



Análisis de la Capacidad de Transformación, el Desorden Estructural y la Trayectoria de Sistemas Complejos: Un Marco para la Predicción Socioeconómica

Alan Alberto Ramírez Guevara⁶⁷

Resumen

Este estudio presenta una propuesta teórica y metodológica para el diagnóstico socioeconómico basada en la econofísica de los Sistemas Complejos Adaptativos (CAS). La fundamentación para el modelo del Destino Sistémico (D) se deriva del teorema de Gouy-Stodola y la termodinámica de procesos irreversibles, permitiendo cuantificar la pérdida de trabajo útil mediante el acoplamiento entre la *temperatura* socioeconómica (T) y el exceso de *entropía* ($S-S_{crit}$). Aplicado al caso de México (2005-2026), el marco operacionaliza la *exergía* sistémica (B) y el umbral de entropía crítica (S_{crit}) para identificar fases de estancamiento estructural. Los resultados ilustrativos sugieren que, bajo los supuestos del modelo, mantener la informalidad por debajo del umbral operacional propuesto favorece trayectorias de mayor capacidad de autoorganización y productividad colectiva.

Palabras clave: *econofísica, sistemas complejos adaptativos, exergía social, entropía crítica, políticas públicas.*

⁶⁷ Universidad Abierta y a Distancia de México email: alanalberto.ramirezgue@nube.unadmexico.mx



Abstract

This research presents a theoretical and methodological proposal for socioeconomic diagnosis rooted in the econophysics of Complex Adaptive Systems (CAS). The foundation for the Systemic Destiny (D) model is derived from the Gouy-Stodola theorem and non-equilibrium thermodynamics, enabling the quantification of lost useful work through the coupling of socioeconomic temperature (T) and excess entropy ($S - S_{crit}$). Applied to the Mexican case (2005–2026), the framework operationalizes systemic exergy (B) and the critical entropy threshold (S_{crit}). Results suggest that sustainable development requires reducing informality below the 54% threshold, allowing the system to spontaneously self-organize toward higher productivity and collective well-being. The study also establishes Popperian falsifiability criteria and provides a formal microstructural basis for exergy ($B = PTF / Gini$).

Keywords: *econophysics, complex adaptive systems, systemic exergy, critical entropy, public policy.*



Introducción: Propuesta Teórica y Alcance del Modelo

Es imperativo precisar que este trabajo constituye una propuesta teórica y metodológica para el diagnóstico socioeconómico, fundamentada en isomorfismos formales rigurosos con la termodinámica del no equilibrio. Aunque se incorpora una simulación cuantitativa aplicada al caso de México para el período de 2005 a 2026, dicho ejercicio posee un carácter cualitativo-ilustrativo orientado a operacionalizar el modelo y es compatible con la consistencia funcional de los parámetros propuestos. En este sentido, los resultados derivados de la simulación deben ser interpretados como hipótesis plausibles y líneas de investigación futuras, y no como verdades econométricas concluyentes, dado que el alcance primordial radica en el respaldo parcial del marco analítico.

Marco Teórico: Fundamentos Físicos y Económicos

Justificación Epistemológica de la Econofísica y los Isomorfismos Formales

El traslado de herramientas matemáticas de la física a la economía no es un fenómeno reciente. La economía neoclásica del siglo XIX adaptó la mecánica racional lagrangiana para modelar el comportamiento del consumidor, asumiendo la maximización de la utilidad bajo restricciones de presupuesto (Mirowski, 1989). Este tipo de transferencias interdisciplinarias se sustenta en el principio de isomorfismo formal, derivado de la Teoría General de Sistemas de Ludwig von Bertalanffy (1968). Bajo este principio, la validez científica de trasladar modelos entre disciplinas no descansa en analogías superficiales, sino en el descubrimiento de homologías lógicas.

Existe una homología lógica cuando las leyes matemáticas y formales que gobiernan la dinámica interna de dos sistemas en diferentes dominios de la realidad son idénticas. En este marco, los agentes económicos se conceptualizan formalmente como microestados cuyas configuraciones colectivas dan origen a propiedades macroscópicas emergentes (Chakraborti et al., 2011; Mantegna y Stanley, 1999). Asimismo, el Principio de Landauer (Landauer, 1961) aporta una base sólida para conceptualizar la temperatura socioeconómica



(T): se redefine como el costo monetario marginal indispensable para registrar, verificar o procesar un bit de información transaccional dentro del sistema (Landauer, 1961).

