

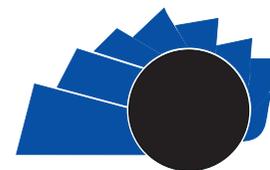


UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

## Visión Electrónica

### Más que un estado sólido

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/visele>



Visión Electrónica

VISIÓN INVESTIGADORA

## Estrategias para el despacho económico con fuentes renovables intermitentes

*Strategies for economic dispatch with intermittent renewable power plants*

*Jorge A. Alarcon<sup>1</sup>, Sergio R. Rivera<sup>2</sup>, Francisco Santamaria<sup>3</sup>*

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

##### Historia del artículo:

Enviado: 25/10/2018

Recibido: 08/11/2018

Aceptado: 20/12/2018

##### Palabras clave:

Despacho económico

Mercado de energía

Optimización

Teoría de juegos

#### RESUMEN

En este artículo se analiza el efecto que tienen las plantas de generación fotovoltaica y eólica en el precio del mercado eléctrico y en el despacho de potencia cuando se usan dos estrategias de negociación diferentes. La primera estrategia asume que las plantas renovables compiten libremente con las demás plantas en el mercado de energía, basados en un precio de oferta. La segunda prioriza el despacho de las renovables, para posteriormente despachar las demás plantas por orden de mérito. Para el estudio se planteó un caso ideal que se resolvió usando la técnica de optimización de “replicator dynamics”, que es una técnica basada en la teoría de juegos. Los resultados indican que en competencia perfecta, las plantas eólicas y fotovoltaicas no logran despachar toda la potencia generada, pero tampoco afectan de manera significativa la potencia y utilidad marginal de otras plantas. Por su parte, dar beneficios a las renovables garantiza el despacho de la potencia disponible, pero afecta la participación de otros competidores en el mercado e incrementa la utilidad marginal y el precio.

#### Open access



##### Keywords:

Economic dispatch

Energy market

Optimization

Game theory

#### ABSTRACT

This paper analyses the effect of photovoltaic and wind power plants, on the price of the electric market, and the effect on the power dispatched by the generation plants, when two different trading strategies are used. The first strategy assumes that renewable plants compete with the same conditions than the other plants in an open energy market, based on a bid price. The second strategy prioritizes the dispatch of renewable power plants, and then, dispatch the other plants in order of merit. For this study, an ideal case was solved using the technique of optimization “replicator dynamics”, which is a technique based on the theory of games. The results indicate that, in a perfect competition market, wind and photovoltaic plants cannot dispatch the full power generated, but neither significantly affect the power and marginal utility of other plants. On the other hand, giving benefits to renewable plants guarantees the dispatch of the full available power, but affects the participation of other competitors in the market, and increase marginal utility and price for customers.

<sup>1</sup> Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica, Candidato a Doctor en Ingeniería Eléctrica. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia. Correo electrónico: [jaalarcon@udistrital.edu.co](mailto:jaalarcon@udistrital.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8718-2542>

<sup>2</sup> Ingeniero Electricista, Especialista en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Ingeniería Eléctrica, Estancia Posdoctoral MIT. Docente de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: [sriverar@unal.edu.co](mailto:sriverar@unal.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2995-1147>

<sup>3</sup> Ingeniero Electricista, Magister en Ingeniería Eléctrica, Doctor en Ingeniería. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia. Correo electrónico: [fsantamariap@udistrital.edu.co](mailto:fsantamariap@udistrital.edu.co). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0391-4508>

## 1. Introducción

El mercado eléctrico ha evolucionado significativamente en los últimos 20 años pasando de un modelo de generación controlado por el estado, poco eficiente y con limitaciones financieras, a un modelo de mercado competitivo en el que hay participación estatal y privada, que permite destinar recursos suficientes para atender los requerimientos de infraestructura del sistema eléctrico. En este nuevo modelo, el precio del mercado de energía se determina con base en el costo marginal de la última unidad de potencia despachada teniendo en cuenta la disponibilidad y el precio de oferta de los generadores, así como la potencia demandada por los usuarios.

Los sistemas de generación eólica y fotovoltaica ayudan a mitigar los requerimientos energéticos y reducir las emisiones de gases contaminantes al medio ambiente, pero la inclusión de estas tecnologías en las redes eléctricas genera incertidumbre por la intermitencia en su funcionamiento, causada por aspectos como cambio repentino en los niveles de radiación y velocidad del viento, dificultad de predecir la potencia disponible hora a hora, e imposibilidad de ofrecer el recurso durante todo el día. Dichos aspectos pueden afectar las condiciones técnicas y económicas, generando cambios en el precio del mercado y en el funcionamiento de las redes eléctricas.

