

## EL DILEMA DE LA DUALIDAD ENERGETICA: UN ANALISIS DE FUNCIONES ENERGETICAS HOMOTETICAS A TRAVES DEL ENFOQUE DE TEORIA DE JUEGOS

MAXIMILIANO F. CAMARDA

Comisión de Eficiencia Energética del Comité de Energías Córdoba (CEC)  
Centro de Investigaciones y Estudios sobre Cultura y Sociedad (CIECS) - CONICET y UNC,  
Córdoba, Argentina.  
*maxi\_camarda@hotmail.com*

Fecha recepción: junio 2020    Fecha aprobación: abril 2021

ARK CAICYT: <http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s18539777/bcyon7inb>

### RESUMEN

Hace siglos las actividades antropogénicas de los sectores industriales se encuentran incrementando los niveles de calentamiento global del planeta tierra. Un enfoque de políticas públicas sobre el uso racional y eficiente de la energía, es fundamental para extender la transición energética que permitirá avanzar hacia una humanidad sostenible.

El Dilema de la Dualidad Energética, plantea las controversias en torno a la efectividad genuina de un Programa de Eficiencia Energética, y a las posibilidades concretas de ahorro energético. El análisis de funciones homotéticas, permite establecer una función de ahorro energético, y por complementariedad, una posible función de desahorro energético asociada.

No obstante, la dinámica de la dualidad energética y sus efectos sobre los niveles de ahorro energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, no siguen un comportamiento lineal y su impacto se encuentra condicionado por la elasticidad de la dualidad energética.

Desde esta perspectiva, los mecanismos de la Teoría de Juegos brindan la posibilidad de aproximarse a la dualidad energética en un contexto de reciprocidad energética colectiva.

Las conclusiones demuestran, que la efectividad en la etapa de diseño, implementación y control de un programa de eficiencia energética es determinante de la maximización del rendimiento energético esperado.

**PALABRAS CLAVE:** Eficiencia Energética - Teoría de Juegos - Dualidad Energética - Funciones Homotéticas - Homotecia Energética - Desarrollo Económico Sustentable

### ABSTRACT

For centuries the anthropogenic activities of the industrial sectors have been increasing the levels of global warming on Planet Earth. A public policy approach to the rational and efficient use of energy is essential to extend the energy transition that will allow us to move towards a sustainable humanity.

The Dilemma of Energy Duality raises controversies regarding the genuine effectiveness of an Energy Efficiency Program and the real specific

possibilities of energy saving. The analysis of homothetic functions allows establishing an energy saving function and as a complement, a possible energy dissaving function associated.

However, the dynamics of energy duality and its effects on energy saving levels and greenhouse gas emissions do not follow a linear behavior and its impact is conditioned by the elasticity of energy duality.

From this perspective, the mechanisms of Game of Theory provide us with the possibility of approaching energy duality in a context of collective energy reciprocity.

Conclusions show that the effectiveness in the design stage, implementation and control of an energy efficiency program is decisive in maximizing the expected energy performance.

**KEYWORDS:** Energy Efficiency - Game of Theory - Energy Duality - Homothetic Functions - Energy Homothetic - Sustainable Economic Development.

## 1. INTRODUCCION

Los países soberanos a nivel mundial deben realizar grandes cambios en sus modelos económicos y energéticos, con el objeto de forjar una matriz productiva y energética eficiente, competitiva y sustentable.

Las Contribuciones Previstas Determinadas a Nivel Nacional (INDCs) no cuentan con una definición bajo el proceso de negociación de cambio climático, pero se interpretan como medidas voluntarias que los países deben afrontar para cooperar, evitando que la temperatura global no se incremente por encima de 2°C (OLADE, 2017). Estas contribuciones son fundamentales para mantener la temperatura global por debajo de los 2°C y tratar de aproximarse a 1,5°C, de forma tal de avanzar en el cumplimiento y establecimiento de niveles de exigencia más sofisticados a través del Acuerdo de París.

La propuesta de este trabajo, es generar una breve aproximación a un nivel de conocimientos más abarcativo y completo sobre las fortalezas y debilidades, explícitas e implícitas, inherentes a un Programa de Eficiencia Energética (PEE), como herramienta de políticas públicas y privadas.

En este tipo de programas, es muy común encontrar una gran cantidad de jugadores que participan de diferentes sectores, donde por lo general poseen objetivos disímiles. La energía, en sus diversas formas de expresión, es utilizada por estos jugadores en base a su sistema de preferencias energéticas, lo que da origen a un sistema heterogéneo de perfiles de consumo energético.

Ya que los sectores industriales y de transporte, poseen una gran demanda energética (OLADE, 2019), merecen especial atención en dicho análisis. Dentro de estos sectores, existen empresas energointensivas, con procesos de producción que necesitan de la aplicación de un Sistema de Gestión de la Energía (SGEn), que les garantice la reducción continua de la

intensidad energética a largo plazo (Maldonado, 2008; Materán Sánchez, 2018).

Cada jugador, selecciona un perfil de estrategias energéticas eficientes que se adapta a su perfil de consumo energético, con el fin de promover el uso racional y eficiente de la energía en sus instalaciones (Gómez, Mathé y Sella Piedrabuena, 2013) y obtener un determinado nivel de rendimiento energético. No obstante, en el campo de la eficiencia energética existen una gran cantidad de variables endógenas y exógenas, que afectan las decisiones de cada jugador, condicionando el perfil de pagos energéticos y el rendimiento o performance energética de acuerdo a los objetivos de la planificación energética bajo ciertas condiciones.

Sumado a esto, las empresas y sectores industriales atraviesan diferentes etapas del ciclo de vida, por lo que la energía posee una dinámica evolutiva propia en cada dimensión espacio-tiempo, con lo cual, las posibilidades de ahorro energético varían y condicionan el éxito de un PEE.

Los jugadores creen conocer y poseer información sobre el programa y las estimaciones de ahorro energético esperadas; el problema se presenta cuando no todas las irregularidades energéticas son captadas y previstas en el diseño de la planificación energética, la implementación y el control de un sistema de gestión de la energía. En este contexto, presentamos “El Dilema de la Dualidad Energética”.

