

Simulation Tools in Teaching Economic Topics in Electrical Engineering

Jessica Guevara¹

¹ Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, jessica.guevara@utp.ac.pa

Abstract— Given the new challenges faced by markets Electric today, the development of simulation tools it has become very useful for training engineers within the electricity industry. This paper it proposes an experimental design based game economy simulating a bag of energy through a simulator teaching market for electricity markets to electrical engineering students. It looks like this help reduce the gap observed between treatment theoretician of these matters and professional practice. The simulator considers the proposed reference market model Spanish wholesaler of electricity, in which groups of students act as market agents and are free to create their own strategies when offering or selling energy in the daily market. The analysis of the results is based on a characterization of the behavior of agents and the impact of their decisions in the evolution of the market price. It is concluded that experimental economics provides an appropriate mechanism to explain the observed phenomena in a practical work carried performed by students.

Keywords— electricity markets, education, behaviour agents, simulation tools, experimental economics.

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.096>

ISBN: 13 978-0-9822896-8-6

ISSN: 2414-6668

13th LACCEI Annual International Conference: “Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?”
July 29-31, 2015, Santo Domingo, Dominican Republic **ISBN:** 13 978-0-9822896-8-6 **ISSN:** 2414-6668
DOI: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2015.1.1.096>

Herramientas de Simulación en la Enseñanza de Tópicos Económicos en Ingeniería Eléctrica

Jessica Guevara¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, jessica.guevara@utp.ac.pa

Resumen— Ante los nuevos desafíos que enfrentan los mercados eléctricos hoy en día, el desarrollo de herramientas de simulación ha llegado a ser de gran utilidad para el entrenamiento de ingenieros dentro de la industria eléctrica. En este trabajo se propone un diseño de economía experimental basado en un juego que simula una bolsa de energía mediante un simulador de mercado para la enseñanza de los mercados eléctricos a estudiantes de ingeniería eléctrica. Se busca de esta forma contribuir a disminuir la brecha observada entre el tratamiento teórico de estas materias y la práctica profesional. El simulador propuesto considera como referencia el modelo de mercado mayorista de electricidad español, en el cual grupos de estudiantes actúan como agentes del mercado y tienen la libertad de crear sus propias estrategias a la hora de ofertar o de vender energía en el mercado diario. El análisis de los resultados se basa en una caracterización de la conducta de los agentes y el impacto de sus decisiones en la evolución del precio del mercado. Se concluye que la economía experimental ofrece un mecanismo idóneo para explicar los fenómenos observados en un trabajo práctico llevado a cabo por alumnos.

Keywords— Mercados eléctricos, educación, comportamiento de agentes, herramientas de simulación, economía experimental.

I. INTRODUCCIÓN

El sector eléctrico ha sufrido grandes cambios desde la década de los 80. Sin embargo, no fue hasta mitad de los años 90 que la mayoría de los países desarrollados y en vías de desarrollo llevaron a cabo sus procesos de transformación, tanto de las estructuras como del marco regulatorio, enfocados a avanzar en la liberación y apertura de la competencia en algunas partes que conforman el sector eléctrico. Desde esa época, se han intensificado los estudios sobre cuáles son los diseños de mercado eléctrico apropiados y con características específicas para cada región o país. De la misma manera, la enseñanza académica se ha tratado de perfeccionar en la medida que son actualizados los diversos tipos de mercados eléctricos que existen y las nuevas herramientas desarrolladas para su funcionamiento.

Desde el punto de vista académico es crucial ofrecer a los estudiantes de nivel de postgrado cursos tales como, mercados eléctricos, operación técnica y económica de los sistemas de potencia, etc., que brinden una capacitación a nivel práctico sobre el funcionamiento de los mercados eléctricos. La idea es contribuir a la formación de profesionales con mejores habilidades y competencias tanto teóricas como prácticas que son valoradas a nivel de la industria eléctrica.

Desde el punto de vista de desarrollos de simuladores

enfocados al entrenamiento y enseñanza a nivel industrial y académico de los sistemas eléctricos de potencia, existe una gran diversidad enfocada a los estudios de flujos de potencia, cortocircuitos, flujo óptimo de potencia, contingencias y estabilidad entre otros, a nivel de software profesional que están disponibles [1]. También en [2] se describen otros trabajos sobre herramientas útiles para la investigación y se discuten las ventajas del código abierto versus el software propietario. Se describe en detalle la plataforma PSAT [3], un toolbox de código abierto, basado en el ambiente Matlab, que incluye una amplia variedad de tipos de estudios.

Sin embargo, se han realizados grandes esfuerzos para la creación de simuladores de mercados eléctricos realistas pero no es una tarea fácil [4], [5]. En años recientes se han desarrollado herramientas sofisticadas para la simulación de mercados [6] y están disponibles en la comunidad de potencia. Se han publicado artículos sobre los simuladores de mercados eléctricos con orientaciones específicas, y se pueden clasificar según las siguientes características: i) aquellos que hacen uso de JAVA y/o componentes basados en MATLAB [7], [8], tecnologías de sistemas multiagentes [9], [10], [11] e incluso plataformas de software integrado [13], ii) aquellos que ejecutan simulaciones de mercados específicos, ya sea en el corto plazo [12], [13], [14], [15], [16], [17] o en el largo plazo [18], [19], iii) simuladores que están hechos para la predicción del comportamiento y la toma de decisión en mercados particulares [16] o están hechos para uso educacional solamente [12],[13], [14], [15].

