l'estructura interna de funcionament del sistema, sinó que es limita a buscar la correspondència entre les variables d'entrada i sortida d'un sistema i relacionar-les a través d'una identitat (Kaya et al. 1989), la qual està formada per indicadors representatius de la problemàtica (De Felipe 2004).

$$A \equiv \frac{A}{B} * \frac{B}{C} * \frac{C}{D} * D \quad \text{Relació 1}$$

Font: De Felipe 2004

La selecció d'indicadors requereix un estudi acurat, per determinar si les variables que formen aquests indicadors són acoblades, és a dir, que realment ens poden donar informació a partir de la visualització de la seva evolució (De Felipe 2004). En general, s'escullen indicadors representatius dels diferents subsistemes del sistema global. Així, s'escullen indicadors del subsistema econòmic, tecnològic i/o social, a més d'indicadors del sistema natural o ambiental (Ehrlich i Holdren 1971, Clark 1989).

Els models de tipus caixa negra desenvolupats amb la metodologia GENIE els podem aplicar a través d'un software específic anomenat GlobeSight, desenvolupat a la Universitat Case Western Reserve d'Ohio sota la direcció del Dr. M. D. Mesarovic (coautor del segon informe al Club de Roma (Mesarovic 1975)). El GlobeSight és una eina de suport al raonament, que també podem anomenar *eina de valoració integrada*. És una interfície informàtica a través del qual podem analitzar problemes de caràcter global en funció del temps (Mesarovic et al. 1999). És un software que ens permet fer simulacions a través de models identitaris creats en llenguatge C, els quals permeten estudiar l'evolució de les variables seleccionades en el temps. Amb les successives simulacions, amb diferents hipòtesis de comportament, es poden crear escenaris de futur (De Felipe 2004).

4.4.2 Dinàmica de sistemes

La dinàmica de sistemes és una metodologia per a la construcció de models de simulació per a sistemes complexos, entre els quals podem destacar el sistemes sociològics, els ecològics, els econòmics i els sistemes mediambientals (Aracil 1986, Martín 2003).

La dinàmica de sistemes s'aplica principalment en entorns complexos i poc definits, on intervenen les decisions de l'ésser humà que solen estar guiades per la lògica (Martín 2004).

Aquesta metodologia va ser desenvolupada durant la dècada dels anys cinquanta del segle XX per Jay W. Forrester, enginyer de sistemes de l'Institut Tecnològic de Massachusetts (MIT), el qual, com a coordinador d'un gran projecte de defensa, el sistema SAGE (Semi-automatic Ground Equipment), es va adonar de la importància de l'enfocament sistèmic per concebre i controlar entitats complexes com les que sorgeixen de la interacció entre homes i màquines. D'aquesta manera va idear la dinàmica industrial (Forrester 1961), una metodologia que permetia construir models dels processos industrials i simular-ne l'evolució temporal amb l'ajut d'un ordinador. Posteriorment va aplicar la seva metodologia a problemes de planificació urbana (Forrester 1969) i la va generalitzar per a qualsevol sistema continu, canviant la denominació per la de *dinàmica de sistemes* (Forrester 1968).

La dinàmica de sistemes va ser àmpliament difosa durant els anys setanta, quan va servir de base per a la realització dels estudis encarregats pel Club de Roma a Forrester i el seu equip, a fi de valorar l'efecte del creixement de la població i de l'activitat humana en un món de recursos limitats. El mateix Forrester va dirigir la confecció d'un model inicial del món (Forrester 1971), a partir del qual es va fer més tard, el 1973, l'informe definitiu, *The Limits to Growth*, dirigit pels professors Meadows (Meadows 1992). Un segon informe, utilitzant també dinàmica de sistemes, va ser encarregat a Mesarovic i Pestel: l'informe *Mankind at the Turning Point*, realitzat l'any 1974 (Mesarovic i Pestel 1975).