## **2. LA PARADOJA DE LA EFICIENCIA ENERGETICA Y EL DILEMA DE LA DUALIDAD ENERGETICA**

La Eficiencia Energética (EE), es una política adecuada para hacer frente a problemas de abastecimiento energético continuo, balances energéticos negativos, reducciones de intensidad energética, emisiones de gases de efecto invernadero, huellas de carbono, problemas ambientales, etc.

No obstante, el logro efectivo de metas de EE depende de una correcta implementación en un contexto influenciado por una multiplicidad sistémica de restricciones políticas, institucionales, culturales, económicas, tecnológicas, etc. (Camarda, 2017, 2019; Carpio y Coviello, 2013; OLADE, 2019).

Según el Consejo Mundial de la Energía (CME) (2010), la implementación deficiente, debido en gran parte al incumplimiento puede reducir el impacto de un PEE entre un 20% y un 50%.

Desde esta perspectiva, “La Paradoja de la Eficiencia Energética”, plantea una serie de interrogantes sobre la versatilidad y fortaleza que posee la estructura de un programa de eficiencia energética y su impacto sobre el perfil de consumo energético, emisiones de gases y rentabilidad de los jugadores.

El diseño de mecanismos (Maskin, 2019), a favor del uso racional y eficiente de la energía, dentro de un SGE<sub>n</sub>, debe prever todas aquellas restricciones que impiden cumplir con los objetivos de EE. En este sentido, debemos comprender claramente que, cada unidad de ahorro energético planificado (AEP) que sufre una variación respecto a la política energética, es

una unidad potencial que puede transformarse en una unidad de desahorro energético (DE).

Ahora bien, la pregunta que debe hacerse es la siguiente: existe una igualdad estricta entre el desvío del ahorro energético planificado y el desahorro energético en las diferentes dimensiones espacio-tiempo [ $d_i$  ( $e_i-t_i$ )], donde la energía se dinamiza, se transforma y se consume para múltiples fines de acuerdo a un sistema de preferencias energéticas.

Desde esta perspectiva, podemos afirmar que toda política de eficiencia energética pretende seguir el camino del desarrollo económico sostenible, pero no siempre los objetivos energéticos planificados pueden materializarse. Dicha situación, plantea una ambivalencia en el campo energético que puede perjudicar seriamente el cumplimiento de las metas de eficiencia energética a nivel nacional, regional y mundial (CME, 2010).

Esta ambivalencia en el campo de la energía, invita a analizar y comprender la coexistencia simultánea del perfil positivo y negativo de la eficiencia energética, dando origen al Dilema de la Dualidad Energética (DDE).

El análisis de la dualidad energética, puede brindar información no sólo sobre el grado de sensibilidad en los resultados energéticos de los diferentes perfiles de consumo energético, sino también, sobre la eficiencia generalizada de los mecanismos que podrían diseñarse a los efectos de fortalecer la integridad global de un PEE. Los mecanismos de la teoría de juegos (Shubik, 1996), pueden ser trascendentes para elaborar políticas públicas preventivas y/o reactivas sobre el uso racional y eficiente de la energía, en un contexto de juegos energéticos basados en la reciprocidad energética colectiva.

### 3. ELASTICIDAD DE LA DUALIDAD ENERGETICA (EDE)

La Elasticidad de la Dualidad Energética (EDE) mide el grado de sensibilidad en las variaciones de los niveles de desahorro energético, ante variaciones en el ahorro energético planificado, en una determinada dimensión espacio-tiempo [ $d_i$  ( $e_i-t_i$ )]. Este indicador (1), demuestra el grado de variación porcentual acontecido en el desahorro energético, por cada 1% en que varía el ahorro energético de acuerdo a la fase inicial de planificación energética.

$$E_d^e = \frac{\Delta \% DE_{d_i}}{\Delta \% AEP_{d_i}} \quad (1)$$

Para cambios infinitesimales en las variables, la elasticidad de la dualidad energética adquiere la siguiente forma (2):

$$E_d^e = \frac{\partial DE}{\partial AEP} * \frac{AEP_{d_0}}{DE_{d_0}} \quad (2)$$

Donde  $\frac{\partial DE}{\partial AEP}$  representa la pendiente de la función de elasticidad de la dualidad energética (FIGURA 1).

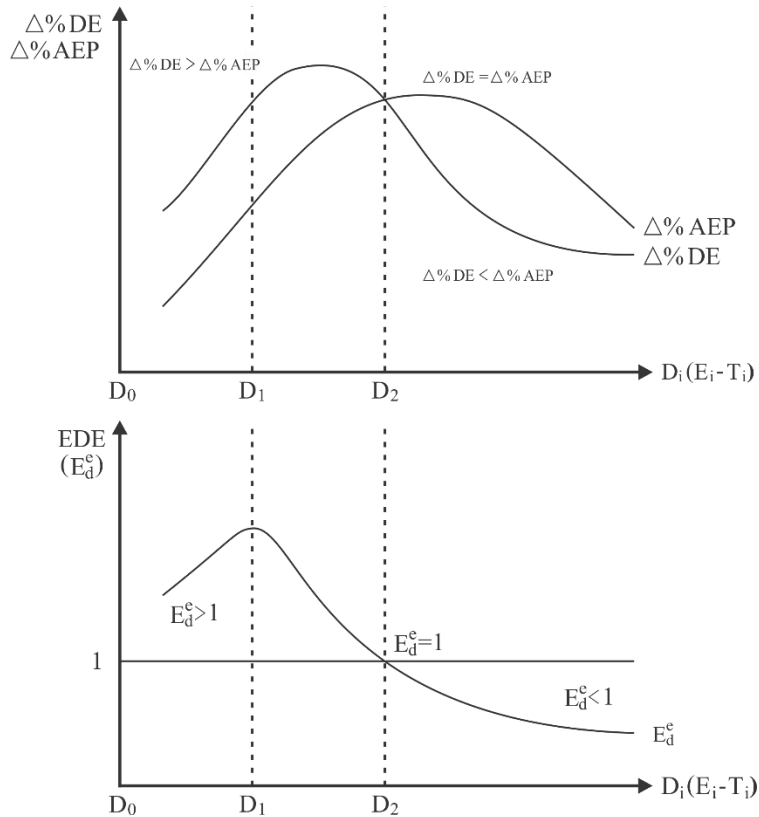


FIGURA 1. Delimitación de la Elasticidad de la Dualidad Energética (EDE)  
Fuente. Elaboración propia.