Dentro de las herramientas para la enseñanza de mercados eléctrico están las desarrolladas por Turtianien et al. [12] en la Universidad de Tecnología de Tampere, Finlandia, diseñaron un juego de simulación basada en la web para enseñar cómo operan los mercados eléctricos. Su ambiente de simulación permitió a los participantes tomar decisiones comerciales y también decisiones de inversión.

Madrigal y Flores en el Instituto de Monterey, México [13], presenta un plataforma de software sofisticado integrada para enseñar diferentes arquitecturas de los mercados spot de energía en el corto plazo, y ha sido ampliamente utilizado para la enseñanza a estudiantes de pregrado y postgrado del curso de mercados eléctricos los cuales pueden interactuar con las diversos modelos y aprender a manipular las distintas plataformas.

Por su parte, en la Universidad de Castilla la Mancha, España [14], se muestra una experiencia de laboratorio basada en un simulador de mercado, que involucra a los estudiantes de nivel de postgrado, incrementando el interés por los

sistemas de energía y promoviendo su creatividad. Los estudiantes juegan el rol de agentes productores y compiten entre ellos con el objetivo de maximizar sus beneficios, siendo este el único rol que desempeñan, ya que la demanda es un dato entregado al simulador y el modelo utilizado para los casos de estudio no consideran la red de transmisión dentro de la experiencia.

También en la Universidad de New South Wales, Australia [15], describen una herramienta desarrollada para enseñar y facilitarles a los estudiantes, la comprensión sobre cómo operan los mercados eléctricos y el comportamiento estratégico de los participantes dentro del mercado.

Para analizar el comportamiento del mercado y de los participantes se han utilizado las metodologías de teoría de juegos, variaciones conjeturales y la economía experimental, entre otros.

Desde [20] el cual describe las técnicas experimentales que permiten tomar en cuenta las decisiones de personas reales en situaciones complejas dentro los mercados. La economía experimental está siendo utilizada en el campo de los mercados eléctricos por sus diversos aportes al análisis de comportamiento que resulta importante al momento de diseñar los mercados.

Se han implementado diversos modelos experimentales para medir el ejercicio de poder de mercado en un sistema simple, que ha sido descrito por [21] y los resultados de la experiencia son comparados con resultados teóricos desarrollados, permitiendo una primera cuantificación del uso de poder de mercado; además de proponer una definición de algunos tipos de comportamiento dentro de los mercados. También existen modelos experimentales usados para probar alternativas de diseños de mercados durante el proceso de restauración de la industria eléctrica que son mostrados en [22]. Al igual que en [23] se emplea a la economía experimental para diseñar un mercado eléctrico de certificados verdes, principalmente evaluando la influencia de los precios de estos dentro del mercado.

En este contexto, este artículo presenta un simulador de mercados eléctricos, basado en el modelo del mercado mayorista de electricidad español, que busca entregar una experiencia práctica a los estudiantes sobre las reglas de los mercados eléctricos, técnicas para generar ofertas y estrategias aplicables en distintos contextos y escenarios. Este simulador se presenta a los estudiantes como el “Juego de la Bolsa”, donde ellos son participantes de esta experiencia académica durante un semestre, mediante el acercamiento a los procesos y herramientas utilizadas hoy en día en los mercados. Este simulador propuesto es aplicado a un sistema de potencia real, dándole mayor complejidad a la experiencia.

Dentro de las contribuciones de este simulador está la introducción de un software novedoso que busca integrar a los estudiantes a un ambiente práctico, interactuando con las reglas del mercado del simulador propuesto y que integra a la red de transmisión de un sistema real. En cuanto a los agentes

participantes, incluye a estudiantes de varias universidades que deben operar como generadores que venden su energía y las distribuidoras que deben comprar su energía en la bolsa, permitiéndoles tener la visión de cómo generar ofertas de compra y venta de energía. El diseño presentado se compara con los modelos ya existentes en sector académico, como se muestra en la tabla I, donde se destaca el modelo propuesto como un diseño novedoso, que incluye además, la red de transmisión y la existencia de contratos, que los otros modelos no contienen en su aplicación.

El método de economía experimental es aplicado en este artículo, para analizar el comportamiento de los agentes que participan del mercado y de esta manera observar el aprendizaje que desarrollan los estudiantes en cada etapa de la experiencia y como ellos evalúan sus estrategias realizando un contraste con la teoría.

Este artículo es organizado en 4 secciones. En la sección 2 se presenta el simulador de mercado eléctrico empleado. En la sección 3 se muestran la aplicación de casos de estudios realizados durante la ejecución del simulador y los resultados. Finalmente, en la sección 4 se presentan las principales conclusiones obtenidas.

TABLA I.

COMPARACIÓN ENTRE HERRAMIENTAS EDUCATIVAS

Características	[14]	[15]	Nuestro
Universidades	1	1	3
# agentes participantes	2	2	3
Tipo pool (PX)	x	x	x
Incluyen la Red	-	-	x
Incluyen contratos	-	-	x
Ofertas de Demanda	-	-	x
Ofertas por bloque /hora	x	x	x
Ofertas Simples	x	x	x
Ofertas complejas	-	x	-
Una ronda	x	x	x
Multi - ronda	x	x	-
Sistema a escala real	-	-	x
# de fases / etapas	4	3	4
Internet	-	-	x
Herramientas adicionales	-	x	x
Información completa	-	-	x
Análisis a través de economía experimental	-	-	x

II. SIMULADOR DEL MERCADO ELÉCTRICO

En esta sección se describen los distintos elementos que constituyen el simulador de mercado eléctrico propuesto.