La dinàmica de sistemes utilitza conceptes del camp del control realimentat per organitzar la informació en un model de simulació per ordinador. Un ordinador executa el paper dels individus en el món real. La simulació resultant revela quines són les implicacions del comportament del sistema representat pel model. La dinàmica de sistemes aplica bàsicament les idees de realimentació i sistema dinàmic, juntament amb la teoria de models a l'espai d'estats, a més de procediments d'anàlisi numèrica.

La dinàmica de sistemes és una tècnica de representació gràfica dels sistemes complexos, en la qual s'identifiquen els elements, les anomenades *variables de nivell*, i les seves relacions amb la resta d'elements del sistema, tant materials com d'informació.

Una vegada identificats els elements que volem modelitzar del sistema, les anomenades *variables de nivell*, s'identifiquen les variables que fan créixer o decreixer el valor de les variables de nivell en un determinat període de temps; aquestes variables són les denominades *variables de flux*. Així, si tenim una variable de nivell denominada p i dues variables de flux, una d'entrada p_e i una de sortida p_s , la variació temporal (en funció del temps) de la variable de nivell estarà determinada per la relació següent:

$$\frac{dp}{dt} = p_e - p_s \quad \text{Relació 2}$$

S'obté una equació diferencial. Les variables de flux, tant d'entrada com de sortida, depenen, en general, d'altres variables de nivell (per exemple, b), d'altres variables de flux (per exemple, f_e i f_s) i/o de variables auxiliars (per exemple, k). Així:

$$\begin{aligned} p_e &= f(b, f_e, f_s, k) \\ p_s &= f(b, f_e, f_s, k) \end{aligned} \quad \text{Relació 3}$$

Aquestes són les relacions i hipòtesis de comportament considerades.

Per tant, si coneixem aquestes relacions podem trobar el valor de p amb la simple integració de la relació 3.

$$dp = (p_e - p_s) * dt$$

$$\int_{t_0}^{t_1} dp = \int_{t_0}^{t_1} (p_e - p_s) * dt \quad \text{Relació 4}$$

Aquesta integració és summament difícil si les relacions de les variables de flux no són lineals. Per tant, per realitzar-la, es recorre als diferents mètodes d'integració existents. En general:

$$\Delta p = p_{t_1} - p_{t_0} = \sum_{t_0}^{t_1} p_e - p_s \quad \text{Relació 5}$$

El comportament del sistema serà determinat pel conjunt de trajectòries de totes les variables. Aquesta metodologia s'utilitza per a la creació de models en els quals la relació causal és coneguda.

Els passos que s'han de seguir per a la creació d'un model en dinàmica de sistemes són (Vennix i Jac 1996):

- Identificació del problema i propòsit del model.
- Conceptualització del sistema.
- Formulació del model i estimació de paràmetres.
- Anàlisi del comportament del model.
- Avaluació del model.
- Utilització del model o implantació.

L'aplicació de la dinàmica de sistemes als sistemes socioeconòmics pot plantejar una sèrie de dificultats. La primera és la quantificació, ja que, en utilitzar dinàmica de sistemes, com ja hem comentat, es comença identificant les variables d'interès i les relacions que lliguen entre si aquestes variables, per a continuació quantificar aquestes relacions, fet que és imprescindible, i a vegades difícils. En segon lloc,

la validació del model, un cop construït, ens hem de preguntar si reflecteix raonablement la realitat, cosa que es pot resoldre si disposem d'informació quantitativa de l'evolució del sistema real en el passat. Si el model és capaç de generar els comportaments característics del sistema real, llavors tenim una certa confiança en la validesa del model.

La simulació amb dinàmica de sistemes permet obtenir trajectòries per a les variables incloses en qualsevol model mitjançant l'aplicació de tècniques d'integració numèrica. Ara bé, aquestes trajectòries mai no s'interpreten com a prediccions, sinó com a projeccions o tendències (Martín 2004). L'objecte de la modelització en dinàmica de sistemes és, com en totes les metodologies, arribar a entendre com l'estructura d'un sistema és responsable del seu comportament. Aquest enteniment facilita el marc adequat per a la determinació d'accions i polítiques per millorar el sistema o resoldre els problemes detectats. L'avantatge de la dinàmica de sistemes és que aquestes accions es poden simular, amb la qual cosa se'n poden valorar els resultats sense necessitat d'experimentar-les de manera pràctica sobre el sistema real.

