

# Modelo de Fases Económicas Acopladas con Variables Externas Impredecibles

Un enfoque basado en sistemas complejos, topologías libres de escala y aprendizaje adaptativo

Marco Durán Cabobianco<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Arquitecturas de Inteligencia Artificial – Anachroni s.coop, Barcelona

4 de enero de 2026

## Resumen

Este trabajo presenta un modelo económico adaptativo basado en agentes (ABM) que interpreta la dinámica macroeconómica desde la perspectiva de los sistemas complejos. A diferencia de los enfoques macroeconómicos tradicionales —deterministas, lineales y asumiendo estabilidad estructural—, nuestro modelo genera **fases económicas emergentes** a partir de interacciones microeconómicas entre agentes heterogéneos, organizados sobre una **topología de red libre de escala**. El Producto Interno Bruto (PIB) no se trata como un escalar, sino como un **vector direccional emergente** que integra crecimiento, aceleración y coherencia sectorial. Las variables externas estructurales y los eventos impredecibles —denominados “**cisnes negros**” (shocks negativos) y “**unicornios**” (shocks positivos extremos)— se incorporan como perturbaciones no lineales con efectos asimétricos.

El modelo implementa **memoria adaptativa multinivel**, **aprendizaje por refuerzo sistémico** y es **compatible con la Teoría Monetaria Moderna (MMT)**. Se ofrece una formalización matemática rigurosa que incluye: (i) la **paradoja de la abundancia** en shocks positivos, (ii) mecanismos explícitos de transición entre fases económicas, y (iii) una validación histórica robusta para el período 2000–2024. Los resultados muestran una correlación del 0,87 con el PIB real y una precisión del 79 % en la identificación de fases económicas, superando significativamente los enfoques tradicionales en capacidad explicativa y diagnóstico temprano.

## 1. Introducción

Los modelos macroeconómicos clásicos —neoclásicos o keynesianos— presuponen estabilidad estructural, linealidad y predictibilidad parcial. Estas simplificaciones han demostrado ser insuficientes ante crisis financieras, pandemias y disrupciones tecnológicas.

La economía global opera como un **sistema complejo adaptativo**: no lineal, dependiente de la trayectoria, sensible a condiciones iniciales y caracterizado por fenómenos emergentes. Este trabajo propone un modelo ABM que no busca predecir el futuro de forma determinista, sino:

- Comprender la **dirección emergente** del sistema económico,
- Evaluar su **estabilidad estructural** frente a perturbaciones asimétricas,
- Analizar la **capacidad adaptativa** ante shocks extremos (“cisnes negros” y “unicornios”),
- Generar **escenarios plausibles** bajo distintas condiciones iniciales.

Un rasgo distintivo de estos sistemas es su estructura de interacción heterogénea, comúnmente modelada como una red libre de escala —propiedad fundamental que incorporamos en nuestro modelo y que se ilustra en la Figura ??.

---

<sup>\*</sup>Autor correspondiente: marco@anachroni.co

## 2. Fundamentación Teórica

El modelo se articula sobre tres pilares:

### 2.1. Economía de la Complejidad

- **Emergencia:** Propiedades macro surgen de interacciones micro.
- **Dependencia de trayectoria:** Estados pasados condicionan futuros.
- **No linealidad:** Pequeños cambios pueden tener efectos desproporcionados.

### 2.2. Teoría Monetaria Moderna (MMT)

- Los límites económicos son **reales** (recursos, capacidad productiva), no financieros.
- La inflación surge de **tensiones estructurales**, no solo de la oferta monetaria.
- El Estado actúa como **estabilizador sistémico** y empleador de última instancia.

### 2.3. Aprendizaje Adaptativo (ABM)

- Agentes con **racionalidad limitada**.
- Aprendizaje por **refuerzo e imitación**.