Algunos estudios que analizan el efecto de este tipo de plantas en las redes eléctricas y su efecto en las pérdidas, flujos de potencia y regulación de tensión [1], [2]. Los resultados indican que se pueden obtener beneficios seleccionando adecuadamente la capacidad y ubicación de las plantas, pero de no ser así se genera produce el efecto contrario [3], [4].

Otros estudios analizan cómo se afecta el despacho de potencia cuando se tienen plantas de generación en firme operando junto con plantas eólicas y fotovoltaicas, y muestran que disminuyen la potencia despachada y el número de horas que estas plantas trabajan [5], [6]. El impacto de estos cambios también depende de las políticas de promoción y las metodologías de despacho.

El estado Colombiano en cabeza de la UPME (Unidad de Planeación minero energética) mediante la ley 1715 de 2014, abrió la posibilidad de integrar estas tecnologías al sistema eléctrico nacional, con la opción de vender energía a la red. Esto ha generado

una oferta creciente de proyectos con tecnologías eólica y fotovoltaica, siendo está una de las razones por las que surge el interés de estudiar y entender su impacto en el mercado eléctrico.

Este paper analiza el efecto de las plantas renovables en el despacho de potencia con dos estrategias de mercado diferentes. La primera asume que las plantas renovables compiten en iguales condiciones que las plantas de generación en firme, con base en un precio de oferta. La segunda les garantiza el despacho de la potencia disponible, para después realizar el despacho de las plantas en firme por orden de mérito, para cubrir la demanda que no ha sido atendida.

## 2. Metodología

### 2.1. El Problema del Despacho Económico

El mercado de energía sigue un modelo de negocio oligopólico en el que existen pocos oferentes con gran capacidad de negociación y capacidad de distorsionar el mercado, quienes además pueden afectar los precios finales del bien a negociar. Por su parte, el estado establece reglas de juego que limitan la posibilidad de distorsión y que propician la asignación de recursos de manera eficiente al menor precio posible, garantizando que se cubre la demanda requerida por los usuarios [6].

Atendiendo estos requerimientos, algunos gobiernos han impulsado la libre competencia en el mercado de energía, implementando normas para regular su funcionamiento [11]. En estas se definen las restricciones, reglas de juego y los mecanismos a seguir para garantizar el funcionamiento del mercado bajo los principios indicados.

Para solucionar este problema se usan técnicas como optimización dinámica, optimización por métodos bio-inspirados y técnicas basadas en teoría de juegos [7], [8], siendo esta última el tipo de técnica usada en este trabajo “Replicator Dynamics”.

### 2.2. Teoría de Juegos

Abarca un grupo de técnicas usadas para analizar situaciones en las que se requiere de un consenso para lograr la subsistencia de la población en el entorno que la rodea, teniendo en cuenta que prima el beneficio de la población y no de un solo individuo [12-15].

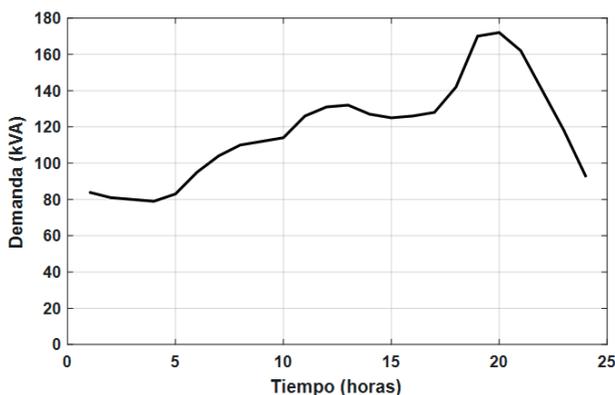
### 2.3. Replicator Dynamics (RD)

Está en la categoría de juegos dinámicos y se caracteriza porque hay repetición continua de jugadas y juegos de etapa, en los que los jugadores tienen la opción de conocer la información de todos los individuos en la etapa anterior [13], [15] alcanzando el óptimo cuando se logra el balance entre beneficios y costos. Esta técnica se ajusta al funcionamiento del mercado de energía, en el cual se hacen transacciones (jugadas) de forma diaria (repetitiva), conociendo previamente el resultado de las jugadas anteriores (cantidades y precios). La técnica de RD evalúa la utilidad marginal de los individuos (generadores), y alcanza el óptimo del mercado cuando la ésta es igual para todos los generadores.

