

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE
SUBASTA ITERATIVA APLICADA A MERCADOS
ELÉCTRICOS COMPETITIVOS**

TESIS DOCTORAL

Autor:

D. Iván Valencia Salazar

Dirigida por:

Dr. Carlos Álvarez Bel

Dr. Guillermo Escrivá Escrivá

Valencia, Julio 2011

“El principio de la sabiduría es el temor a Dios”

A Dios gracias por permitirme la consecución de esta obra.

Gracias a Dios por mi familia, fuente de apoyo infinito, fuerza y coraje.

A Dios gracias por tocar los corazones, iluminar las mentes y liberar las manos de todos aquellos, sin los cuales, no hubiese sido posible la victoria.

A Él toda la honra y toda la gloria.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Estructura de la tesis	7
2 ANTECEDENTES: MERCADOS ELÉCTRICOS Y SUBASTAS DE ENERGÍA.....	9
2.1 Actualidad en los mercados eléctricos.....	10
2.1.1 Características de operación en la industria eléctrica.....	10
2.1.2 Operación tradicional de los sistemas eléctricos	14
2.1.3 Proceso de liberalización del sector eléctrico.....	17
2.1.4 Componentes del mercado liberalizado.....	20
2.2 Evolución de la participación de la demanda en el sector eléctrico.....	30
2.2.1 Participación de la demanda en mercados regulados	31
2.2.2 Participación de la demanda en mercados liberalizados	31
2.2.3 Beneficios de la participación de la demanda.	33
2.2.4 Barreras a la participación de la demanda.....	35
2.2.5 Tipos de productos de participación de la demanda.	40
2.3 Mecanismos de subasta y de mercado	42
2.3.1 Tipos de subastas	43

<u>Diseño e Implementación de una Metodología de Subasta Iterativa Aplicada a Mercados Eléctricos Competitivos</u>	
2.3.2	Mercados..... 45
2.3.3	Mercado mayorista de energía..... 48
2.3.4	Subasta iterativas 52
2.4	Conclusiones del capítulo 54
3	ANTECEDENTES: LA ECONOMÍA EXPERIMENTAL Y LOS MERCADOS ELÉCTRICOS 59
3.1	Introducción 59
3.2	Metodología y experimentación 61
3.2.1	Etapas de la Experimentación..... 64
3.2.2	Requisitos básicos para la investigación experimental 67
3.2.3	Replicabilidad y control..... 72
3.2.4	Instrucciones 74
3.2.5	Motivación y recompensa..... 75
3.2.6	Ensayos 77
3.2.7	Muestras..... 77
3.2.8	Sesiones..... 79
3.2.9	Repetición del Experimento 79
3.2.10	Validez de los experimentos..... 80
3.3	Elementos de un experimento económico 80
3.4	Aplicación del método experimental en la Economía..... 82
3.4.1	Experimentos económicos desarrollados en mercados eléctricos..... 86
3.5	Conclusiones del capítulo 94
4	METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN DE LOS NUEVOS MECANISMOS DE SUBASTA APLICADOS AL MERCADO DIARIO..... 97

4.1	Introducción	98
4.2	Objetivos	99
4.3	Subasta Uniforme Iterativa	100
4.3.1	Identificación del problema	100
4.3.2	Hipótesis	101
4.3.3	Variables relevantes	102
4.3.4	Diseño del experimento	105
4.3.5	Establecer el grupo experimental y el grupo de control	105
4.3.6	Aplicación del estímulo al grupo experimental	107
4.3.7	Evaluación de los resultados y análisis de la teoría	108
4.4	Experimento económico	108
4.4.1	Entorno de laboratorio	109
4.4.2	Institución	114
4.5	Subasta Uniforme con Recursos de Demanda	120
4.5.1	Identificación del problema	120
4.5.2	Hipótesis	121
4.5.3	Variables relevantes	122
4.5.4	Diseño del experimento	122
4.5.5	Entorno de laboratorio	122
4.5.6	Institución	123
4.6	Conclusiones	127
5	RESULTADOS	131

