

Curricular Renovation and Electricity Markets – Power Exchange Simulator –

J. G. Cedeño, *Member, IEEE*, R. P. Behnke, *Senior Member, IEEE* and R. Uribe

Abstract— Latin American universities are not foreign to the challenges of curriculum reform being implemented worldwide in engineering schools. One of these challenges is the development of adequate tools for the training of engineers for the electricity industry. This paper proposes a new methodology, called "Power exchange Game," consistent with curricular renovation. Its main objective is to diminish the existing gap between theory and practice in the industry. In this context, the proposed simulation scheme allows student groups operate as market agents and they are free to create their own strategies. Results are validated by a student survey concluding that the proposed learning framework provides a useful mechanism for understanding and explaining the observed phenomena, and it also promotes the employability Latin American students. The proposed framework can be extended to other disciplines.

Keywords— Education, electricity markets, curricular renovation, simulation tool, competencies.

I. INTRODUCCIÓN

A partir de la década de 1980, la privatización de industrias estatales y la apertura de los mercados a la competencia internacional, desafió a las escuelas de ingeniería en muchos países de América Latina para definir las competencias de sus egresados en el nuevo contexto industrial [1].

Los esfuerzos por reformar la educación en ingeniería en los Estados Unidos y Europa en torno a las nuevas definiciones de competencias específicas y genéricas, también han llegado a América Latina, junto con la crítica de un sistema educativo universitario rígido e ineficiente, caracterizado por el predominio de programas largos, con entrada y puntos de salida limitados [2]. El principal reto de la enseñanza de la ingeniería en América Latina es descubrir cómo replantear las competencias de los ingenieros en la región y en cada país. Diversos planes de estudios de ingeniería eléctrica en diferentes países han incorporado cursos nuevos o bien adaptado contenidos, Este es el caso del área de mercados eléctricos, producto del proceso de privatización del sector eléctrico [2]. Durante la década de los noventa, la mayoría de los países desarrollados y en vías de desarrollo llevaron a cabo sus procesos de transformación, tanto de las estructuras de propiedad como del marco normativo. El enfoque se centró en la introducción de la competencia a nivel de generación y suministro de energía. 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 [3]-[4]. De la misma manera, la enseñanza universitaria se ha tratado de perfeccionar en la medida que han evolucionado tanto los diversos tipos de mercados eléctricos existentes como las nuevas herramientas desarrolladas para su funcionamiento.

Este es el caso de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Chile, donde se está implementado un currículum más flexible basado en competencias generales y específicas [5]. Es importante tener en cuenta que tales esfuerzos locales deben considerar las características y las limitaciones propias de cada realidad.

1.1. Renovación curricular

La renovación Curricular de las carreras de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile se basa en la iniciativa CDIO (concebir, diseñar, implementar, operar) [6]. CDIO desarrolló un nuevo modelo de educación internacional de ingeniería superior que identifica y codifica una serie de objetivos para la enseñanza, que sirven de base para la mejora curricular y la evaluación basada en resultados. El objetivo es la creación de metas razonables, completas, universales y comunes para la educación en ingeniería. Este modelo hace hincapié en el desarrollo de la teoría de la ingeniería básica y los conocimientos profesionales, a través de cada curso, cada módulo, y cada eslabón de la enseñanza, para satisfacer las necesidades de la industria, y para lograr la calidad requerida para las habilidades de ingeniería [6].

Basado en los cuatro principios del diseño curricular de la FCFM (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas), se propone un sistema general que logra desarrollar competencias de egresos en los estudiantes. Dicho sistema se muestra en la Fig. 1 y puede ser implementado en cualquier curso que tenga como principio de su diseño curricular que "*el proceso educativo se centre en los estudiantes y en sus aprendizajes, lo que establece que el estudiante es el protagonista*" [5]. Esto logra un cambio de paradigma, donde el estudiante pasa de ser un ente pasivo a uno activo en el proceso de su formación académica.

El esquema distingue las siguientes etapas:

1. Diseño curricular basado en competencias:

Las competencias de egreso deben estar definidas por un equipo docente y validadas por la comunidad educativa. Este proceso utiliza para su definición el programa CDIO. Las competencias se dividen en genéricas y específicas, estando las primeras asociadas al desarrollo de las habilidades personales e interpersonales del estudiante, en tanto que las competencias específicas están asociadas al área profesional y del conocimiento. Dicho recorrido curricular permite formar al futuro ingeniero.

J. Y. Guevara Cedeño, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, jessica.guevara@utp.ac.pa

R. Palma Behnke, Universidad de Chile, Santiago, República de Chile, rodpalma@cec.uchile.cl

R. Uribe, Universidad de Chile, Santiago, República de Chile, rouribe@ing.uchile.cl



Figura 1. Esquema para desarrollar competencias de egreso en los estudiantes (elaboración propia).

2. Diseño de estrategias metodológicas:

Este proceso se centra en el diseño de estrategias de enseñanza y construcción de ambientes de aprendizaje para el desarrollo de competencias genéricas y específicas. El docente se constituye como un agente facilitador del aprendizaje y del auto-aprendizaje del estudiante.

3. Desarrollo de competencias genéricas y específicas:

Para el desarrollo de las competencias diseñadas por el equipo docente, el estudiante debe asumir un rol protagonista. En este proceso, el docente pasa a ser un mediador entre el conocimiento y el aprendizaje del estudiante, buscando así una interacción entre conocimiento, actitudes y valores.