El simulador de mercado eléctrico denominado “Juego de la Bolsa”, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica con la participación de los profesionales Sr. Rigoberto Torres y Frank Leañez, consiste en simular una bolsa de energía basada en el modelo de mercado español. Las reglas de este mercado de producción se encuentran descritas en la página web del operador de mercado OMEL y puede encontrar más detalles en [24]. Se ha elegido este mercado por ser representativo de una estructura básica de bolsa de energía.

El simulador comprende contratos bilaterales físicos y un mercado diario. Su operación se coordina mediante una institución que hace el rol de un operador de mercado (OM) que ve la parte financiera y un operador de red (OS) que ve la factibilidad técnica de la operación del sistema. En el mercado diario, las ofertas de venta y adquisición de energía eléctrica son incluidos en un proceso de casación para un horizonte de programación (día siguiente) considerando 24 periodos horarios. Estas ofertas son modeladas como ofertas simples de energía eléctrica para cada periodo y por unidad de producción, con un precio y una cantidad de energía, pudiendo existir para cada periodo horario dentro del horizonte de producción hasta un máximo de 25 bloques de energía con un precio diferente para cada bloque en forma creciente.

Asimismo, las ofertas se presentan en una ronda en donde el método de casación acepta solo una sesión de ofertas y no permite corregirlas, como en el modelo español.

2.1 Plataforma computacional de la bolsa

El simulador se basa en una plataforma computacional basada en internet. La interfaz del usuario fue creada utilizando la aplicación applet de JAVA, la cual se comunica de forma remota a un servidor que contiene una base de datos para guardar toda la información enviada por los participantes como se muestra en la figura 1 y estos son registrados en la página web diseñada para el simulador en la dirección <http://146.83.6.25/be/index.htm>, y a cada grupo se le asigna una clave de usuario para poder acceder a enviar su “apuesta” de compra/venta al servidor vía internet.

Estos datos son utilizados por el programa Deep-Edit [25] que se encarga de realizar los cálculos correspondientes a la casación del mercado como se observa en la figura 1. Los resultados obtenidos por Deep-Edit son enviados vía email por parte del OM de forma personalizada a cada grupo a través de e-mails, y los resultados públicos son publicados a través de la página web, como esta descrito en la figura 1.

2.2 Estrategia metodológica

El simulador del juego de la bolsa es empleado para la enseñanza experimental de los mercados eléctricos, buscando familiarizar a los estudiantes con las reglas típicas de los mercados, las actividades que realizan los agentes que participan y desarrollar el interés de los estudiantes por los temas que involucran a los mercados eléctricos, promoviendo la creatividad y la introducción de nuevas ideas en el momento de tomar decisiones dentro del juego.

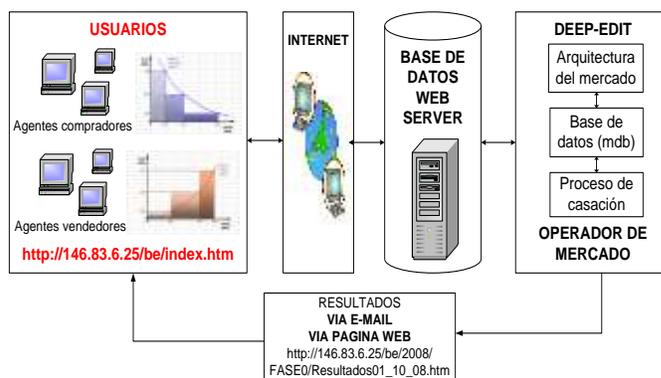


Fig 1. Plataforma basada en la web del simulador de la Bolsa

Como se describe en la figura 2, la estrategia metodológica propuesta se basa en un proceso de 5 niveles que se desarrollan durante la experiencia académica.

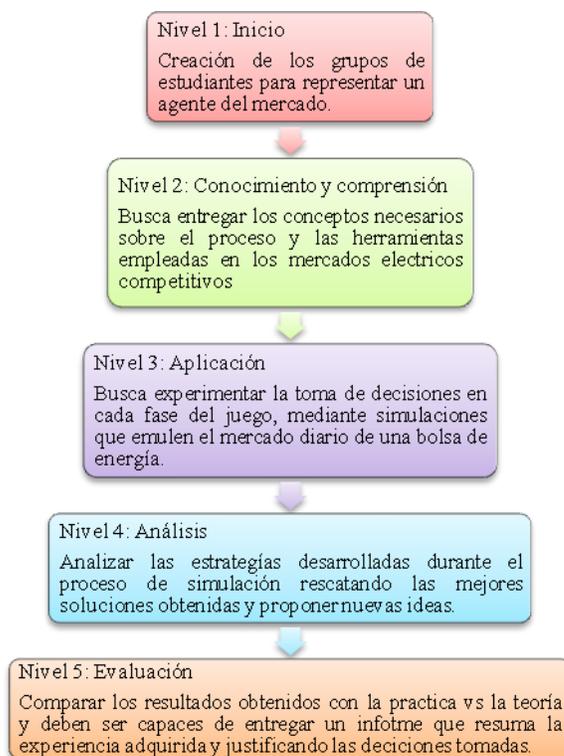


Fig 2. Estrategia metodológica

En el nivel 1 se da inicio a la actividad denominada “Juego de la Bolsa” que es una experiencia grupal, intra-universitaria, en donde los estudiantes (participantes) representan a un agente del mercado eléctrico, en esta etapa se propone la agrupación de los estudiantes, la cual es realizada por el instructor del curso y se les asigna una empresa eléctrica compradora o productora de energía eléctrica. Esto promueve el trabajo grupal entre los participantes.