5.1 Mecanismo de subasta uniforme iterativa	131
5.1.1 Resultados en el escenario de competencia.....	135
5.1.2 Resultados en el escenario de concentración de generación	137
5.1.3 Validación de las hipótesis	138
5.2 Mecanismo de subasta uniforme con recursos de demanda.....	140
5.2.1 Resultados anuales.....	143
5.2.2 Validación de la hipótesis.....	149
5.3 Conclusiones	151
6 CONCLUSIONES	153
6.1 Conclusiones	153
6.2 Aportaciones	156
6.3 Futuras líneas de investigación.....	157
7 ANEXO A. LABORATORIO VIRTUAL WEL-IUA	159
8 BIBLIOGRAFÍA	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura típica de un sistema eléctrico.	12
Figura 2.2 Estructura típica de una empresa verticalmente integrada.	15
Figura 2.3 Mejoras en el sistema eléctrico debido a la participación de la demanda.	32
Figura 3.1 Etapas de la experimentación.	65
Figura 3.2 Proceso del trabajo experimental.	71
Figura 4.1 Túnel de máxima eficiencia del bienestar social.	104
Figura 4.2 Curvas agregadas de oferta y demanda en el experimento.	110
Figura 4.3 Dotación de los agentes en el escenario de competencia.	112
Figura 4.4 Dotación de los agentes en el escenario de concentración de generación.	113
Figura 4.5 Diagrama de flujo de la Subasta Uniforme.	116
Figura 4.6 Diagrama de flujo de la Subasta Uniforme Iterativa.	119
Figura 4.7 Diagrama de flujo de la Subasta Uniforme con Recursos de Demanda.	126
Figura 5.1 Precio de mercado y energía casada, sesión 1, escenario de competencia, grupo de control.	133
Figura 5.2 Bienestar social y eficiencia, sesión 1, escenario de competencia, grupo de control.	133
Figura 5.3 Excedente de los agentes, sesión 1, escenario de competencia, grupo de control.	134
Figura 5.4 Precio de mercado promedio y desviación estándar en el escenario de competencia.	136
Figura 5.5 Promedio de la eficiencia general del mercado en el escenario de competencia.	136
Figura 5.6 Precio de mercado promedio y desviación estándar en el escenario de concentración de generación.	137
Figura 5.7 Promedio de la eficiencia general del mercado en escenario de concentración de generación.	138

Figura 5.8	Curvas de oferta y demanda del Programa resultante de la casación ejecutado por el OMEL y nuevo precio de mercado obtenido con el uso de recursos de demanda.	142
Figura 5.9	Evolución del precio de mercado P_m y el nuevo precio P_{m_0} en el año 2010.	143
Figura 5.10	Precio inicial p_m y ratio de precio inicial p_m y precio final p_{m_0} de mercado.	144
Figura 5.11	Volumen económico del mercado y ahorro económico producido por el uso de recursos de demanda.	145
Figura 5.12	Ahorro en VET por uso de recursos de demanda a lo largo del año 2010.	146
Figura 5.13	Los 100 mayores DWO_0 en el año 2010, el Wdo empleado y su efecto en VET.	147
Figura 5.14	Evolución del DWO_0 a lo largo del año 2010.	148
Figura 5.15	Reducción en el precio de mercado en función de la demanda reducida.	148
Figura A.1	Ventana para el establecimiento de parámetros generales.	161
Figura A.2	. Ventana de parámetros de consumidores.	162
Figura A.3	Ventana de parámetros de Vendedores.	163
Figura A.4	Pantalla de juego de un jugador “Vendedor” en subasta uniforme.	164
Figura A.5	Pantalla de juego de un jugador “Comprador” en subasta uniforme.	165
Figura A.6	Pantalla de juego de un jugador “Vendedor” en subasta iterativa.	166
Figura A.7	Pantalla de juego de un jugador “Comprador” en subasta iterativa.	167

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Modelos de estructura de los sistemas eléctricos.	27
Tabla 3.1 Experimentos económicos aplicados a los mercados eléctricos.	92
Tabla 4.1 Diseño del experimento.	106
Tabla 5.1 Resultados del escenario de competencia.	136
Tabla 5.2 Resultados del escenario de concentración de generación.	138
Tabla 5.3 Resultados de la aplicación de recursos de demanda en el mercado diario de MIBEL el 26/12/2010 22:00 horas.	141
Tabla 5.4 Ahorros en VET en función del porcentaje de demanda reducida.	149

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los diferentes procesos de liberalización de los sistemas eléctricos en el ámbito internacional coinciden en la búsqueda de la optimización y la eficiencia operativa. Se ha pasado de una visión técnica, en la que se buscaba la eficiencia técnico-operativa al menor costo, a una visión económica, que entiende los sistemas eléctricos como mercados en los que se busca la eficiencia económica manteniendo las condiciones mínimas de operación.

La búsqueda de la eficiencia y eficacia en los mercados eléctricos es un proceso continuo, que requiere en si mismo, revisiones que respondan a las variaciones sociales y tecnológicas a las que se enfrenta el sistema eléctrico en su conjunto. Es por ello, condición normal que se presenten modificaciones en los procesos operativos que rigen principalmente la parte técnico-operativa del sistema, y en mucha menor medida modificaciones en el aspecto puramente económico del mercado. El sistema eléctrico español se encuentra dentro de esta condición de normalidad debido a los ajustes realizados en sus procesos técnico-operativos¹ y de mercado².

¹ http://www.ree.es/operacion/procedimientos_operacion.asp

² <http://www.omel.es/inicio/normativa-de-mercado/reglas-omel>

Los resultados de estos procesos liberalizadores, demuestran que en muchos casos [1], los objetivos de eficiencia y optimización no se han cumplido, siendo los fallos en el sistema de California [2]-[5] y la gran reestructuración del sistema en Inglaterra [6]-[8] los ejemplos más conocidos.

Los problemas de eficiencia en los mercados eléctricos liberalizados tienen tres causas principales:

1. Durante la creación del mercado, se permitió una elevada concentración en la capacidad de generación [9].
2. Una reducida participación de la demanda en los procesos definitivos de precios.
3. Mercados diarios de energía con mecanismos de subasta inadecuados³.

