



Análisis de Interacciones entre Procesos de Expansión de Generación y Transmisión de Energía Eléctrica con Dinámica de Sistemas

Daniel Ríos, Félix Fernández, Gerardo Blanco

Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos, Facultad Politécnica - UNA

Paraguay

RESUMEN

La reestructuración de los mercados eléctricos ha supuesto un cambio de paradigma en el ámbito de la toma de decisiones inherente a la expansión de los sistemas de potencia. Principalmente, esto se debe a la inclusión en dichos procesos de diversos agentes autónomos, quienes no siempre actúan de manera coordinada. Atendiendo a esto, el uso de enfoques de simulación resulta de gran utilidad para analizar el comportamiento e interacción de los participantes dentro del mercado. Este trabajo se encuentra enfocado en presentar una revisión del estado del arte sobre la aplicación de la teoría de Dinámica de Sistemas (DS) para replicar la dinámica a largo plazo de inversiones en infraestructura eléctrica en sistemas de potencia. En este sentido, se ha encontrado que DS ha sido empleado extensamente tanto para evaluar la expansión del parque generador, así como el impacto de inversiones en la red de transmisión, requeridas para interconectar distintos mercados eléctricos. Sin embargo, no se han encontrado antecedentes de la aplicación de DS para evaluar la dinámica de la interacción entre decisiones de inversión en generación y transmisión. En este contexto, el principal aporte del trabajo consiste en proponer delineamientos básicos para analizar la interacción de inversiones emprendidas por agentes de generación y transmisión de un mercado eléctrico competitivo, mediante el enfoque de DS. Finalmente, dicho modelo buscará ser una herramienta para delinear políticas que incentiven la coordinación y cooperación entre agentes autónomos del mercado eléctrico.

PALABRAS CLAVES

Planificación de Expansión de Generación, Planificación de Expansión de Transmisión, Regulación de Transmisión, Modelado de Mercados Eléctricos, Dinámica de Sistemas.



1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de agentes autónomos al proceso de expansión de los sistemas de potencia ha significado el aumento de la complejidad en el análisis de evolución de los márgenes de reserva de los mercados energéticos. Actualmente, una alternativa válida para asistir a la toma de decisiones en organizaciones que involucran a múltiples agentes consiste en la utilización de modelos computacionales. En ese contexto, este trabajo propone identificar y analizar las interacciones que pueden vincular, en el largo plazo, los procesos de expansión de generación y transmisión en un mercado eléctrico liberalizado, aplicando el enfoque de simulación Dinámica de Sistemas (DS).

Este artículo está organizado de la siguiente manera: primeramente, se definen el objetivo general y los objetivos específicos del trabajo; a continuación, se detalla la caracterización del problema de investigación; luego, se presenta una recopilación literaria sobre el empleo de DS para asistir a la planificación de actividades de generación y transmisión de energía eléctrica; posteriormente, se proponen los delineamientos que pueden llegar a representar un proceso interactivo de toma de decisiones de ambos agentes. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

2. OBJETIVO

Analizar las interacciones existentes entre los procesos de expansión de generación y transmisión de energía eléctrica con Dinámica de Sistemas.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

4. CARACTERÍSTICAS DE INVERSIÓN EN GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Un acabado detalle de las características de las inversiones en plantas de generación, las cuales influyen sustancialmente en el comportamiento de los inversores en un ambiente competitivo, puede ser encontrado en [1]. En resumen, este tipo de inversión es intensivo de capital y de un solo paso, tiene periodos prolongados de amortización, es irreversible, y está sujeto a numerosas incertidumbres en el largo plazo, en términos de desarrollo de expectativas de futuras rentas. Algunas de estas incertidumbres son:

- El crecimiento de la demanda, la programación de mantenimiento, el tiempo de retiro y tamaño de plantas viejas e ineficientes, y el tiempo de entrada y tamaño de nuevas centrales, entre otras. Estas incertidumbres influyen grandemente en las decisiones de inversión, sobre todo, en centrales de punta;
- Los costos de combustible, el progreso de eficiencia térmica de las plantas, y la eventual entrada o salida de competidores. Estas incertidumbres influyen grandemente en las decisiones de inversión, sobre todo, en centrales de base y de mediana capacidad. En sistemas con potencial hidroeléctrico o eólico, se introducen incertidumbres adicionales, tales como la disponibilidad de estos recursos.
- Por último, como la propia entrada al mercado, y la de otras firmas generadoras, reduciría el déficit del margen de reserva de generación y, consecuentemente, las expectativas de rentas por picos de precios de la electricidad, los inversores aparentemente no tienen ventajas de ser los primeros en actuar. Debido a ello, es probable que sean extremadamente cautos y, por ende, su respuesta para ajustar la capacidad de generación se torne insensible a las señales de precios [2], [3].

