

El Mercado Eléctrico Mayorista: Agentes y Modelos de Organización

Wholesale power market: agents and organization models

Jean Lozano^{1*}, Jaime Luyo¹, Yuri Molina²

¹Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Av. Túpac Amaru 510, Lima - Perú

²Centro de Energías Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, Cidade Universitária - João Pessoa - PB - Brasil

Recibido : 18/12/2017 Aceptado: 01/02/2018

RESUMEN

En este artículo se presenta una revisión de los modelos que sirvieron como base para el diseño de mercados eléctricos competitivos actualmente en funcionamiento en la mayor parte del mundo. Se explica en primer lugar las principales características de la electricidad que lo diferencian de cualquier otro producto que puede ser comercializado en un mercado organizado. Se describe a los agentes que pueden participar en un mercado eléctrico competitivo. Se presenta una clasificación del mercado eléctrico de acuerdo al grado de competencia dentro del contexto de liberalización y se hace un análisis de los modelos de organización y operación de mercados eléctricos centralizados con competencia en el mercado mayorista.

Palabras clave: (diseño, mercado eléctrico, organización, operación, liberalización)

ABSTRACT

This article presents a review of models that served as the basis for the design of competitive electricity markets currently in operation in most of the world. First, we explain the main characteristics of electricity that differentiate it from any other product that can be marketed in an organized market. Then, we describe the agents that can participate in the electricity market and we present a market classification according to the degree of competition within the current context of liberalization. Finally, we made an analysis of the models of organization and operation of electricity markets with competition in the wholesale market.

Keywords: (diseño, mercado eléctrico, organización, operación, liberalización)

1. INTRODUCCIÓN

La realización del presente estudio se justifica por dos razones principales. La primera es que para analizar la problemática actual de un mercado eléctrico se requiere del entendimiento previo de su modelo de organización y operación así como de los mecanismos de regulación y supervisión desarrollados para las diferentes actividades involucradas en su funcionamiento. En segundo lugar, no existe disponible en la bibliografía una revisión clara y completa del tema. En este sentido, esperamos que el presente artículo sea de mucha utilidad para aquellos estudiantes, profesionales y público en general que desean tener un conocimiento introductorio sobre el diseño de los mercados eléctricos.

La electricidad es un energético fundamental de las sociedades modernas y su suministro impacta directamente en el desarrollo social y económico de las naciones. Por esta razón, es fundamental que el suministro de este energético sea realizado de un modo seguro, confiable, eficiente y económico [1].

Con el fin de lograr estos objetivos, en las últimas décadas se vienen realizando continuas e importantes reformas en el sector eléctrico en países con diferentes niveles de industrialización. En este contexto de un sector eléctrico en constante proceso de cambio y búsqueda de mejores formas de organización y operación que fomenten la eficiencia y la sostenibilidad del servicio, incluyendo los aspectos medioambientales, se hace necesario una continua investigación y discusión de la problemática del sector en particular del diseño de mercados eléctricos.

* Correspondencia:
E-mail: jeanlozanop@gmail.com

Un mercado eléctrico es un sistema económico complejo de diseñar y analizar debido principalmente a las características particulares de la electricidad y a la complejidad técnica que implica establecer y operar un sistema interconectado para su suministro.

Antes de analizar la estructura y los principales modelos de organización que sirvieron como base para el diseño de mercados eléctricos competitivos actualmente en funcionamiento en la mayor parte del mundo, presentaremos una revisión previa de las principales características técnicas necesarias para el suministro de la energía eléctrica y de las características económicas de la electricidad como producto a ser comercializado.

La electricidad hoy en día es ampliamente considerada como un commodity. Como commodity, este se compra y se vende tanto como potencia y energía, con varios atributos que se comercializan en los mercados eléctricos. Sin embargo, este energético tiene algunas características únicas que lo distinguen de casi todos los demás commodities que se pueden comercializar dentro de un mercado organizado.

En primer lugar, la principal característica de la electricidad es que este no puede almacenarse en grandes cantidades ni inventariarse. Por lo tanto, la electricidad tiene que ser generada y transmitida al mismo tiempo que es consumida. En todo momento debe mantenerse el equilibrio entre la generación (oferta) y la demanda. El hecho de que la demanda de electricidad tenga que ser satisfecha en tiempo real tiene dos implicancias importantes sobre el sistema. Primero que se necesita contar con una capacidad de generación instalada que pueda satisfacer la demanda máxima del sistema en tiempo real y la segunda es que se necesita contar con capacidad de reserva en caso de que se produjese eventos inesperados.

En segundo lugar, es importante considerar la peculiaridad de la electricidad para su transporte ya que este no puede ser enviado en paquetes etiquetados. Llevar la energía eléctrica desde los centros de generación hacia los centros de consumo requiere de extensas redes de transmisión y distribución que interconectan todo el sistema y tienen que funcionar como un todo integrado. Una vez inyectada la energía eléctrica al sistema, la ruta por la que se transmite esta energía no puede ser elegida a voluntad, este es determinado por las leyes físicas (leyes de Kirchhoff) donde la distribución de corriente depende de la impedancia en las líneas de transporte y otros elementos a través del cual fluye la electricidad. Las leyes físicas establecen además que las distintas rutas de transmisión y distribución interconectadas son altamente interdependientes, esto significa que cualquier cambio en la red de transmisión (problemas de congestión causado por incrementos súbitos de la demanda, conexión y desconexión de cargas, fallas inesperadas en el sistema de transmisión, etc.) causa una reconfiguración instantánea del flujo de carga y este puede causar efectos significativos en las otras

instalaciones del sistema interconectado. Excepto en casos muy simples, todo lo que podemos conocer es la cantidad de energía eléctrica que es inyectada al sistema interconectado en un nodo o barra del sistema y la cantidad de energía que es retirada del sistema en otro nodo. Todos los generadores que participan en el mercado inyectan energía al sistema de transmisión en nodos determinados y todas las cargas (demanda) retiran la energía del sistema interconectado en nodos determinados. En este contexto, es imposible distinguir quien retira la energía de quien y no es posible garantizar la ejecución física de los contratos bilaterales.

Como consecuencia de las características mencionadas líneas arriba es necesario distinguir entre la operación física del sistema para mantener el equilibrio dinámico en tiempo real entre la oferta de generación y la demanda y las transacciones financieras que pueden existir entre los participantes del mercado eléctrico. Garantizar el abastecimiento seguro, estable y confiable en tiempo real requiere usualmente de una institución independiente y reconocida por todos los agentes participantes del sistema eléctrico que se encargue exclusivamente de la operación del sistema físico con independencia de los acuerdos comerciales que puedan existir entre productores y consumidores.