4. Evaluación continua del proceso:

La evaluación continua permite una retroalimentación entre el diseño curricular que se propone, el que considera las competencias de egreso del curso y una evaluación al diseño de estrategias experimentales propuestas por el docente. Lo anterior permite levantar mejoras al sistema.

1.2. Herramientas existentes para la enseñanza de mercados eléctricos

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 [6]-[7]. Los autores ya han presentado resultados de investigación previos en esta área [8], donde se detallan los aspectos técnicos de la implementación de un sistema de juego de una bolsa de energía. Se discute su aplicabilidad en el contexto de la disciplina de economía experimental y teoría de juegos. Sin embargo, no se entregan detalles sobre los desafíos y aspectos propios de un diseño curricular que ha enfrentado la FCFM de la Universidad de Chile.

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 [9]. Sin embargo, no se muestra el mismo dinamismo para la creación de simuladores de mercados eléctricos reales [10]. Concretamente, se han publicado

artículos sobre los simuladores de mercados eléctricos con orientaciones específicas, los que se pueden clasificar según las siguientes características:

- i) Aquellos que ejecutan simulaciones de mercados específicos, ya sea en el corto plazo [11]-[14] o en el largo plazo [15]-[16],
- ii) Con uso de conceptos de sistemas multiagentes [17]-[21],
- iii) Utilizan plataformas web [22]-[24], y
- iv) Enfocadas al uso educacional [25]-[29].

Se constata el desarrollo de distintos simuladores de mercados eléctricos que han sido introducidos como herramientas educativas desde el año 2002. Sin embargo, no se constata una inserción de los trabajos publicados en el marco de reformas curriculares generales en las escuelas de ingeniería respectivas.

En Contreras *et al.* [25] se describe una experiencia de laboratorio basada en un simulador de mercado utilizado por los estudiantes de ingeniería eléctrica. Esta experiencia ha incrementado el interés de los estudiantes en temas de energía, promoviendo su creatividad, siendo un vehículo para la expansión de sus ideas innovadoras. Sin embargo, este trabajo no considera ofertas de parte de la demanda, y tampoco la red de transmisión. Paravan *et al.* [26] presenta un simulador de un mercado eléctrico diario descentralizado como herramienta de enseñanza para los estudiantes e ingenieros, de la que pueden aprender de ejemplos y profundizar su comprensión sobre el comportamiento del mercado eléctrico. En Cau *et al.* [27] se desarrolla una herramienta de enseñanza para facilitar a los estudiantes la comprensión del comportamiento estratégico en los mercados eléctricos. La sencillez y la claridad eran sus principales criterios en el desarrollo de su herramienta de enseñanza. Madrigal y Flores [28] han desarrollado una plataforma de software para enseñar las diferentes arquitecturas del mercado eléctrico, donde los estudiantes realizan simulaciones de los distintos mercados aunque no ejercen un rol activo de agentes del mercado eléctrico. Los autores informan que las simulaciones de los mercados eléctricos desde esta plataforma también podrían ayudar a los estudiantes a comprender el ejercicio de poder de mercado en la industria eléctrica. Chen *et al.* [29] introduce el diseño e implementación de una plataforma basada en la economía experimental y un enfoque basado en simulación de agentes. Se presenta una experiencia de laboratorio exitosa de un simulador basado en la plataforma J2EE.

El artículo que se presenta busca contribuir a través de un esquema metodológico, a la formación práctica de los ingenieros eléctricos, basado en obtener las competencias de egresos requeridas por la industria. El enfoque que se propone permite que el estudiante ejerza roles reales pero en un ambiente simulado dándole oportunidad de cometer errores y aprender de los mismos. Asimismo, el alumno se enfrenta a cierta incertidumbre ante los temas y debe ser capaz de enfrentar la falta de conocimiento a través de la investigación propia sobre el problema que está abordando. En los artículos revisados en la literatura, no se encuentran contribuciones con el fin de impulsar el auto-aprendizaje y a mejorar las competencias de egreso de los estudiantes. Sin embargo se muestran avances en desarrollo de simuladores de mercados eléctricos en donde el estudiante puede aprender realizando

varias simulaciones aunque muchas tienen el enfoque teórico [25] – [29].

Este artículo está organizado en cinco secciones. En la sección 2, se presenta el enfoque propuesto para la enseñanza y diseño de mercados eléctricos. En la sección 3, se describe la enseñanza del funcionamiento de un mercado basado en una bolsa de energía. En la sección 4, se presenta y analiza la experiencia docente. Finalmente, en la sección 5 se describe las principales conclusiones de esta investigación.

II. ESQUEMA PARA LA ENSEÑANZA Y DISEÑO DE MERCADOS ELÉCTRICOS

En esta sección se propone un marco para la definición de conceptos y criterios para resolver los problemas particulares de la enseñanza de los mercados eléctricos. También sirve como referencia para enfrentar y resolver nuevos problemas de naturaleza similar, por medio de una estrategia metodológica de simulación. Esta propuesta es coherente con el proceso de los programas que están siendo implementados por la Universidad de Chile y es descrita en la sección anterior [5].