### 2.4. Descripción del Caso de Estudio

Para el caso de estudio se analiza una microrred eléctrica ideal que se representa alimentada por una planta a gas (66 kW), una planta diesel (106 kW), una planta fotovoltaica (47 kW) y una planta eólica (172 kW), para un total instalado de 391 kW. El recurso eólico y la radiación solar se representan con curvas típicas normalizadas y la demanda de potencia se representa con una curva típica con un valor pico de 172 kW (Figura 1).

**Figura 1.** Curva de demanda diaria de Potencia para la microrred



Fuente: elaboración propia.

### 2.5. Planteamiento del Problema

El RD optimiza el despacho para cada hora del día actualizando la potencia disponible en las plantas eólica y fotovoltaica, ya que ésta cambia dependiendo

del recurso primario (viento y radiación). La solución indica la potencia a despachar por cada una de las cuatro plantas, garantizando un balance de potencia entre la generación y la carga.

El cálculo de fitness se realiza siguiendo la representación de la utilidad Marginal presentada por [10], que se indica en (1).

$$F_{pi}(p_{ri}) = \frac{d J_{pi}}{d p_{ri}} = \frac{2}{c_{pi}} * \left(1 - \frac{p_{ri}}{P_{maxi}}\right) \tag{1}$$

Donde:  $J_{pi}$ : función de utilidad de la planta  $i$ ;  $p_{ri}$ : potencia despachada por la planta  $i$ ;  $P_{maxi}$ : capacidad máxima de potencia en la planta  $i$ ;  $C_{pi}$ : factor de costo de generación en la planta  $i$ ;  $F_{pi}$ : fitness de la planta  $i$  (utilidad marginal)

El RD utiliza un factor de ajuste indicado en (2) que mide la diferencia entre el fitness de cada individuo y el fitness promedio de la población que se calcula con (3), para luego ajustar la potencia a despachar en cada iteración hasta que se alcanza el consenso (el óptimo para la población).

$$\dot{p}_i = \beta * p_i * (f_i - \bar{f}) \tag{2}$$

Donde:  $f_i$ : fitness del individuo  $i$ ;  $\bar{f}$ : fitness promedio de la población;  $p_i$ : Potencia despachada en la iteración anterior;  $\dot{p}_i$ : potencia a despachar en iteración actual (ajustada)

$$\bar{f} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_j * f_j \tag{3}$$

El problema de optimización se plantea siguiendo (4) y (5).

$$\max J_p(p_r) = \sum_{i=1}^N J_{pi}(p_{ri}) \tag{4}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N p_{pi} = \sum_{i=1}^N P_{Li} = P_L \tag{5}$$

$$0 \leq p_{ri} \leq P_{maxi}, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N$$

### 3. Solución del Problema Usando RD

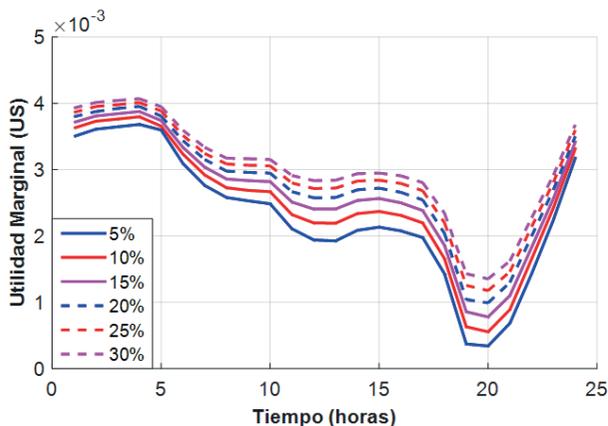
#### 3.1.Efecto de las Estrategias en la Utilidad Marginal

Para tener un parámetro de comparación y analizar cómo las plantas intermitentes afectan el despacho, se comparan dos estrategias de despacho. En la primera las plantas compiten en igualdad de condiciones durante el despacho, despachando cada planta por orden de mérito. En la segunda se despacha la potencia disponible en las plantas renovables (CPR) y después se despachan las demás plantas por orden de mérito hasta cubrir la potencia que no ha sido atendida. Para cada estrategia se simularon seis valores de potencia renovable medidos respecto de la demanda pico diaria (5%, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%).