En el nivel 2 los participantes adquieren los conocimientos teóricos sobre las reglas que rigen a este mercado y sobre el

funcionamiento del simulador, sus principales características computacionales y recursos que emplearán en la actividad.

En el nivel 3 se realiza la aplicación de la herramienta a través de distintas fases que forman parte del proceso, en la cual experimentan distintos grados de dificultad, desde lo básico hasta llegar a un nivel de complejidad mayor. Estas fases son descritas en la sección 2.3 A En este nivel, se espera un compromiso de los participantes para que maximicen sus utilidades sujetas a las reglas del juego.

En el nivel 4 se llega a una etapa de análisis de los resultados logrados, los cuales deben ser analizados en cada etapa del proceso para distinguir y seleccionar las mejores estrategias realizadas y mejorar las malas decisiones tomadas durante el proceso.

Finalmente, en el nivel 5, es la etapa donde los estudiantes hacen las críticas a las decisiones tomadas y un contraste con la teoría, para evaluar los resultados obtenidos y deben entregar un informe donde resumen la experiencia adquirida y justifican su desempeño realizado durante la actividad.

2.3 Descripción del juego

Este juego consta de 4 fases que buscan enseñar diversas características del mercado eléctrico, en donde se interactúa con situaciones reales que enfrentan los mercados hoy en día.

Los estudiantes son agrupados en grupos de 3 personas y se les asigna una empresa que tiene un grupo de centrales generadoras o consumos a su disposición. Se les entrega la información de los costos variables de sus unidades y la de sus competidores, y a los consumidores se les entrega la capacidad de sus consumos asignados. Según la descripción dada en la sección II, los participantes pueden ofertar para cada hora hasta 25 bloques de energía con precio-cantidad distintos, por un periodo de 24hrs.

A. Fases del juego

Se divide en cuatro fases, denominadas fases de duración de una semana c/u (5 días hábiles):

- *Marcha Blanca – uninodal (FASE 0):*

La Fase 0 es la fase inicial o de introducción al Juego de la Bolsa. Es la fase de prueba, consultas y depuración de errores. Se plantea una bolsa uninodal, sin restricciones de agua para las centrales de pasada, inexistencias de contratos bilaterales físicos, se considera el valor estratégico del agua.

- *Uninodal (FASE 1):*

Para la fase 1 se introdujo la variación de los flujos de agua, de manera que a medida que avanzaba la fase, menos es la disponibilidad de energía que se puede ofrecer. También hay existencias de gas natural, lo cual permite la operación a bajo costo de algunos competidores térmicos.

- *Uninodal-Contratos Bilaterales (FASE2):*

Para la fase 2 se introdujo la existencia de Contratos Físicos Bilaterales a precios libres ya definidos. Esto obliga a no disponer de toda su energía en la bolsa, a menos que se opte por comprar en ella a precios más convenientes que es sus

contratos, y luego venderla al precio establecido con el cliente, esto sin duda resulta beneficioso para la empresa.

- *Multinodal (FASE3):*

Finalmente en la Fase 3 se consideró restricciones de red, lo cual desacopla de cierta forma los valores y el sistema es sensible a limitaciones o saturaciones de las líneas. La figura 4 detalla de manera general todo lo expuesto previamente.



Fig. 4 Esquema de las fases del juego

B. Actividades periódicas:

Lo primero que debe realizar cada grupo (empresa) es reunirse diariamente para discutir sus estrategias. Una vez definidas, cada agente debe enviar su oferta a través de la página web del simulador, antes de las 12:00 hrs, para las próximas 24, de lunes a viernes. Luego el operador de mercado (OM) recibe las ofertas enviadas de los participantes y realiza la operación de casación y envía los resultados de las ofertas aceptadas a los agentes a través de email a cada grupo durante el transcurso de la tarde. Antes de las 17:00 hrs.

Finalmente, el OM publica los resultados del mercado precio – cantidad transada en la página web, antes de las 17:00 hrs, pero las ofertas realizadas por los participantes no son de dominio público. Los participantes tienen que tener en cuenta que ellos pueden no ofertar un día y se les considera que mantiene la oferta efectuada el día anterior. Aunque ellos tienen la obligación de ofertar el 1er. día de cada fase.

III. EXPERIENCIA DOCENTE

Para comprender mejor la experiencia docente, el modelo de bolsa se aplica en forma modificada a la estructura de propiedad del mercado eléctrico chileno y el sistema eléctrico panameño, debido a la familiaridad que tienen los estudiantes participantes con el sistema. Cada grupo de agentes presentan sus ofertas de compra y venta a la bolsa de energía, para un periodo de 24 horas, siendo importante resaltar que los agentes que compran energía, realizan sus ofertas en forma decreciente presentando una elasticidad en la demanda. La aplicación de estudio se analiza considerando las fases que constituyen el juego.

Cabe señalar que si bien el juego se inspira en el sistema eléctrico, no busca ser un fiel reflejo de la realidad de cada

empresa. En esta presentación se han mantenido los nombres y sus variantes, ya que parte de la apuesta pedagógica tiene como desafío situar a los alumnos en situaciones con una base real.