Esquema específico propuesto

Para la enseñanza de los mercados eléctricos, como curso de especialización a futuros ingenieros eléctricos, se construye un esquema basado en el sistema presentado en la Fig.1 y descrito en la sección anterior. Este esquema propuesto se muestra en la Fig. 2.

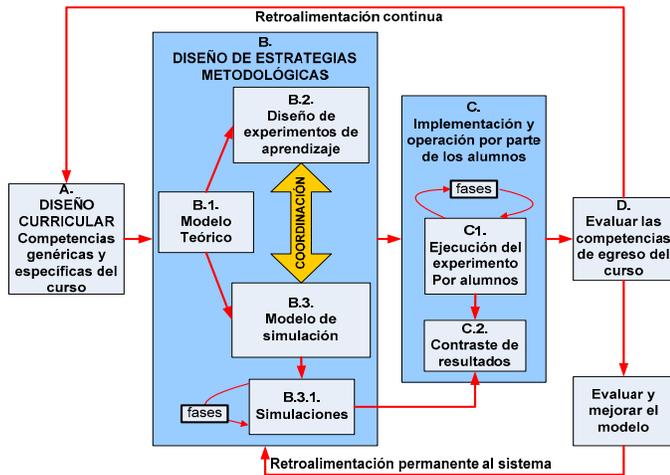


Figura 2. Esquema propuesto para la enseñanza de los mercados eléctricos

Siguiendo los esquemas de las figuras 1 y 2 se describen las siguientes etapas:

Etapa A: Diseño curricular: competencias genéricas y específicas.

Para los cursos de mercados eléctricos proponemos las siguientes competencias genéricas y específicas a lograr:

Competencias genéricas

- Trabaja en equipo en la resolución de problemas económicos.
- Capacidad de autoaprendizaje para resolver los problemas que se le presenten.

Competencias específicas

- Comprende el diseño de los mercados eléctricos y la funcionalidad asociada a c/u de sus agentes
- Demuestra un rol de agente aplicando conceptos económicos, matemáticos, técnicos y legales.
- Implementa y opera estrategias para desempeñarse en un mercado eléctrico.
- Modela y resuelve problemas de optimización/equilibrio.

Estas competencias buscan cubrir todas las necesidades del futuro profesional, que egresará con una mejor formación tanto en el área técnica como práctica. Será capaz de enfrentar problemas con incertidumbre y de trabajo en equipo que son muy importantes en el mundo laboral.

Etapa B: Diseño de estrategias metodológicas:

En esta etapa, el profesor desarrolla la estrategia de aprendizaje que desea aplicar para lograr las competencias propuestas inicialmente para el curso. Para este caso específico, se propone una estrategia metodológica de simulación que tiene como propósito que el estudiante aprenda mediante resolución de situaciones análogas a lo real [30]. Con esto se logra exponer al estudiante a ambientes con muchas incertidumbres que debe resolver en la mayoría de los casos sólo o a través de un trabajo en equipo. Para el logro correcto, es necesario dividir esta etapa en sub-etapas con el fin de clarificar la estrategia de aprendizaje propuesto en su totalidad. En el bloque B.1 el profesor desarrolla un modelo teórico que utiliza las herramientas económicas y matemáticas para modelar el comportamiento estratégico y racional de los agentes y el mercado eléctrico.

El mercado eléctrico es frecuentemente demasiado complejo para ser modelado eficazmente por los métodos teóricos tradicionales. Sin embargo, hay dos métodos que son capaces de simular el comportamiento real de un mercado eléctrico con problemas de alta complejidad. Estos dos métodos son la economía experimental y técnica de simulación teórica. Aplicando estos métodos, el profesor crea un ambiente de aprendizaje donde los estudiantes puedan familiarizarse con todos los roles de los agentes del mercado eléctrico.

En el bloque B.2, el profesor crea experimentos para probar la validez de las distintas teorías económicas y evaluar su desempeño económico en los mercados eléctricos específicos. En esta sección, el objetivo de los experimentos es crear un mercado eléctrico controlable y medible en el laboratorio. Para estos experimentos, es fundamental definir las funciones de los agentes del mercado que los estudiantes van a representar durante la implementación del experimento. También es necesario considerar que los períodos de ejecución para cada experimento tienen que ser definidos óptimamente para evitar que los estudiantes pierdan el interés y reduzcan su participación.

En el bloque B.3 se desarrolla un modelo de simulación que contenga los mismos experimentos diseñados en el bloque B.2. A través de una coordinación entre ellos, se busca que mejoren los diseños de los experimentos a realizar. El modelo de simulación puede ser implementado mediante el uso de herramientas computacionales que utilicen técnicas basadas en sistemas de simulación multiagentes. Los bloques B2 y B3

están destinados a incorporar el modelo teórico desarrollado por el profesor [8], [17]-[19].

Después de la fase de diseño de los experimentos, éstos pueden avanzar de forma secuencial. Cada experimento contiene los mismos datos específicos y las distintas fases de ejecución que pueden ser integrados en los diferentes niveles de complejidad.

Etapa C: Ejecución por los estudiantes

En la Etapa C, se ejecuta el entorno de aprendizaje creado por el profesor. En el bloque C.1, la ejecución del experimento, involucra a personas quienes deben tomar decisiones y seguir las reglas indicadas. El experimento se puede realizar a través de una plataforma computacional en la web o en un laboratorio computacional que contiene la plataforma.