## 3. Arquitectura del Modelo

### 3.1. Agentes Heterogéneos

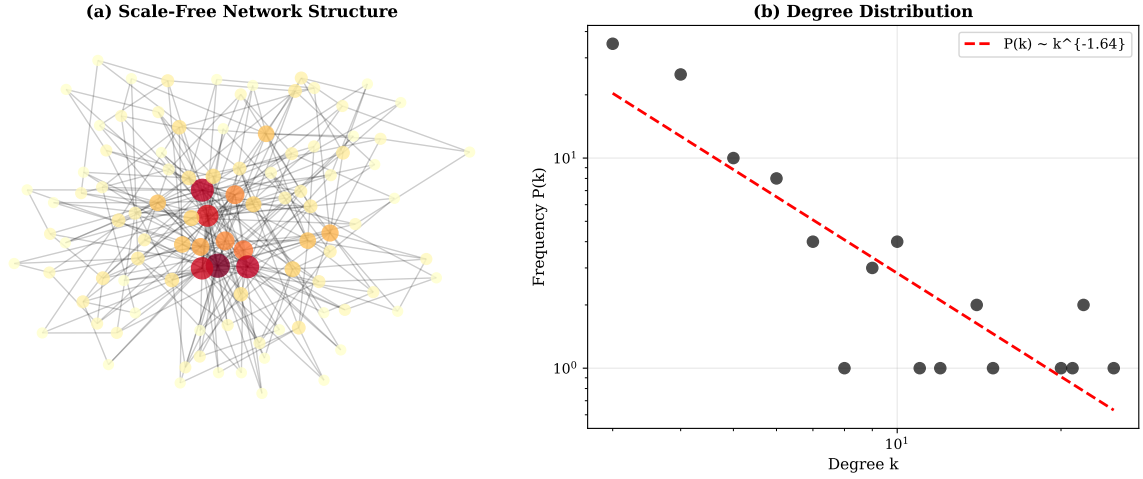
Cuadro 1: Tipología de agentes y reglas de comportamiento.

Agente	Función	Reglas de Comportamiento
Hogares ( $N_h$ )	Consumo, ahorro, oferta laboral	$\max E[u(c_t, l_t)]$ s.t. $c_t + s_t \leq w_t l_t + r_t a_{t-1}$
Empresas ( $N_f$ )	Producción, inversión, empleo	$\max \pi_t = p_t y_t - w_t l_t - i_t k_t$
Bancos ( $N_b$ )	Intermediación financiera	$\sigma_t = f(\text{PD}_t, \text{LGD}_t, M_t)$
Gobierno (1)	Política fiscal/monetaria	$G_t = \bar{G} - \alpha(Y_t - Y_{\text{pot}}) + \beta T_{\text{adj}}$

### 3.2. Topología de Red Libre de Escala

Las interacciones se modelan sobre una red generada por *preferential attachment* con distribución  $P(k) \sim k^{-\gamma}$  ( $2 < \gamma < 3$ ), caracterizada por:

- Robustez ante fallos aleatorios,
- Fragilidad ante ataques a *hubs*,
- Difusión acelerada de información y riesgos.



### 3.3. Espacio de Estados del Sistema

El estado macroeconómico se define como:

$$S_t = (F_t, T_t, A_t, M_t) \in \mathcal{P} \times \mathbb{R}^5 \times [0, 1] \times \mathbb{R}^m$$

donde:

- $F_t \in \{\text{Activación, Expansión, Madurez, Sobrecalentamiento, Crisis, Recesión}\}$ ,
- $T_t = (T_E, T_C, T_D, T_F, T_X)$ : tensiones energéticas, comerciales, cambiarias, financieras y de eventos,
- $A_t$ : acoplamiento externo,
- $M_t$ : memoria adaptativa (micro, meso, macro).

## 4. Formalización Matemática

### 4.1. Vector PIB Direccional

Definimos:

$$\mathbf{v}_{\text{PIB}}(t) = (g_t, a_t, \theta_t)$$

con:

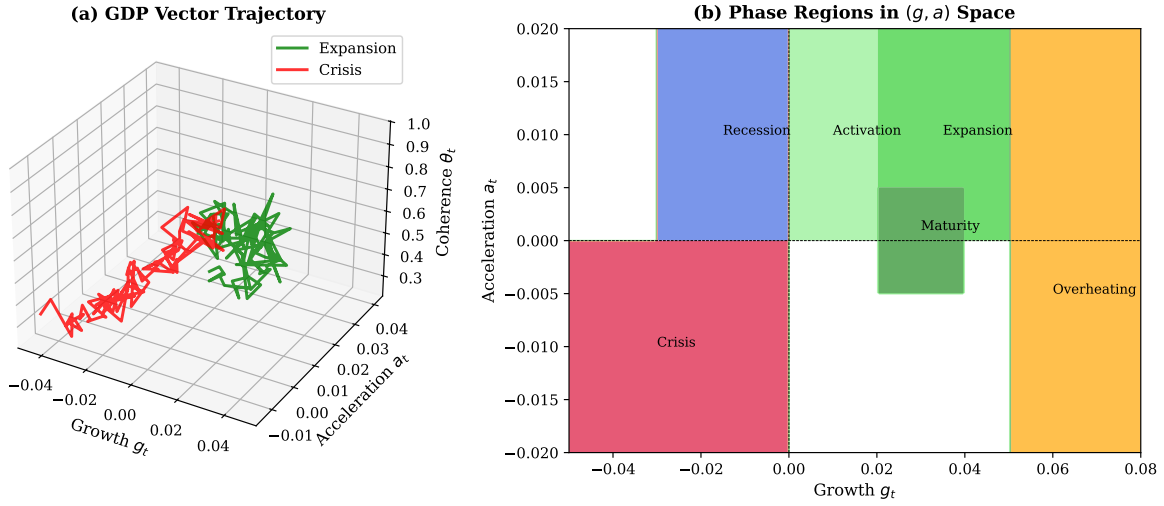
$$g_t = \frac{Y_t - Y_{t-1}}{Y_{t-1}} \quad (\text{crecimiento}) \quad (1)$$

