

Modelatge de Xarxes Econòmiques

Un marc per vincular les microinteraccions amb la macrodinàmica

Eric Farran Moreno
Master en Ciència de Dades



Hola, soc l'Eric Farran Moreno, estudiant de màster de Ciència de Dades a la UOC, i en aquesta sessió presento el meu Treball Final de Màster.

Motivació

Com circula el
diner per
l'economia?

“L'energia ni es crea
ni es destrueix,
només es transfereix.”

Primera llei de la termodinàmica

Per començar, m'agradaria introduir la motivació del treball a partir d'una analogia física.

"La primera llei de la termodinàmica estableix que l'energia ni es crea ni es destrueix, sinó que únicament es transfereix."

De manera anàloga, aquest mateix principi pot observar-se en l'àmbit econòmic, on l'ingrés d'un agent esdevé la despesa d'un altre.

Aquesta observació permet reinterpretar l'economia com un sistema dinàmic complex, definit principalment per l'entramat de les interaccions econòmiques entre els seus agents.

Els models macroeconòmics tradicionals tendeixen a modelitzar l'economia a nivells altament agregats, ignorant explícitament les micro-interaccions i limitant la seva capacitat per estudiar com circula el diner; aquest és el punt de partida del treball.

En conseqüència, l'objectiu fonamental d'aquest TFM és superar aquest enfocament agregat i presentar un nou marc teòric que entén l'economia com la macro-dinàmica que emergeix de les micro-interaccions entre agents.

Estat de l'art

Situant el model dins la literatura existent

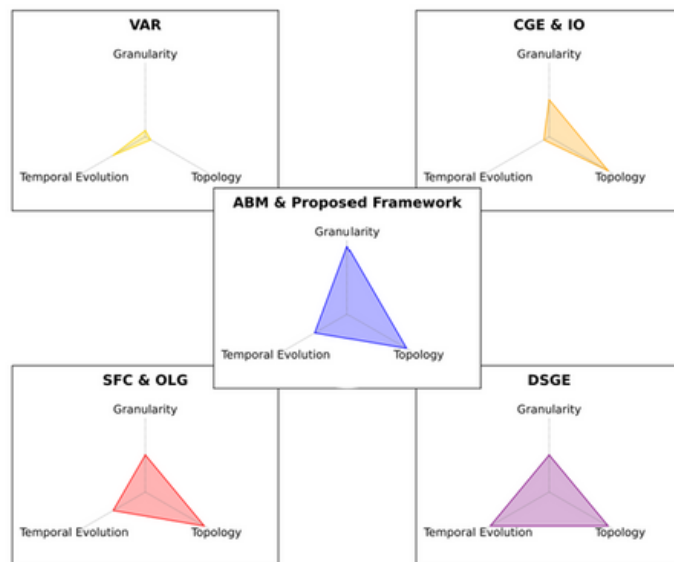


Figure 2.1: Conceptual mapping of macroeconomic canonical models

Amb el pas dels anys, la modelització macroeconòmica ha divergit substancialment, tant en objectius com en enfocaments, donant lloc a una gran varietat de prismes per observar i interpretar els fenòmens econòmics.

Per tal d'elaborar una anàlisi sistemàtica i comparar les principals línies actuals, els diferents models tradicionals s'han situat dins d'un espai conceptual tridimensional definit per tres eixos: la granularitat, la topologia i l'evolució temporal.

D'una banda, la granularitat fa referència al grau de detall del model, és a dir, si es treballa amb agregats, agents representatius o agents individuals.

D'altra banda, la topologia descriu si els agents interactuen explícitament entre si o si es consideren aïllats.

Finalment, l'evolució temporal estableix com el model evoluciona en el temps, ja sigui de forma estàtica, discreta o contínua.

Aquest espai conceptual permet classificar els models macroeconòmics en diferents tipologies, caracteritzant la classe de problemes que poden resoldre.

Així, els models que comparteixen una mateixa tipologia poden entendre's com a membres d'una mateixa família, com és el cas del marc desenvolupat i dels models basats en agents o ABMs.

Estat de l'art

Més que un ABM

Dimension	VAR	CGE	IO	SFC	OLG	DSGE	ABM	Proposed Framework
Micro-representation	-	-	-	-	-	-	+	+
Dynamical analysis	+	-	-	+	+	+	+	+
Behavioral inference	-	-	-	-	-	-	-	+
Visual analytics	-	-	-	-	-	-	-	+
Traceability	-	+	+	+	+	+	-	+
Institutional applicability	+	+	+	+	+	+	-	+
Computational efficiency	+	+	+	+	+	+	-	-

Table 2.2: Benchmarking relative to canonical models

Legend: "-" := non-native application; "+" := native application.