En cuarto lugar, en el sector eléctrico existen diversas tecnologías que son eficientes para la generación de energía eléctrica. Algunas de ellas, como la generación hidráulica o nuclear, requieren grandes inversiones para su construcción pero tienen menores costos operativos lo que las hace adecuadas para abastecer grandes cantidades de energía. Otras tecnologías, como la generación termoeléctrica (basada en combustibles fósiles), tienen menores costos de inversión pero presentan altos costos variables de operación, por lo que son adecuados para abastecer pequeñas o medianas cantidades de energía. En los últimos años la disminución del costo de inversión y operación de centrales de generación basados en recursos renovables no convencionales (solar y eólico) está impulsando a que muchos países los incorporen de manera apreciable dentro de su parque generador.

De acuerdo a la disponibilidad de recursos de cada país, todas estas tecnologías pueden ser combinadas para lograr un suministro eficiente de energía eléctrica y al menor costo posible.

En quinto lugar, las actividades de transporte de electricidad (transmisión y distribución) implican usualmente grandes costos hundidos y no se hace funcional fomentar la competencia (no resulta económico ni ambientalmente amigable construir múltiples líneas de transmisión y/o distribución que compitan entre ellas para el transporte de energía). Para hacer atractiva la inversión en esta actividad y salvaguardar la eficiencia productiva se entregan concesiones exclusivas (argumentos de monopolios naturales) y se establecen mecanismos de pago

apropiados por el uso de la red. Estas características motivan diversas necesidades como las referidas a la regulación de los segmentos monopólicos y las decisiones de inversión en la transmisión.

En el diseño del mercado eléctrico se deben tomar en cuenta todas estas características y necesidades, estableciendo las funciones de los diferentes agentes, las transacciones factibles, los mecanismos de operación del sistema y los mecanismos de formación de precios. Debido a las características económicas y técnicas de la industria eléctrica, existen diversas maneras de organizar el mercado eléctrico [2].

2. AGENTES PARTICIPANTES EN UN MERCADO ELÉCTRICO LIBERALIZADO (Stakeholders)

Las peculiaridades de la electricidad y la complejidad en la planificación, coordinación y operación de una red eléctrica interconectada, llevaron a que en el pasado en la mayoría de países el sector eléctrico fuera administrado y operado por un monopolio estatal verticalmente integrado. Estas compañías tenían el control absoluto de todas las actividades desde la generación de la energía hasta la distribución a los usuarios finales. Subsistía la idea de que era difícil coordinar la generación y transmisión como empresas separadas, debido a que debía hacerse la operación en forma integrada, además de planificarse en forma conjunta las inversiones en generación y transmisión [3]. Aunque los modelos verticalmente integrados funcionaron razonablemente bien durante la mayor parte del siglo XX, siendo capaces de atender aumentos constantes y rápidos de la demanda, también es cierto que la ausencia de competencia provocó una pérdida de miedo al riesgo, generando muchas veces excesos de inversión en capacidad, malas decisiones en la elección de tecnologías y fuentes primarias, politización de los procesos de inversión y grandes dificultades en los procesos de regulación por la evidente asimetría de información.

Desde la segunda mitad de los años 80, producto del cuestionamiento generalizado sobre la eficiencia de los monopolios estatales en las empresas de servicios públicos, el proceso de liberalización de la industria eléctrica ocupa un lugar destacado en los programas político energético de muchos países. Con el fin de atraer la inversión privada, promover la competencia y mejorar la eficiencia económica del sector, en la mayoría de países pioneros en las reformas se propuso primero una reestructuración del sector con varias medidas, entre ellas la separación de la industria eléctrica en actividades diferenciadas (generación, transmisión, distribución y comercialización) y promoción de la competencia donde este sea posible manteniéndose el Gobierno solo como regulador y supervisor del sistema, principalmente en las

actividades donde por su naturaleza no se podía introducir competencia (transmisión y distribución) [4]. Desde las primeras reformas realizadas en cada país, la discusión sobre como introducir competencia y diseñar mercados con los mecanismos de regulación y supervisión apropiados, constituye hasta hoy uno de los mayores desafíos de las teorías de regulación [5].

De acuerdo al modelo de mercado eléctrico existen variaciones sobre las formas de organizar los intercambios físicos y comerciales. Sin embargo, los tipos de agentes participantes, las funciones y necesidades que presentan los mercados eléctricos liberalizados son esencialmente las mismas.

En la industria eléctrica se distinguen como actividades físicas necesarias para el suministro: la generación, la operación física del sistema, el transporte a grandes distancias en alta tensión y la distribución en áreas más pequeñas a menor tensión. Los agentes que cumplen estas funciones de carácter físico en el sistema son las empresas generadoras (Genco), empresas de transmisión (Transco), el operador del sistema (*system operator* - SO) y las empresas distribuidoras (Disco). Como actividades comerciales se distingue entre el comercio en el mercado mayorista (*wholesale market*) entre los agentes generadores con los distribuidores, grandes clientes, comercializadores (*retailers*) y/o con otros agentes generadores y el comercio minorista (*retail market*) entre los distribuidores o comercializadores y los consumidores finales.

En cuanto a los agentes que pueden participar en un mercado eléctrico liberalizado se tiene:

Empresas Generadoras (Genco): Son aquellos agentes que producen energía eléctrica en sus centrales y la ofrecen al mercado. En función a la tecnología de producción empleada se pueden clasificar en:

- **Generación Nuclear:** Con esta tecnología se aprovecha el calor obtenido mediante la fisión de los núcleos de uranio para producir energía eléctrica. Los costos de inversión de estas centrales son elevadas y sus costos variables de producción son relativamente bajos. Estas centrales tienen una capacidad de respuesta a la demanda y de regulación muy limitada. Por esta razón, son centrales de base y en general el precio de sus ofertas de energía dentro de un mercado liberalizado tienden a ser próximos a cero con el fin de asegurar su despacho.
- **Generación con carbón:** Son las centrales termoeléctricas clásicas que aprovechan el calor liberado de la combustión del carbón para la producción de electricidad mediante un ciclo termodinámico agua/vapor. Aunque su puesta en marcha toma en general entre 8 y 12 horas, estas centrales tienen una buena flexibilidad en su capacidad de regular su producción (el orden de minutos para subir o bajar la producción desde una

carga parcial). Por otro lado, estas centrales son las mayores contaminantes del planeta.