La EDE reaccionará con diferentes grados de sensibilidad, de acuerdo a diversas variables, tales como, las características naturales del PEE, sector industrial, tipo de empresa, ciclo de vida de la industria/empresa, proceso energointensivo, tipo de tecnología, dimensión espacio-tiempo, entre otros. En este sentido, pueden considerarse tres situaciones:

1.  $E_d^c < 1$  - La variación porcentual del desahorro energético ( $\Delta\%DE_{d_i}$ ), es inferior a la variación porcentual en el ahorro energético planificado ( $\Delta\%AEP_{d_i}$ ), en una cierta dimensión espacio-tiempo  $d_i(e_i - t_i)$ . Por cada 1% en que varía el ahorro energético planificado, las variaciones porcentuales en el desahorro energético son inferiores al 1%.

La elasticidad entre el ahorro energético planificado y el desahorro energético es inelástica. Ello significa que no todas las variaciones en el ahorro energético planificado, se trasladan y transforman en desahorro energético en una cierta dimensión espacio-tiempo  $d_i$ .

Existen dos observaciones claves a realizar respecto al grado de efectividad del PEE para absorber pérdidas energéticas, ambientales y económicas:

Por un lado, la eficiencia de los mecanismos de configuración del PEE permite desarrollar una capacidad predictiva y preventiva de los desvíos energéticos. En este sentido, cada unidad de consumo energético (kW/h, m<sup>3</sup> de gas natural, lbs. de combustible, tep, etc.), cada unidad económica asociada al consumo energético, y cada unidad de emisiones de gases de efecto invernadero, pueden reducirse siempre que existan asimetrías inelásticas entre el ahorro energético planificado y el desahorro energético.

Por otro lado, otra interpretación de la inelasticidad, es la confirmación de la inexistencia de pérdidas o irregularidades energéticas ocultas no contempladas en la planificación energética (en el lenguaje habitual suele denominarse consumo fantasma de energía).

2.  $E_d^c = 1$  - La  $\Delta\%DE_{d_i}$  es igual a la  $\Delta\%AEP_{d_i}$ , es decir, por cada 1% en que varía el ahorro energético planificado, las variaciones en el desahorro energético también son iguales al 1%. La elasticidad entre las variables es unitaria, tanto el ahorro energético planificado como el desahorro energético varían en proporciones idénticas. La efectividad del programa de eficiencia energética para absorber pérdidas energéticas, ambientales y económicas es de carácter neutral.

3.  $E_d^c > 1$  - La elasticidad entre las variables es elástica, cuando las variaciones porcentuales en el desahorro energético son superiores a las variaciones porcentuales en el ahorro energético planificado. Por cada 1% en que varía el ahorro energético planificado, las variaciones en el desahorro energético son superiores al 1%. Nuevamente se presentan dos observaciones: Los mecanismos de configuración del PEE presentan falencias para identificar y corregir situaciones que generan incrementos del desahorro energético. Por otro lado, es muy probable que existan irregularidades energéticas que se encuentran generando incrementos en la intensidad energética, y no han sido previstas en la etapa inicial de planificación energética. En este sentido, la efectividad del PEE para absorber pérdidas energéticas, ambientales y económicas no es significativa.

#### 4. LOS JUEGOS DE DUALIDAD ENERGETICA (JDE)

En un contexto de Gobernanza de la Eficiencia Energética (GoEE), es común observar la existencia de una gran multiplicidad de jugadores provenientes de diferentes sectores económicos, sociales y políticos, con intereses por lo general contrapuestos. El JDE, no es la excepción.

La formal normal de un Juego de Dualidad Energética de dos jugadores, sería la siguiente:

$J_1$  y  $J_2$ , representan dos sectores industriales que producen bienes complementarios:

$J_1$ : sector automotriz - se dedica a la producción de automóviles, demanda materias primas y transfiere pagos monetarios a  $J_2$  en función de las compras realizadas.

$J_2$ : sector metalmecánico - produce autopartes metálicas, vende materias primas y cobra un valor monetario por la transferencia de insumos a  $J_1$ .

Las decisiones estratégicas (DE) de ambos jugadores, podrían resumirse de la siguiente manera:

DE<sub>1</sub>: Invertir en un Programa de Eficiencia Energética que posee un Mecanismo Eficiente de Configuración (PEEMEC).

DE<sub>2</sub>: Invertir en un Programa de Eficiencia Energética que no posee un Mecanismo Eficiente de Configuración (PEENMEC).

Las decisiones de los jugadores de invertir en programas que poseen diferencias en los niveles de configuración en cuanto al grado de calidad de sus mecanismos, pueden observarse en los niveles de costes ( $C_i$ )  $C_1$  y  $C_2$ , donde  $C_1 > C_2$ , por lo que las ganancias energéticas ( $GE_i$ ) y los retornos económicos ( $RE_i$ ) serán diferentes, siendo  $GE_1 < GE_2$  y  $RE_1 < RE_2$ .

Las decisiones de los jugadores, no sólo condicionan los valores de la matriz de pagos energéticos, sino que además afectan el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. Los pagos energéticos de las matrices, representan ganancias o pérdidas energéticas expresadas a través de tasas de rendimiento energético (%). A su vez, los pagos de la matriz se encuentran condicionados por los valores de la elasticidad de la dualidad energética.

Los mecanismos de configuración del PEE determinan el Margen (o Banda) de Flotación Energética Eficiente (MaFEE), entre el máximo nivel de ahorro energético posible y el ahorro energético mínimo admisible. Por el contrario, la elasticidad de la dualidad energética, ya sea, por las imperfecciones del diseño de mecanismos o las perturbaciones exógenas que absorbe el PEE, determina el Margen (o Banda) de Flotación Energética Ineficiente (MaFEI).

#### 4.1 Espejo de la Eficiencia Energética con EDE Inelástica

Según los valores de la TABLA 1, cuando  $J_1$  y  $J_2$  deciden invertir en PEEMEC, pueden lograr el máximo rendimiento energético esperado por la planificación energética del PEE (+50%). Esta situación se corresponde con un equilibrio de Nash eficiente (Binmore, 2011; Camarda, 2018; Gibbons, 1992).