5. CARACTERÍSTICAS DE INVERSIÓN EN TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Las inversiones en transmisión comparten la mayoría de las características con aquellas de generación [4], [5]; sin embargo, y con respecto al largo plazo, en transmisión son inclusive más vulnerables a las continuas

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

incertidumbres que afectan las variables clave del mercado, tales como el crecimiento de la demanda, el costo de los combustibles, el retiro o adición de inversiones en generación, entre otros [6]. De manera general, las inversiones en transmisión pueden ser clasificadas en:

- Inversión regulada: en este caso, el objetivo es mejorar la confiabilidad y la economía a nivel del sistema; los costos del proyecto son asignados mediante un análisis centralizado de costo-beneficio [7]. El incentivo para los agentes consiste en recuperar la inversión a través de tasas de retorno preestablecidas sobre un horizonte dado.
- Inversión mercantil: es un producto de la liberalización de los mercados eléctricos. En este caso, la expansión de transmisión recae en la existencia de competencia y la entrada libre al mercado; el atractivo para los agentes consiste en el establecimiento de un mecanismo de rentas por congestión de las líneas.

En [8] se profundiza acerca en la descripción de la inversión mercantil; en ese sentido, se puede tomar como ejemplo una situación vigente en Estados Unidos de América, en donde existen mercados eléctricos mayoristas basados en Precios Marginales Locales (PML), y mecanismos de incentivos basados en la asignación de Derechos Financieros de Transmisión (DFT) [9]. Bajo este régimen, las rentas por congestión de un agente consisten en la sumatoria del producto entre los DFT que tiene asignados, y las diferencias entre PML de los pares de nodos de entrada y salida del flujo de potencia que transporta la línea.

6. MODELADO DE MERCADOS ELÉCTRICOS CON DINÁMICA DE SISTEMAS

En [10] son presentados, desde un punto de vista de análisis económico, dos tipos importantes de modelos de mercado: optimización y simulación. Particularmente, los modelos simulación permiten modelar con flexibilidad el comportamiento real de los mercados eléctricos en el largo plazo; estos enfoques son apropiados para capturar algunas características personales de los inversores, tales como la racionalidad limitada, las habilidades de aprendizaje, las asimetrías de información, entre otras [11]. Dos de las principales corrientes que cubren el desarrollo de este tipo de modelos son el Modelado Basado en Agentes (MBA) y la Dinámica de Sistemas (DS) [12].

El enfoque basado en DS se ocupa de identificar la estructura de retroalimentación de un sistema, a nivel general, y la lógica de las interrelaciones entre sus componentes, con el objetivo de obtener su respuesta dinámica en el largo plazo. Una referencia de la literatura sobre este tema es [13].

Una herramienta de la metodología de DS, útil para ofrecer una perspectiva preliminar acerca de la estructura de retroalimentación del sistema considerado, es el Diagrama de Lazo Causal (DLC). En nuestro caso de estudio, el DLC es capaz de mostrar, en principio, el equilibrio básico de retroalimentación que gobierna el desarrollo a largo plazo de los mercados de energía.

En un DLC, las relaciones causales entre dos variables, sean x e y , son identificadas por flechas. El signo positivo (negativo) al final de cada flecha puede ser entendido como un pequeño cambio positivo en x que provoca una variación positiva (negativa) sobre la variable y . Asimismo, un lazo puede ser caracterizado como de refuerzo (de equilibrio) si un pequeño cambio positivo en x provoca una variación positiva (negativa) sobre sí mismo, luego de recorrer todo el lazo.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al segmento considerado, los trabajos recopilados son enumerados en la Tabla I. A continuación, se describe la contribución de cada uno.