Tabla 1.

Comparativa de enfoques de isomorfismo físico-económico

Dimensión Analítica	Enfoque Neoclásico Tradicional	Enfoque de Equilibrio Estadístico	Enfoque de Exergía y Trabajo Útil	Enfoque de Desorden Sistémico Propuesto (D)
Concepto Termodinámico Base	Termodinámica clásica de sistemas cerrados.	Mecánica estadística y equilibrio de Shannon.	Primera y segunda ley de la termodinámica (exergía física).	Termodinámica de no equilibrio y sistemas abiertos disipativos.
Análogo de la Energía (E / H)	Utilidad individual (U) o riqueza.	Cantidad total de dinero o valor conservado.	Consumo de exergía primaria de recursos naturales y combustibles.	Entalpía social (acervo de infraestructura, capital humano y recursos).
Análogo de la Entropía (S)	Maximización de la utilidad como estado estacionario.	Entropía de información sobre transacciones.	Pérdidas energéticas inevitables en procesos de conversión.	Tasa de desorden estructural y fragmentación institucional (informalidad).

Fuente: elaboración propia

El punto de partida conceptual es tratar a las economías no como mecanismos de mercado en equilibrio, sino como Sistemas Complejos Adaptativos (CAS, por sus siglas en



inglés). Esta visión, promovida por autores como Holland (1992) y Beinhocker (2006), concibe la economía como un ecosistema de agentes (individuos, empresas, instituciones), que interactúan, se adaptan y co-evolucionan constantemente. En este marco, el sistema no tiende a un estado óptimo predefinido, sino que explora un paisaje de posibilidades en constante cambio.

Desde la física estadística, los agentes económicos pueden ser vistos como microestados, cuyas interacciones y configuraciones colectivas definen el macroestado observable del sistema (Mitchell, 2009). Este macroestado no se limita a magnitudes agregadas como el PIB, sino que también revela la estructura de las posibilidades futuras del sistema. Por ejemplo, una economía dominada por microempresas de subsistencia tendrá una trayectoria de desarrollo diferente a una con un enfoque industrial diversificado y consolidado, incluso si ambas presentan temporalmente la misma tasa de crecimiento económico. El uso de la complejidad en la economía ofrece un lenguaje más adecuado para describir estos fenómenos emergentes y no lineales que caracterizan a las sociedades humanas (Holt et.al., 2011).

Exergía Sistémica (B) y Trabajo Útil

Inspirado en la termodinámica, la *exergía sistémica (B)* se define como la capacidad máxima de una economía para convertir sus recursos y energía disponible en *trabajo útil*. El *trabajo útil* se manifiesta como crecimiento sostenible, innovación y movilidad social. En este marco teórico, la *exergía sistémica* se interpreta como la capacidad máxima de energía que puede ser efectivamente movilizada para una transformación dirigida, formulándose microestructuralmente como $B = PTF / Gini$.

Un sistema puede poseer una alta acumulación de recursos, capital, una población joven, recursos naturales, pero exhibir una baja *exergía* si sus fuerzas estructurales internas (como la desigualdad extrema o la rigidez institucional), o un nivel elevado de desorden impide su conversión efectiva. En este sentido, la *exergía* es contextual y depende de la organización interna del sistema. Lo que determina el potencial de desarrollo no es la



cantidad de recursos que una nación posee, sino su capacidad estructural para transformarlos en bienestar y progreso colectivo.

Entropía Social (S) y el Umbral Crítico (S_{crit})

La *entropía social* (S) mide la diversidad de estados y configuraciones del sistema, representando el grado de desorden estructural. El modelo introduce la *entropía crítica* (S_{crit}) como el punto de bifurcación donde el desorden genera fragmentación caótica. Por consiguiente, si $S > S_{crit}$, el sistema disipa energía en lugar de organizarse.

Conceptualmente, el umbral de S_{crit} funciona como un punto de inflexión. Si la informalidad y el desorden exceden este límite, el sistema inicia un proceso de estancamiento. En este escenario, el desorden se vuelve dominante y el sistema se caracteriza por ineficiencias y desigualdad, lo que dificulta la generación de una trayectoria positiva.