El equipo docente proporciona información básica sobre el diseño del mercado y sus reglas. Se presenta su relación con los temas teóricos tratados en el aula. Además, la retroalimentación (evaluación) se muestra a los estudiantes al final de cada experimento. Después de la ejecución del experimento, en el bloque C.2 se realiza un contraste entre los resultados obtenidos experimentalmente y los simulados en B.3.1, basados en los mismos conceptos teóricos. Esto permite un análisis del comportamiento de los participantes en el experimento y de cómo se refleja su desempeño en relación a la simulación teórica esperada.

El análisis a través de los indicadores individuales o sistemáticos facilita la adquisición de conocimientos y habilidades.

Etapa D: Evaluación continua

Esta etapa es fundamental, pues permite evaluar las competencias declaradas en el diseño curricular. Los resultados de esta evaluación permiten retroalimentar el modelo incluyendo las competencias declaradas. La evaluación aplicada a los estudiantes busca a través del desempeño de éstos, en cada una de las etapas, el logro de las competencias declaradas.

Por otro lado, el análisis de los resultados hace posible la ejecución de diversos ajustes y sirve como retroalimentación para cada modelo. Esto es de particular importancia en la evolución continua y la mejora del modelo de enseñanza propuesto.

La metodología propuesta presenta pocas limitaciones para implementarse. Sin embargo, se debe considerar que los periodos de ejecución de la metodología deben ser adecuados para la formación de los estudiantes y que no les represente una carga académica adicional, perjudicando la motivación para la participación de la experiencia.

III. APLICACIÓN Y HERRAMIENTA DE UN MERCADO ELÉCTRICO TIPO BOLSA

El esquema propuesto presentado en la Fig. 2 es aplicado sistemáticamente para actividades experimentales en los cursos de postgrado denominados "Mercados eléctricos internacionales" y "Análisis técnico y económico de la operación del sistema eléctrico," en la Universidad de Chile y en la Pontificia Universidad Católica, respectivamente.

Etapa B.1. - Modelo teórico

Se utiliza un modelo de bolsa de energía basado en el diseño del mercado eléctrico español, elegido como una estructura de bolsa de energía básica y representativa [31]. Este modelo incluye el uso de contratos bilaterales físicos y un mercado diario. Su funcionamiento es coordinado por un operador del mercado (OM), que es responsable del mecanismo de equilibrio del mercado y la validación de la viabilidad técnica a través del operador del sistema independiente (ISO) [8].

Etapa B.2. - Diseño del experimento

El diseño experimental es concebido en cuatro fases principales. Cada fase contiene niveles de complejidad que caracterizan a un mercado eléctrico real.

Los alumnos / jugadores se dividen en grupos, cada uno de los cuales representa una empresa de generación o distribución. El coordinador del juego (asistente del curso) desempeña el papel del OM e ISO. La información privada de cada grupo se relaciona con los costos de operación de sus unidades de generación propia. El objetivo de cada grupo es maximizar sus propios beneficios esperados.

El juego se divide en cuatro fases de duración semanal (5 días hábiles):

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

La Fase 0 es la fase inicial o de introducción al Juego de la Bolsa. Corresponde a la fase de prueba, consultas y depuración de errores.

Se plantea una bolsa uninodal, sin restricciones de agua para las centrales de pasada, inexistencia de contratos bilaterales físicos y se considera el valor estratégico del agua embalsada.

- **Uninodal (FASE 1):**

Para la fase 1 se introduce la variación de los flujos de agua, de manera que a medida que avanza la fase, menor es la disponibilidad de energía que se puede ofrecer. No hay restricciones para la tecnología basada en gas natural, lo cual permite la operación a bajo costo de algunos competidores térmicos.

- **Uninodal-Contratos Bilaterales (FASE2):**

Para la fase 2 se introduce la existencia de Contratos Bilaterales Físicos a precios libres ya definidos. Este nuevo escenario (no obligatorio), siguiendo el esquema de mercado en Europa, no fuerza a los agentes a ofrecer toda su producción de energía en la bolsa.

- **Multinodal (FASE3):**

Finalmente, en la Fase 3 se consideran restricciones de red. El sistema es sensible a limitaciones o saturaciones de las líneas, lo cual posibilita desacople de los precios del mercado.

La Fig. 3 detalla de manera general todo lo expuesto previamente.

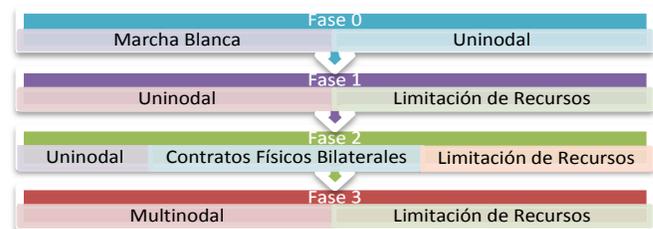


Figura 3. Esquema de las fases del juego.

Etapa B.3. - Modelo de simulación

Para cada fase, con la información específica de cada grupo, se lleva a cabo una simulación teórica, utilizando los modelos alternativos siguientes:

- Teoría de oligopolios,
- Enfoque de planificación centralizada,
- Sistemas de simulación basada en agente.