Els models realitzats amb dinàmica de sistemes s'implementen en softwares específics, entre els quals podem destacar els anomenats Stella i Vensim, entre altres.

4.4.3 Xarxes complexes

L'anomenada *ciència de les xarxes complexes*, desenvolupada per científics provinents del camp de la física, es va constituir a partir de la incorporació de les matemàtiques i la física a l'anàlisi de les estructures, ja siguin de tipus social (Watts 2003, Barabasi 2002), conegudes com a *xarxes socials* (ARS en castellà i SNA en anglès), ja siguin estructures de tipus tecnològic, neuronal, etc.

L'anàlisi de xarxes complexes consisteix en una sèrie de mètodes matemàtics utilitzats en sociologia, lingüística i tota una sèrie de disciplines, per expressar visualment i matemàticament el conjunt de relacions que s'estableixen entre una sèrie d'individus o nodes. Els elements que formen els sistemes complexos es

consideren nodes, i les relacions (tant materials com d'informació) que s'estableixen entre si creen una xarxa. L'estudi se centra en la manera com evoluciona la xarxa, així com en les propietats dels llaços entre els nodes.

Estudiant les xarxes naturals, socials i tecnològiques s'ha arribat a la conclusió que presenten característiques comunes i mecanismes comuns de creixement. Un d'aquests mecanismes és l'estructura o topologia d'interacció entre els elements del sistema, és a dir, qui interactua amb qui dins el sistema. La topologia és molt important, ja que sempre afecta el comportament global del sistema. Un dels resultats més interessants és que existeixen moltes similituds en l'estructura d'interacció dels sistemes, cosa que fa pensar en l'existència d'uns principis generals aplicables a sistemes ben diversos. Un altre avenç important dins el camp de les xarxes complexes és el descobriment que hi ha uns nodes importants imprescindibles per al bon funcionament de la xarxa, els anomenats *nodes crítics*, pels quals passa la major part d'informació de la xarxa, fet comú en un gran nombre de xarxes.

Si parlem de xarxes socials, l'ARS considera els individus, grups i organitzacions humanes com a nodes vinculats per enllaços, dels quals investiga les seves propietats. Les estructures socials poden ser molt diverses: per exemple, l'estudi de la gent, cultura, relacions sexuals, malalties, crisis financeres, problemes energètics, organitzacions empresarials, col·lapses d'aeroports, etc.

És una tècnica amb un futur prometedor, ja que enllaça perfectament amb les noves tecnologies de la informació anomenades *sistemes d'informació geogràfica*. Aquesta metodologia s'utilitza per crear models espacials dels sistemes complexos.

4.5 Escenaris de futur

El futur dels éssers humans no està definit i no es pot deduir de manera senzilla mitjançant equacions matemàtiques. Tampoc no està subjecte a l'atzar, ja que el passat i el present el condicionen. La investigació sobre el futur implica anticipar-se als fets venidors i poder-hi reaccionar. La prospectiva és la disciplina que

s'encarrega dels estudis de futur. La prospectiva és l'estudi de les causes científiques, tècniques, econòmiques, polítiques, socials i culturals que acceleren l'evolució del món i la previsió de les situacions que sorgeixen de les seves interaccions. Fer prospectiva és interrogar-se sobre els grans problemes i desafiaments de la societat i explorar els possibles futurs. La prospectiva proveeix metodologies i eines per a l'estudi i exploració dels possibles futurs. Una d'aquestes metodologies és la construcció d'escenaris de futur.