#### 3.2.Estrategia 1. Despacho Basado en Libre Competencia

Los resultados de la Figura 2 indican que en libre competencia se producen cambios reducidos en la utilidad marginal. En todos los casos el fitness tiene la misma forma pero aumenta cuando el porcentaje de renovable instalada se incrementa. Éste incremento se da porque cada planta tiene una función de utilidad diferente y ésta depende de su capacidad, con lo cual se afecta el precio y las cantidades despachadas. Para el caso de las plantas en firme, un aumento en la utilidad implica una reducción en la potencia despachada.

Figura 2. Variación de la utilidad marginal con cambios en la generación de las plantas eólica y fotovoltaica



Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran cambios en la utilidad menores al 15% en la mayoría de los casos, pero pueden alcanzar valores cercanos al 200% en algunos casos como la hora 20, cuando la potencia renovable es el 30% de la potencia pico demandada.

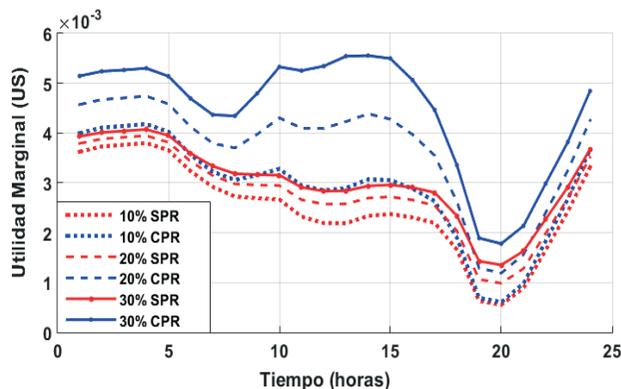
#### 3.3.Estrategia 2. Despacho con Prioridad a las Renovables

En este caso la generación renovable se maneja como una carga negativa que se resta a la demanda total como se ve en (6) y modifica la potencia a despachar por las plantas en firme.

$$D_{Res} = D_{Tot} - P_{Fotov} - P_{Eolic} \tag{6}$$

Donde: DRes Demanda no atendida; DTot, la demanda total; PFotov potencia entregada por la planta fotovoltaica; PEolic potencia entregada por la planta eólica.

Figura 3. Comparación de escenarios: dando prioridad a las renovables CPR (curva azul) y sin dar prioridad a las renovables SPR (curva roja) en el despacho



Fuente: elaboración propia.

La Figura 3 muestra el Fitness (utilidad marginal) con las dos metodologías, y evidencia un incremento significativo en la utilidad marginal cuando se usa la estrategia 2, que puede llevar a un incremento en el costo de la energía para el mercado y para el usuario final. El incremento se hace más evidente cuando la planta fotovoltaica tiene mayor capacidad de generación, alcanzando la mayor diferencia en la hora 12, ya que pasa de una utilidad de  $2.2 \cdot 10^{-3}$  US a una utilidad de  $5.6 \cdot 10^{-3}$  US, que implica un aumento del 154 %.

### 4. Efecto de las Estrategias en la Potencia Despachada

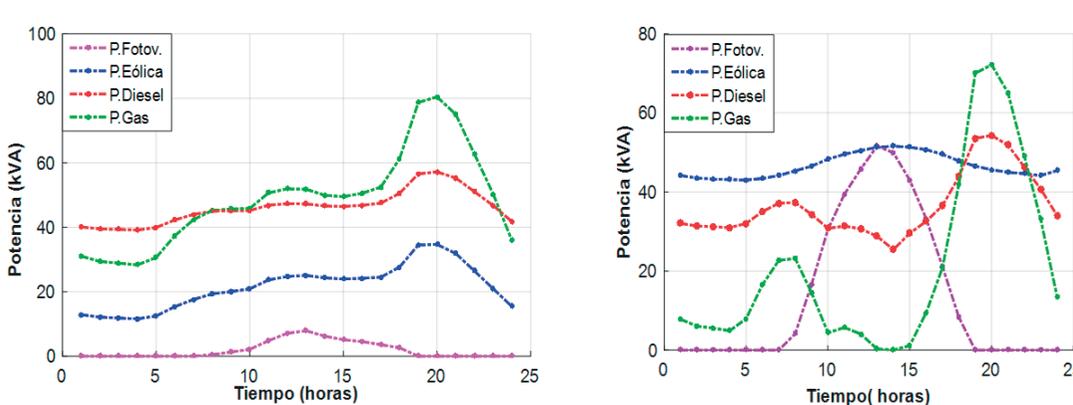
#### 4.1. Comparación de Estrategias con 30% de Renovable