Las herramientas específicas sólo son utilizadas por el equipo docente. Sin embargo, cada modelo hace uso de herramientas de flujo de carga y despacho económico de libre acceso, con y sin representación de restricciones de red. Estas herramientas también están disponibles para los estudiantes.

Etapa C - Ejecución: Implementación y operación del experimento.

La ejecución del experimento se lleva a cabo a través de una plataforma interactiva como se muestra en la Fig. 4.

El simulador es basado en una plataforma computacional web. La interfaz de usuario ha sido creada mediante un Applet de Java, que se conecta remotamente a un servidor de base de datos que almacena toda la información enviada por los participantes (ver Fig. 4) [8].

Con un nombre de usuario y su contraseña, cada grupo es capaz de enviar sus ofertas de compra y/o venta, que son procesadas por el programa Deep-Edit [2]-[8]. Este programa se encarga de obtener el precio de equilibrio del mercado, y los resultados obtenidos para cada participante son enviados vía e-mail. Asimismo, los resultados generales del mercado (precio y la demanda agregada) se publican en el sitio web del juego (<http://146.83.6.25/be/index.html>).

Esta herramienta no presenta limitaciones de implementación para el tema de mercados eléctricos ya que se puede adaptar a otros diseños de mercados. Sin embargo, si se desea aplicar a otro problema del sector eléctrico se tendría que desarrollar otra plataforma en línea que permita resolver el problema que se desea abordar.

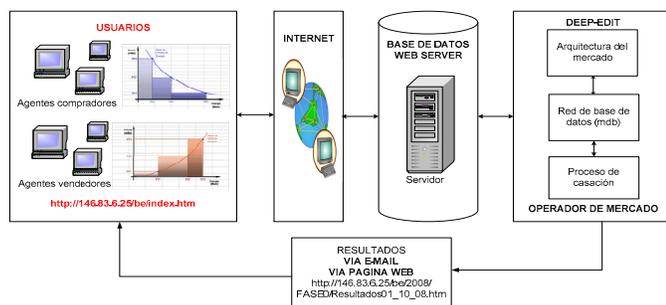


Figura 4. Plataforma web para el simulador de la bolsa de energía.

La experiencia académica fue llamada “Juego de la Bolsa” y es llevada a cabo por los estudiantes durante un mes. La coordinación requerida se detalla a continuación:

Primero, una sesión de coordinación es organizada por cada universidad en la que se describen las normas de comportamiento y el diseño experimental presentado en la sección III. A continuación, el coordinador del juego crea los grupos en las universidades y ofrece información general a todos los grupos. Para facilitar la ejecución del juego, temas específicos teóricos son tratados en las cátedras habituales del ramo en cada universidad.

Las distintas fases descritas en la *etapa B.2* se realizan a través de la plataforma Web [8]. El OM (coordinador del juego) está abierto a las preguntas y promueve la comunicación fluida con los grupos de estudiantes. Los resultados en el mercado se publican al final del día por el OM. En base a estos resultados, los grupos son capaces de confirmar o modificar sus estrategias.

Después de cada fase de juego, los grupos deben preparar un informe con una explicación de las estrategias seleccionadas y un análisis de los resultados (técnicos y económicos). El equipo docente revisa el informe y da su opinión sobre los resultados de cada fase con las estrategias utilizadas por todos los grupos.

Etapa D - Evaluación de las competencias de salida

La evaluación de las competencias de salida se basa en los instrumentos pedagógicos siguientes:

- Los informes de grupo son una herramienta de evaluación que permite la identificación de las competencias específicas.
- La aplicación de un test de trabajo en equipo, donde la auto-evaluación y la evaluación de sus compañeros permite evaluar las competencias genéricas de los estudiantes.
- Test de inicio y término de la actividad propuesta, permite conocer los resultados de aprendizaje obtenidos.

IV. 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 con un mix tecnológico de generación (embalses, centrales de pasada, vapor-carbón, ciclo combinado, y los motores diesel). También se incluyen las principales líneas de transmisión con sus respectivas capacidades. Los siguientes resultados corresponden a una aplicación del Juego de la bolsa en las Universidad de Chile y Pontificia Universidad Católica.

1.1. Descripción general

El juego de la bolsa se ha desarrollado por un periodo de 8 años, en los cuales se han realizado modificaciones según los resultados obtenidos en cada año. Las principales modificaciones que se han realizado a las reglas entregadas a los estudiantes, buscan 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. Como se menciona en la *etapa B.2*, esta experiencia consta de 4 fases. Durante la aplicación del juego en el año 2010, se obtuvieron los siguientes resultados por fase:

Fase I: Los estudiantes experimentan el problema de restricción de recursos hídricos y deben tomar decisiones sobre cómo deben ofertar y obtener altas utilidades. En la Tabla 1 se observan los resultados experimentales y simulados obtenidos para el día inicial y final de la fase, en donde los precios obtenidos y la demanda transada son menores a los

obtenidos en el último día de la fase. Esto permite concluir que los estudiantes fueron capaces de mejorar sus estrategias de oferta en la medida que se fue desarrollando la fase, logrando conocimientos nuevos de cómo enfrentar las incertidumbres del mercado y poniendo en práctica los conceptos de estrategias dictados en la clase teórica. Igualmente, se observa que en las horas de punta son capaces de vender más energía a precios altos, poniendo en práctica su aprendizaje adquirido durante esta fase.