Kahn va introduir el terme *escenari* dins la planificació. Va desenvolupar els escenaris gràcies a estudis militars i estratègics realitzats a la dècada de 1950, treballant per a la Rand Corporation. El terme *escenari* el van popularitzar Kahn i Weiner a la dècada de 1960, a causa dels escenaris realitzats com a conseqüència de la guerra freda, amb la finalitat de desenvolupar l'estudi de les possibilitats futures d'ordre mundial (Kahn i Weiner 1967).

Els escenaris de futur proveeixen una eina per a la planificació creativa del futur i tenen la capacitat de preparar-nos per al canvi i la incertesa, ja que intenten anticipar els futurs possibles dins la complexitat que caracteritza l'actual sistema en què estem immersos com a humanitat.

En general, els escenaris els utilitzen els decisors per comunicar plans de futur i preveure possibles canvis que es produiran en un futur proper. Els escenaris faciliten l'adaptació a aquests canvis, ja que fan tasques d'anticipació. Són essencials per a la gestió, ja que permeten prendre decisions en el present preveient els possibles canvis que tindran lloc en el futur.

4.5.1 Definició i utilitat

Un escenari és una eina d'anàlisi que descriu un conjunt possible de condicions de futur. Els escenaris són *fotogrames del que pot arribar a ser*. Els escenaris no són exclusivament projeccions de la situació passada i actual en el futur, sinó que proveeixen diferents vies o camins per ajudar la gent a veure les implicacions que tenen les seves decisions actuals en el futur i facilitar l'adaptació als canvis (McLain i Lee 1996). Els escenaris són eines útils quan la complexitat i la incertesa

del sistema són elevades, ja que estimulen noves formes de pensament per facilitar l'adaptació a aquest futur incert (Lee 1993). Els escenaris són descripcions narratives del futur en les quals el focus principal se centra especialment en els processos causals i els punts per a la presa de decisions (Kahn 1967). Segons Godet, un escenari és un conjunt format per la descripció d'una situació futura i la progressió dels esdeveniments que permetin passar de la situació d'origen a la situació de futur (Godet 1985).

La utilitat que tenen els escenaris és ajudar la gent a canviar els seus esquemes o mapes mentals, de com fer les coses, ja que permeten tractar o jugar amb la incertesa del futur i percebre les conseqüències que tenen les accions presents en un futur a curt o llarg termini.

El món globalitzat en què vivim es caracteritza per molts canvis que transcorren a gran velocitat, i tots envoltats d'una gran incertesa, cosa que facilita que el pensament racional que tenim, en general, es nodreixi de l'experiència acumulada, i això fa que, davant una situació desconeguda, moltes vegades quedi bloquejat. Aquestes barreres psicològiques fan que no es pugui pensar amb claredat i amb perspectiva de previsió de futur. Els escenaris proveeixen una eina que facilita l'anticipació a aquestes hipotètiques situacions: afavoreix la prèvia percepció de diferents possibles futurs i ajuda a l'adaptació quan aquestes situacions esdevenen properes. És un procés d'aprenentatge interactiu.

Els escenaris són potents eines de planificació, precisament perquè el futur és incert i impredecible. Els escenaris presenten imatges alternatives a l'extrapolació de les actuals tendències cap al futur i ajuden a la comunicació d'opcions o alternatives complexes. Els bons escenaris són plausibles i sorprenents i tenen la capacitat de trencar vells estereotips, i s'hi poden veure moltes vegades signes d'alerta, als quals, després de sorprendre'ns, un es pot adaptar i en els quals pot actuar de manera eficaç. Les decisions que es prenguin poden ser experimentades per veure'n les conseqüències i implicacions, amb la qual cosa es pot actuar en el present amb les millors estratègies amb vista a aconseguir el futur desitjat, i això és un gran avantatge. El resultat de la planificació de futurs escenaris no és la realització de la

millor *fotografia* del futur, sinó que és pensar i actuar estratègicament en el present per millorar el nostre futur.