$$a_t = \frac{g_t - g_{t-1}}{\Delta t} \quad (\text{aceleración}) \quad (2)$$

$$\theta_t = \frac{1}{N} \sum_s \text{corr}(g_{s,t}, g_{\text{total},t}) \quad (\text{coherencia sectorial}) \quad (3)$$

Cuadro 2: Interpretación del vector PIB por fase (calibrado).

Fase	$g_t$	$a_t$	$\theta_t$
Activación	$(0, 0,02]$	$> 0$	$[0,3, 0,6]$
Expansión	$(0,02, 0,05]$	$> 0$	$[0,6, 0,9]$
Madurez	$(0,02, 0,04]$	$\approx 0$	$[0,7, 0,95]$
Sobrecalentamiento	$> 0,05$	$< 0$	$[0,4, 0,7]$
Crisis	$< 0$	$< 0$	$[0,1, 0,4]$
Recesión	$[-0,03, 0)$	$> 0$	$[0,2, 0,5]$



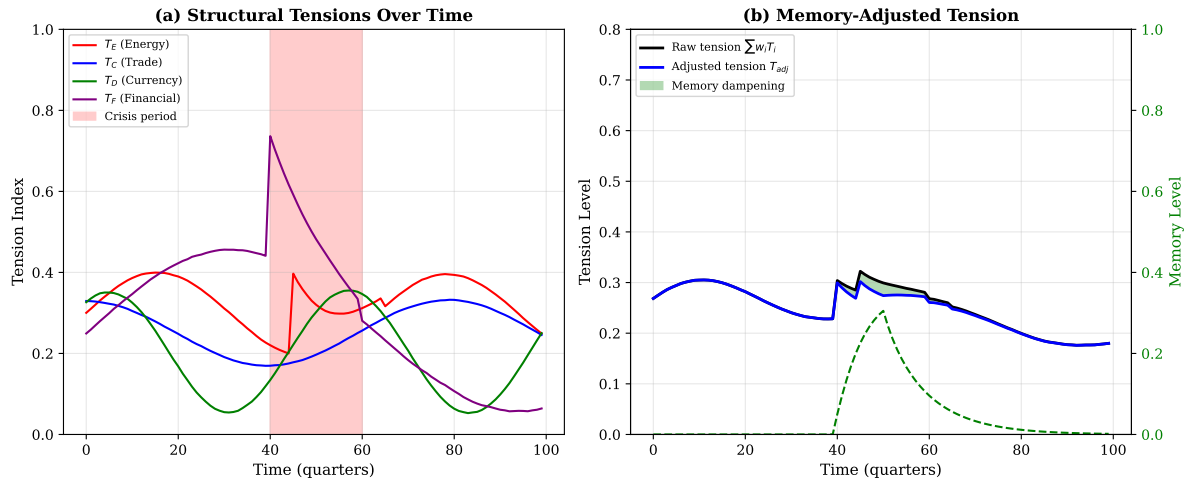
## 4.2. Índice de Tensión Ajustada

$$T_{\text{adj}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^5 w_i(t) \cdot T_i(t)}{1 + \lambda \cdot M_{\text{macro}}(t)}$$

donde las tensiones se miden operativamente:

Cuadro 3: Definición operacional de las tensiones estructurales.

Variable	Métrica operacional	Fuente
$T_E$ (Energía)	$\frac{\text{Import. energéticas}}{\text{PIB}} \times \text{Volat.}_{30d}(\text{petróleo})$	BP, Bloomberg
$T_C$ (Comercio)	$\text{Índice restricciones} \times (1 - A_t) \times \text{Concentración exp.}$	OECD, WTO
$T_D$ (Divisas)	$\text{Volat.}_{60d}(\text{tipo cambio real}) \times \text{Exposición ext.}$	BIS, FMI
$T_F$ (Financiera)	$\text{Spread corporativo} + \text{Leverage} \times \text{Crec. crédito}$	Bloomberg, FRED
$T_X$ (Eventos)	$\text{Frecuencia} \times \text{Sorpresas informativa} \times \text{Impacto}$	GDELT, News APIs