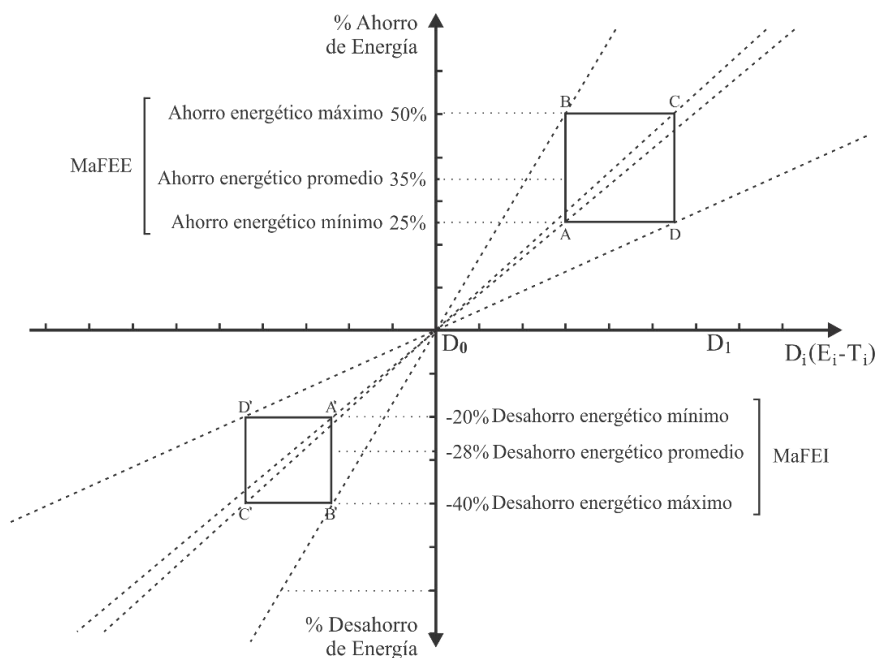
Si uno de los jugadores decide invertir en PEEMEC y el otro jugador decide invertir en PEENMEC, el primero de los jugadores lograría un rendimiento energético promedio aproximado en el orden del +35%, en tanto que el segundo jugador tendría una pérdida energética equivalente al -28%.

Si  $J_1$  y  $J_2$  deciden invertir en PEENMEC, ambos jugadores perderían un -40% de rendimiento energético, constituyendo este par de decisiones el peor resultado posible alcanzado (equilibrio de Nash ineficiente). En el contexto de la EE, existe un sistema de restricciones (políticas, institucionales, económicas, financieras, tecnológicas, etc.) que dificulta a los jugadores modificar unilateralmente sus decisiones para emprender proyectos de EE, razón por la cual, los jugadores se encuentran ante un dilema del prisionero, basado en la pérdida de competitividad industrial y el derroche energético (Camarda, 2017, 2018; Carpio y Coviello, 2013; OLADE, 2019).

$J_1   J_2$	PEEMEC	PEENMEC
PEEMEC	+50% , +50%	+35% , -28%
PEENMEC	-28% , +35%	-40% , -40%

**TABLA 1. Juego de Dualidad Energética con 2 jugadores y EDE < 1**  
Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo a la FIGURA 2, el espejo de la eficiencia energética adquiere una simetría imperfecta u homotidicidad energética imperfecta cuando se presenta el caso de una elasticidad inelástica (EDE= 0,80%). Nuestro centro de referencia en  $D_0$ , en el campo de las matemáticas se denomina Centro de Homotecia. Se denominará Centro de Homotecia Energética de Referencia (CHER).



**FIGURA 2. Espejo de la Eficiencia Energética con EDE < 1.** Fuente. Elaboración propia.

#### 4.2 Espejo de la Eficiencia Energética con EDE Unitaria

En la TABLA 2, si  $J_1$  y  $J_2$  invierten en PEEMEC, obtienen un rendimiento energético en el orden del +50% (equilibrio de Nash eficiente), por el contrario,



si deciden simultáneamente invertir en PEENMEC, ambos adquieren una pérdida estimada en un -50% (equilibrio de Nash ineficiente).

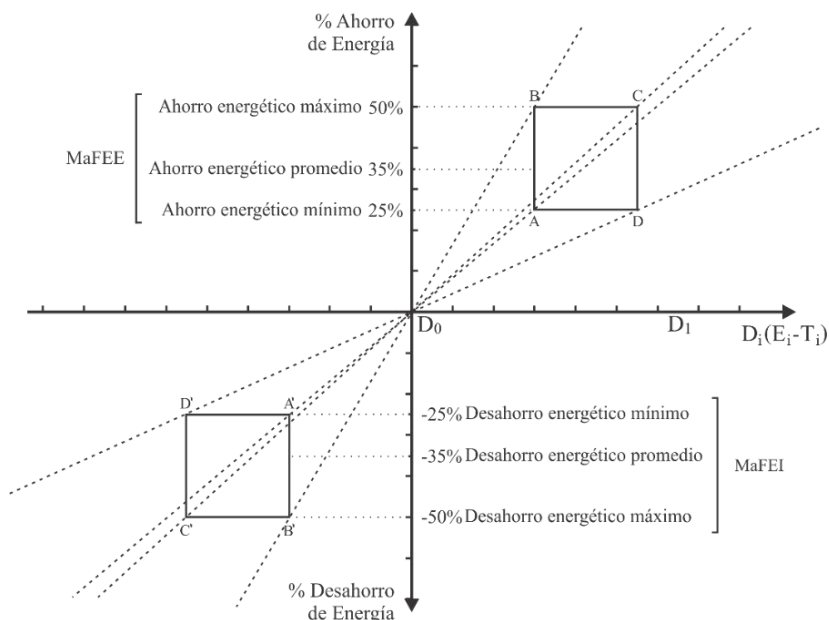
Cuando se producen decisiones disímiles, es decir, un  $J_i$  invierte en PEEMEC y el otro  $J_i$  invierte en PEENMEC, el primer jugador obtiene un rendimiento del +35% y el otro jugador una pérdida de -35%.

El análisis global de pagos energéticos, donde  $\sum (C_i, GE_i)$ , para  $i= 1, \dots, n$  se compensa perfectamente, constituyendo un juego energético de suma cero.

$J_1   J_2$	PEEMEC	PEENMEC
PEEMEC	+50% , +50%	+35% , -35%
PEENMEC	-35% , +35%	-50% , -50%

**TABLA 2. Juego de Dualidad Energética con 2 jugadores y EDE=1**  
Fuente. Elaboración propia.

En este caso, el espejo de la eficiencia energética adquiere una simetría perfecta u homotocidad energética perfecta, ante la presencia de una elasticidad unitaria (FIGURA 3).