S'utilitza la paraula *escenari* quan parlem d'escenaris de futur, pel símil establert amb diferents escenes d'una obra de teatre. Una vegada que veiem les diferents escenes, un ja pot entendre i veure quines són les opcions o possibilitats que hi ha en el teatre.

Un escenari no és una predicció d'un pronòstic específic per si mateix; preferentment és una descripció del que pot passar. Els escenaris descriuen fets i tendències i com poden evolucionar. Els escenaris de futur són una manera de desenvolupar futurs alternatius basats en diferents combinacions de supòsits, fets i tendències.

4.5.2 Construcció d'escenaris de futur

Per a la construcció d'escenaris de futur és necessari fer una sèrie de passes (Schwartz 1996). En primer lloc, cal tenir en compte l'estructura actual del sistema complex, fer un diagnòstic del present a partir d'elements del passat que hi han influït, identificant les *driving forces*, és a dir, les forces motrius de la problemàtica i les seves tendències de les zones geogràfiques de l'estudi (Bossel 1998). Aquestes forces motrius normalment es poden classificar en quatre categories:

- Dinàmica social: inclou tendències demogràfiques, estils de vida, valors, creences religioses...
- Dinàmica econòmica: aquí podem diferenciar les tendències macroeconòmiques i les tendències microeconòmiques.
- Dinàmica política: regulacions i legislacions.
- Dinàmica tecnològica: inclou les possibilitats tecnològiques.

Com més forces motrius identificades, més gran serà la complexitat per a la construcció dels escenaris de futur.

A més de la identificació de les forces motrius, necessitem determinar l'any base de l'escenari a partir del qual treballarem. L'any base és un any recent del qual hem de disposar de totes les dades necessàries. A partir de l'any base hem de determinar els anys de l'escenari, els anys als quals volem aplicar l'estudi.

Un cop identificades les forces motrius i les seves tendències, així com l'any base i els anys d'aplicació de l'escenari, tenim una sèrie d'incerteses amb diferents graus, les quals hem d'ordenar i veure com són de crítiques, i seran les que considerarem en els escenaris futurs per ordre d'importància.

A continuació hem d'identificar els factors que dinamitzen les forces motrius. Aquests factors poden ser interns o externs al sistema. És convenient separar els factors conjunturals dels factors estructurals. Després s'han d'identificar les restriccions, ja siguin naturals, econòmiques, polítiques, tècniques, etc.

Posteriorment, es construeixen els escenaris, un per a cada hipòtesi de futur que es consideri i per a cada factor motor (Fabey i Randall 1998).

Un cop construïts els escenaris, s'ha de passar a fer l'anàlisi dels resultats obtinguts, intentant identificar els factors clau en el temps per a cada un dels escenaris realitzats.

Per a cada escenari s'han de definir una sèrie d'indicadors representatius, els quals serà molt interessant monitoritzar per fer-ne el seguiment.

És important tenir en compte que entendre el futur és essencial per dissenyar estratègies.

4.5.3 Tipus d'escenaris

En l'anàlisi d'un sistema mitjançant escenaris de futur podem diferenciar dos tipus d'escenaris:

- Escenari de futur de referència.

- Escenaris de futur alternatius.

L'escenari de futur de referència és l'escenari de projecció de tendències. És aquell escenari que descriu l'evolució en el futur de les forces motrius més importants del sistema, partint de les condicions presents de les variables que dinamitzen les forces motrius i de les seves tendències històriques. El que es fa és la projecció de les tendències històriques de les variables seleccionades en el futur. És l'extrapolació de variables. Involucra primer un component retrospectiu, per després projectar.

Els escenaris de futur alternatius són aquells escenaris obtinguts aplicant diferents hipòtesis a les variables seleccionades, ja siguin hipòtesis possibles i/o desitjables. Els escenaris alternatius són un conjunt coherent d'hipòtesis respecte de com evolucionarà una problemàtica, segons com es comportin i articulin els diferents factors que hi intervenen, els mecanismes d'evolució del problema i les estratègies dels diferents actors (Licha 2000).