Los resultados evaluados corresponden a las estadísticas observadas al aplicar el juego de la bolsa durante el segundo semestre de 2012 a grupos de alumnos de las Universidades de Chile y Pontificia Universidad Católica¹, y 2013 - 2014 en la Universidad Tecnológica de Panamá en el marco de cursos de postgrado del área.

Se realizaron encuestas de inicio y final para evaluar los conocimientos adquiridos por los estudiantes en cada fase del juego.

A. Descripción general y análisis teórico:

El juego de la bolsa se ha desarrollado por un periodo de 10 años, de los cuales 2 se han hecho en Panamá, donde se han realizado modificaciones según los resultados obtenidos en cada año. Se destaca que solo para el análisis por fase se hace referencia a los años 2012 y 2014. Las principales modificaciones que se han realizado han sido a las reglas entregadas a los estudiantes, buscando facilitar que éstos alcancen competencias declaradas al inicio del curso. También, se busca alcanzar niveles de logro desde obtener nuevos conocimientos hasta realizar análisis del desempeño durante todas las fases y al final de la experiencia del Juego sean capaces de alcanzar los niveles de síntesis y evaluación según la taxonomía de Bloom. El juego consta de una etapa de evaluación a través de informes técnicos por fase del juego y de una evaluación de trabajo en equipo.

En cuanto a las condiciones técnicas del juego entregado a los estudiantes fueron principalmente detallar un mercado compuesto por 10 empresas generadoras, cada una con un determinado número de centrales con sus capacidades de generación y dos empresas distribuidoras que engloban el consumo del sistema eléctrico.

La composición del parque generador, se detalla en la figura 5, en ella se puede apreciar la fuerte componente hidráulica con una participación del 42%, seguida por un 17% en centrales de ciclo combinado y un 15% en centrales de pasada, entre lo más destacado, siempre brindándole al estudiante un mix tecnológico del cuál aprendió a identificar diferencias entre las tecnologías del parque existente.

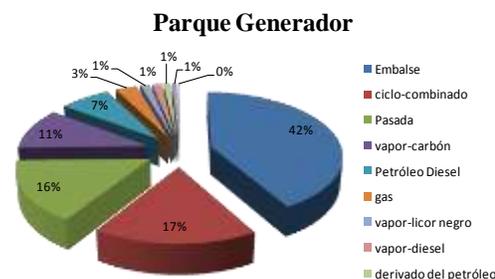


Fig 5. Clasificación de tecnologías del parque generador

Se les entregó también, datos en relación a costos marginales de cada empresa, los cuales dependen de los combustibles que emplean sus centrales, éstos a su vez les permitieron hacer una clasificación para las distintas empresas en agentes como tomadores de precio, líderes y seguidores. Una de las reglas establecidas en la documentación entregada fue que las empresas generadoras deben comportarse de manera racional y competitiva, buscando maximizar sus beneficios. Esto quiere decir que deben ofertar a costo marginal. En cuanto a las empresas distribuidoras participantes del mercado, deben ofertar con elasticidad a la hora de comprar la energía que tienen comprometida. Principalmente deben evitar cubrir sus compromisos comprando en el mercado spot, ya que representa un riesgo debido a la volatilidad que presentan los precios en el spot, específicamente en la etapa de contratos del juego.

B. Resultados de la Fase 0:

Durante la fase inicial, se observaron las siguientes características.

En las encuestas iniciales, los estudiantes chilenos respondieron que un 70% conocía tópicos del sector eléctrico principalmente, la terminología y las empresas participantes en forma básica. Sin embargo los estudiantes panameños respondieron que un 40% entendía la terminología y empresas del sector panameño.

Los principales niveles 1, 2 y 3 a lograr en esta fase presentaron inconvenientes en los estudiantes panameños, debido a la dificultad de entender las reglas del juego y el trabajo en equipo que debían adaptar. Se procedió a darles seguimiento sin interferir en la toma de decisiones como equipo y rol que debían jugar cada grupo. Al final de la fase, luego de cometer todos los errores en cuanto a definir curvas, estrategias y toma de decisión, los estudiantes demostraron comprender el rol establecido, esto principalmente a que fue discutido con todo el grupo participante y así lograran aprender de sus errores y de los errores de los otros grupos.

En cuanto a los estudiantes chilenos, mostraron datos bastantes reales, demostrando un aprendizaje en los niveles 1, 2 y 3 de la taxonomía de Bloom. Los principales resultados para esta fase se pueden observar en la curva de oferta realizada por los grupos compradores de energía, donde se muestra dos etapas, la primera fue un comportamiento muy elástica y la segunda fue inelástica, dando lugar para los

¹ Se agradece la cooperación con el Prof. Hugh Rudnick en esta iniciativa.

primeros días de la semana, que se transará una demanda baja. Indicando que estaban conociendo el comportamiento del mercado de menor a mayor compra de demanda. Sin embargo, al final de la semana se observa que aumenta la cantidad transada, indicando que se compró más energía, logrando el objetivo de la fase donde debían aprender a comprar con esas características.

En cuanto a los grupos que fueron generadores, la primera comparación se basa en la curva de oferta realizada por ello con su costo marginal, en la cual las empresas ofertaron por encima de su costo marginal. Esto se muestra en la figura 6, donde sus centrales a costo US\$0 fueron ofertadas a US\$211. Finalmente, esto nos indica que los estudiantes chilenos comprendieron el concepto de oferta y costo que debían considerar. Los estudiantes panameños se limitaron a entregar sus ofertas con los mismos valores definidos como sus costos de operación.