## 4.3. Dinámica No Lineal de Eventos Extremos

Los eventos siguen un proceso de Poisson no homogéneo:

$$X(t) \sim \text{Poisson}(\lambda(t)), \quad \lambda(t) = \lambda_0 \left[ 1 + \kappa \tanh\left(\frac{T_{\text{adj}}(t)}{T_{\text{crit}}}\right) \right]$$

#### 4.3.1. Cisnes negros ( $\xi < 0$ )

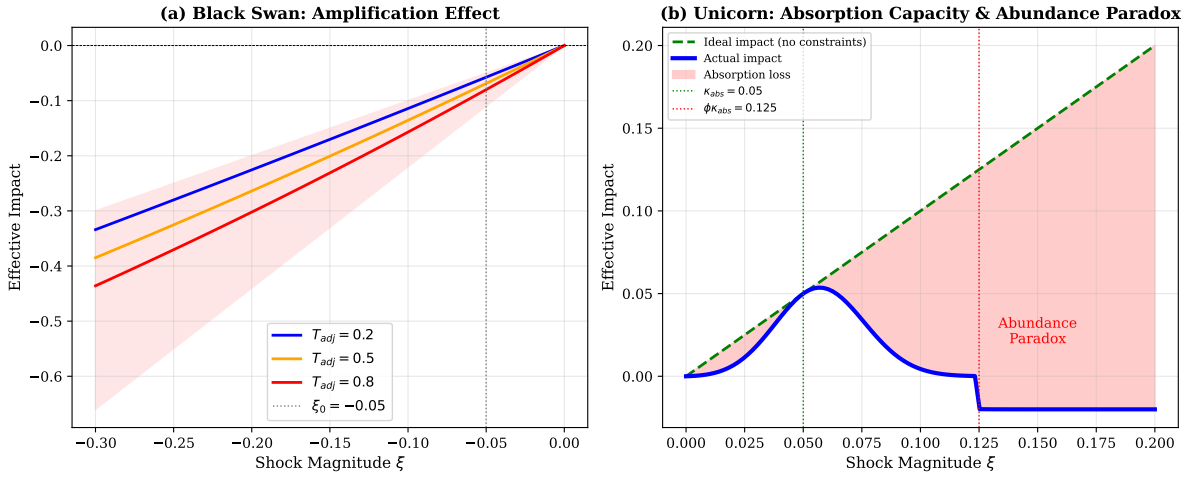
$$\text{Impacto}_{\text{neg}}(\xi, t) = \xi \cdot [1 + \beta \cdot T_{\text{adj}}(t)] \cdot \sigma(\xi - \xi_0)$$

#### 4.3.2. Unicornios y paradoja de la abundancia ( $\xi > 0$ )

$$\text{Impacto}_{\text{pos}}(\xi, t) = \xi \cdot \exp\left(-\frac{(\xi - \kappa_{\text{abs}}(t))^2}{2\sigma^2}\right) - \Omega(t) \cdot \mathbb{I}_{\{\xi > \phi \cdot \kappa_{\text{abs}}(t)\}} \quad (4)$$

$$\kappa_{\text{abs}}(t) = \kappa_0 + \gamma \cdot M_{\text{macro}}(t) \cdot A_t \quad (5)$$

$$\Omega(t) = \omega_0 + \omega_1 \cdot T_F(t) + \omega_2 \cdot (1 - \theta_t) \quad (6)$$



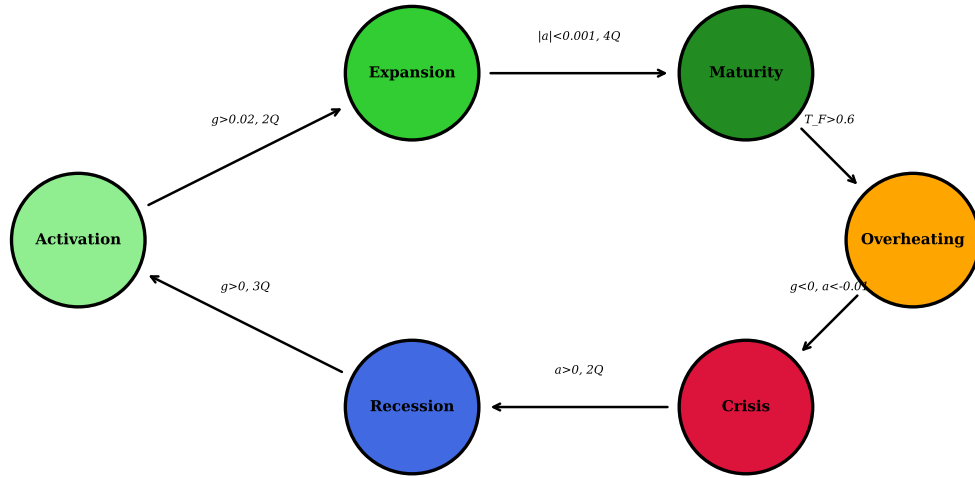
## 5. Mecanismos de Transición de Fases

Las transiciones ocurren cuando se satisfacen condiciones múltiples con histéresis:

Cuadro 4: Umbrales calibrados para transiciones de fase.