**FIGURA 3. Espejo de la Eficiencia Energética con EDE=1.** Fuente. Elaboración propia.

Nótese que el área ABCD, que demuestra ilustrativamente la magnitud del ahorro energético entre  $D_0$  y  $D_1$ , es exactamente idéntica al área  $A'B'C'D'$ , donde se ilustra el nivel de derroche o despilfarro energético. Además, la distancia entre  $D_0$  y cada vértice de la figura ABCD ( $D_0-A$ ;  $D_0-B$ ;  $D_0-C$ ;  $D_0-D$ ) es idéntica a la distancia entre  $D_0$  y cada vértice de la figura  $A'B'C'D'$  ( $D_0-A'$ ;  $D_0-B'$ ;  $D_0-C'$ ;  $D_0-D'$ ), con lo cual, la  $\Sigma (D_0-A, D_0-B, D_0-C, D_0-D) = \Sigma (D_0-A', D_0-B', D_0-C', D_0-D')$ . La FIGURA 3, representa la homotecia energética perfecta en su máxima expresión, el espejo perfecto de la EE en su aspecto dual.

### 4.3 Espejo de la Eficiencia Energética con EDE Elástica

La situación cambia y se agrava ante la presencia de irregularidades energéticas, o mecanismos deficientes de configuración cuando la elasticidad es elástica. De manera similar a los dos casos anteriores, según la TABLA 3, cuando  $J_1$  y  $J_2$  deciden invertir en PEEMEC, su ganancia energética se encuentra asociada a un +50% de rendimiento energético (equilibrio de Nash eficiente); caso contrario, si  $J_1$  y  $J_2$  invierten en PEENMEC, deberán afrontar una pérdida mayor a las situaciones anteriores, en el orden del -60% (equilibrio de Nash ineficiente).

Si  $J_i$  invierte en PEEMEC logra una ganancia energética aproximada en +35%, en tanto que, el  $J_i$  que invirtió en PEENMEC, posee una pérdida energética aproximada en -42%.

$J_1   J_2$	PEEMEC	PEENMEC
PEEMEC	+50% , +50%	+35% , -42%
PEENMEC	-42% , +35%	-60% , -60%

**TABLA 3. Juego de Dualidad Energética con 2 jugadores y EDE > 1**  
Fuente. Elaboración propia.

En la FIGURA 4, el espejo de la eficiencia energética también adquiere una simetría imperfecta u homotocidad energética imperfecta, ante la presencia de una elasticidad superior a 1 (uno). En nuestro caso, por cada 1% en que varía el ahorro energético planificado, el desahorro energético varía un 1,2%, razón por lo cual, se amplifica la pérdida energética en el orden del 20%. En sectores energointensivos, este tema requiere especial atención.

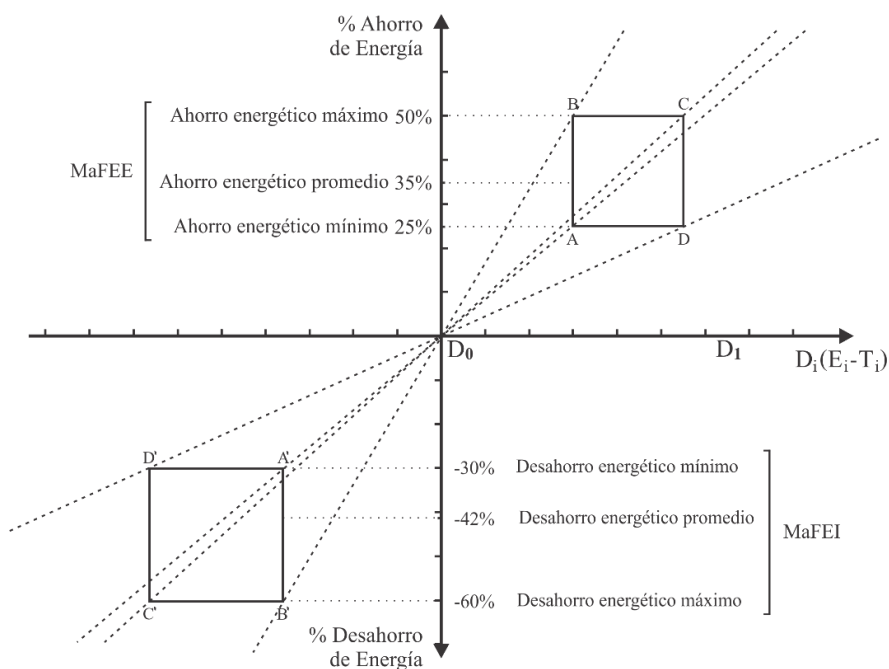


FIGURA 4. Espejo de la Eficiencia Energética con EDE > 1  
Fuente. Elaboración propia.

## 5. EL DILEMA DEL PRISIONERO Y LOS EQUILIBRIOS DE NASH EN TORNO AL USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA EN UN CONTEXTO DE AMBIVALENCIA O DUALIDAD ENERGÉTICA

Dado que el análisis del equilibrio de Nash, es una herramienta poderosa para comprender las interacciones humanas (Fudenberg y Levine, 2016), podemos afirmar que, en el juego de la dualidad energética se observan dos equilibrios de Nash cuando coinciden los pares de decisiones estratégicas correspondientes a situaciones extremas y opuestas respecto al grado de efectividad de un SGen (Aumann y Sorin, 1989; Binmore, 2011; Shubik, 1996).

Cuando ambos jugadores deciden invertir en un PEE que posee un mecanismo eficiente de configuración (PEEMEC), se ubican en un equilibrio de Nash Eficiente; por el contrario, cuando los jugadores deciden invertir en un PEE con un mecanismo ineficiente de configuración (PEENMEC), las acciones se sitúan en un equilibrio de Nash ineficiente.

La carencia de mecanismos y de un sistema de incentivos efectivo, que fomente la cooperación energética recíproca y colectiva, se aleja de aquellos equilibrios cercanos a la eficiencia económica y energética. En este sentido, la estructura clásica del dilema del prisionero, conduce por un camino equivocado y distinto al camino del uso racional y eficiente de la energía.