Una de las ideas centrales de Ramírez-Guevara (2021) es que el emprendimiento en América Latina, a pesar de ser numeroso, funciona principalmente como un mecanismo de supervivencia más que como un motor de innovación. Gran parte de la actividad empresarial surge de la necesidad de complementar ingresos familiares o como la única alternativa ante la falta de empleos de calidad. Esta motivación de subsistencia, combinada con un bajo nivel educativo entre los microempresarios, resulta en una aversión al riesgo y una escasa adopción de nuevas tecnologías, lo que limita estructuralmente la capacidad de las empresas para crecer, innovar y competir en mercados más amplios.

Expandiendo esta idea, Ramírez-Guevara y Vázquez-Ocaña (2024) sostienen que la falta de una cultura empresarial robusta es un problema fundamental que afecta a todo el ecosistema de mercado. Esta carencia se manifiesta en un entorno de competencia desleal, donde los negocios formales que invierten en calidad y buenas prácticas laborales deben competir con actores informales que reducen precios a costa de la precariedad. Este fenómeno desequilibra el mercado, reduce los márgenes de ganancia y desincentiva la inversión en el desarrollo de competencias centrales, que son la base para una ventaja competitiva sostenible. Estas condiciones de precariedad y competencia desleal son



precisamente las que definen un sistema de alta *entropía*. Cuando $S > S_{crit}$, el sistema entra en un estado donde la energía se disipa en lugar de organizarse. Un ejemplo claro es la informalidad laboral: un nivel moderado puede actuar como una solución temporal, pero cuando supera un umbral crítico (por ejemplo, más de la mitad de la fuerza laboral), deja de ser una fuente de resiliencia para convertirse en un impedimento estructural que disipa el esfuerzo productivo, que impide la acumulación de capital y tecnología, y conduce a un equilibrio de baja productividad. Esta transición de un estado de resiliencia a uno de estancamiento o colapso es un tema central en el estudio de sistemas socio-ecológicos, como lo describe la teoría de la panarquía (Gunderson y Holling, 2002).

Bajo esta óptica, el crecimiento sin desarrollo se interpreta como una ineficiencia en la conversión de recursos en bienestar. Como proponen Ayres y Warr (2005), el crecimiento está vinculado al trabajo físico extraído de la energía. En una economía, los flujos de capital que no encuentran cauces institucionales se disipan en estructuras de alto desorden como la informalidad o la corrupción, propiedades de marcos institucionales que inhiben la productividad.

Deducción Formal y Consistencia Metodológica

La trayectoria se define mediante la ecuación del Destino Sistémico (D), cuya operacionalización detallada se presenta en la Sección 3. Esta relación sostiene una homología con el teorema de Gouy-Stodola, estableciendo que la pérdida de trabajo útil ($W_{perdido}$) es proporcional a la temperatura y a la generación de entropía (Bejan, 2016).

La elección del modelo lineal se justifica al contrastarlo con formulaciones alternativas. La *formulación divisional* amortigua la degradación pero carece de consistencia con las leyes de conservación donde las pérdidas son aditivas; además, impide modelar colapsos netos ($D < 0$). La *formulación exponencial* es inadecuada para sistemas abiertos al tender asintóticamente a cero, fallando en representar la destrucción del capital base.

Tabla 2.

Comparación estructural de los modelos de trayectoria espacial



UANL FTSyDH



POLÍTICAS SOCIALES SECTORIALES

“Calidad e Innovación: Perspectiva contemporánea para la Educación Superior”



Propiedad	Modelo Lineal	Modelo Divisional	Modelo Exponencial
Consistencia Física	Alta (Aditividad)	Baja (Atenuación artificial)	Baja (Sistemas aislados)
Modelado de Colapsos	Completa ($D < 0$)	Nula (Asintótica a 0)	Nula (Asintótica a 0)

Fuente: elaboración propia

Asimismo, el modelo propone una fundamentación microestructural de la exergía sistémica, definida como el cociente entre la Productividad Total de los Factores y el Índice de Gini ($B = PTF / \text{Gini}$). En física estadística, la capacidad de producir trabajo depende de gradientes accesibles; análogamente, una sociedad con menor concentración de poder (menor Gini) posee mayor capacidad de transformación y autoorganización debido al libre flujo de información y oportunidades entre sus agentes. Dentro del marco propuesto, la temperatura socioeconómica (T) actúa como factor de escala: si el sistema opera en alto desorden ($S > S_{crit}$), cualquier incremento en el dinamismo (mayor T , como el *nearshoring*) acelera la tasa de transacciones ineficientes, amplificando la pérdida neta de energía útil.