- **Generación con biomasa:** Su funcionamiento es similar a las centrales de carbón. Sin embargo, el hecho de usar como combustible la biomasa les otorga en algunos países algunos beneficios como primas por la energía que producen.
- **Generación diésel:** Son centrales termoeléctricas de encendido rápido y muy buena flexibilidad en su capacidad de regulación de su producción. Se usa diésel como combustible. Este recurso es en general más caro que otro tipo de combustibles fósiles lo que hace que el funcionamiento de estas plantas se limite en muchos países a las horas punta o de mayor demanda.
- **Generación con gas natural:** Son centrales termoeléctricas que usan el gas natural como combustible. Estas centrales pueden ser de ciclo simple de turbina de gas o de ciclo combinado con turbina de gas y turbina de vapor. Tienen mayor flexibilidad operativa que las centrales clásicas de carbón pero con un costo de combustible generalmente más elevado.
- **Generación hidráulica:** Es la más flexible de todas las tecnologías. Se aprovecha la energía cinética o potencial del agua para generar energía mecánica y finalmente energía eléctrica. Estas centrales son en general consideradas limpias puesto que no emite productos contaminantes. Sin embargo, dependiendo del tamaño pueden producir un gran impacto ambiental debido a la construcción de represas que inundan grandes extensiones de terreno y modifican el caudal y calidad del agua de los ríos. El costo variable de producción de estas centrales es prácticamente nulo.
- **Generación eólica:** Estas centrales aprovechan la energía del viento para su funcionamiento y la mayor dificultad para estos productores está en la previsibilidad de su producción. Las ofertas de generación al mercado eléctrico consisten esencialmente en indicar hora a hora para el día siguiente el precio mínimo al que estaría dispuesto a vender y la cantidad de energía que se va a producir. Aquí es donde los productores eólicos tienen que recurrir a sofisticados modelos de predicción de producción para el día siguiente, so pena de incurrir en importantes penalizaciones por no cumplir su compromiso. El exceso o la falta de producción de una central debe compensarse en tiempo real a través de la producción de otra central de alta flexibilidad en producción por cuyo servicio, llamada de regulación cobra un precio sensiblemente mayor que el del mercado diario.
- **Generación termosolar:** Este tipo de centrales colecta la energía solar haciendo uso de espejos reflectores lo que permite generar vapor de agua que finalmente se usa para generar energía eléctrica. La energía solar recogida durante el día

también puede almacenarse en otros medios líquidos, sólidos o de cambio de fase como sal fundida. Por la noche se puede extraer la energía del medio de almacenamiento para hacer funcionar la central.

- **Generación solar fotovoltaica:** Estas centrales usan los fotones solares que impactan sobre las placas solares y movilizan electrones generando una diferencia de potencial (voltaje) en los terminales de la placa. Este tipo de centrales necesitan grandes extensiones de terreno para su funcionamiento a gran escala. No tienen capacidad de regulación y la predicción de su producción es limitada.
- **Productores especiales:** Corresponde a productores no convencionales como la cogeneración. Este consiste en la generación simultánea de electricidad y de calor útil usando turbinas de gas o motores diésel. El calor puede ser usado para un proceso industrial o para climatización. Este tipo de instalaciones normalmente se limita a aceptar el precio resultante del mercado ya que ofertarán su producción eléctrica a precio cero para despachar su energía.
- **Empresas Transportistas (Transco):** Son aquellas que transportan la energía eléctrica a largas distancias a través de redes de alta tensión (mayores a 220kV) desde las centrales de generación hasta las subestaciones de distribución o hasta las estaciones de los grandes clientes industriales. Aún en mercados liberalizados es usual que la actividad de transmisión sea una actividad regulada.
- **Empresas Distribuidoras (Disco):** Son los agentes que distribuyen la energía eléctrica a través de sus redes de distribución de media y baja tensión hasta los consumidores finales. Esta actividad también es regulada, otorgándoles áreas de concesión definidas. La distribución de energía eléctrica se realiza en dos etapas. La primera etapa corresponde al reparto que se hacen usualmente en forma de anillos con tensiones entre 25 y 132kV alrededor de los grandes centros de consumo. La segunda etapa es la etapa de distribución propiamente dicha, con tensiones comprendidas en 3 y 30kV hasta llegar a los centros de transformación y de 125 a 400 V en las líneas de baja tensión para el suministro final a los clientes. Su diseño es usualmente radial.

En algunos mercados las empresas distribuidoras ejercen también el papel de comercializadores ante aquellos consumidores que no contratan su suministro con ningún agente comercializador.

Comercializadores (retailers): Los comercializadores son aquellos agentes que compran la energía eléctrica

en el mercado eléctrico para venderlo a sus clientes finales. Para ello deben pagar un peaje a la empresa transportista y/o a la empresa distribuidora por utilizar sus redes. Los comercializadores de energía eléctrica deben prever la demanda de sus clientes y realizar las pertinentes ofertas de compra en el mercado eléctrico. En general, el precio de compra que se indica en estas ofertas será el máximo posible en los mercados donde se ha establecido un precio techo o un precio suficientemente alto como para asegurarse de que la oferta de compra sea casada siempre. En algunos mercados eléctricos existen los denominados “comercializadores de último recurso” quienes suministran la energía a los consumidores que no desean o lo logran firmar un contrato con un comercializador al uso a un precio libremente pactado. En estos casos, el precio de la energía eléctrica es fijado a través de subastas específicas extraordinarias o en última instancia por el regulador.

Consumidores: Los agentes consumidores son aquellos que compran la energía eléctrica para su consumo final en virtud de un contrato con un comercializador, distribuidor o directamente en el mercado eléctrico. En la mayoría de casos es posible clasificar a los consumidores en dos grandes segmentos o grupos en función de su volumen de consumo de energía. El segmento regulado corresponde a clientes con bajo consumo (usualmente clientes residenciales) y sólo pueden contratar con un comercializador o distribuidor en función a tarifas reguladas. El segmento libre corresponde a los grandes consumidores de energía (usuarios comerciales e industriales) que ya tienen poder de negociación y contratan libremente con comercializadores, distribuidores o directamente con generadoras mediante contratos bilaterales sin intervención del regulador.

En cuanto a las necesidades operacionales de un mercado eléctrico se tiene:

La operación física: Dada las características técnicas de los sistemas eléctricos interconectados de gran tamaño. La operación física responde a la necesidad de mantener un suministro seguro, estable y confiable en tiempo real. En este sentido, es necesario la creación de una institución que se encargue exclusivamente de la operación física del sistema. Esta entidad puede ser una empresa transmisora o un operador independiente (Independent System Operator - ISO).

La entidad responsable de la operación física tendrá tres actividades fundamentales para asegurar el funcionamiento físico del sistema [6].

- Coordinar la producción de energía de las unidades generadoras (despacho) en tiempo real según la demanda o carga requerida en cada nodo o barra del sistema.
- Administrar las redes de transmisión.
- Administrar los servicios complementarios o auxiliares (las reservas en generación y transmisión

que permitan enfrentar contingencias y asegurar la estabilidad y confiabilidad del sistema).

Para garantizar la estabilidad del sistema es crítico controlar variables como: frecuencia, voltaje, flujos máximos por las líneas de transmisión, equilibrio generación - carga, etc.