Tabla I: Trabajos recopilados de acuerdo al segmento considerado para el análisis de expansión con DS.

Análisis de Expansión de:		
G ¹	IeM ²	T ³
[1] [14] [15] [16] [17] [18] [19]	[20] [21] [22]	[8]

¹G: Generación; ²IeM; Interconexión entre Mercados; ³T: Transmisión.

8. PLANIFICACIÓN DE EXPANSIÓN DE GENERACIÓN

Uno de los primeros trabajos que ha empleado DS para evaluar la Planificación de Expansión de Generación (PEG) es [14], en donde se describe el potencial para la aparición de ciclos en la construcción de centrales, causando periodos alternados de exceso y falta de suministro de electricidad. A esta misma conclusión se ha llegado en [1], en donde se ha definido que, atendiendo a los lazos de retroalimentación integrados en la estructura de los mercados eléctricos liberalizados, y a la existencia de ciertas demoras, la evolución del mercado en el largo plazo puede exhibir un comportamiento bastante volátil. Lo último es demostrado en [15], cuyo modelo describe las incertidumbres del mercado a largo plazo, a través de simulaciones estocásticas.

A diferencia de los análisis de mercados liberalizados con competencia perfecta, en [16] y [17] se proponen alternativas para mejorar la diferenciación entre compañías a la hora de decidir el emprendimiento de nuevas inversiones. Por otro lado, y desde una perspectiva regulada, en [18] y [19] se investigan los efectos de distintos mecanismos de pagos por capacidad, como incentivo de inversiones en plantas de generación.

9. PLANIFICACIÓN DE EXPANSIÓN DE GENERACIÓN CONSIDERANDO INTERCONEXIONES ENTRE MERCADOS

En [20], el objetivo ha consistido en analizar el comportamiento de una interconexión mercantil entre mercados, estableciendo dos formas de operación de estas líneas de transmisión: la retención estratégica de capacidad y la oferta obligatoria. Los resultados obtenidos sugieren que el manejo de la oferta de la línea por parte del operador de la interconexión no va en detrimento de los mercados; es más, las simulaciones han revelado que es necesaria la existencia de retención de capacidad por parte del transmisor en alguna fase del desarrollo del proyecto mercantil, ya sea en el dimensionamiento de la línea de transmisión, o en la operación del vínculo. Casos de estudio sobre interconexiones entre mercados eléctricos en Latinoamérica son [21] y [22].

10. PLANIFICACIÓN DE EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN

En [8] fueron incluidos los primeros DLC que pueden dirigir el proceso de Planificación de Expansión de Transmisión (PET). Se ha considerado que el involucramiento de regulación en el marco de la PET es esencial, debido a que es poco probable que una intervención de carácter mercantil produzca suficientes inversiones por sí sola, debido a las condiciones de monopolio natural del segmento. Se ha establecido que la inversión en capacidad de transmisión sea producto de un lazo de retroalimentación negativo que alivie las rentas por congestión del sistema: siempre y cuando existan suficientes incentivos regulatorios para apoyar la PET, es posible eliminar completamente la congestión en dicho sistema. Cabe resaltar que el objetivo de dicho trabajo ha sido proponer delineamientos para el análisis dinámico de los incentivos para la inversión, solamente, en transmisión; no así la interacción o coordinación de emprendimientos de generación y transmisión.

11. PROPUESTA DE ANÁLISIS DE INTERACCIÓN DE LOS PROCESOS DE PEG Y PET CON DS

De acuerdo a la revisión anterior, puede concluirse que hasta el momento no se han presentado trabajos que evalúen la interacción entre incentivos de inversión de generación y transmisión con DS, en mercados eléctricos liberalizados. En ese contexto, el principal aporte de este trabajo consiste en representar, a través de un DLC, un proceso de retroalimentación conjunto de PEG y PET, basado en señales del mercado, incluyendo la descripción de incentivos para el establecimiento de marcos regulatorios en el segmento de transmisión. Un ejemplo de este enfoque mixto para el análisis de inversiones en transmisión es incluido en [23]. El DLC elaborado se muestra en la Figura 1.