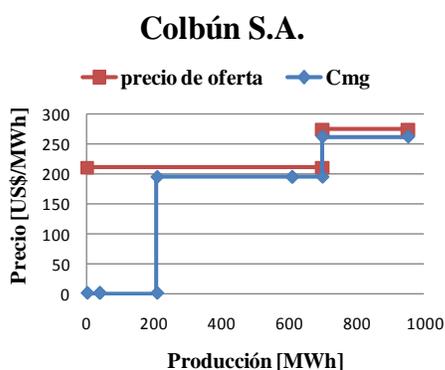


Fig 6. Curva de precios de Colbún

Finalmente, para esta fase se puede observar en la figura 7, la evolución de la demanda a lo largo de la fase ratificando el aumento de la energía transada al final de la fase, que es lo que se debe esperar como etapa de aprendizaje y conocimiento del comportamiento de los agentes participantes en el mercado cuando no se tiene ninguna referencia de los mismos.

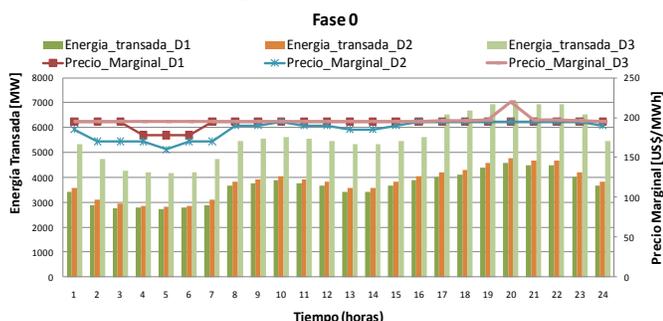


Fig 7. Evolución de la demanda y los precios en la fase 0.

Durante esta fase los estudiantes lograron comprender los conceptos establecidos para participar en un mercado eléctrico como lo es costo marginal, precio marginal, cantidad transada, aunque hubieron errores que eran permitidos en la fase inicial,

se observó que los estudiantes en Chile tenían conocimientos más avanzados que los de Panamá, los cuales tuvieron mayores errores durante la fase, la cual para este grupo debió ser repetida bajo el seguimiento diario de las ofertas que ellos realizaron. Se puede concluir que influye la forma en que se dan las instrucciones iniciales y el seguimiento a las consultas que realizan los estudiantes.

C. Resultados fase 1:

Esta etapa presentó variaciones importantes respecto de la fase anterior, en cuanto a las reglas recibidas por los grupos participantes. En primer lugar se define como punto de partida que el costo estratégico del agua embalsada subiera para las empresas de mayor tamaño y disminuyo para las más pequeñas. Por otro lado, se impusieron restricciones de caudales en las centrales de pasada; hecho que limita la cantidad de energía y potencia a ofertar para estos agentes.

Como se muestra en la figura 8, los estudiantes tanto panameños como chilenos ofertaron al inicio de la fase precios iguales para cada hora, sin hacer distinción a las horas de mayor demanda las cuales en un mercado real presentan precios altos. Esto indicó que se debe dar seguimiento por día a los grupos, dando como resultado que el último día de la fase la demanda como el precio fueron los esperados por un mercado real. Siendo un éxito para ambos grupos de estudiantes en el aprendizaje esperado para esta fase.

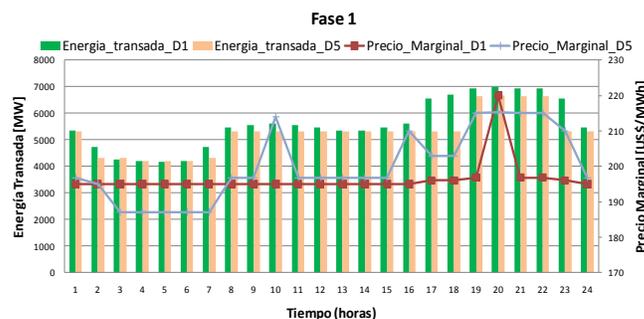


Fig 8. Evolución de la demanda y los precios en la fase 1.

D. Resultados fase 2:

Como fue descrito en el punto 2.3 de la sección A, en esta etapa se introducen los contratos. Las empresas generadoras con mayor tamaño, tomaron la decisión de abastecer los contratos físicos con su propia generación y ofertando la energía que les queda disponible en la bolsa. Sin embargo, hubo un grupo generador panameño que ofertó toda su capacidad instalada arriesgándose de ir a comprar a la bolsa para satisfacer sus contratos.

Al inicio de esta fase, la demanda tuvo un comportamiento muy elástico permitiendo a los compradores comprar a precios menores que en la fase 1. En la figura 9, podemos observar que en esta etapa la oferta de compra fue de menor cantidad a las fases anteriores y se debe a que los contratos son abastecidos por las propias empresas y la demanda no contratada fue comprada en la bolsa. En cuanto a los precios

según la figura 9, muestra que al inicio de la fase los precios fueron elevados comparado con los precios al final de la fase, esto se debió a la disminución de la demanda al final de la fase, llevando a ser abastecidas por las empresas que tenían precios más bajos a pesar de ser tecnologías hidroeléctricas.

En esta etapa los estudiantes panameños que se arriesgaron a ir a la bolsa consiguieron al final de la fase maximizar sus utilidades comparado con los que cumplieron sus contratos con sus propias capacidades físicas. Los estudiantes chilenos aprendieron que podían tomar decisiones como lo hizo el grupo panameño al final. Ambos grupos aprendieron el concepto de contratos aunque jugaron roles distintos en el proceso de toma de decisión, favoreciendo en este caso a las empresas con mayor capacidad de venta.