La operación del mercado: En todo mercado eléctrico se debe garantizar el funcionamiento del sistema interconectado haciendo uso óptimo y económico de los recursos disponibles buscando minimizar el costo total del sistema y/o maximizando el beneficio social (operación económica del sistema). Además, se debe satisfacer las necesidades de todos los agentes participantes en términos de transparencia en los procedimientos, toma de decisiones y disponibilidad de información.

En la mayoría de mercados eléctricos liberalizados actualmente en funcionamiento, es usual que el organismo encargado de la operación del mercado tenga la administración de una bolsa de energía (power exchange), que corresponde a una instancia de coordinación económica donde se ordenan las ofertas de compra-venta de energía y el óptimo económico se alcanza al igualar las ofertas de los generadores y la demanda del sistema, determinando un precio de despeje del mercado que es aceptado por todos los participantes. Junto con la coordinación económica, el organismo encargado de la operación de mercado cumple también la función de coordinación comercial. Debe coordinar los intercambios comerciales entre los diferentes agentes del mercado, en base a los precios definidos en la bolsa. Entre las tareas que debe realizar dentro de esta coordinación comercial está la facturación, las liquidaciones en diferentes horizontes de tiempo (mensual, semanal o diario) y el manejo de diferentes fondos necesarios para el funcionamiento del mercado [7].

El operador de mercado (Market Operator) suele ser una entidad independiente sin fines de lucro.

En algunos países latinoamericanos (Perú, Chile, Colombia, Bolivia) es usual que una misma institución se encargue de la operación física del sistema y de la operación del mercado.

3. CLASIFICACIÓN GENERAL DE MERCADOS ELÉCTRICOS

Las reformas estructurales y regulatorias impulsaron la creación de mercados eléctricos competitivos. La competencia en la industria eléctrica significa generalmente competencia en la producción (generación) de electricidad y en la actividad de comercialización (venta de energía al consumidor final). Las actividades de transporte de electricidad (transmisión y distribución) no pueden ser competitivos, estos son monopolios naturales, tienen que servir a todos y tienen que ser regulados para evitar sobrecargos en el servicio. La mayoría de países aplican

a estas actividades (transmisión y distribución) dos grandes tipos de regulación de precios: la regulación por tasa de retorno (modelo americano) y la regulación por desempeño o basada en incentivos (modelo británico) [3].

Como en todo mercado organizado, los principales elementos que hay que definir son el conjunto de reglas, instrucciones e instrumentos necesarios para su funcionamiento; esto se conoce como el diseño del mercado eléctrico. En esta sección presentaremos una clasificación de los mercados eléctricos de acuerdo al grado de competencia que se puede introducir en el sistema. La mayoría de países que siguieron el proceso de liberalización años más tarde adoptaron como base uno de estos esquemas y sobre esta base continuaron las reformas y se implementaron regulaciones basadas en sus propias circunstancias y características.

Sea cual sea el diseño de mercado eléctrico adoptado, existen objetivos esenciales que se deben mantener al establecer un mercado de electricidad liberalizado aunque estos objetivos parezcan parcial o totalmente contradictorios [5]: i) garantizar el suministro de electricidad seguro, estable, continuo y de calidad (operación física del sistema) ii) garantizar la operación económica del sistema, es decir reducir en la mayor medida posible el precio de la electricidad pero basado en costos reales y iii) garantizar el menor impacto ambiental posible con el funcionamiento del sistema.

Aunque no existe una clasificación única aceptada internacionalmente, es posible distinguir 4 tipos de acuerdo al grado de competencia que se introduce en el sistema [4]. i) Monopolio verticalmente integrado que ya discutimos anteriormente ii) Modelo de comprador único (*single buyer model*) iii) Modelo con competencia mayorista (*wholesale competition*) y iv) Modelo con competencia minorista (*retail competition*).

3.1 Mercado Eléctrico con Comprador único

El modelo de comprador único fue uno de los primeros intentos por introducir competencia en el sector eléctrico. En este modelo existe una entidad compradora única (*single buyer*) que actúa como intermediario en la compra y venta de toda la energía a nivel mayorista. Los gobiernos de muchos países autorizaron la inversión privada y competencia en el submercado de generación permitiendo la participación de productores independientes de energía (*independent power producers - IPPs*). Estos IPPs tienen que vender la totalidad de la energía producida a la agencia compradora que en la mayoría de casos es una entidad estatal que se encarga de la operación física de las redes de transmisión y distribución y del suministro a los clientes finales.

3.2 Mercado Eléctrico con Competencia Mayorista

En este modelo, todos los generadores (Genco) que forman parte del sistema eléctrico de potencia compiten entre sí en condiciones similares para

establecer contratos de venta de energía de largo plazo con las empresas distribuidoras (Disco) y/o grandes consumidores (clientes industriales) y compiten también por ofertar su producción en el mercado mayorista de corto plazo (*wholesale spot market*) que es administrado por el operador del mercado eléctrico. Las redes de transmisión son el sistema físico abierto a todos que permite esta libre competencia y el funcionamiento de un mercado mayorista de energía eléctrica. En la **Figura 1** se esquematiza el funcionamiento de este modelo [4] y como se puede apreciar todas las compras se hacen a nivel del mercado mayorista de energía el cual toma la forma de una piscina (*pool*) de energía donde los generadores inyectan y los consumidores pueden retirar la energía. En este modelo de mercado eléctrico las empresas distribuidoras (Disco) son las empresas encargadas de operar las redes de distribución y suministrar (vender) la energía al consumidor final dentro de su área de concesión. A diferencia de los grandes consumidores los usuarios finales pequeños y medianos no tienen la libertad de elegir a su suministrador. Las empresas distribuidoras pueden acordar contratos de largo plazo con las generadoras lo que les permite estabilizar el precio de sus compras de electricidad.

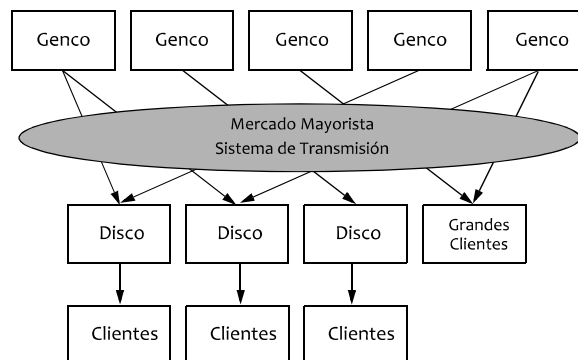


Figura 1. Mercado eléctrico con competencia mayorista

En un esquema básico de este modelo, solo las empresas generadoras pueden participar del mercado mayorista spot. Las generadoras con capacidad insuficiente para cumplir con sus contratos o que hayan sido desplazados del despacho adquieran electricidad de otras generadoras con capacidad disponible en el mercado mayorista spot y de esta manera cubren su déficit y pueden cumplir con sus compromisos contractuales. En algunos mercados más competitivos donde las distribuidoras y los grandes clientes pueden participar en el mercado mayorista spot, estos requieren tomar las mejores ofertas de las empresas generadoras, lo que impulsa la participación de corredores (*brokers*) dentro de las llamadas bolsas de energía.