A través del análisis de funciones homotéticas, hemos observado que la situación energética se agrava cuando la elasticidad de la dualidad

energética es elástica. Esta situación, permite comprender la heterogeneidad que posee la evolución dinámica de la energía, en diferentes dimensiones espacio-tiempo, sectores económicos, ciclos de vida, grados de intensidad energética, perfiles de consumo energético, etc.

Siguiendo este enfoque, las estrategias a implementar por  $J_1$  y  $J_2$  variarán en función del análisis del contexto, la calidad de la información disponible y el marco institucional vigente por parte de los organismos encargados de promover la eficiencia energética en el territorio.

Desde esta perspectiva, según Camarda (2018), la construcción del camino crítico del desarrollo económico sostenible, implica la búsqueda continua y sistemática de múltiples equilibrios de Nash eficiente, que representan estadios cada vez más sofisticados de ahorro energético, reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y retornos económicos.

## **6. EL ROL DE LA COOPERACION ENERGETICA EN EL DESARROLLO DE PROGRAMAS DE EFICIENCIA ENERGETICA (PEE)**

Para Nowak y Sigmund (2005), la selección natural favorece a los fuertes y egoístas que maximizan sus recursos y ganancias a expensas de otros jugadores que poseen una mayor inclinación al altruismo. El problema que presentan las conductas individualistas en un PEE, es que no contemplan las posibilidades de ahorro energético como una medida de carácter colectivo y sistémico.

Es normal y propio de la interacción humana, que existan discrepancias entre los incentivos privados que promueven un accionar individualista y el bien común, propio de acciones altruistas basadas en una cooperación desinteresada. Desde esta lógica, según Dal Bó (2005), la principal contribución de la Teoría de Juegos al análisis de esta situación, es reconocer que la interacción repetida permite desarrollar esquemas recompensa/castigo que intentan limitar el comportamiento oportunista y fomentar la cooperación.

En este sentido, la racionalidad y las expectativas individuales, ante un sistema de mecanismos que no promueve las inversiones en eficiencia energética y el desarrollo de una cultura del ahorro energético compartida, sólo conduce a esquemas productivos perjudiciales para el desarrollo de una competitividad industrial genuina y sustentable a largo plazo (Camarda, 2017).

Si bien pueden encontrarse soluciones cooperativas al DDE, las simulaciones en el estudio de Hauert y Schuster (1997), demuestran que una mayor cantidad de jugadores puede obstaculizar la cooperación. En juegos de dualidad energética con muchos jugadores, los Mecanismos Eficientes de Coordinación (MEC) destinados a aprovechar la máxima sinergia sincronizada del accionar colectivo de los jugadores, resulta indispensable.

En cada  $D_i$  ( $E_i-T_i$ ), al iterar el juego, según Dreber, Fudenberg y Rand (2014), la cooperación se encuentra motivada por la búsqueda de la maximización de la rentabilidad a largo plazo, e independientemente que algunos jugadores posean objetivos divergentes, como sucede en los PEE, no constituye un determinante clave de la variación que puede tomar el juego repetido. Cada jugador debe considerar las reacciones de los demás jugadores

participantes de un programa de eficiencia energética al momento de diseñar, evaluar y controlar su perfil de estrategias energéticas destinadas a incrementar no sólo sus ganancias energéticas, sino las ganancias energéticas del PEE.

Los juegos de dualidad energética repetidos finitamente, permiten que los jugadores, en contextos favorables, puedan desplegar acciones de respuesta energética recíproca, que permitan maximizar el ahorro energético y económico, y minimizar el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero.

Un número finito de iteraciones debe permitir mejorar la cooperación (Fudenberg y Maskin, 1986), en este sentido, cada jugador ampliaría la probabilidad de reducir su elasticidad de dualidad energética, minimizando el impacto negativo de factores exógenos (políticos, institucionales, macroeconómicos, etc.), y endógenos (capacidades, conocimientos, recursos, etc.) sobre su perfil de decisiones estratégicas y sobre su balance energético.

La mejora energética continua, depende de las acciones colectivas eficientes de todos los jugadores que integran un PEE, no admite la presencia de free-riders en el contexto de la EE (Camarda, 2018). Desde esta perspectiva, las actividades estratégicas y cooperativas destinadas a fomentar el uso racional y eficiente de la energía en los sectores industriales, suponen la superación continua de la performance energética de los jugadores.

La evolución de la mejora energética continua, en un contexto relacional de la energía, admite la evolución de la cooperación energética, para construir un sistema sólido y transparente de Gobernanza de la Eficiencia Energética (GoEE). La evolución de la cooperación (Axelrod y Hamilton, 1981), en el continuum hacia mayores niveles de altruismo en el sector energético e industrial, permitirá avanzar en la lucha contra el cambio climático, y en el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París.

La ruptura del tradicional Dilema del Prisionero, implica el diseño de mecanismos institucionales (Camarda, 2019), que permitan fortalecer el sistema de incentivos que posee un programa de eficiencia energética, de forma tal que, la cooperación colectiva, recíproca y sistémica conduzca a un estadio óptimo de bienestar que pueda ser considerado un equilibrio de Nash eficiente (Maskin, 1999, 2008).

Para ello, dicha cooperación debe crearse a través de una estructura sólida, eficiente, y equitativa, que permita estabilizar y dirigir el comportamiento colectivo de los jugadores a largo plazo, en pos del logro de metas superadoras de eficiencia energética (Bernheim y Drebaj, 1989). La presencia de información completa, perfecta y oportuna, resulta imprescindible para que los jugadores puedan tomar decisiones cada vez más eficientes y sustentables, fundamentalmente en entornos dinámicos como los mercados energéticos (Fudenberg y Levine, 2016).

Resulta una tarea sumamente compleja, la construcción de un PEE sólido a partir de información incompleta de los jugadores y los diferentes perfiles de consumo energético (Laffont y Maskin, 1979). En este sentido, el rol de la Instituciones en materia de EE, desde una perspectiva Neoinstitucionalista, resulta fundamental para promover el uso racional de la energía y el desarrollo de una cultura del ahorro energético, basada en el

respeto por el medio ambiente y la preservación de los recursos naturales a largo plazo (Camera y Casari, 2009).