TABLA I. EVOLUCIÓN DE LA DEMANDA Y LOS PRECIOS EN LAS FASES 1-2-3.

		Demanda Estimada	Costos variables Estimado [US\$/MWH]	Día inicial		Día final	
				Demanda Transada [MW]	Precio obtenido [US\$/MWH]	Demanda Transada [MW]	Precio obtenido [US\$/MWH]
Fase 1	Max	6890	205	4451	180	6903	210
	Min	4134	140	4078	150	3637	170
Fase 2	Max	7446	205	4257	222	5470	231
	Min	5297	203	1669	193	3129	211
Fase 3	Max	7446	205	4652	243	5432	266
	Min	5297	203	3856	203	4526	185

Fase 2: Los estudiantes fueron capaces de tomar la decisión sobre las compras y ventas de sus compromisos ante la presencia de contratos. En la Tabla 1, se puede observar que la cantidad transada fue menor que en la fase 1. Esto se debe a que la decisión tomada fue la de cubrir sus contratos con su propia generación. Sin embargo, los costos marginales obtenidos fueron mayores a la Fase 1, dando señales de que las ofertas realizadas aprovecharon la oportunidad de obtener mayores utilidades al final de la Fase. En esta fase se observa que muchas empresas compran energía en la bolsa para satisfacer sus contratos, pero obtienen pérdidas debido a los altos precios en esta fase. Lo anterior demuestra que el concepto de contratos en conjunto con una bolsa, no fue bien manejado, constituyéndose en la fase más crítica para la comprensión por parte de los estudiantes.

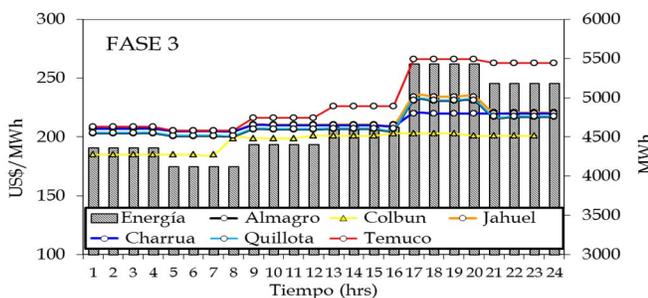


Figura 5. Evolución de la demanda y los precios en la fase 3.

Fase 3: se caracteriza por la presencia de un sistema multinodal. Como se observa en la Fig. 5, los costos marginales son los obtenidos en cada nodo del sistema de prueba. Se destaca el nodo “Temuco”, el que presenta el precio más alto obtenido en esta fase. Esto refleja que la empresa ubicada en ese nodo ejerció poder de mercado (ver tabla 1), aprovechando que el sistema presentó restricciones de líneas. Los estudiantes fueron capaces de imponer sus conocimientos en el tema de poder de mercado y lograr las metas que se les pedían en esta fase.

1.2. Retroalimentación

La implementación del esquema propuesto, permitió evaluar las competencias declaradas inicialmente en la etapa A. Estas competencias son propuestas para ser logradas por los estudiantes que participan de la actividad, siendo el trabajo en equipo y el auto-aprendizaje dos de las competencias genéricas que logran ser evaluadas durante el desarrollo de la actividad pedagógica.

A través del test de trabajo en equipo se logró reconocer que los estudiantes, pueden demostrar las competencias de autoaprendizaje en un 94% y el trabajo en equipo en un 91%. No obstante, debemos señalar que dentro de los indicadores evaluados para el trabajo en equipo, con una evaluación mínima de un 84% fueron las siguientes:

- Sugerir los recursos que pueden usarse.
- Sintetizar las múltiples ideas en representaciones coherentes.
- Comunicar al profesor las necesidades y consultas del equipo.
- Proveer regularmente de información para apoyar la resolución del problema que se presenta.

TABLA II. COMPETENCIAS ESPECÍFICAS.

Competencias específicas	Excelencia %	Bueno %	Regular %
Comprende el diseño de los mercados eléctricos y la funcionalidad asociada a c/u de sus agentes	39	40	21
Demuestra un rol de agente aplicando conceptos económicos, matemáticos, técnicos y legales	36	38	26
Implementa y opera estrategias para desempeñarse en un mercado eléctrico	31	38	31

La información anterior permite planificar, para las próximas versiones del curso, un desarrollo más eficiente de estos indicadores de competencia de “trabajo en equipo” y “autoaprendizaje”.

En relación a las competencias específicas, declaradas inicialmente para este proyecto (ver Etapa A), podemos indicar que fueron evaluadas en procesos a través de informes periódicos y un reporte final. Los resultados obtenidos para cada una de las competencias específicas declaradas se resumen en la Tabla II.

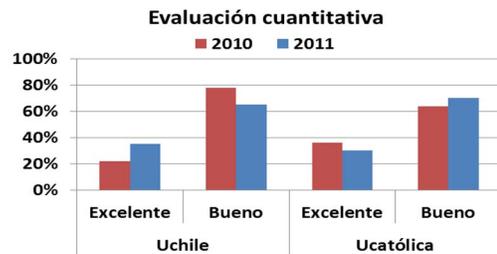


Figura 6. Resultados de la evaluación de los informes de grupo.