3.3 Mercado Eléctrico con Competencia Minorista

En este modelo se considera por defecto la competencia en el mercado mayorista donde los generadores compiten por establecer contratos de suministro con comercializadores (*retailers*) y grandes consumidores y se incorpora el funcionamiento de un mercado minorista en el que las empresas comercializadoras minoristas y/o distribuidoras compiten entre ellas para la venta de energía a los usuarios finales. La red de distribución es el sistema físico que permite el funcionamiento de este mercado tal como se muestra en la **figura 2** [4].

Los consumidores finales pueden dentro de este modelo elegir libremente a sus suministradores (*retailers*), escogiéndolas de acuerdo a su conveniencia (bajo precio y calidad); en algunos casos las mismas empresas distribuidoras pueden participar como minoristas, mientras que en otros casos están limitadas a sus funciones en la operación de las redes de distribución.

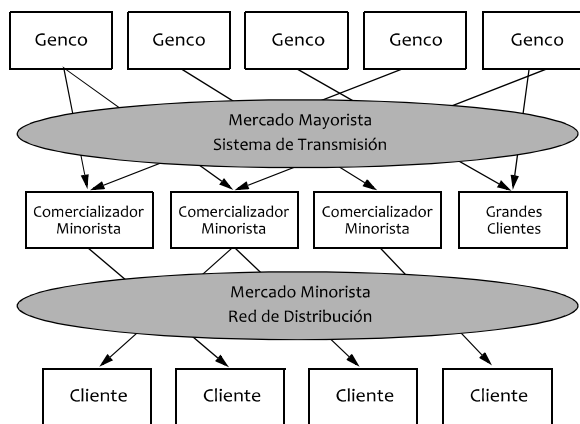


Figura 2. Mercado eléctrico con competencia minorista

En este modelo de organización es usual que tanto los ofertantes de energía (generadoras) y consumidores (distribuidores, comercializadores y grandes clientes) participen del mercado mayorista spot en las denominadas bolsas de energía.

4. DISEÑO DE MERCADOS ELÉCTRICOS CON COMPETENCIA MAYORISTA

El principio fundamental en el cual se basa la formación de un mercado eléctrico competitivo es la existencia de un mercado mayorista organizado de electricidad, cuya condicionante es la coordinación entre los diversos agentes participantes del mercado (generadores, transportistas y consumidores). En este sentido, dentro de los modelos que incorporan competencia en el mercado mayorista (wholesale y retail) es posible distinguir dos modelos principales de organización y operación: a) Mercado Centralizado y b) Modelo de contratos bilaterales o Mercado Descentralizado [8].

Ambas formas representan los postulados de las dos escuelas tradicionales de organización de mercados eléctricos. Por un lado se encuentran aquellos que sostienen que el mercado debe organizarse en torno a un ente independiente con poder discrecional sobre los agentes, que velando por el interés global de los participantes busca optimizar centralizadamente la operación económica del sistema organizando así el despacho de las unidades como si tuviese un solo dueño. Por el contrario la forma descentralizada, responde al modelo de organización donde son los agentes quienes bajo determinadas consideraciones toman sus propias decisiones en lo que respecta al despacho de las unidades sin la intervención directa de un organismo central superior. En otras palabras, el modelo de mercado centralizado defiende la idea de que debe existir un organismo central el cual debe conducir el mercado para lograr la eficiencia económica, mientras que el modelo descentralizado se basa en que la eficiencia económica en el mercado (señal de precio eficiente) se logra a través de transacciones bilaterales directas entre los participantes. El óptimo se espera alcanzar por medio de los mecanismos de mercado y la competencia al interior del sector [9].

Cada país que inició el proceso de liberalización de su sector eléctrico adoptó uno de estos modelos de organización o combinación de estos ya que no son mutuamente excluyentes. Sobre estos modelos continúan reformas y se implementan regulaciones basadas en sus propias características y circunstancias. En los últimos años, la incorporación de políticas medioambientales y la alta promoción en incorporación de energías renovables no convencionales (solar, eólico) en los sistemas eléctricos está llevando en muchos países a la revisión de los modelos de organización de mercados eléctricos para la implementación de mecanismos regulatorios que permitan a estas nuevas tecnologías incorporarse adecuadamente al sistema física y económicamente.

Por las características particulares de la electricidad y del sistema eléctrico en general no es posible implementar un mercado eléctrico basado completamente en contratos bilaterales. Por este motivo, el modelo de mercados eléctricos centralizado es el más usado en el mundo y puede adoptar la forma de Power Pools (PP) o Power Exchanges (PE). Este último es un modelo híbrido ya que incorpora los contratos bilaterales físicos en su diseño como explicaremos más adelante.

4.1 El modelo Poolco (Power Pool Markets)

El concepto principal de un mercado centralizado tipo power pool (Poolco) es que todos los agentes que participan en el mercado eléctrico reconocen y aceptan el funcionamiento de un organismo central que gestiona el mercado y bajo mecanismos apropiados

establece el precio de corto plazo del mercado mayorista de electricidad (wholesale spot price) el cual es el precio de despeje del mercado (clearing price) producto del equilibrio entre la oferta y la demanda. En los mercados de electricidad centralizados el precio spot lo determina el operador del mercado y se establece usualmente sin considerar las relaciones comerciales bilaterales entre los productores (empresas generadoras) y consumidores (grandes clientes, distribuidores y/o comercializadores).

Dentro del modelo Poolco, la participación de los agentes generadores es obligatoria y están sujetos a la programación y despacho económico de las unidades de generación (economic dispatch) que se establece centralizadamente producto de la coordinación entre el operador del mercado y el operador del sistema. Por este motivo a este tipo de mercado también se le conoce como Mandatory Pool.

El despacho económico se entiende como la coordinación y operación de las instalaciones de generación para producir la energía que permita satisfacer de manera confiable la demanda total del sistema al menor costo posible durante un periodo de tiempo tomando en consideración los límites operacionales de las centrales de generación y las líneas de transmisión. Son dos los componentes fundamentales para el despacho económico: la programación del despacho para el día siguiente (short term scheduling) y el despacho de unidades generadoras en tiempo real.

El modelo Poolco de organización de un mercado eléctrico es usado en buena parte del mundo y es usual que ambas funciones (operación del mercado y operación del sistema) se encuentren integradas dentro de un mismo organismo (operador central).