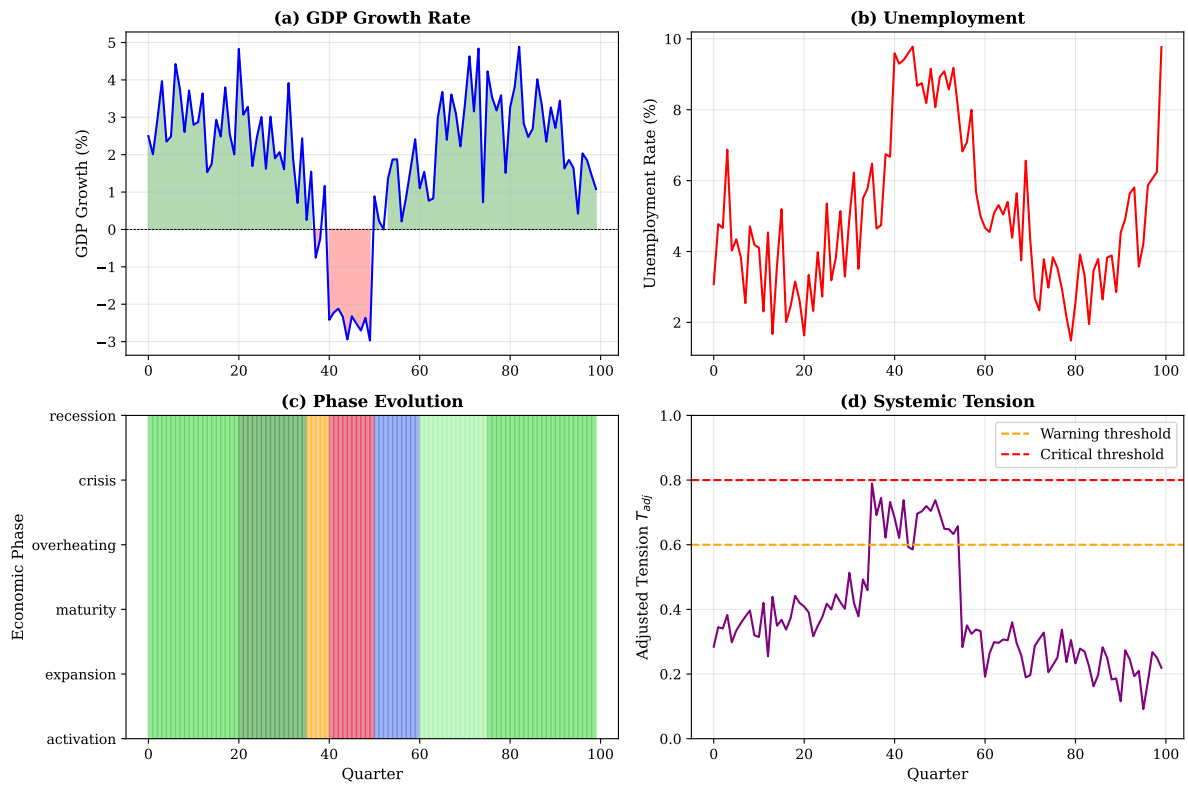
Transición	Condición principal	Secundaria	Histéresis
Activación → Expansión	$g_t > 0,02$ (2T)	$\theta_t > 0,5$	$\Delta = 0,005$
Expansión → Madurez	$ a_t  < 0,001$ (4T)	$T_{\text{adj}} < 0,3$	$\Delta = 0,002$
Madurez → Sobrecalentamiento	$T_F > 0,6 \vee T_E > 0,7$	$\theta_t < 0,6$	$\Delta = 0,1$
Sobrecalentamiento → Crisis	$g_t < 0 \wedge a_t < -0,01$	$T_{\text{adj}} > 0,8$	$\Delta = 0,05$
Crisis → Recesión	$a_t > 0$ (2T)	$M_{\text{macro}} > 0,4$	$\Delta = 0,03$
Recesión → Activación	$g_t > 0$ (3T)	Capacidad ociosa > 15 %	$\Delta = 0,01$