Operacionalización del Modelo y Variables

Las variables se operacionalizan bajo los siguientes criterios conceptuales:

Exergía Sistémica (B): Representa la capacidad máxima de un sistema para convertir recursos brutos en trabajo útil de desarrollo (Wall, 1987) (innovación, movilidad social) mediado por la eficiencia institucional.

Entropía Social (S) y Entropía Crítica (S_{crit}): Mide la dispersión de estados y la falta de cohesión, operacionalizada a través de la informalidad laboral. S_{crit} actúa como punto de bifurcación.

Temperatura Socioeconómica (T): Representa el dinamismo, la volatilidad y la magnitud de los estímulos o choques externos.



Energía Libre Social (G): Evalúa la capacidad autopoiética y de autoorganización del sector formal. Si $G > 0$, el sistema no se autoorganiza espontáneamente y requiere intervención externa para sostener la formalidad.

Tabla 3.

Parámetros de calibración e indicadores de normalización (2005-2026)

Variable	Proxy	Mín	Máx	Justificación/Fuentes
Exergía (B)	Productividad Total / Gini	0.20	0.35	Rigidez histórica de TFP en México. Fuentes: INEGI, CONEVAL.
Temperatura (T)	Variación PIB (%)	-5.0%	+6.0%	Espectro de volatilidad cíclica. Fuentes: BM, INEGI.
Entropía (S)	Tasa Informalidad Laboral	52.0%	59.0%	Persistencia de la dualidad laboral. Fuente: INEGI (ENOE).

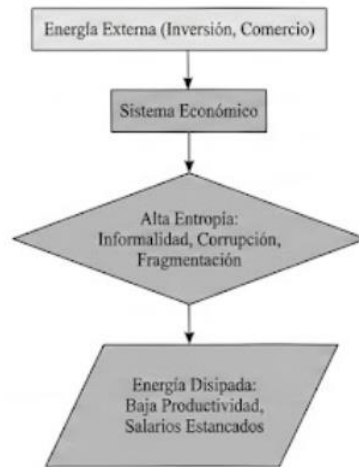
Fuente: elaboración propia datos de INEGI (2025), CONEVAL (2025) y Banco Mundial (2025)

Para formalizar y predecir la trayectoria de un sistema socioeconómico, el modelo propone la siguiente fórmula conceptual para el *destino del sistema* (D):

$$D = B - T(S - S_{crit})$$

Figura 1.

Modelo de flujo de energía y disipación



Fuente: elaboración propia.

Donde la Figura 1 representa la mecánica central de tu hipótesis: cómo la capacidad institucional (*exergía*) media entre los recursos externos y el desarrollo real, enfrentando la pérdida de energía por desorden (*entropía*). Donde:

- **B**: capacidad del sistema para realizar trabajo útil, condicionada por la eficiencia institucional.
- **T**: medida del dinamismo y la volatilidad del entorno macroeconómico.
- **S**: cuantificación del desorden estructural, operacionalizada mediante la informalidad laboral.
- **S_{crit}**: umbral de inflexión a partir del cual el desorden domina la dinámica sistémica.

Esta ecuación postula que el destino de una nación (hacia el desarrollo, el estancamiento o el colapso), depende del balance entre su capacidad de trabajo útil (*exergía*, B) y la energía disipada por el desorden. El término disipativo, $T(S - S_{crit})$, solo se activa de forma significativa cuando la entropía del sistema supera su umbral crítico, momento en el cual una mayor *temperatura* (más dinamismo o inversión) acelera el caos en lugar de generar orden.

Esta idea se alinea con la evidencia sobre cómo la concentración de la riqueza (Piketty, 2014) y la desigualdad de oportunidades (Stiglitz, 2012) no solo son injustas, sino



que socavan la eficiencia y el dinamismo de la economía. Este determinismo estructural crea una fuerte dependencia de la trayectoria (Arthur, 1994), donde las condiciones iniciales de desigualdad y concentración de poder "encierran" al sistema en un camino subóptimo del que es muy difícil escapar. Se genera así una paradoja: aunque los individuos posean talento y agencia, sus probabilidades de generar un cambio sistémico son mínimas si el campo estructural permanece rígidamente deformado.