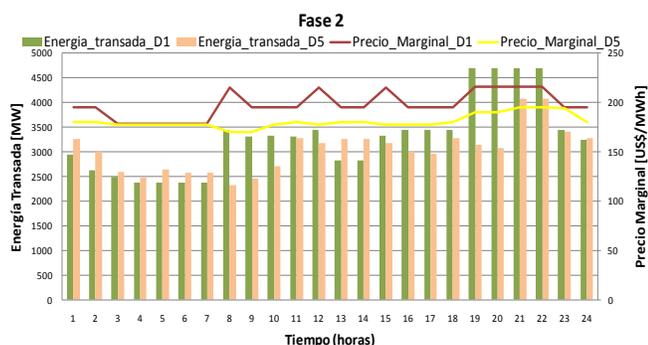


Fig 9. Evolución de la demanda y los precios en la fase 2.

E. Resultados fase 3:

La principal característica de esta fase final es la existencia de limitaciones físicas de la red, es decir, la Bolsa de Energía se transforma en una Bolsa Multimodal como fue descrito en la sección A, del punto 2.3.

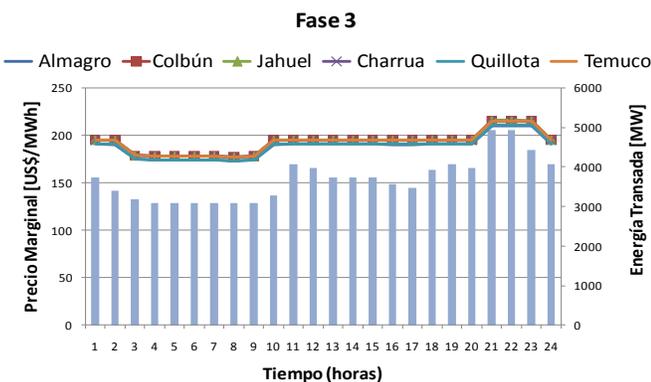


Fig 10. Evolución de la demanda y los precios en la fase 3.

En esta fase final del juego, los estudiantes eran supervisados cada día para recordarles que debían considera la red des sistema combinándolo con lo aprendido en las etapas anteriores.

Los principales aprendizajes fueron enfocados en los últimos niveles de la taxonomía de Bloom, donde los estudiantes con empresas que se encontraron en la parte norte del sistema simulado son de carácter térmico y por sus

elevados costos de operación sus ofertas estratégicas fueron operar con sus unidades de costos variables más bajos que los costos de oportunidad de los embalses, aunque no ejercen ningún tipo de poder ya que sus tecnologías son muy caras y el sistema es capaz de abastecer la demanda con centrales de embalse en las horas de mayor demanda, siendo estas características aprendidas al final de la fase. En la figura 10 se muestra el resultado obtenido de la evolución de los precios en cada barra del sistema modelado. La barra de Temuco y Jahuel son las que muestran los precios más elevados de la fase, esto es porque los costos se distribuyen de las barras más baratas a los consumos. En esta etapa, a pesar de generarse las condiciones para que los agentes actúen ejerciendo poder de mercado debido a las congestiones que se presentan en la red, las empresas siguieron ofertando a costos marginales basándose en los precios históricos que se tenían de las fases anteriores, esto ocurrió con los estudiantes panameños los cuales se limitaron a seguir con sus estrategias de inicio del juego a pesar del seguimiento que se les entregó.

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Este artículo ha presentado una herramienta utilizada para enseñar los mercados eléctricos, a través de un diseño experimental empleando la técnica basada en economía experimental para el acercamiento práctico de los conceptos económicos. El comportamiento ejercido por los agentes a lo largo de la experiencia se basó en un proceso de aprendizaje por etapa, llevándolos a mejorar sus ofertas, según lo observado en las etapas anteriores. Cada fase presentó diferentes tipos de ofertas, de las que se pueden destacar: los agentes tomadores de precio, líderes y seguidores. Los participantes que compraron energía se comportaron ofertando de forma elástica, lo cual influyó directamente en la casación obtenida, haciendo más difícil la elección de una estrategia adecuada. Finalmente, las ofertas realizadas por los agentes se basaron en sus costos marginales, y no se observaron comportamientos de ejercicio de poder de mercado significativos, esto se podría deber a la inexperiencia de los participantes en estos temas.

De las encuestas realizadas a los estudiantes al inicio y al final del juego, entregaron resultados que indicaban que los estudiantes chilenos eran más comprometidos con las reglas y el aprendizaje que se esperaba lograr, en cambio los estudiantes panameños tuvieron mayores dificultades a la hora de ejecutar las experiencias y se debió a la diferencia clara en la malla curricular de las carreras en los diferentes países.

Dentro de los desarrollos futuros, se busca implementar metodologías para incentivar a los participantes a ser más arriesgados a la hora de realizar sus ofertas y mejorar los diseños experimentales que permitan evidenciar con más detalle el rol de los agentes dentro de los mercados.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido parcialmente financiado por SENACYT - SNI, Panamá.