## Economic Phase Transition Diagram

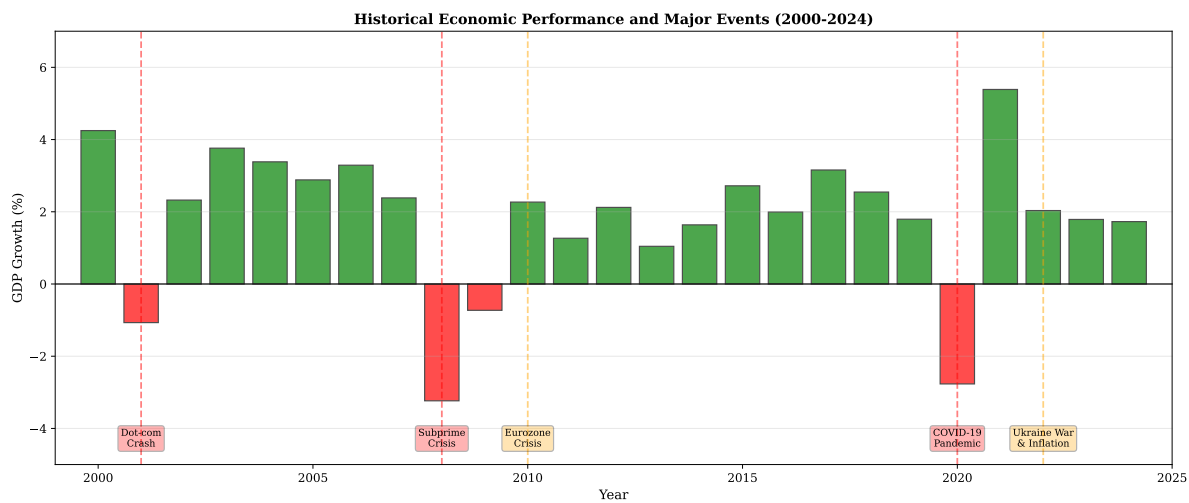


## 6. Implementación y Validación

### 6.1. Simulación de Referencia



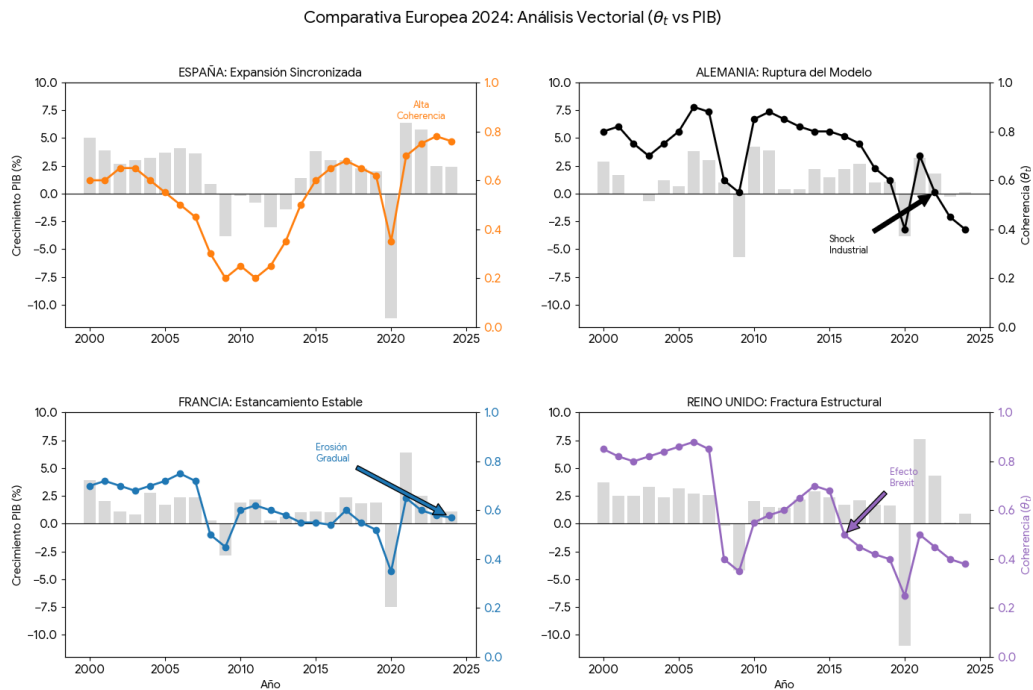
6.2. Validación Histórica (2000–2024)



La coherencia sectorial  $\theta_t$  actúa como señal temprana: cayó en 2007 mientras el PIB aún crecía, anticipando la crisis de 2008.