Energía Libre Social (G) y Entalpía (H)

Inspirado en Gibbs, la *energía libre social* ($G = H - T \cdot S$) evalúa la *espontaneidad* del sistema. La *entalpía social* (H) representa el acervo de recursos e infraestructura. Si $G > 0$ (*endergonicidad*), la formalidad exige esfuerzo externo; si $G < 0$ (*exergonicidad*), el sistema se autoorganiza espontáneamente.

$$G = H - T \cdot S$$

Donde H es la *entalpía social* (recursos totales como infraestructura y capital humano):

- Un valor de $G < 0$ sugiere que el sistema tiene condiciones estructurales favorables para organizarse espontáneamente hacia estados de mayor orden y productividad, como emprendimientos consolidados.
- Un valor de $G > 0$ implica que la consolidación productiva requiere un esfuerzo externo y sostenido, ya que las tendencias entrópicas dominan la dinámica interna.

Como ejercicio ilustrativo, una estimación simplificada para México, usando $H \approx 0.70$ (índice de capital humano e infraestructura normalizado), $T \approx 1.50$ (volatilidad y dinamismo externo), y $S \approx 0.55$ (tasa de informalidad), genera:

$$G = (0.70 - 1.50 \times 0.55) = -0.125.$$

Este valor, aunque negativo, es peligrosamente cercano a cero. Indica que México se encuentra en un umbral crítico: cualquier aumento en la *entropía* (más informalidad) o un deterioro en su capital base (pérdida de calidad institucional) podría llevar a G a un valor positivo, empujando al sistema a un estado de desorden persistente donde el desarrollo se vuelve estructuralmente insostenible.



Propuesta Metodológica y Análisis Cuantitativo para México

Para transformar el marco teórico en una herramienta de diagnóstico, se realiza una aplicación cuantitativa ilustrativa para México. El objetivo no es realizar una econometría exhaustiva, sino demostrar cómo el modelo opera con datos plausibles y genera resultados interpretables sobre la trayectoria del sistema.

Operacionalización y Normalización de Datos

Se utilizan los indicadores proxy definidos previamente para el periodo 2005-2026, tal y como se muestran en la Tabla 4. Para hacerlos comparables e integrarlos en la fórmula, se normalizan a una escala de 0 a 1 utilizando la normalización Mín-Máx, basada en rangos realistas para México en estas dos décadas. Fórmula de normalización:

$$Valor_{norm} = (Valor_{actual} - Valor_{min}) / (Valor_{max} - Valor_{min})$$

Tabla 4.

Variables, proxies y referencias para los datos socioeconómicos

Variable	Proxy	Rango Asumido (2005-2025)	Justificación del Rango	Referencia
Exergía (B)	Índice (Productividad / Gini)	Mín: 0.20, Máx: 0.35	Refleja el estancamiento histórico de la productividad y la lenta pero leve mejora en la desigualdad. Un rango estrecho indica baja capacidad de cambio estructural.	• INEGI (Productividad) • CONEVAL (Gini)
Temperatura (T)	Crecimiento Anual del PIB (%)	Mín: -5.0%, Máx: 6.0%	Captura la volatilidad, incluyendo la crisis de 2009 y los picos de recuperación.	• INEGI (Sistema de Cuentas Nacionales) • Banco Mundial



UANL FTSyDH



POLÍTICAS SOCIALES SECTORIALES

“Calidad e Innovación: Perspectiva contemporánea para la Educación Superior”



Entropía (S)	Tasa de Informalidad Laboral (%)	Mín: 52.0%, Máx: 59.0%	Refleja la persistencia estructural de la informalidad, con fluctuaciones cíclicas.	• INEGI (Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo - ENOE)
--------------	----------------------------------	---------------------------	---	--

Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2025), CONEVAL (2025) y Banco Mundial (2025)

Estimación de la Entropía Crítica (S_{crit})

En este trabajo se adopta un valor operacional de 54% como hipótesis de umbral crítico, inspirado en la evidencia sobre dualidad laboral, mala asignación de recursos y persistencia de la informalidad documentada para México. La estimación rigurosa de dicho umbral constituye una línea de investigación futura mediante modelos de cambio de régimen. La raíz estructural radica en el diseño de protección social que genera asimetrías de precios entre el empleo formal gravado y el informal subsidiado. A partir de este punto crítico, las empresas formales de alta productividad no logran escalar, mientras proliferan microempresas de subsistencia que capturan empleo pero no aportan significativamente al PIB.