V. REFERENCIAS

- W. Jewell, L. Bam, "Review: Power system analysis software tools", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1, June 2005.
- F. Milano, L. Vanfretti, J. C. Morataya, "An Open Source Power System Virtual Laboratory: The PSAT Case and Experience", *IEEE Transactions on Education*, Vol. 51, No. 1, pp. 17-23, February 2008.
- F. Milano, "An open source power system analysis toolbox," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1199-1206, Aug. 2005.
- A. Debs, C. Hansen, and Y.-C. Wu, "Effective electricity market simulators," *IEEE Comput. Applic. Power*, vol. 14, pp. 29-34, 2001.
- J. L Bernal-Agustín, J. Contreras, R. Martín-Flores, A. J. Conejo, "Realistic electricity market simulator for energy and economic studies," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 46-54, Jan. 2007.
- J. Kumar, G. Sheble, "Auction market simulator for price based operation", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 1, pp. 250 - 255, 1998.
- PowerWorld Corporation Simulator [online], <http://www.powerworld.com/products/simulator.html>.
- J. Contreras, A. Losi, M. Russo, "A JAVA/MATLAB simulator for power exchange markets", in: *Proc. IEEE 22nd Int. Conf. Power Ind. Comput. Appl. PICA, Sydney, Australia*, May 2001, pp. 106-111.
- H. Liu, B. Yuan, H. Dai, J. Lin, Y.X. Ni, F.F. Wu, "Framework design of a general-purpose power market simulator based on multi-agent technology", in: *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet., Vancouver, Canada*, July 2001, pp. 1478-1482.
- D. W. Bunn, F.S. Oliveira, "Agent-based simulation—An application to the new electricity trading arrangements of England and Wales", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol.5,no. 5, pp. 493-503, Oct. 2001.
- I. Praça, C. Ramos, Z. Vale, M. Cordeiro, "Mascem: a multiagent system that simulates competitive electricity markets", *IEEE Intell. Syst.*, vol. 18, no. 6, pp. 54-60, 2003.
- A. Turtiainen, T. Mannila, S. Kuusiluoma, and L. Korpinen, "Simulation game in teaching electric economics", *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific*, vol. 3, pp. 1986 - 1989, 6-10 October 2002.
- M. Madrigal, M. Flores, "Integrated software platform to teach different electricity spot market architectures," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 19, pp. 88-95, Feb. 2004.
- J. Contreras, A.J. Conejo, S. de la Torre, M.G. Muñoz, "Power engineering lab: electricity market simulator," *IEEE Trans. Power Syst.* vol. 17, pp. 223-228, May. 2002.
- Thai D. H. Cau, H. Outhred & I. MacGill "Using a market game as a tool for teaching strategic behavior in an electricity restructuring course", *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004)*, 26-29 September 2004, Brisbane, Australia.
- M. Dicorato, A. Minoia, R. Sbrizzai, and M. Trovato, "A simulation tool for studying the day-ahead energy market: the case of Italy," in *Proc. Power Eng. Soc. Winter Meeting*, 2002, vol. 1, 2002, pp. 89-94.
- A. Martini, P. Pelacchi, L. Pellegrini, M. V. Cazzol, A. Garzillo, and M. Innorta, "A simulation tool for short term electricity markets," in *Proc. Power Ind. Comput. Applicat.*, 2001.
- D. W. Bunn and F. S. Oliveira, "Agent-based simulation-an application to the new electricity trading arrangements of England and Wales," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 5, pp. 493-503, Oct. 2001.
- I. Praca, C. Ramos, and Z. A. Vale, "Competitive electricity markets: simulation to improve decision making," in *Proc. IEEE Porto Power Tech Conf.*, Porto, Portugal, Sept. 10-13, 2001.
- V. Smith, "Economics in the Laboratory", *the Journal of Economic Perspectives*, vol. 8, No.1, pp. 113-131, 1994.
- F. Petit, Y. Phulpin, M. Saguanl and Ph. Dessante, "A Contribution of experimental economics toward characterization of the use of market

power in oligopolistic electricity markets", *IAEE European Energy Conference, Florence: Italy*, 2007.

- W. Schulze, S. Ede, R. Zimmerman, J. Bernard, T. Mount, R. Thomas, R. Schuler, "Can Experimental Economics Help Guide Restructuring of Electric Power?", the NSF/DOE/EPRI *Sponsored Workshop on Future Research Directions for Complex Interactive Electric Networks* Washington, D.C., November 16-17, 2000. Uploaded: June 27, 2006.
- K. Vogstad, S. Arango, H. Skjelbred, 2005. "Experimental economics for market design", *Proceedings of the 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, Boston, MA, July 2005.
- Electricity Market Activity Rules (non binding unofficial translation) [Online]. Available: <http://www.omel.es/es/pdfs/EMRules.pdf>
- R. Palma, O. Moya, L. Vargas, "Object-Oriented Simulation Software for a Competitive Environment - Application to Transmission Expansion Planning", *The First EPRI Latin America Conference & Exhibition: Toward a Mature Electricity Market Through Tecnology, R&D, and Business Vision*, Rio de Janeiro, Brasil, 28-30 Noviembre, 2001.
- Stoft, S., *Power system economics: designing markets for electricity*, New York: IEEE Press & Wiley-Interscience, 2002.

VI. BIOGRAFÍA

Jessica Guevara-Cedeño, nace en Santiago de Veraguas, Panamá. Ella recibe su Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Tecnológica de Panamá, en 2005. Ella actualmente tiene un doctorado de la Universidad de Chile, Rep. de Chile. Es académico de la Universidad Tecnológica en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Su principal interés de investigación son los mercados eléctricos competitivos, educación en ingeniería, Smart grid, sistemas de energía en Sistemas ferroviarios, Energías Renovables y Uso eficiente de la energía.