La evaluación final del curso permitió reconocer que el 100% de los estudiantes logra las competencias cognitivas declaradas, destacando que el 23% lo hizo en un nivel de excelencia para el año 2010 en la Universidad de Chile y un 36% en la Pontificia Universidad Católica. Sin embargo para el año 2011, el 35% de los estudiantes de la Universidad de Chile alcanzan lograr las competencias declaradas mejorando los resultados del año anterior como se muestra en la Fig. 6.

Es posible concluir entonces que la propuesta de evaluación, tanto para las competencias genéricas como para las específicas, son objetivas y permite reconocer qué estudiante logra la competencia y quién no la logra. Asimismo, se reconoce que la herramienta metodológica aplicada es pertinente y efectiva, es decir, logra lo que se propone desarrollar con los estudiantes en el periodo asignado para su aplicación.

V. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este trabajo se presenta un nuevo enfoque de enseñanza de los mercados eléctricos, basado en una herramienta capaz de integrar los principios de renovación curricular en ingeniería, observados a nivel internacional. Esta herramienta se basa en la estrategia metodológica de simulación, la que ofrece un mecanismo adecuado para experimentar y entender los fenómenos observados en un entorno real. La experiencia consiste en un proceso gradual de aprendizaje, lo que lleva a los estudiantes a mejorar sus conocimientos sobre estrategias, comportamiento y seguir reglas dentro de un mercado eléctrico durante la ejecución de cada fase. Cada fase presenta una dinámica con características propias de diferentes situaciones recurrentes en un mercado eléctrico.

Finalmente, las encuestas a los estudiantes han proporcionado evaluaciones positivas sobre el valor de este tipo de herramientas en su proceso de formación profesional. El desarrollo futuro de la herramienta se centrará en la integración de nuevos conceptos de inversión y planificación de los sistemas eléctricos. Asimismo, el esquema curricular propuesto puede extenderse a otras disciplinas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CONICYT/FONDAP/15110019, U. de Chile y el IFARHU-SENACYT, Panamá.