Al comparar las dos metodologías se ve una gran diferencia en la potencia que despachan las plantas. La Figura 4a muestra la solución obtenida cuando se usa el despacho por orden de mérito en libre competencia. En este se ve una gran participación de las plantas a gas y diesel, mientras que la participación de la fotovoltaica y eólica son bajas, comparadas con lo observado en la Figura 4b.

La Figura 5b muestra una reducción significativa en la potencia que despacha la planta a gas respecto de lo observado en la Figura 5a, porque las plantas eólica y fotovoltaica atienden la mayor parte de la demanda entre las 9 y 17 horas, y porque su función de utilidad es más sensible a los cambios de potencia.

La metodología 2 implica un gran beneficio ya que la potencia despachada aumenta hasta en un 246% para la planta eólica (en la hora 1), y un 455% en fotovoltaica (en la hora 13).

**Figura 4.** Efecto de las estrategias de despacho en la potencia entregada por las plantas. a) Basado en libre competencia. b) con beneficio a las renovables

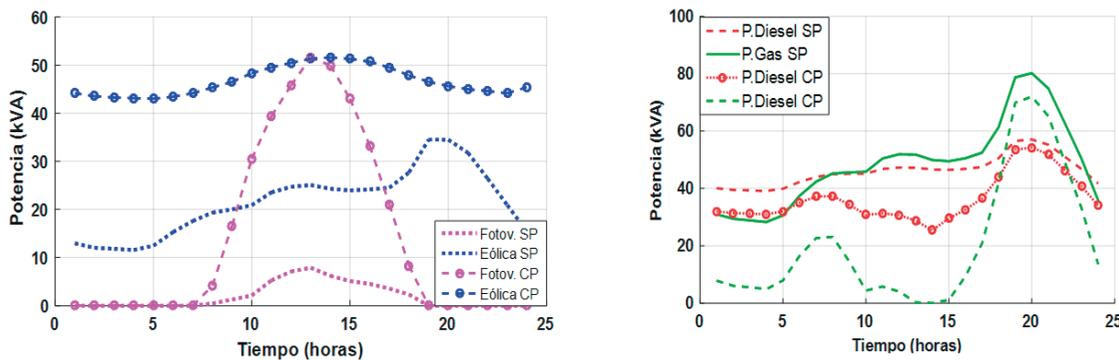


a) Estrategia de libre mercado

b) Estrategia de beneficio a renovables

Fuente: elaboración propia.

**Figura 5.** Comparación de potencia despachada con las metodologías de libre mercado (SP) y con beneficio a las renovables (CP) con 30% de renovable



a) Eólica y fotovoltaica

b) Gas y diesel

Fuente: elaboración propia.

## 5. Discusión de Resultados

Los resultados de este trabajo indican que una estrategia de libre competencia de mercado, producen una mayor eficiencia del mercado que se ve reflejada en un menor precio del mercado y un menor costo para el usuario final. Por el contrario, la estrategia de proteccionismo no solo incrementa los precios del mercado, sino que además reduce de manera significativa la potencia a despachar por algunas de las plantas.

Un aspecto importante es la sensibilidad del mercado a la inclusión de las tecnologías de generación con plantas eólicas y fotovoltaicas, ya que la utilidad marginal varía significativamente cuando hay cambios en la participación de las plantas renovable. Esto se evidencia en la Figura 5, donde se ve un cambio importante en la potencia que despacha la planta a Gas cuando hay un 30% de participación de las renovables.

## 6. Conclusiones

El estudio muestra que la estrategia del mercado afecta la utilidad marginal y el precio de la energía en el mercado, por lo tanto deben ser evaluadas teniendo en cuenta las necesidades y sus consecuencias en el mercado, los usuarios y los generadores entre otros.

Es importante incentivar la inversión en tecnologías renovables, pero se debe encontrar un balance entre la proporción de este tipo de plantas en el sistema y el precio de la energía, sin que esto afecte de significativamente el negocio de los demás operadores, que se podrían desincentivar con consecuencias como afectación en la continuidad del suministro.