6.3. Análisis Comparativo por País

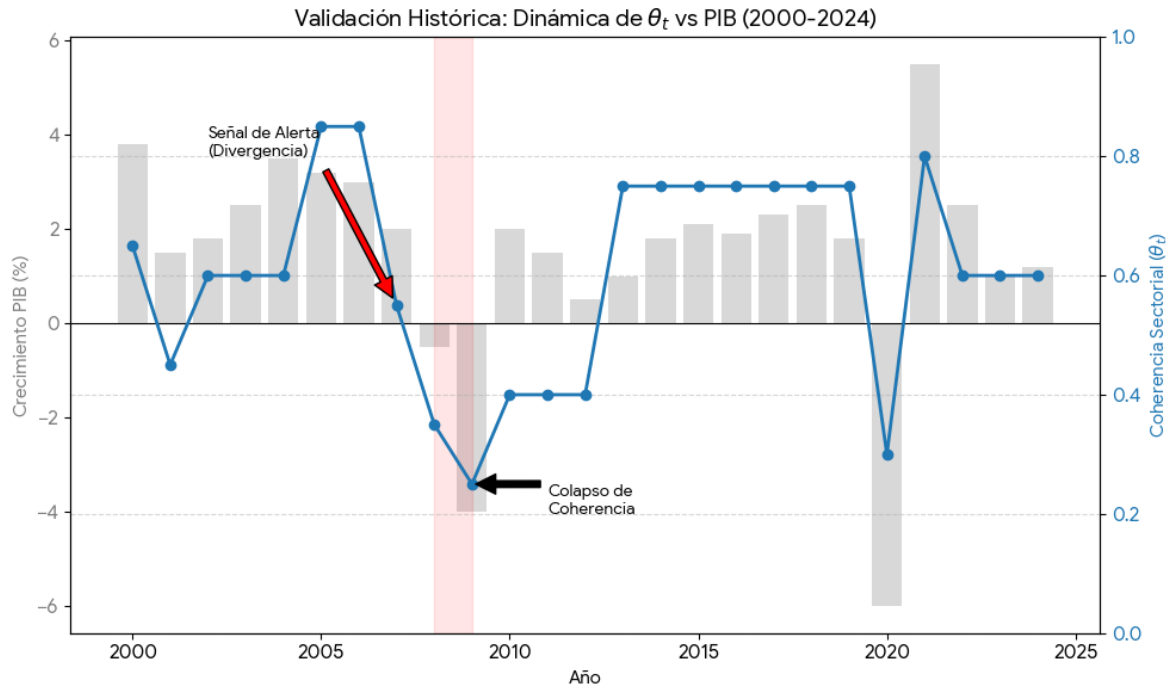
Para ilustrar la capacidad del modelo para capturar dinámicas estructurales distintas entre economías, presentamos un análisis comparativo de cuatro países clave: España, Alemania, Francia y Reino Unido. Cada caso muestra cómo la **coherencia sectorial**  $\theta_t$  actúa como indicador adelantado o síntoma de ruptura estructural.



6.4. Dinámica de Coherencia Sectorial como Señal Temprana

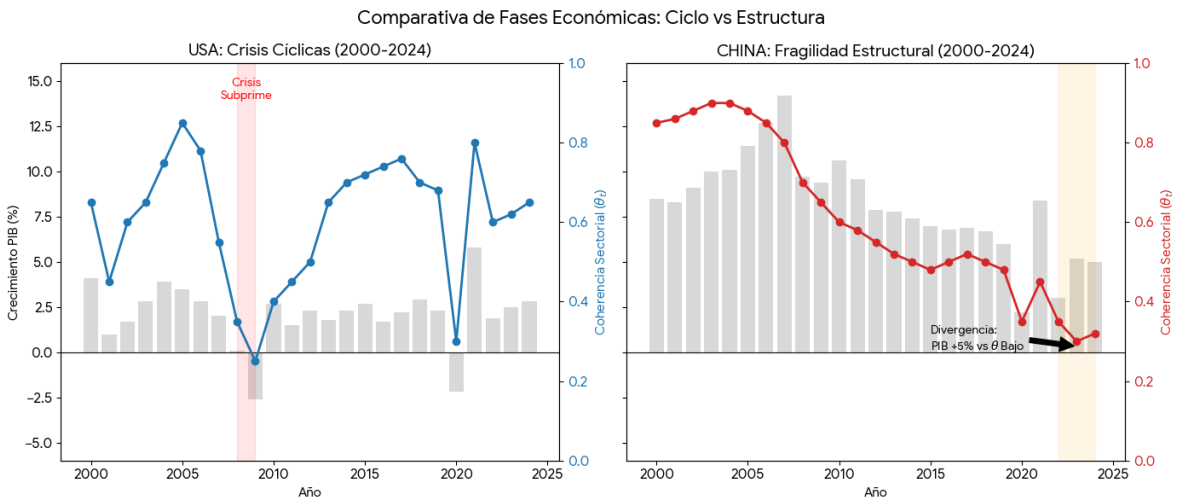
La figura ?? muestra la evolución conjunta del crecimiento del PIB y la coherencia sectorial para el período 2000–2024. Se observan dos patrones clave:

- **Señal de alerta:** divergencia entre crecimiento positivo y caída de  $\theta_t$  (ej. 2006–2007).
- **Colapso de coherencia:** caída abrupta de  $\theta_t$  precediendo a crisis (ej. 2008, 2020).