Tot i que el marc proposat i els ABMs pertanyin a la mateixa família conceptual, l'exercici comparatiu revela diferències rellevants en les seves aplicacions natives.

En primer lloc, mentre que els ABMs acostumen a programar el comportament dels agents mitjançant regles heurístiques definides a priori, el model proposat infereix el comportament dels agents a partir de l'observació.

Com a conseqüència directa, el marc desenvolupat permet rastrejar explícitament la macro-dinàmica del sistema a partir de les accions individuals, resolent un dels principals problemes d'opacitat associats als ABMs tradicionals.

Addicionalment, el model incorpora de manera nativa l'ús de software de visualització en temps real, el qual permet observar directament les interaccions entre agents i l'evolució dels fluxos monetaris.

Gràcies a la combinació d'aquestes innovacions, el marc desenvolupat es configura com una eina transparent i auditable, fet que facilita la seva adopció en entorns institucionals.

Marc teòric

Modelant l'economia com un graf únic

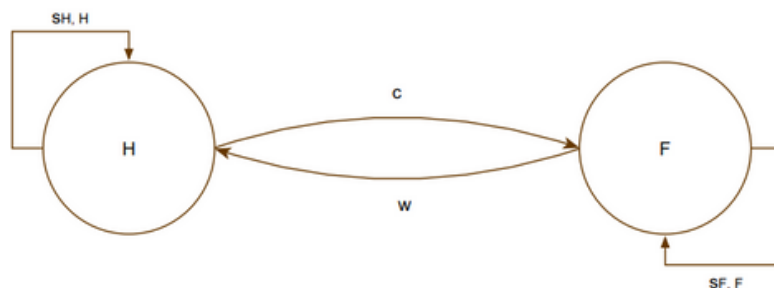


Figure A.1: Household and firm economy

Matriu de fluxos

$$S_t = \begin{bmatrix} s_t^{H,H} & c_t \\ w_t & s_t^{F,F} \end{bmatrix}$$

Tenint en compte el caràcter conceptual del treball, el principal objectiu no esdevé tant la validació empírica immediata com el disseny d'un model teòric coherent i consistent.

Per presentar aquest marc teòric de manera il·lustrativa i facilitar la seva comprensió, l'explicació es recolza en l'annex A de la memòria, el qual descriu la mínima expressió d'una economia no trivial formada per dos agents: una família i una empresa.

A la figura de la diapositiva es mostra explícitament com aquests dos agents participen en la xarxa econòmica.

En primer lloc, la família treballa i genera un benefici per l'empresa.

A partir d'aquest benefici, l'empresa, d'una banda, retribueix la família amb un salari i, de l'altra, genera un estalvi.

Finalment, amb el salari percebut, la família compra béns per a la seva subsistència a la mateixa empresa i genera, alhora, el seu propi estalvi.

Per tal de facilitar l'operativitat matemàtica d'aquest sistema, la xarxa econòmica pot reescriure's com una matriu de fluxos monetaris, equivalent a una matriu d'adjacència tradicional.

En aquesta representació, cada fila, identificada per l'estalvi del corresponent agent, recull les seves despeses o outputs, introduint així el concepte fonamental de restricció comptable.

Marc teòric

Definint les regles
de la dinàmica

Restricció comptable

$$R_t^H := c_t - w_t + s_t^{H,H} - s_{t-1}^{H,H} = 0 \quad \forall t \in \mathbb{N},$$

$$R_t^F := w_t - c_t + s_t^{F,F} - s_{t-1}^{F,F} = 0 \quad \forall t \in \mathbb{N},$$

Inferència del comportament

$$s_t^{H,H} = \left(\frac{1}{\Omega_t^H} - 1 \right) c_t, \quad s_t^{F,F} = \left(\frac{1}{\Omega_t^F} - 1 \right) w_t$$

En primer lloc, la restricció comptable constitueix l'expressió formal que integra totes les interaccions monetàries d'un agent segons la seva posició dins del graf, garantint que, en cada instant, només es gestionin els recursos monetaris disponibles, tot satisfent la seva identitat comptable.