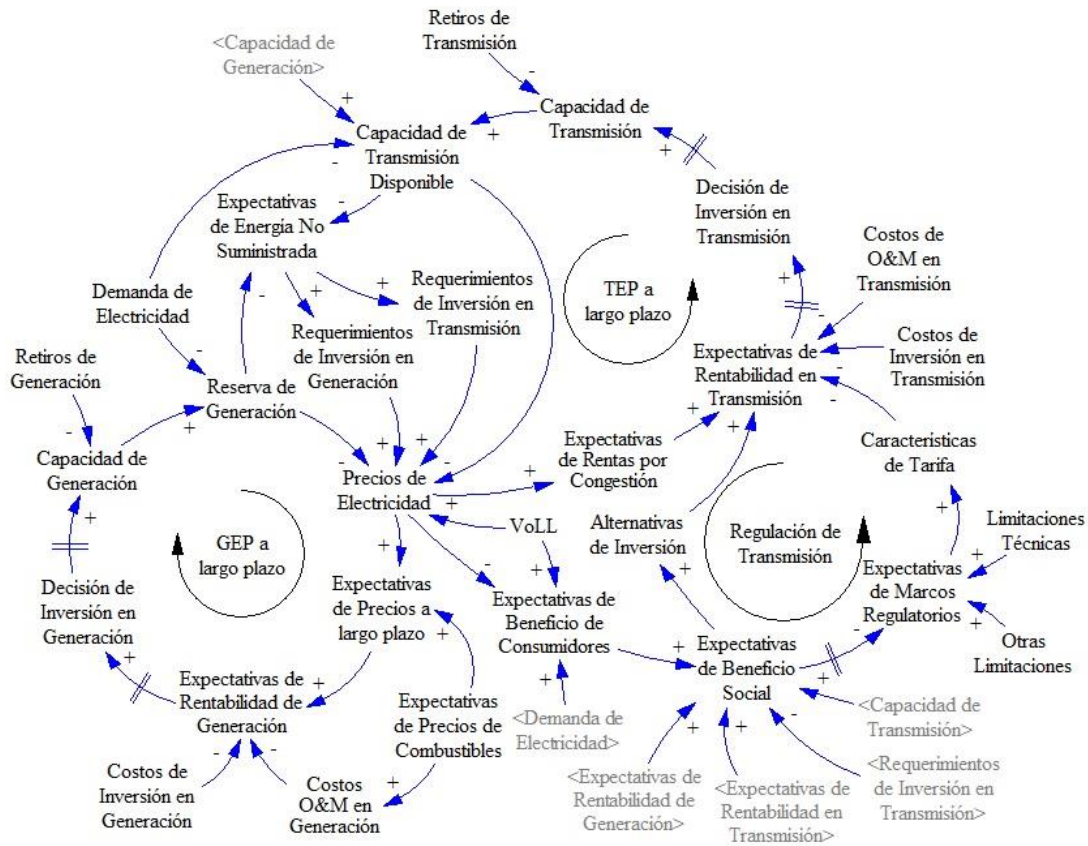


Figura 1: DLC propuesto para analizar la interacción de los procesos de PEG y PET, y el desarrollo de incentivos para la regulación de la transmisión.

La propuesta corresponde a una ampliación del modelo de presentado en [1], el cual explica el flujo de información en que gobierna la PEG en el contexto de estudio. En ese sentido, este trabajo incorpora otros tres lazos de retroalimentación, todos ellos lazos de equilibrio: el primero, explica el proceso de PET a largo plazo; el segundo, el origen de interacción entre los procesos de PEG y PET, y el tercero, los incentivos para la regulación de la transmisión. Con la intención expresa de vincular los lazos de PEG y PET, se incluye la variable Expectativas de Energía No Suministrada; asimismo, se considera que los incentivos para la regulación están guiados por los precios de la electricidad, e influyen, finalmente, en las expectativas de rentabilidad en transmisión, determinantes del lazo de PET.