REFERENCIAS

- [1] J. Lucena, G. Downey, B. Jesiek, S. Elber, "Competencies Beyond Countries: The Re-Organization of Engineering Education in the United States, Europe, and Latin America", *Journal of Engineering Education*, vol. 96, no. 4, pp. 433-447, Oct. 2008.
- [2] H. Rudnick, R. Palma-Behnke, S. Jr. Carneiro, T.M.L. Assis, H. Salazar, and J.A.Valencia, "Where School Is Cool", *IEEE Power Energy Mag.*, vol.8, no.4, pp.61-74, Jul.-Aug. 2010.
- [3] G. Tequiltalpa, J. Tovar, G. Gutiérrez, "Asignación de Costos por el Servicio de Potencia Reactiva en Mercados Competitivos", *IEEE Trans. LATIN AMERICA*, vol. 1, no. 1, pp. 40-47, Oct. 2003
- [4] R. Reta, A. Vargas, "New Price System to Mitigate Marginal Price Volatility in Electricity Markets", *IEEE Trans. LATIN AMERICA*, vol. 9, no. 5, pp. 793-799, Sept. 2011.
- [5] PROYECTO MECESUP UCH0403: Renovación Curricular De La Ingeniería Civil En La Universidad De Chile y En La Pontificia Universidad Católica De Chile, 2006.
- [6] E. Crawley, "The CDIO Syllabus: A Statement of Goals for Undergraduate Engineering Education". Dept. Aeronaut. Astronaut., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, MIT CDIO Report #1, 2001[Online]. Available: www.cdio.org
- [7] J. Carpio, G. Quejo, R. Guirado, M. Valcarcel, P. Simon, A. Santamaria, N. Acero, M. Garcia-Lorenzo, R. Chacon, Q. Martin-Moreno, M.D. Fernandez-Perez, "Educational Application of Role-Playing and Simulation of Professional Environments Related to the Power Systems and the Electricity Market", in *Proc. IEEE Meeting the Growing Demand Eng. Educ. 2010-2020 Int. Summit*, Munich, Germany Nov. 9-11 2007, updated 2009, pp. 1-10.
- [8] J. Y. Guevara-Cedeño, R. Palma-Behnke, R. Uribe, "Experimental Economics for Teaching the Functioning of Electricity Markets", *IEEE Trans. Education*, vol. PP, no. 99, pp. 1-8, 2012. (D.O.I.: 10.1109/TE.2012.2189886)
- [9] W. Jewell, L. Bam, "Review: Power system analysis software tools", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 139-144, Jun. 2005.
- [10] J. L Bernal-Agustín, J. Contreras, R. Martín-Flores, A. J. Conejo, "Realistic electricity market simulator for energy and economic studies," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 77, pp. 46-54, Jan. 2007.
- [11] J. Contreras, A. Losi, M. Russo, "A JAVA/MATLAB simulator for power exchange markets", in *Proc. IEEE 22nd PICA*, Sydney, Australia, May. 2001, pp. 106-111.
- [12] D. Hua, H.W. Ngan, Wen. Fushuan, "Electricity Market Simulator: Adaptive for Studies on Different Market Behavior", in *Proc. IEEE TENCON*, Taipei, Taiwan, Nov. 2007, pp. 1-5.
- [13] A. Martini, P. Pelacchi, L. Pellegrini, M. V. Cazzol, A. Garzillo, and M. Innorta, "A simulation tool for short term electricity markets," in *Proc. IEEE PICA*, 2001, pp. 112-117.
- [14] 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, pp. 89-94.
- [15] I. Praca, C. Ramos, and Z. A. Vale, "Competitive electricity markets: simulation to improve decision making," in *IEEE Porto Power Tech Proc.*, Porto, Portugal, Sept. 10-13, 2001, vol 1.
- [16] G. Migliavacca, M. Benini, M. Gallanti, E. Bompard, E. Carpaneto, G. Ciwei, "LREMS: a long term electricity market simulator based on game theory", in *Proc. IEEE Power Syst. Conf. Expo.*, Atlanta, GA, 2006, pp. 1333-1340.
- [17] "PowerWeb User's Manual" ver. 2.7, School of Electrical Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, 2001 [Online]. Available: <http://www.pserc.cornell.edu/powerweb/>.
- [18] L. Hongyan, L. Tesfatsion, "The AMES Wholesale Power Market Test Bed: A Computational Laboratory for Research, Teaching, and Training," Iowa State University, Department of Economics, Staff General Research Papers, Jun. 2009.
- [19] G. Grozev, D. Batten, M. Anderson, G. Lewis, J.P.T. Mo & J. Katzfey, "NEMSIM: Agent-based simulator for Australia's national Electricity," <http://www.cmmt.csiro.au/research/papers/abstract.cfm/664>
- [20] Z. Vale, T. Pinto, I. Praça, H. Morais, "MASCEM - Electricity markets simulation with strategically acting players", *IEEE Intell. Syst.*, accepted, Jan. 2011.
- [21] G. Knežević, K. Fekete, S. Nikolovski, "Applying Agent-based Modeling to Electricity Market Simulation", in *MIPRO*, 2010 Proceedings of the 33rd International Convention, pp 647 - 652, May 2010.
- [22] D. Hua, H.W. Ngan, C.W. Yu, "Implementation of electricity market simulation system on Browser/Client/Server structure", in *Proc. 3rd Int. Conf. Elect. Utility Deregulation Restructuring Power Technol.*, Nanjing, China, Apr. 2008, pp. 1977-1981.
- [23] M.B.A. Kopace, M. Manbachi, H. Khezeli, M.S. Ghazizadeh, A.R. Kian, "InterNet-Based Power Market Simulator (NetPMS)", in *Proc IEEE ICAEE*, Beijing, China, Jun. 2010, pp. 95-98.
- [24] J.W. Lee, K. M. Yang, Y. W. Jeong, J. B. Park, J. R. Shin, "Development of Educational Web-Based Simulator for the Electricity Spot Market in Korea", in *Proc. Power Plants Power Syst. Control*, Kananaskis, Canada 2006, pp. 47-52.
- [25] 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.
- [26] D. Paravan, A. Sajin, R. Golob, "Teaching trading electricity with the use of electricity market simulator," in *Proc. IEEE Bologna Power Tech. Conf.*, Jun. 2003, vol. 3, pp. 23-26.
- [27] T. D. H. Cau, H. Outhred and I. MacGill, "Using a market game as a tool for teaching strategic behavior in an electricity restructuring course", in *Proc. Australasian Univ. Power Eng. Conf.*, Brisbane, Australia, Sep. 26-29, 2004, pp. 1-6.
- [28] M. Madrigal, M. Flores, "Integrated software platform to teach different electricity spot market architectures," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 88-95, Feb. 2004.
- [29] H. Chen, D. Hua, Z. Jing, "Power engineering lab for complicated experimental research of electricity markets", in *Proc. 8th Int. Conf. Adv. Power Syst. Control, Oper. Manage*, Hong Kong, China, Nov. 11, 2009, Updated 2010, pp. 1-5.

- [30] D. Zowghi, S. Paryani, "Teaching Requirements Engineering Through Role Playing", in *Proc. 11th IEEE Int. Conf. on Requirements Engineering*, 2003, pp. 233-241.
- [31] Electricity Market Activity Rules (non-binding unofficial translation) [Online]. Available: <http://www.omie.es/inicio/normativa-de-mercado/reglas-omel>.



Jessica Guevara Cedeño (S'03 - M'11) was born in Santiago de Veraguas, Panamá. She received her B.Sc. in Electrical and Electronic Engineering from the Technological University of Panamá, in 2005, and her Ph.D degree in electrical engineering from the Universidad of Chile, Santiago, in 2012. She is currently an Associate Professor in the Electrical Engineering Department in the Technological University of Panamá. Her main research interests are competitive power markets and engineering education.



Rodrigo Palma Behnke (M'94 - SM'04) was born in Chile. He received the B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from the Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, and the Dr.-Ing. degree from the University of Dortmund, Germany. He is currently an Associate Professor in the Electrical Engineering Department at the University of Chile, Santiago. His research field is the planning and operation of electrical systems in competitive power markets and new technologies.



Rosa Uribe was born in Santiago, Chile. She received her B.S. degree in Biology Teacher Education from the Universidad de Playa Ancha, Valparaiso, Chile and M.S. degree in Education - Curriculum from the Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago. She is currently an educational advisor in the Faculty of Physical and Mathematical Sciences, at the University of Chile. Hers main research interests are engineering education and general education.