Tabla 5.

Trayectoria simulada del destino (D) de México (2005-2026)

Año	Exergía (B)	Temp. (T)	Entropía (S)	Término Disipativo	Destino (D)	Diagnóstico
2007	0.533	0.755	0.429	-0.108	+0.425	Crecimiento Sostenido
2015	0.400	0.691	0.786	-0.346	+0.054	Estancamiento Crónico
2024	0.600	0.773	0.571	-0.220	+0.380	Crecimiento Frágil
2026	0.533	0.500	0.457	-0.500	+0.447	Transición Incierta



Fuente: elaboración propia con datos de INEGI (2025) y Banco Mundial (2025)

Cálculo del Destino del Sistema (D) para Años Seleccionados

Se seleccionan tres años representativos para ilustrar la dinámica del sistema:

- 2007: un año de crecimiento pre-crisis.
- 2015: un año de estancamiento post-crisis.
- 2024: un año representativo del fenómeno *nearshoring* (alta temperatura).

Tabla 6.

Datos brutos y normalizados

Año	Variable	Dato Bruto	Cálculo de Normalización	Valor Normalizado
2007	Exergía (B)	0.28	$(0.28 - 0.20) / (0.35 - 0.20)$	0.533
	Temperatura (T)	3.30%	$(3.3 - (-5.0)) / (6.0 - (-5.0))$	0.755
	Entropía (S)	55.00%	$(55.0 - 52.0) / (59.0 - 52.0)$	0.429
2015	Exergía (B)	0.26	$(0.26 - 0.20) / (0.35 - 0.20)$	0.4
	Temperatura (T)	2.60%	$(2.6 - (-5.0)) / (6.0 - (-5.0))$	0.691
	Entropía (S)	57.50%	$(57.5 - 52.0) / (59.0 - 52.0)$	0.786
2024	Exergía (B)	0.29	$(0.29 - 0.20) / (0.35 - 0.20)$	0.6
	Temperatura (T)	3.50%	$(3.5 - (-5.0)) / (6.0 - (-5.0))$	0.773
	Entropía (S)	56.00%	$(56.0 - 52.0) / (59.0 - 52.0)$	0.571

Fuente: elaboración propia basada en los datos de la Tabla 4

Cálculo del Destino $D=B-T(S-S_{crit})$:

- Para 2007:
 - $D_{2007} = 0.533 - 0.755 \times (0.143) = 0.533 - 0.108 = +0.425$



Interpretación: el sistema aún tenía un balance positivo. La *entropía*, aunque por encima del umbral, no era lo suficientemente alta para que el término disipativo anulara la *exergía* disponible. El sistema estaba en fase de *crecimiento sostenido*, aunque con vulnerabilidades.

- Para 2015:

- $D_{2015} = 0.400 - 0.691 \times (0.500) = 0.400 - 0.346 = +0.054$

Interpretación: el sistema está peligrosamente cerca de cero. La *exergía* ha caído (menor productividad/mayor desigualdad) y la *entropía* ha aumentado significativamente. El sistema ha transitado a una fase de *estancamiento crónico*. Casi toda la energía del sistema se disipa para mantener el desorden estructural.

- Para 2024 (escenario *nearshoring*):

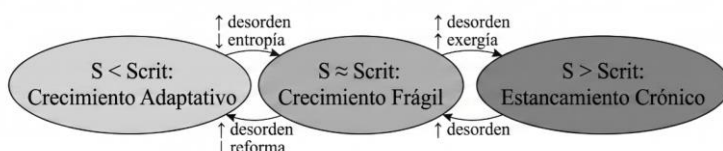
- $D_{2024} = 0.600 - 0.773 \times (0.285) = 0.600 - 0.220 = +0.380$

La simulación ilustrativa sugiere la paradoja del *nearshoring* (2024-2026): aunque la inyección de capital eleva la temperatura (*T*) y la *exergía* (*B*), el término disipativo sigue siendo elevado. El capital externo se "quema" sosteniendo la dualidad laboral. Además, el alza obligatoria del salario mínimo se desacopla de la productividad laboral, encareciendo la operación formal y empujando a los trabajadores hacia la informalidad.