Sobre aquesta base, el comportament dels agents es descriu mitjançant el factor de propensió, definit com la relació entre un flux monetari discrecional i els recursos monetaris totals disponibles per a la seva assignació, reflectint així la preferència de l'agent per aquella interacció concreta.

A tall d'exemple, en el cas de la família, la restricció comptable garanteix que el salari percebut més els estalvis anteriors es reparteixin en la seva totalitat entre el consum i l'estalvi actual, mentre que el factor de propensió al consum recull la proporció de l'ingrés disponible que es destina al consum.

A partir d'aquesta formulació, la inferència del comportament no s'imposa mitjançant regles heurístiques definides a priori, sinó que es fonamenta en la deducció funcional de l'expressió matemàtica que relaciona els fluxos monetaris discrecionals amb el factor de propensió.

Marc teòric

Reconstruint
l'evolució de
l'economia

$$\begin{pmatrix} c_t \\ w_t \\ s_t^{H,H} \\ s_t^{F,F} \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\Omega_t^H \Omega_t^F} - 1 \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{\Omega_t^F} & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \frac{1}{\Omega_t^H} \\ 0 & 0 & \left(\frac{1}{\Omega_t^H} - 1 \right) \frac{1}{\Omega_t^F} & \left(\frac{1}{\Omega_t^H} - 1 \right) \\ 0 & 0 & \left(\frac{1}{\Omega_t^F} - 1 \right) & \left(\frac{1}{\Omega_t^F} - 1 \right) \frac{1}{\Omega_t^H} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_{t-1} \\ w_{t-1} \\ s_{t-1}^{H,H} \\ s_{t-1}^{F,F} \end{pmatrix}$$

D'aquesta manera, combinant la restricció comptable amb la inferència del comportament, és possible caracteritzar l'evolució temporal de l'economia en funció dels estats previs, donant lloc a un sistema dinàmic discret governat per les preferències dels agents.

És a dir, l'estat de la xarxa en cada període depèn exclusivament de com els agents gestionen els seus recursos.

Justament aquest és el nucli del treball: formalitzar l'economia com una xarxa interconnectada en què la macro-dinàmica emergeix i és traçable de manera natural a partir de les decisions individuals dels agents.

Marc teòric

Reinterpretant la
xarxa com un
sistema dinàmic
discret

*“L’aleteig d’una papallona al
Brasil pot desencadenar un
tornado a Texas.”*

Edward Lorenz

Un cop formulada l’expressió dinàmica del sistema, és possible analitzar-ne l’evolució global de la xarxa.

Així com Edward Lorenz va mostrar que les trajectòries dels sistemes dinàmics complexos són altament sensibles a les condicions inicials, els canvis sobtats en el comportament dels agents poden modificar significativament l’evolució de la xarxa econòmica.

L’estudi de la macro-dinàmica del sistema es fonamenta en l’estudi d’aquestes trajectòries, en particular mitjançant el radi espectral de la matriu de transició de la diapositiva anterior.

En funció del valor d’aquest radi espectral, és possible determinar si l’economia col·lapsa, divergeix o bé es reestabilitza després d’un xoc.

Aquest enfocament permet estudiar i comparar trajectòries hipotètiques, facilitant la simulació d’escenaris tant a curt com a llarg termini, especialment rellevants en el context d’intervencions polítiques.

Prova de concepte

Presentant el disseny gràfic



Figure 3.1: Computational proof of concept

Amb el marc teòric i la seva formulació dinàmica definida, aquesta tesi de màster desenvolupa una prova de concepte amb l'objectiu de validar la coherència interna i l'operativitat del model proposat, tot facilitant alhora la seva exploració i interpretació dinàmica.

En concret, el prototip es materialitza en una simulació computacional basada en la xarxa econòmica descrita a l'annex A de la memòria i composta per dues pantalles: la primera, per configurar els paràmetres inicials de la simulació; i la segona, per visualitzar l'evolució de l'economia.