En algunos mercados (pools latinoamericanos), las generadoras están obligadas a participar en el mercado eléctrico mayorista declarando al operador del mercado y al operador del sistema toda su capacidad de generación disponible y el costo marginal de producción asociado (costos variables de generación), a este tipo de mercados se les conoce como Pool-Costos (Cost Based Pools). En este modelo es usual que la demanda no tenga participación activa en el mercado mayorista (no participa activamente con ofertas de compra) y para obtener el precio spot, el operador de mercado tiene establecidos procedimientos que le permiten hacer estimaciones de la demanda total futura (día siguiente) de todo el sistema, tomando como referencia los patrones históricos de consumo. A este tipo de pool donde sólo se considera las ofertas de venta de los generadores para establecer el precio spot también se les conoce como one-side auction pool o single auction pool (pool de un lado o de subasta simple). Este modelo de mercado busca emular las condiciones de competencia perfecta donde una empresa ofrece su producto al mercado a un precio igual a su costo marginal de producción.

Como ya se mencionó, en un mercado eléctrico con modelo de organización pool-costos, todos los agentes generadores que desean vender energía deben presentar sus ofertas para suministrar una cierta cantidad de energía (capacidad de generación disponible) y el costo marginal de producción asociado para un periodo definido y lo hacen a través de un sistema de subastas temporales (pueden ser horarias, cada media hora, cada 15 minutos) de energía convocados por el operador del mercado usualmente un día antes del despacho físico (mercado del día previo). El operador de mercado ordena estas ofertas de menor a mayor precio y forma una curva agregada de oferta la cual interseca con la demanda estimada para ese intervalo temporal tal como se muestra en la **figura 3**. El precio ofertado por el ultimo generador que permite cubrir la demanda al menor precio posible se convierte en el precio de despeje o precio spot del sistema para ese intervalo de tiempo. Este precio representa el precio de un MWh adicional de energía que sería necesario para cubrir la demanda en ese momento y por eso se llama el precio marginal del sistema.

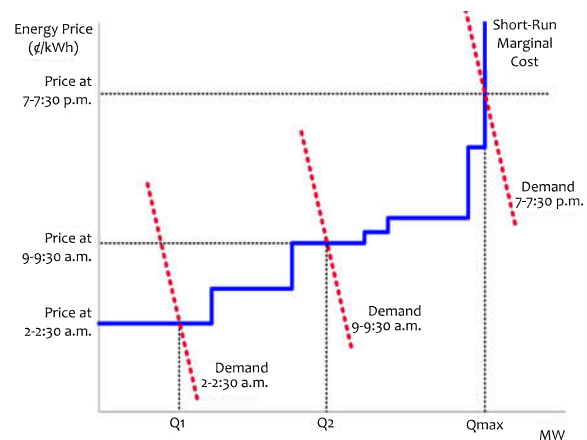


Figura 3. Determinación del precio spot en un pool básico [10].

Este tipo de pool es un mercado multilateral, donde toda la oferta y la demanda para un mismo periodo se igualan, sin necesidad de identificar los acuerdos o contratos bilaterales establecidos entre los agentes participantes. Para compatibilizar los compromisos asumidos por las generadoras mediante contratos con el despacho físico organizado por el OM y el OS (por ejemplo: un generador con un contrato de suministro con una distribuidora puede que no sea llamado a despachar por que ingresaron otros que tienen menor costo), se establece un mecanismo mediante el cual el operador de mercado realiza las transacciones financieras con el generador de modo que equivalgan al pago y/o cobro de energía retirada del pool por el compromiso contractual. Este balance financiero se realiza utilizando el precio spot para cada intervalo temporal establecido. Así, los contratos realizados bajo

este esquema de mercado eléctrico, usado actualmente en Chile, Perú, Brasil y algunos países Centro Americanos se conocen como contratos bilaterales financieros. Su firma no tiene implicancia alguna en el despacho centralizado dentro del pool [3].

En países con mercado eléctrico mayorista más sofisticado y competitivos, se establece que las compañías generadoras sean libres de presentar al operador de mercado ofertas de precio y capacidad disponible de generación que crean conveniente para su participación en el mercado (Bid Based Pools) y por otro lado los consumidores deben realizar ofertas libres de compra de distintos bloques de energía para periodos de tiempo definidos tal como se muestra en la figura 4. Como la participación de los generadores y consumidores es en función a precios libres, a este tipo de mercados también se les conoce como Pool-Precios (Price Based Pools), two-side auction pool o double auction pool debido a que existen ofertas por ambos lados (generación y demanda) para el establecimiento del precio de equilibrio (precio spot). Este modelo, a diferencia del modelo anterior (pool-costos) busca acercarse más a una condición de competencia perfecta ya que existen verdaderas curvas de oferta y demanda del mercado, estableciéndose un precio y cantidad de equilibrio. En este modelo se considera que la competencia hace que las empresas generadoras finalmente participen en el mercado ofreciendo su costo marginal de producción.

definen fechas y horarios que deben ser respetados por todos los agentes participantes del mercado. Dentro de un Poolco es usual que el OM gestione dos submercados (two settlement markets) para garantizar el funcionamiento del mercado mayorista de corto plazo: El mercado del día previo (day ahead market) el cual es un mercado de futuros (forward market) y el mercado en tiempo real o de equilibrio (real time spot market). En el mercado de día previo, los participantes del mercado entregan ofertas de venta y compra de energía, y el operador de mercado en coordinación con el operador del sistema establece la programación de la generación necesaria para cubrir la demanda del día siguiente estableciendo así el precio marginal en cada barra principal del sistema interconectado para cada una de las 24 horas del día siguiente. En el mercado de tiempo real, los participantes pueden comprar o vender energía para balancear las diferencias entre la programación del día previo y la carga en tiempo real, así el OM establece el precio en tiempo real en cada barra del sistema.

En un mercado real tipo Poolco las ofertas de venta y compra de bloques de energía presentados al operador de mercado por las generadoras y agentes consumidores respectivamente en el periodo establecido para la subasta (mercado del día previo por ejemplo) son evaluados en coordinación con el operador del sistema haciendo uso de herramientas computacionales sofisticadas que permiten modelar el funcionamiento del sistema despachando progresivamente a las generadoras con mejores ofertas, hasta alcanzar la demanda total tomando en cuenta con el mayor detalle posible todos los aspectos técnicos de la operación del sistema y características de las unidades generadoras (capacidad disponible, mínimos operativos, nivel de embalses, restricciones de la red de transmisión, etc). El precio obtenido a partir de la simulación no es el precio spot (precio de equilibrio del mercado) producto de la casación de oferta y demanda, es un precio de referencia (precio sombra) del sistema y sus restricciones. El operador del sistema (OS) valida así la factibilidad técnica del despacho determinado por el OM y se encarga de operar físicamente el sistema eléctrico interconectado en tiempo real manteniendo la seguridad, estabilidad y confiabilidad del mismo. De esta manera el OS realiza las correcciones necesarias al plan de operación y determina los servicios auxiliares requeridos para su correcto funcionamiento. Dentro de este modelo se gestiona usualmente una estructura de tarificación para la transmisión y para el conjunto de servicios auxiliares necesarios para garantizar el funcionamiento seguro, estable y confiable del sistema.