Respecto al Diagnóstico de Energía Libre Social (*G*), el cálculo $G = H - T \cdot S$ arroja un valor de -0.125. Aunque negativo, su cercanía a cero advierte que el sistema opera en un límite de estabilidad. Cualquier deterioro institucional podría empujar a *G* a valores positivos, destruyendo la capacidad autopoiética del sector formal.

Figura 2.

Trayectorias de sistemas basadas en la entropía



Fuente: elaboración propia

Análisis de Sensibilidad

Este análisis tiene un propósito exploratorio y busca evaluar la robustez cualitativa del modelo frente a variaciones razonables de los parámetros.

Tabla 7.

Variaciones cuantitativas del destino sistémico (D) y estabilidad cualitativa

Año	Escenario	Rango B	Rango S	Valor D	Diagnóstico
2007	Línea Base	(0.20, 0.35)	(52.0%, 59.0%)	+0.425	Crecimiento Sostenido
2015	Línea Base	(0.20, 0.35)	(52.0%, 59.0%)	+0.054	Estancamiento Crónico
2024	Línea Base	(0.20, 0.35)	(52.0%, 59.0%)	+0.380	Crecimiento Frágil

Fuente: elaboración propia

Limitaciones Analíticas y Direcciones para Investigaciones Futuras

- 1. Agregación de Indicadores Sintéticos:** El uso de proxies unidimensionales conlleva una pérdida de granularidad sectorial. Se recomienda desglosar parámetros por ramas industriales en futuras investigaciones.
- 2. Validación Econométrica del Umbral Crítico:** Iteraciones posteriores deben aplicar modelos de cambio de régimen de transición suave (STAR) para estimar este parámetro de manera estrictamente econométrica.



3. Análisis de Dinámica Temporal: Se requiere validación empírica formal mediante análisis de cointegración multivariante para verificar si la exergía y la informalidad causan el vector disipativo del PIB a largo plazo.

Este gráfico de fases ilustra el punto de inflexión del 54% que identificaste. Es crucial para visualizar por qué el *nearshoring* por sí solo no garantiza el éxito si el sistema opera en la zona de *estancamiento crónico*.

Conclusiones y Recomendaciones de Política Pública

Para optimizar el balance del destino sistémico (D), bajo los supuestos del modelo, la política pública podría estructurarse bajo tres pilares de modulación:

Abatimiento de la Entropía Social (S) por Debajo del Umbral Crítico: Una implicación potencial del modelo consiste en reducir la informalidad mediante un Sistema de Seguridad Social Universal financiado con impuestos generales, eliminando las cuotas patronales que gravan el empleo formal.

Fortalecimiento de la Exergía Sistémica (B): Acelerar la transición hacia matrices energéticas limpias con menor pérdida termodinámica y consolidar la educación técnica especializada.

Modulación de la Temperatura (T) como Vector de Financiamiento: Aprovechar los shocks de inversión del *nearshoring* para financiar las reformas que mejoran B y reducen S .

1. El estancamiento como balance de desorden: los cálculos sugieren que el estancamiento en México (2015, $D=+0.054$) se debe a que la capacidad de transformación del sistema es anulada por el desorden interno. El sistema utiliza sus recursos para mantener su configuración actual sin generar evolución.
2. La paradoja del *nearshoring*: el resultado de 2024 ($D=+0.380$) muestra que inyectar capital en sistemas de alto desorden no produce transformación social automática, sino que parte de la eficacia se disipa en estructuras ineficientes.



3. El umbral de desorden como límite al desarrollo: mientras la informalidad permanezca por encima del umbral crítico, los esfuerzos de crecimiento serán deficientes. Esto implica priorizar políticas de formalización e inclusión para reducir el desorden sistémico.
4. Implicaciones de política pública refinadas: el modelo transforma el debate de políticas. La pregunta deja de ser "¿cómo crecer más?" para convertirse en "¿cómo mejorar el balance D?". Esto obliga a considerar simultáneamente tres frentes:
 - **Aumentar B (exergía):** vía reformas estructurales que ataquen las *fuerzas gravitatorias* (monopolios, captura regulatoria), para mejorar la productividad y la distribución.
 - **Reducir el desorden (S):** mediante políticas de inclusión que incentiven la formalidad para situar el sistema por debajo del umbral crítico.
 - **Modular T (temperatura):** aprovechar los *shocks* de inversión para financiar las reformas que mejoran B y reducen S , en lugar de permitir que la energía se disipe.