Prova de concepte

Establir l'arquitectura del projecte

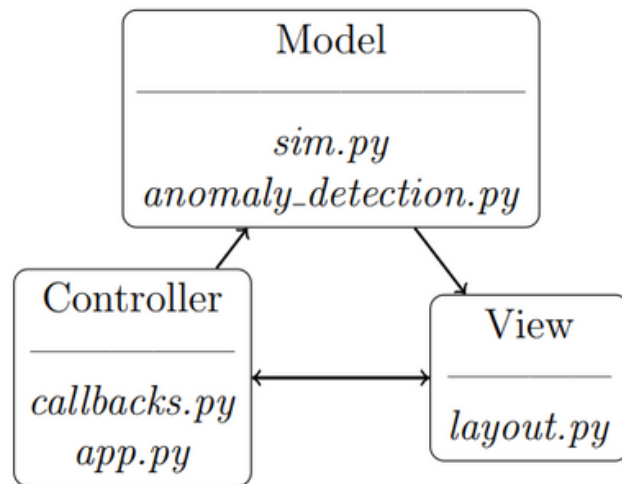


Figure 3.2: Model-View-Controller design

Pel que fa al disseny del prototip, la prova de concepte s'ha estructurat seguint una arquitectura de tipus Model-View-Controller, organitzant el sistema en tres components principals: la simulació, la visualització i el controlador.

D'una banda, la simulació constitueix el nucli del sistema i determina l'evolució de la dinàmica al llarg del temps.

D'altra banda, la visualització representa aquest estat del sistema mitjançant components gràfics, permetent observar l'evolució i identificar patrons rellevants.

Per acabar, el controlador coordina el funcionament global del prototip, gestionant tant el desenvolupament normal de la simulació com la interacció amb l'usuari.

A través d'aquesta arquitectura, l'estat de la simulació influeix contínuament en la visualització, mentre que les accions de l'usuari, canalitzades pel controlador, poden modificar el curs de l'execució i actualitzar la representació del sistema.

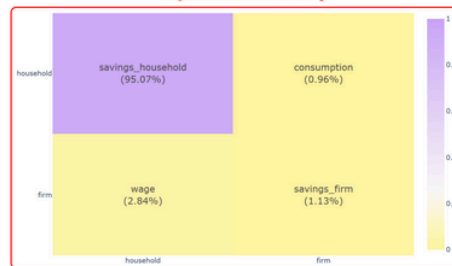
Prova de concepte

Implementant els components visual

Economic Network - Dashboard

Stop and go back

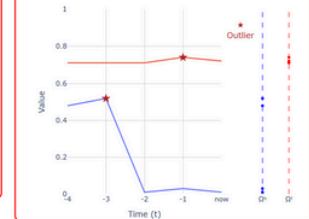
Dynamical heatmap



Interactive slide-bars



Historical propensity data



Historical time series

Figure 3.4: Dashboard components

En relació amb el panell de control, els components visuals s'han dissenyat per monitoritzar el comportament de l'economia.

A l'esquerra, s'incorpora una representació gràfica de la xarxa de fluxos monetaris entre agents, identificant vies d'alta concentració del diner.

En el superior dret, s'integren elements d'interacció que permeten modificar a voluntat les preferències dels agents en temps real, facilitant l'exploració d'escenaris i simulant els efectes de la propagació de xocs dins la xarxa econòmica.

En l'inferior dret, s'inclou una sèrie temporal que recull l'evolució dels factors de propensió dels agents, monitoritzant i detectant l'origen de les pertorbacions.

En conjunt, els tres components permeten supervisar l'evolució de les micro-interaccions, donant peu a l'anàlisi macro-dinàmic i establint el dashboard com una eina tant per a la recerca com per a entorns aplicats.

Reflexions finals

Conclusions,
limitacions i treball
futur

Eric Farran Moreno
Master en Ciència de Dades



En conclusió, aquest treball estableix un marc integrat i inèdit per a modelar economies com a xarxes dinàmiques d'agents interconnectats.

En específic, la contribució principal es concreta en un marc teòric unificat que combina grafs, inferència del comportament i anàlisi espectral, facilitant la traçabilitat dels fenòmens macroeconòmics a través de les accions dels agents i presentant una prova de concepte funcional mitjançant un dashboard interactiu pensat pel monitoratge i simulació d'escenaris.

Malgrat les limitacions identificades, així com la selecció dels fluxos discrecionals o el cost computacional, el treball obre les portes a la validació empírica del model, a la seva aplicació en l'exploració d'escenaris polítics o econòmics i a l'avanç en la recerca teòrica sobre aquest tipus de grafs.

Per acabar només emfatitzar que aquest marc formalitza amb rigor l'economia com un organisme autònom i interconnectat, indissociable de les parts que la componen.

Permetent entendre com una decisió individual pot propagar-se i afectar tota la xarxa.

Fins aquí la presentació del meu TFM, moltes gràcies.