Como se mencionó antes, a diferencia del pool básico (pool-costos), en el modelo pool-precios se permite la participación de la demanda en el mercado mayorista spot y para esto el operador de mercado gestiona una institución usualmente denominada Bolsa de Energía

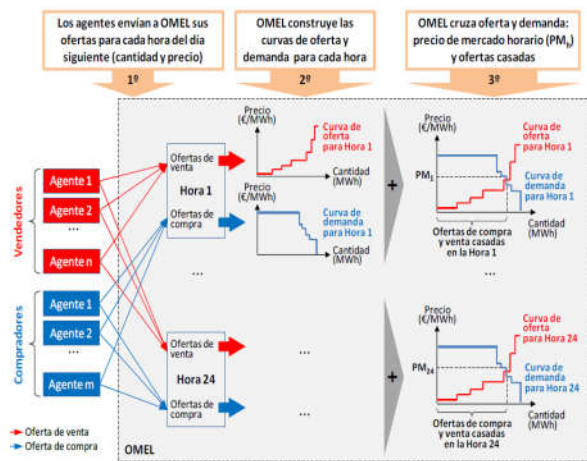


Figura 4 Determinación del precio spot en un poolco [11].

En ambos modelos (sea pool-costos o pool-precios), el operador de mercado en función de las ofertas de venta (precio y cantidad) de los generadores y las ofertas de compra de los consumidores o la demanda total estimada por el OM para una determinada hora, establece el precio de equilibrio (casación oferta - demanda) el cual es el precio de despeje del mercado spot para esa hora en curso (otros mercados establecen el precio spot cada media hora). Para el cumplimiento de los procesos mencionados, se

(BE) donde se realiza el ordenamiento de las ofertas (settlement) y donde concurren tanto generadores, distribuidores, comercializadores y grandes consumidores para transar libremente la energía que les sobra o les falta producto de sus contratos bilaterales previos (mercado en tiempo real) y de esta manera cubrir sus desbalances energéticos. La principal ventaja de este tipo de modelo es que al realizar la coordinación entre las curvas de oferta de compra y de venta, se está minimizando el costo de operación del sistema y maximizando el beneficio social a diferencia del modelo pool-costos donde despacho económico solo busca minimizar el costo total de operación del sistema. Por otra parte, la gran dificultad que se presentan en este tipo de organización es que existe la posibilidad de ejercicio de poder de mercado de algunos agentes. Dentro de los varios mercados existentes tipo Poolco competitivos, se pueden citar: Colombia, New York pool, New England pool, Omel (España), Alberta.

4.2 El modelo Power Exchange (PX)

A diferencia de los Power Pools donde los contratos puede ser solo de naturaleza financiera. En un mercado eléctrico tipo Power Exchange, los contratos bilaterales entre vendedores y consumidores pueden ser de naturaleza física o de naturaleza financiera.

En el caso de los contratos bilaterales físicos, suministradores y consumidores establecen libremente relaciones y acuerdos de tipo comercial, ya sea en forma directa o a través de un comercializador. Estos contratos tienen participación directa en el despacho de las unidades generadoras dentro del plan operacional del sistema elaborado por el operador de mercado, su ejecución física obligatoria. Con este tipo de contratos de abastecimiento de energía, el generador asegura la inyección al sistema de la cantidad de energía y potencia contratada especificada en su plan de operación, a su vez, los consumidores tienen que orientar su consumo a la potencia especificada en el contrato y plan de operación. Este tipo de contratos son recolectados diariamente por el Operador de Mercado, quien finalmente establece la programación de todo el sistema y lo envía al Operador físico del sistema (ISO) para la verificación de factibilidad [12].

En el modelo Power Exchange, no todo el despacho está basado en contratos bilaterales físicos. Existe un mercado mayorista de corto plazo donde la participación es voluntaria. Este mercado es administrado por el Operador de Mercado usualmente denominado Power Exchange (PX). En este mercado mayorista participan aquellos agentes vendedores y compradores que no hayan conseguido establecer contratos bilaterales de cumplimiento físico. El PX ordena las ofertas de venta y compra y establece un

precio de casación similar al del modelo Poolco y este es el precio de despeje del mercado para un intervalo de tiempo particular [13].

El modelo eléctrico Power Exchange busca acercarse más a un mercado real donde la electricidad pueda negociarse como cualquier otro commodity bajo acuerdos bilaterales entre vendedor y comprador sin la intervención de organismos que gestionen centralizadamente todo el mercado. Bajo estas condiciones, los acuerdos de compra-venta bilaterales en el mercado eléctrico son de naturaleza física (entrega inmediata del producto comercializado).

A diferencia del modelo Poolco, en el que una sola institución puede asumir las funciones de operación física del sistema interconectado y la operación económica – comercial del mercado eléctrico. El modelo Power Exchange establece una explícita separación de estas dos actividades. Como resultado, hay una institución independiente que se encarga de la operación física de la red interconectada garantizando la confiabilidad y estabilidad del sistema (Operador Independiente del Sistema - ISO) y una institución independiente que se encarga de la operación del mercado (Power Exchange - PX). La separación completa está basada en la hipótesis de que los principios detrás del funcionamiento del mercado y la operación física de la red pueden ser completamente diferenciados. Mientras que el mercado eléctrico operado por el PX debe estar basado exclusivamente en principios económicos el ISO debe operar el sistema basado exclusivamente en principios físicos y los requerimientos de seguridad necesarios [15].

En la figura 4 se presenta esquemáticamente el funcionamiento del modelo Power Exchange. Se muestran los agentes participantes (stakeholders) y la interacción entre ellos dentro del mercado mayorista y minorista. El mercado OTC (mercado over the counter) es un mercado donde se negocian distintos instrumentos financieros directamente entre dos partes, estos acuerdan libremente la forma y fecha de liquidación de los instrumentos.

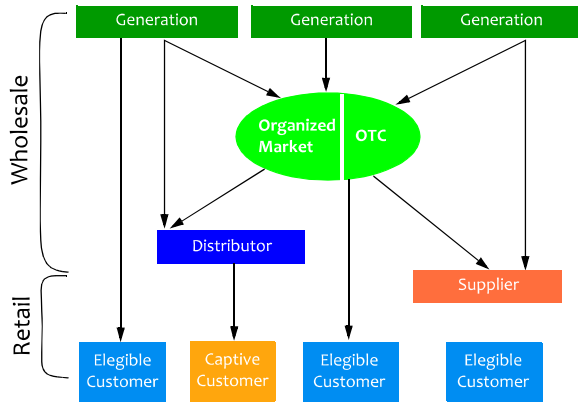


Figura 4 Mercado mayorista y minorista de electricidad en el modelo Power Exchange [14].