En conclusión, los resultados obtenidos sugieren que reformular las políticas públicas para reducir el desorden estructural constituye una hipótesis consistente con el marco desarrollado. No obstante, esta interpretación requiere validación empírica adicional mediante estudios econométricos específicos.

Criterios de Falsabilidad Popperiana

1. **Desacoplamiento de Trayectorias:** Si una economía con $S > 54.0\%$ y alto dinamismo ($T > 4.0\%$) registra crecimiento sostenido de la PTF, incremento de *exergía* neta (D) y baja desigualdad, el modelo queda refutado.
2. **Inversión del Efecto de Temperatura:** Si el incremento de T en escenarios de alta informalidad ($S > S_{crit}$) se asocia directamente con un incremento en la *exergía* neta (D) sin reducción previa del desorden, la ecuación lineal queda falsada.



POLÍTICAS SOCIALES SECTORIALES

“Calidad e Innovación: Perspectiva contemporánea para la Educación Superior”



- 3. Espontaneidad de Gibbs:** Si un sistema con energía libre social positiva ($G > 0$) experimenta formalización laboral espontánea sin intervención estatal, el marco basado en la termodinámica de espontaneidad de Gibbs-Helmholtz queda invalidado.



Referencias

- Arthur, W. B. (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy*. University of Michigan Press.
- Ayres, R. U., y Warr, B. (2005). Accounting for growth: The role of physical work. *Structural Change and Economic Dynamics*, 16(2), 181–209.
- Banco Mundial. (2025). *Indicadores del desarrollo mundial* [Conjunto de datos]. <https://datos.bancomundial.org>
- Beinhocker, E. D. (2006). *The origin of wealth: Evolution, complexity, and the radical remaking of economics*. Harvard Business School Press.
- Bejan, A. (2016). *Advanced engineering thermodynamics* (4.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Bertalanffy, L. von. (1968). *General system theory: Foundations, development, applications*. George Braziller.
- Chakraborti, A., Toke, I. M., Patriarca, M., y Abergel, F. (2011). Econophysics review: I. Empirical facts. *Quantitative Finance*, 11(7), 991–1012.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. (2025). *Medición de la pobreza* [Conjunto de datos]. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/PobrezaInicio.aspx>
- Gunderson, L. H., y Holling, C. S. (Eds.). (2002). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press.
- Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press.
- Holt, R. P., Rosser, J. B., Jr., y Colander, D. (2011). The complexity era in economics. *Review of Political Economy*, 23(3), 357–369.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025a). *Banco de información económica (BIE)* [Conjunto de datos]. <https://www.inegi.org.mx/sistemas/bie/>



- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025b). *Encuesta nacional de ocupación y empleo (ENOE), población de 15 años y más* [Conjunto de datos]. <https://www.inegi.org.mx/programas/enoe/15ymas/>
- Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. *IBM Journal of Research and Development*, 5(3), 183–191.
- Levy, S., y Cruces, G. (2021). *Time for a new course: An essay on social protection and growth in Latin America* (UNDP LAC Working Paper No. 24). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Fundación EU-LAC.
- Mantegna, R. N., y Stanley, H. E. (1999). *An introduction to econophysics: Correlations and complexity in finance*. Cambridge University Press.
- Mirowski, P. (1989). *More heat than light: Economics as social physics, physics as nature's economics*. Cambridge University Press.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press.
- Piketty, T. (2014). *Capital in the twenty-first century* (A. Goldhammer, Trad.). The Belknap Press of Harvard University Press.
- Ramírez-Guevara, A. A. (2021). Factores que limitan el emprendimiento en América Latina. *Revista Empleo y Crecimiento Económico*, 7(7), 112–125.
- Ramírez-Guevara, A. A., y Vázquez Ocaña, A. (2024). Fundamentos del éxito empresarial: Claves y estrategias. *Políticas Sociales Sectoriales*, 2(2), 467–489.
- Stiglitz, J. E. (2012). *The price of inequality: How today's divided society endangers our future*. W. W. Norton & Company.
- Wall, G. (1987). Exergy conversion in the Swedish society. *Resources and Energy*, 9(1), 55–73.