Las instituciones de North, entendidas como reglas de juego implícitas y explícitas, resultan de suma importancia para definir los marcos generales y/o específicos que deberán adoptar los jugadores en su proceso de toma de decisiones estratégicas. Este conjunto de instituciones en un juego de dualidad energética, deben fomentar el uso racional y eficiente de la energía y crear una hoja de ruta de la eficiencia energética, de forma tal que, en cada proceso iterativo del juego, los jugadores mejoren su performance energética a través de diversos mecanismos de cooperación energética como lo constituyen las redes de reciprocidad energética.

## 7. UNA APROXIMACION A LA RECIPROCIDAD ENERGETICA INDIRECTA

Uno de los mecanismos que brinda la posibilidad de fortalecer los sistemas de cooperación energética y permite generar un cambio paradigmático en el dilema del prisionero, es la Reciprocidad Energética Indirecta (REI) (Nowak, 2007). Para Battigalli y Dufwenberg (2009), los jugadores toman decisiones en base a la reciprocidad basada en intenciones o en la creencia de los demás; estas creencias de orden superior, creencias en los demás y los planes de acción, permite desarrollar y comprender efectos psicológicos dinámicos, que dan origen a la reciprocidad secuencial y la inducción psicológica hacia adelante (Camerer, 1997; Shubik, 1996).

Si bien es posible la existencia de juegos únicos o de un solo disparo en diferentes contextos, los cambios tecnológicos acontecidos en una era global, hace posible que la cooperación dependa del establecimiento de relaciones basadas en la reciprocidad indirecta (Brandts y Sola, 2001; Gong y Yang, 2019; Suzuki y Akiyama, 2007). En el campo de la eficiencia energética, denominamos a este concepto relaciones de reciprocidad energética indirecta.

Tanto la reciprocidad directa como la cooperación condicional, constituyen mecanismos importantes para evitar que ciertos dilemas sociales prosperen e incrementen sus niveles de complejidad. No obstante, en grandes grupos de jugadores, estos mecanismos pueden ser ineficientes porque requieren que los jugadores individuales ejerzan influencia significativa sobre sus pares (Hilbe, Wu, Traulsen y Nowak, 2014).

En juegos de dualidad energética de un solo disparo, en  $D_0$  ( $E_0-T_0$ ), o juegos repetidos en  $D_0$  ( $E_0-T_0$ ),  $D_1$  ( $E_1-T_1$ ),  $D_2$  ( $E_2-T_2$ ), ...,  $D_n$  ( $E_n-T_n$ ); las estrategias de los jugadores basadas en el desarrollo de Redes de Aprendizaje de la Eficiencia Energética (RdAEE) puede manifestar una predisposición al establecimiento de intereses recíprocos, basados en el intercambio de experiencias, conocimientos, información, tecnologías, sistemas de gestión, etc.

Las RdAEE, constituyen una herramienta práctica muy utilizada entre empresas de diferentes sectores industriales, que intenta promover el uso racional y eficiente de la energía a través de las experiencias de cada uno de los jugadores. A través de la aplicación de estos instrumentos, pueden fortalecerse las redes de reciprocidad energética, tanto directa como indirecta.

El desarrollo de las RdAEE, a medida que los jugadores aprenden y acumulan experiencia a través de juegos repetidos, permite mejorar los niveles de cooperación e incrementar los resultados de la matriz de pagos (Dal Bó y Frechette, 2011). Algunos autores como Charness, Frechette y Qin (2007), sostienen que la cooperación es más difundida cuando el sistema de pagos de transferencia endógeno es más factible. También deberían analizarse los pagos de transferencia exógenos de donantes internacionales en PEE.

Siguiendo a Brandts y Sola (2001), en juegos secuenciales simples, analizamos si las reacciones a un determinado resultado energético de referencia, se encuentran influenciadas por los cambios en otro/s resultado/s, denominado/s punto/s energético/s de referencia. Los cambios acontecidos en un punto energético de referencia, pueden conducir a cambios cuantitativamente significativos en la tendencia del resultado energético de referencia, con lo cual, puede verse comprometido el logro de objetivos de EE del programa.

En este sentido, las estrategias basadas en la reciprocidad energética de los jugadores permiten que la cooperación mutua conduzca hacia un equilibrio estable (Hilbe, Traulsen y Sigmund, 2015; Zagorsky, Reiter, Chatterjee y Nowak, 2013) en una cierta  $D_i$  ( $E_i-T_i$ ). No obstante, una estrategia puede ser estable en relación a cierto punto energético de referencia, aunque ello no implica que dicho punto de equilibrio pueda ser vulnerable a la invasión de estrategias no cooperativas, y, por lo tanto, encontrarse condicionado a posibles desestabilizaciones en otras  $D_i$  ( $E_i-T_i$ ) (Le y Boyd, 2007).

El análisis de la dualidad energética demuestra claramente, que la búsqueda de determinadas metas de eficiencia energética que podemos denominar resultados energéticos de referencia, depende de numerosas restricciones y puntos energéticos de referencia, que favorecen o desalientan la performance energética de los jugadores. El impacto del punto energético de referencia sobre los resultados energéticos, variará para cada jugador en función de la eficiencia del mecanismo de configuración que posea cada PEE.

## 8. CONCLUSIONES

El uso racional y eficiente de la energía a escala global, actualmente sigue siendo un gran desafío para la comunidad política, empresaria, científica y la ciudadanía.

El contexto de la EE posee un gran número, tanto de restricciones como de jugadores, por lo que es necesario la utilización de diversos diseños de mecanismos que sean lo más eficientes posible, para que los sectores industriales puedan reducir sistemáticamente la intensidad energética en un contexto de cooperación energética formado por diversas redes de reciprocidad energética.

Desde esta perspectiva, el análisis de la dualidad energética, constituye una herramienta adicional e integrante de un sistema de gestión de la energía, que permitirá evaluar el grado de efectividad de un PEE, mejorando decisiones estratégicas sobre el uso racional y eficiente de la energía.

El análisis de funciones energéticas homotéticas permite visualizar gráficamente las implicancias de la elasticidad de la dualidad energética sobre el perfil de rendimientos energéticos de los jugadores; con lo cual, la fase de diseño, implementación y control de un PEE resultan claves para que los jugadores puedan maximizar el rendimiento energético esperado.

El rol de los formadores de políticas de EE, es crucial para diseñar un JDE evolutivo en términos energéticos, económicos y ambientales.