Los principales mercados tipo Power Exchange funcionando actualmente en el mundo son: NordPool, European Energy Exchange (EEX), California Power Exchange, ASX Energy (Australia) [15].

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una revisión sistemática de los principales modelos que sirvieron como base para el diseño de los mercados eléctricos liberalizados actualmente en funcionamiento. Cada país fue adaptando estos modelos de acuerdo a sus propias características y realidades, estableciendo complejas estructuras regulatorias.

En cuanto a las características generales de los mercados eléctricos, se puede concluir que aunque las reglas de interacción entre los agentes que pueden participar dentro de un mercado eléctrico puede variar dependiendo del diseño de mercado eléctrico adoptado, los tipos de agentes, las funciones de estos y las necesidades que presentan los mercados eléctricos liberalizados son esencialmente las mismas.

En cuanto a las necesidades operacionales de los mercados eléctricos se tiene: La operación física del sistema que busca mantener en tiempo real la seguridad, confiabilidad y estabilidad del suministro eléctrico dentro de los márgenes operacionales adecuados. La operación del mercado cuyo objetivo es garantizar la operación económica del sistema haciendo uso eficiente de los recursos energéticos, minimizando el costo total del funcionamiento del sistema y/o maximizando el beneficio social. La operación comercial es esencialmente la administración transparente de los pagos y cobros producto de la compra y venta de energía dentro del mercado eléctrico.

En cuanto a la clasificación general de mercados eléctricos competitivos se tiene: Los mercados eléctricos que solamente incorporan competencia a nivel mayorista (wholesale market) y los mercados eléctricos que incorporan competencia a nivel mayorista y minorista (retail market).

En cuanto a los modelos de organización de mercados eléctricos centralizados con competencia en el mercado mayorista se puede concluir lo siguiente. El modelo centralizado se basa en la idea de que la gestión eficiente física y económicamente de un sistema eléctrico interconectado solo puede garantizarse si es realizado por una institución central independiente. Esta institución gestiona el sistema eléctrico como si tuviera un único dueño, de esta manera la participación de los agentes generadores en el mercado eléctrico puede ser obligatoria (Power Pool) o voluntario (Power Exchange) presentando su capacidad disponible con el costo marginal de producción asociado (Cost Based Pools) o presentando ofertas libres de cantidad y precio para su participación en el mercado mayorista spot (Bid Based pools). Es usual que el operador de mercado gestione dos submercados (two settlement markets) para garantizar el funcionamiento del mercado mayorista de corto plazo: El mercado del día previo (day ahead market) y el mercado en tiempo real o de equilibrio (real time spot market). En función de la oferta y la demanda, el OM establece el precio de despeje del mercado (precio spot) para intervalos de tiempo definidos. El precio spot es el precio que usa el operador de mercado para realizar los balances financieros por la inyección y retiro de energía del sistema interconectado.

En el modelo Power Pool, todos los contratos bilaterales entre productores y consumidores son de naturaleza financiera, estos contratos no condicionan el despacho organizado por el operador central. En algunos mercados pequeños, la demanda no participa del mercado mayorista spot con ofertas de compra y para establecer el precio de despeje el operador central utiliza procedimientos que permiten estimar la demanda total en el sistema para intervalos de tiempo definidos. En el modelo Power Pool la operación física y económica (operación del mercado) está usualmente integrada en un organismo central único.

Por otro lado, en el modelo Power Exchange, todo el despacho ya no es coordinado centralizadamente. Los participantes del mercado (compradores y vendedores) pueden establecer contratos de naturaleza física, estos contratos tienen participación directa y obligatoria en el despacho programado del sistema mientras cumplan las condiciones de factibilidad para su ejecución. El modelo Power Exchange incorpora en su estructura el Power Pool (Poolco) en el sentido de que hay un organismo operador del mercado (Power Exchange) que gestiona centralizadamente a los agentes del mercado que no desean o no pudieron establecer contratos de naturaleza física, la participación en este mercado es voluntario en función de sus propios intereses.

En el modelo Power Exchange existe una separación completa entre el operador del sistema físico que puede ser un ISO y el operador de mercado que es denominado Power Exchange.

REFERENCIAS

- [1] Antonio Gomez-Exposito, Antonio J. Conejo, Claudio Cañizares, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*. CRC Press, 2009.
- [2] Oficina de Estudios Economicos, *Reformas estructurales en el Sector Eléctrico*. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía, Lima - Peru 2005.
- [3] Alfredo Dammert, Raúl García Carpio, Fiorella Molinelli, *Regulación y Supervisión del Sector Eléctrico*. Fondo Editorial PUCP, 2013.
- [4] Sally Hunt, *Making Competition Work in Electricity*. John Wiley & Sons, 2002.
- [5] Juan de la Cruz Ferrer, Jean Monnet, *Bases Para el Diseño de los Mercados Eléctricos*. REDETI, No 28 2007.
- [6] Paulo Andrés Atienza Yañez, Hugh Rudnick, *Aplicación del Modelo Bolsa de Energía en Chile*. Tesis para obtener el Título de Ingeniero. Pontificia Universidad Católica de Chile 2001.
- [7] Cristian Alberto Alvarez Arriagada, *Análisis comparativo de la gobernabilidad de mercados de generación eléctrica*. Tesis para optar el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile 1998.
- [8] Luis Augusto Barroso, Teófilo H. Cavalcanti, Konrad Purchala and Paul Giesbertz, *Classification of Electricity Market Models Worldwide*. IEEE, 2005.
- [9] Enrique Salinas Escobar, *Sistema de Monitoreo para el Análisis del Manejo Estratégico de Capacidad de Corto Plazo en el Mercado Eléctrico Chileno (Sistema SIC)*. Universidad de Chile, 2013.
- [10] William W. Hogan, *Electricity Market Design Energy and Capacity Markets and Resource Adequacy*. EUCI Conference, Harvard University – Massachusetts 2015.
- [11] Álvaro Martínez Valle, *Modelado de la Curva Horaria de Precios del Mercado Diario Español*, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2010.
- [12] Juan Pablo Avalos, Roger M. Mellado, Hugh Rudnick. *Estructura y funciones de un operador independiente*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012.
- [13] Cristian Alberto Alvarez Arriagada, *Análisis Comparativo de la Gobernabilidad de Mercados de Generación Eléctrica*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 1998.
- [14] Coralia Verdugo Penado, *Role of the Physical Power Exchanges in the Electricity Wholesale Market*, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2008.
- [15] David Watts, Paulo Atienza and Hugh Rudnick, *Application of the Power Exchange-Independent System Operator Model in Chile*. IEEE, 2002.
- [16] L. M. Cardenas and C. J. Franco, *Structure and Current State of the Wholesale Electricity Markets*. IEEE 2017.