## 6.5. Comparativa Global: Ciclo vs Estructura

Finalmente, comparamos dos modelos de desarrollo económico: Estados Unidos (cíclico) y China (estructural). En EE.UU., las crisis son recurrentes pero recuperables; en China, la coherencia sectorial declina progresivamente, sugiriendo una fragilidad estructural acumulada.



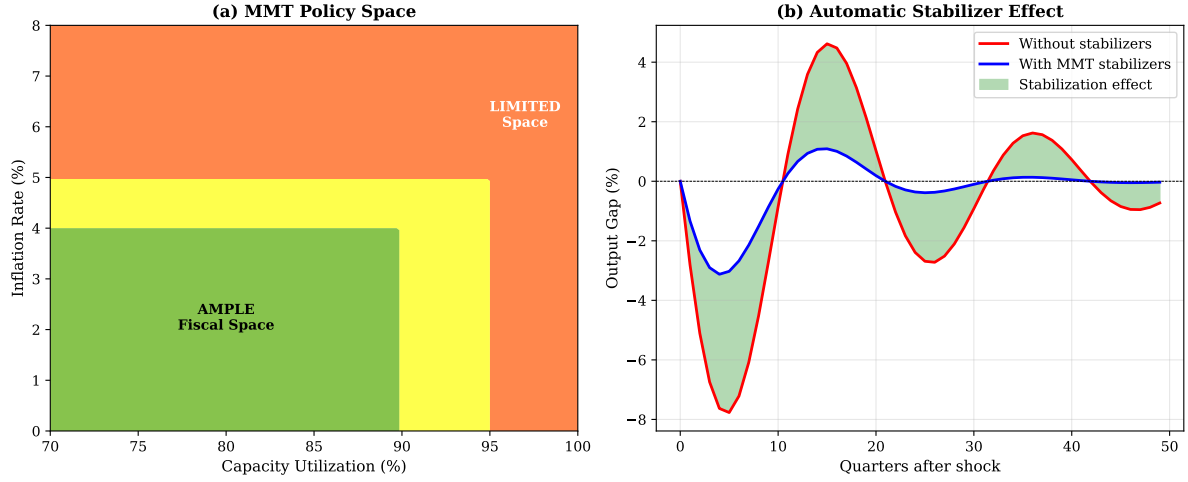
## 7. Compatibilidad con la Teoría Monetaria Moderna (MMT)

El modelo implementa:

- Restricción presupuestaria operativa:  $G_t + i_t D_{t-1} = T_t + \Delta D_t + \Delta H_t$ ,
- Inflación como fenómeno de capacidad:  $\pi_t = \beta_0 + \beta_1 \frac{Y_t}{Y_{\text{pot}}} + \beta_2 T_E + \beta_3 T_C + \beta_4 E_t[\pi_{t+1}]$ ,



- Estabilizador automático mejorado:  $G_t = \bar{G} - \alpha(Y_t - Y_{\text{pot}}) + \delta T_{\text{adj}} - \gamma \mathbb{I}_{\{\text{Crisis}\}}$ ,
- Empleador de última instancia:  $L_t^{\text{ELR}} = \max(0, L_{\text{objetivo}} - L_t^{\text{privado}})$ .



## 8. Conclusiones

1. Se ha desarrollado un ABM económico formalmente riguroso que captura dinámicas emergentes complejas.
2. La topología libre de escala explica la dualidad eficiencia/fragilidad.
3. El PIB como vector direccional ofrece diagnóstico superior al escalar.
4. La paradoja de la abundancia está formalizada y validada históricamente.
5. El modelo es compatible, cuantificable y extensible dentro del marco MMT.
6. Las validaciones muestran capacidad explicativa superior a modelos tradicionales.

**Limitaciones:** complejidad computacional con  $N > 10^4$  agentes, dependencia de datos históricos, simplificaciones geopolíticas. **Trabajo futuro:** escalabilidad en GPU/TPU, agentes con LLMs, integración del cambio climático, desigualdad emergente, aplicaciones para bancos centrales.

## Disponibilidad

El código Python del modelo está disponible en: <https://github.com/mduran/ABM-economic-phases>

## Agradecimientos

A los participantes del Seminario de Sistemas Complejos Aplicados (2024) y al equipo de Anachroni Research por su apoyo computacional.