Basado en los resultados de las simulaciones se puede concluir que, en caso de plantearse incentivos para promover el crecimiento de las tecnologías eólica y fotovoltaica es importante evaluar de manera crítica cuales ofrecen mejores condiciones para el mercado y para el sistema eléctrico, porque el uso de estrategias de proteccionismo severo pueden afectar el mercado y las tecnologías que ya están en funcionamiento, pero la falta de estos podría eludir a los inversionistas para implementar este tipo de tecnologías.

## 7. Reconocimientos

Agradecimientos a la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por el apoyo y financiación en el trabajo de investigación con el apoyo para estudios de doctorado, y a la Universidad Nacional de Colombia.

## Referencias

- [1] C. Cecati, C. Citro y P. Siano, "Combined operations of renewable energy systems and responsive demand in a smart grid," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, n° 4, pp. 468–476, 2011, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2161624>
- [2] A. S. Brouwer, M. van den Broek, A. Seebregts y A. Faaij, "Impacts of large-scale Intermittent Renewable Energy Sources on electricity systems, and how these can be modeled," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 443–466, May 2014, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.076>
- [3] Y. Yang, S. Zhang y Y. Xiao, "Optimal design of distributed energy resource systems coupled with energy distribution networks," *Energy*, vol. 85, pp. 433–448, Jun. 2015, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.101>
- [4] S. Abdi y K. Afshar, "Application of IPSO-Monte Carlo for optimal distributed generation allocation and sizing," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 44, n° 1, pp. 786–797, Jan. 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.08.006>
- [5] R. Kumar, P. Datta Ray, and C. Reed, "Smart grid: An electricity market perspective," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, ISGT Europe*, 2011.
- [6] M. Peng, L. Liu y C. Jiang, "A review on the economic dispatch and risk management of the large-scale plug-in electric vehicles (PHEVs)-penetrated power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, n° 3, pp. 1508–1515, Apr. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.12.009>
- [7] M. Burger, B. Klar, A. Müller & G. Schindlmayr, "A spot market model for pricing derivatives in electricity markets." *Quantitative Finance*, vol 4, n° 1, 2004, pp 109–122, <https://doi.org/10.1088/1469-7688/4/1/010>

- [8] M. L. Baughman and W. W. Lee, "A monte carlo model for calculating spot market prices of electricity". *IEEE Transaction on Power Systems* vol. 7, n° 2, 1992, <https://doi.org/10.1109/59.141763>
- [9] O. Velez, H. Gomez, and J. A. Parejo, "Computación Evolutiva y Teoría de Juegos : Un híbrido para la automatización en sistemas de soporte a la negociación," *Industrial Data Revista de Investigación*, vol. 9, n° 2, pp. 39–46, 2006.
- [10] E. Mojica, C. Barreto y N. Quijano, "Population Games Methods for Distributed Control of Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol 6, n°. 99, pp. 2586–2595, 2015, <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2444399>
- [11] C. Cain and J. Lesser "A Common Sense Guide to Wholesale Electric Markets," Online Book, published by Bates White Economic Consulting, 2007. [En línea] Disponible en: [https://www.bateswhite.com/media/publication/55\\_media.741.pdf](https://www.bateswhite.com/media/publication/55_media.741.pdf)
- [12] L. Arozamena, A. Neme, J. Oviedo, F. Tome, F. Weinschelbaum, "Progresos en Teoría de Juegos y sus Aplicaciones" Temas Grupo Editorial, Serie Progresos en Economía, Buenos Aires, 2011.
- [13] R. Cressman y Y. Tao, "The replicator equation and other game dynamics," *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* 111. July 14, 2014 (Supplement 3). <https://doi.org/10.1073/pnas.1400823111>
- [14] Accinelli Elvio, "La teoría de juegos evolutivos, naturaleza y racionalidad", Universidad de Santiago de Compostela, Temas de Teoría Económica y su Método no 15 Documento 117 de la Serie Economic Development, Enero de 2011 [En línea] Disponible en: <https://ideas.repec.org/p/eea/ecodev/117.html>
- [15] S. Rocha, A. Laruelle, P. Vasco, P. Zuazo y P. Vasco, "Replicator Dynamics and Evolutionary Stable Strategies in Heterogeneous Games" University of Leicester, Department of Economics, Working Paper No 11/54, December, 2011. [En línea] Disponible en: <https://www.le.ac.uk/ec/research/RePEc/lec/leecon/dp11-54.pdf>