A l'hora de seleccionar els escenaris alternatius, s'han de considerar les hipòtesis preses. Respecte a l'anàlisi de les diferents alternatives de decisió, hipòtesis assumides, potser només es creuaran amb un o dos escenaris dels realitzats, però, si tenim decisions que es creuen amb la majoria d'escenaris, llavors estem segurs de considerar les millors hipòtesis (Fabey i Randall 1998).

4.6 Conclusions

D'aquest capítol cal destacar el marc conceptual en què es basa l'anàlisi de la sostenibilitat dels sistemes. Aquest marc conceptual el defineixen tres components. Un primer component és determinat per la definició de *desenvolupament sostenible*, la qual requereix, per a la seva aplicació, una visió sistèmica, transversal i multidisciplinària dels sistemes. Un segon component és determinat per la consideració del sistema com a sistema complex, format per múltiples interrelacions entre els elements que el formen i entre aquests elements i el seu entorn, cosa que determina una de les principals característiques que cal considerar

dels sistemes, la seva complexitat, que planteja greus reptes del sistema a tots els nivells que fins i tot poden arribar a provocar-ne el col·lapse (Brown 2006). Un tercer component que cal tenir en compte en parlar de sistemes complexos és la incertesa que els caracteritza. Per pal·liar aquesta última característica, encara que no permet resoldre-la, ens pot ajudar el coneixement adquirit de l'estudi de l'estat actual del sistema i el seu passat.

Considerant aquest marc conceptual, és necessari crear models de comportament dinàmic dels sistemes complexos que es pretén estudiar, per poder analitzar-los. Un factor crític que condiciona l'anàlisi que podem fer del sistema és determinat pel marc conceptual considerat. Aquest factor és la complexitat i incertesa que caracteritzen els sistemes complexos. Poder representar en un model matemàtic la complexa realitat del sistema format per la humanitat i els subsistemes en què aquesta viu i que l'envolten és impossible, a causa de la impossibilitat de conèixer totes les interrelacions que s'estableixen entre els elements que formen el sistema. Només podem modelitzar aproximacions parcials del seu comportament.

A l'hora d'escollir una determinada metodologia de representació dels sistemes complexos per aplicar-la, s'han de considerar tres factors: el primer el determina l'anàlisi que es vulgui fer del sistema; el segon, les dades disponibles, i el tercer i últim, en funció de l'escala a què es vulgui treballar. L'econometria és útil quan no coneixem les interrelacions que s'estableixen entre les entrades i les sortides del sistema que es vol estudiar. Pel que fa a la dinàmica de sistemes, s'utilitza quan coneixem les interrelacions que s'estableixen entre els elements del sistema que es vol estudiar i treballem amb un sistema unidimensional. Les xarxes complexes són útils quan coneixem les interrelacions que s'estableixen entre els elements del sistema: tenim dades molt detallades de cada un dels elements i volem fer-ne una representació multidimensional.

Apareix una necessitat dins aquest context de complexitat comentat, provocada en gran part pel procés de globalització en què vivim, que fa necessari més que mai pensar en el futur i preveure el futur o possibles futurs que ens esperen, ja que, com a humanitat, se'ns plategen uns grans reptes de tipus ecològic i/o social que hem d'afrontar. Per fer-ho tenim una eina d'anàlisi àmpliament utilitzada

internacionalment, que destaca, sobre altres eines d'anàlisi, la creació d'escenaris de futur. Aquesta eina ens permet visualitzar els possibles futurs, que són construïts amb diferents hipòtesis considerades. D'aquesta manera podem fer una anàlisi de sensibilitat de les diferents variables que afecten el sistema i, per tant, determinar quins són els factors crítics d'un sistema. Els escenaris de futur són una potent eina de previsió, ja que ens faciliten la presa de decisions i ens permeten veure les conseqüències que tindran les nostres decisions presents en el futur.