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016**

En este modelo de mercado, el lazo de PET estará guiado por el aumento de los precios de la electricidad, debido a que ello estimula expectativas de rentas por congestión. Las mismas determinan, a su vez, la formación de expectativas de rentabilidad de eventuales emprendimientos, en función a expectativas de costos de inversión, así como también, los correspondientes a operación y mantenimiento. En ese contexto, la puesta en servicio de nuevas líneas de transmisión estará condicionada por retardos de decisión de inversión, debido a la necesidad de desarrollar una certidumbre suficiente acerca de la recuperación del capital invertido, y de construcción. De esta manera, la nueva capacidad de transmisión se encontrará determinada por la capacidad actual, el retiro de instalaciones que han cumplido con su vida útil y la adición de los nuevos emprendimientos. El aumento de las capacidades de transmisión y de generación será ajustado respecto al crecimiento de la demanda para establecer la Capacidad de Transmisión Disponible, variable análoga a la Reserva de Generación en el lazo de PEG, y cuyo aumento influirá nuevamente, y de manera inversamente proporcional, en los precios de la electricidad, debido al alivio de la congestión de las líneas de transmisión, percibida inicialmente.

La necesidad de coordinar la planificación de emprendimientos de generación y transmisión surgirá partir de la determinación de Expectativas de Energía No Suministrada en el sistema, las cuales serán definidas, a su vez, luego de comparar los déficits existentes de Reserva de Generación y Capacidad de Transmisión Disponible. Los requerimientos de inversión en ambos segmentos surgirán como consecuencia del aumento de dichas expectativas, debido a la disminución de cualquiera de los márgenes de disponibilidad considerados. Finalmente, y de forma general, el nuevo nivel de precios predominante del mercado estará marcado por ambos requerimientos inversión, así como por la Reserva de Generación y la Capacidad de Transmisión Disponible, teniendo también como referencia al Valor de Pérdida de Carga (VOLL, *Value of Lost Load*) vigente.

Con respecto al desarrollo de incentivos para la regulación de transmisión, los precios de la electricidad servirán como referencia al regulador para determinar las expectativas de beneficio de los consumidores, junto con el VOLL y la demanda. Dichas expectativas, junto con las correspondientes expectativas de rentabilidad en generación y transmisión, la Capacidad de Transmisión Disponible, y los requerimientos de inversión respectivos, determinarán las expectativas del beneficio social a ser obtenido de los eventuales emprendimientos de infraestructura eléctrica, teniendo como referencia la definición establecida en [24]. Cabe resaltar que el ajuste entre la Capacidad de Transmisión Disponible y los requerimientos de inversión respectivos se incluyen de manera explícita para enfatizar la consideración de la congestión de las líneas como determinante de los precios que afectan a los consumidores. Siguiendo con el curso del lazo, la disminución del gradiente de expectativas de beneficio social incentivará el estudio de ajuste sobre las condiciones regulatorias vigentes para la actividad de transmisión, luego de un retardo, dado por la existencia de periodos regulatorios; un aumento, por su parte, potenciará el desarrollo de alternativas de inversión. El establecimiento de tarifas reguladas, finalmente, afectará la formación de expectativas de rentabilidad de este tipo de agentes, las cuales, en el marco de un ambiente perfectamente competitivo, dependerían, exclusivamente, de las rentas por congestión.

12. CONCLUSIONES

Este trabajo contiene una recopilación literaria acerca del empleo del enfoque de simulación de DS en el marco de la expansión de los segmentos que componen un sistema eléctrico de potencia. En ese sentido, el principal aporte ha consistido en proponer delineamientos válidos para analizar y alentar la coordinación a largo plazo entre las decisiones de inversión en los segmentos de generación y transmisión, y la maximización del beneficio social, en el contexto de un mercado eléctrico liberalizado.

La propuesta mencionada, en forma de DLC, es descrita mediante el seguimiento del flujo de información a través de los lazos de retroalimentación; se enfatiza en la identificación de las variables que vinculan a los