## 9. REFERENCIAS

- Aumann y Sorin (1989). Cooperation and Bounded Recall. *Games and Economic Behavior*, 1 (1), 5-39.
- Axelrod y Hamilton (1981). The Evolution of Cooperation. *Science*, 211 (4489), 1390-1396.
- Battigalli y Dufwenberg (2009). Dynamic Psychological Games. *Journal of Economic Theory*, 144 (1), 1-35.
- Bernheim y Drebnaj (1989). Collective Dynamic Consistency in Repeated Games. *Games and Economic Behavior*, 1 (4), 295-326.
- Binmore (2011). *La Teoría de Juegos. Una breve introducción*. Alianza Editorial S.A., Madrid, 2011.
- Brandts y Sola (2001). Reference Points and Negative Reciprocity in Simple Sequential Games. *Games and Economic Behavior*, 36 (2), 138-157.
- Camarda (2017). Eficiencia Energética y Competitividad Industrial: Análisis del Sistema de Incentivos en torno al Programa Provincial Energía Eficiente (ProPEE). *Revista Administración Pública y Sociedad*, N° 3, enero-junio 2017, 62-81.
- Camarda (2018). Teoría de Juegos en el campo de la Eficiencia Energética: Análisis de la dinámica industrial en la búsqueda de un Equilibrio de Nash Eficiente. *Revista de la Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa*, Año XXVI, N° 44, noviembre 2018, 41-60.
- Camarda (2019). La Institucionalidad de la Eficiencia Energética en la República Argentina: un análisis de las principales políticas en el período 1980-2017. *Revista Administración Pública y Sociedad*, N° 7, enero-junio 2019, 22-43.
- Camera y Casari (2009). Cooperation among strangers under the shadow of the future. *American Economic Review*, 99 (3), 979-1005.
- Camerer (1997). Progress in Behavioral Game Theory. *Journal of Economic Perspectives*, 11 (4), 167-188.
- Carpio y Coviello (2013). Eficiencia Energética en América Latina y el Caribe: avances y desafíos del último quinquenio. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile, 1-12.
- Charness, Frechette y Qin (2007). Endogenous transfer in the Prisoner's Dilemma Game: an experimental test of cooperation and coordination. *Games and Economic Behavior*, 60 (2), 287-306.
- Consejo Mundial de la Energía (2010). *Eficiencia Energética: Una receta Para el éxito*. Traducido por el Comité Argentino y el Grupo de Eficiencia Energética del CACME, 1-17.



- Dal Bó (2005). Cooperation under the shadow of the future: experimental evidence from infinitely repeated games. *American Economic Review*, 95 (5), 1591-1604.
- Dal Bó y Frechette (2011). The evolution of cooperation in infinitely repeated games: experimental evidence. *American Economic Review*, 101 (1), 411-429.
- Dreber, Fudenberg y Rand (2014). Who cooperates in repeated games: the role of altruism, inequity aversion, and demographics. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 98, 41-55.
- Fudenberg y Levine (2016). ¿Whiter Game Theory? towards a theory of learning in games. *Journal of Economics Perspectives*, 30 (4), 151 -170.
- Fudenberg y Maskin (1986). The folk theorem in repeated games with discounting or with incomplete information. *Econometrica*, 54 (3), 533-554.
- Gibbons (1992). *Un primer curso de Teoría de Juegos*. Antoni Bosch ed., Barcelona, España.
- Gómez, Mathé y Sella Piedrabuena (2013). Eficiencia Energética. En *Matriz de recursos energéticos de la provincia de Córdoba*, CIECS (Conicet y UNC), Editorial Copiar, ed. Devalis, S. A., 95-129.
- Gong y Yang (2019). Cooperation through indirect reciprocity: the impact of higher-order history. *Games and Economic Behavior*, 118, 316-341.
- Hauert y Schuster (1997). Effects of increasing the number of players and memory size in the iterated prisoner's dilemma: a numerical approach. *Proceedings Biological Sciences*, 264 (1381), 513-519.
- Hilbe, Traulsen y Sigmund (2015). ¿Partners or Rivals? Strategies for the iterated prisoner's dilemma. *Games and Economic Behavior*, 92, 41-52.
- Hilbe, Wu, Traulsen y Nowak (2014). Cooperation and control in multiplayer social dilemmas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111 (46), 16425-16430.
- Laffont y Maskin (1979). On the difficulty of attaining distributional goals with imperfect information about consumers. *The Scandinavian Journal of Economics*, 81 (2), 227-237.
- Le y Boyd (2007). Evolutionary dynamics of the continuous iterated prisoner's dilemma. *Journal of Theoretical Biology*, 245 (2), 258-267.
- Maldonado (2008). Estudio sobre empresas energointensivas y su posible contribución a Programas de Eficiencia Energética. Serie Recursos Naturales e Infraestructura N° 135, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile, junio 2008, 1-58.
- Maskin (1999). Nash equilibrium and welfare optimality. *Review of Economic Studies*, 66 (1), 23-38.
- Maskin (2008). Mechanism design: how to implement social goals. *The American Economic Review*, 98 (3), 567-576.
- Maskin (2019). Introduction to mechanism design and implementation. *Transnational Corporations Review*, 11 (1), 1-6.

- Materán Sánchez (2018). Eficiencia Energética en refinerías de petróleo. En Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe (ENERLAC), 2 (2), 72-105.
- Nowak (2007). Five rules for the evolution of cooperation. Science, 314 (5805), 1560-1563.
- Nowak y Sigmund (2005). Evolution of indirect reciprocity. Nature, 437 (7063), 1291-1298.
- Organización Latinoamericana de la Energía (OLADE) (2017). Recomendaciones de política para el sector energético de América Latina y el Caribe en apoyo a la implementación de las NDCS. OLADE, 1-84.
- Organización Latinoamericana de la Energía (OLADE) (2019). Barómetro de la Energía de América Latina y el Caribe 2019: Energía Renovable y Eficiencia Energética. OLADE, 1-15.
- Shubik (1996). Teoría de Juegos en las Ciencias Sociales. Conceptos y Soluciones. Editorial Fondo de Cultura Económica. México, D. F.
- Suzuki y Akiyama (2007). Evolution of indirect reciprocity in groups of various sizes and comparison with direct reciprocity. Journal of Theoretical Biology, 245 (3), 539-552.
- Zagorsky, Reiter, Chatterjee y Nowak (2013). Forgivers triumphs in alternating Prisoner's Dilemma. Plos One, 8 (12): e80814.