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016**

mismos, y en los retardos existentes, los cuales no fueron considerados de manera sistemática por los modelos revisados, y son, finalmente, una fuente importante de dinámica en el sistema. El mecanismo de equilibrio planteado pretende ser responsable de mantener un adecuado margen de reserva, tanto de generación como de transmisión, para garantizar la disponibilidad de electricidad en el largo plazo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Olsina, F. Garcés, and H.J. Haubrich, “Modeling long-term dynamics of electricity markets,” *Energy Policy*, vol. 34, no. 12, pp. 1411–1433, 2006.
- [2] C. Weber, “Das investitionsparadox in wett-bewerblichen strommärkten,” *ET. Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, vol. 52, no. 11, pp. 756–759, 2002.
- [3] E. P. Coyle, “Economists’ stories, and culpability in deregulation,” *The Electricity Journal*, vol. 15, no. 8, pp. 90–96, 2002.
- [4] D. Kirschen and G. Strbac, “Fundamentals of Power System Economics,” John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [5] P. Vasquez and F. Olsina, “Valuing flexibility of DG investments in transmission expansion planning,” en *Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. IEEE, 2007*, pp. 695–700.
- [6] J. A. Rotger and F. A. Felder, “Reconciling market-based transmission and transmission planning,” *The Electricity Journal*, vol. 14, no. 9, pp. 31–43, 2001.
- [7] G. Blanco, F. Olsina, O. Ojeda, and F. Garcés, “Transmission expansion planning under uncertainty - The role of FACTS in providing strategic flexibility,” en *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest. IEEE, 2009*, pp. 1–8.
- [8] H. Yuan, “Systems Dynamics modeling for understanding transmission investment incentives,” Ph.D. dissertation, Washington State University, 2009.
- [9] W. Hogan, “Financial Transmission Right formulations,” Report, Center for Business and Government, John F. Kennedy School of Government, Harvard University, Cambridge, MA, 2002.
- [10] J. D. Sterman et al., “A skeptic’s guide to computer models,” *Managing a nation: The microcomputer software catalog*, vol. 2, pp. 209–229, 1991.
- [11] M. Ventosa, A. Baillo, A. Ramos, and M. Rivier, “Electricity market modeling trends,” *Energy policy*, vol. 33, no. 7, pp. 897–913, 2005.
- [12] F. Olsina, “Long-term dynamics of liberalized electricity markets,” Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2005.
- [13] J. Sterman, “Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world,” Irwin/McGraw-Hill Boston, 2000, vol. 19.
- [14] A. Ford, “Cycles in competitive electricity markets: a simulation study of the western United States,” *Energy Policy*, vol. 27, no. 11, pp. 637– 658, 1999.



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
25 y 26 de Agosto de 2016

-
- [15] F. Olsina and F. Garcés, “Stochastic modeling of the long-term dynamics of liberalized electricity markets,” in Power and Energy Society General Meeting–Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. IEEE, 2008, pp. 1–6.
- [16] J. Sánchez, J. Barquín, E. Centeno, and A. López-Pea, “A multidisciplinary approach to model long-term investments in electricity generation: Combining System Dynamics, Credit Risk Theory and Game Theory,” in Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. IEEE, 2008, pp. 1–8.
- [17] G. Kilanc and I. Or, “A decision support tool for the analysis of pricing, investment and regulatory processes in a decentralized electricity market,” Energy Policy, vol. 36, no. 8, pp. 3036–3044, 2008.
- [18] M. Hasani-Marzooni and S. H. Hosseini, “Dynamic analysis of various investment incentives and regional capacity assignment in Iranian electricity market,” Energy policy, vol. 56, pp. 271–284, 2013.
- [19] N. Hary, V. Rious, and M. Saguan, “The electricity generation adequacy problem: Assessing dynamic effects of capacity remuneration mechanisms,” Energy Policy, vol. 91, pp. 113–127, 2016.
- [20] O. A. Ojeda, F. Olsina, and F. Garcés, “Simulation of the long-term dynamic of a market-based transmission interconnection,” Energy Policy, vol. 37, no. 8, pp. 2889–2899, 2009.
- [21] C. Ochoa, I. Dyner, and C. Franco, “Simulating power integration in Latin America to assess challenges, opportunities, and threats,” Energy Policy, vol. 61, pp. 267–273, 2013.
- [22] C. Ochoa and A. van Ackere, “Does size matter? Simulating electricity market coupling between Colombia and Ecuador,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, pp. 1108–1124, 2015.
- [23] G. A. Blanco, R. M. Pringles, F. G. Olsina, and F. F. Garcés, “Valuing a flexible regulatory framework for transmission expansion investments,” en PowerTech, 2009 IEEE Bucharest. IEEE, 2009, pp. 1–8.
- [24] M. Osthus, C. Rethanz, and G. Blanco, “Strategic investments and regulatory framework for distribution system planning under uncertainty: An option game approach,” en 15th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. PMAPS, 2012, pp. 1–8.