La primera condición bien pudo darse como parte de una política industrial del gobierno [10]. El corregir esta situación puede implicar un alto costo político.

Actualmente, se realizan trabajos importantes que buscan subsanar la segunda condición, ya sea de manera individual o participando en proyectos de cooperación internacional de gran envergadura [11][12]. La mayoría de los mercados liberalizados cuentan con productos que posibilitan la participación de la demanda, desafortunadamente, en la mayoría de los casos esta participación es limitada y escasa. Su participación se limita generalmente a dos tipos:

³ En ocasiones, el regulador del mercado ha implantado nuevos mecanismos de subasta sin probarlo previamente, y cuando los problemas han aparecido, se han aplicado “remiendos” al mecanismo. Un caso representativo de esta circunstancia, es el mercado usado inicialmente en California. [13]

1. Interactuar con el mercado a través de un sistema de precios dinámicos de energía, con lo cual, su decisión de consumir energía está en función del precio instantáneo de la energía.
2. Ofertar al sistema eléctrico reducciones de energía que son empleadas para aliviar conflictos en la red de transporte, o bien disminuir el costo total de suministro de la energía en el sistema.

Desafortunadamente, estos tipos de participación de la demanda no son considerados en los mecanismos de subasta que operan en los mercados del día siguiente, por lo tanto, los recursos de demanda no tienen capacidad de influir significativamente en el precio final de la energía. Este bajo impacto en el precio final de la energía se debe a que el precio del mercado del día siguiente es el componente que más pondera en el precio final. En el caso del mercado español, durante la pasada década, el precio del mercado del día siguiente representó poco más del 85%⁴ del precio final de la energía, el resto del precio final está en función de la aportación que hacen los mercados intradiario, restricciones, procesos de operación técnica y el pago por capacidad.

En base a lo anterior, podemos concluir que la elasticidad que brindan actualmente los recursos de demanda no afecta de manera importante el precio final de la energía. El uso de estos recursos en los mercados del día siguiente parece estar vetado debido a teorías económicas [14] que consideran que las reducciones de precios que se generan, producen únicamente transferencias de rentas de generadores a consumidores, y que ello reduce los incentivos a invertir en generación lo cual ocasiona una disminución en la eficiencia del mercado en el largo plazo.

⁴ Promedio obtenido de los valores declarados por Red Eléctrica de España en sus informes anuales, disponibles en http://www.ree.es/publicaciones/publicaciones_informes_anuales.asp.

Sin embargo, otras teorías [15] defienden el uso de los recursos de demanda en estos mercados, ya que su utilización permite alcanzar balances de energía más adecuados, eliminan rentas artificiales a los generadores, y envían señales correctas de precios a los inversores.

La tercera condición se presenta de manera aislada, o bien, en conjunción con cualquiera de las otras dos condiciones. En todos los mercados liberalizados operan mercados diarios de energía, en ellos, los generadores realizan ofertas de venta de energía y los consumidores realizan ofertas de compra de energía. Los mercados de energía emplean diversos mecanismos de subastas adaptados a las particularidades del sistema eléctrico donde se aplica, sin embargo, en lo general se percibe el uso de dos mecanismos básicos de subasta: la subasta uniforme, en la que todos los agentes pagan o son pagados a un mismo precio; y la subasta discriminatoria, en la que los agentes pagan o son pagados de acuerdo al precio de sus ofertas en el mercado.

A lo largo de los años, los principales problemas que han afectado a las subastas son: su sensibilidad al poder de mercado, volatilidad de precios, precios elevados y la posible colusión de los agentes participantes en el mercado. Desde su implementación, los mecanismos de subasta han sido objeto de muchas investigaciones, a fin de encontrar la solución a estos problemas, y por otro lado establecer la superioridad de una subasta con respecto a la otra.

A pesar de los múltiples estudios realizados hasta la fecha, no está claro que mecanismo de fijación de precios es el óptimo, ya que diversos estudios arrojan resultados que generan controversia, independientemente si utilizan algoritmos computacionales o experimentos económicos. Cabe señalar, que en estos estudios se emplean diferentes modelos del mercado y sistema eléctrico, lo cual explica en cierta medida las diferencias entre las conclusiones alcanzadas en los estudios.

Algunos autores [16]-[20] consideran que la subasta uniforme es mejor, ya que induce a los agentes a revelar sus costos y valoraciones, y envía correctas señales económicas de largo plazo a potenciales inversores [21]. Además, es un mecanismo de fácil implementación; aunque reconocen que es susceptible al poder de mercado por parte de los generadores [22].

Para el caso de la subasta discriminatoria, algunos autores consideran que anima al abuso de los generadores [23]. Sin embargo, otros autores [24]-[26] consideran que la subasta discriminatoria tiene un mejor funcionamiento. Otros estudios [27][28] no encuentran diferencias significativas entre los resultados de ambas subastas, y en [29][30] se considera que los beneficios de los agentes son los mismos aunque con diferente varianza.

A pesar de los diferentes resultados obtenidos, es evidente que la victoria en cuanto implementación corresponde a la subasta uniforme, ya que se emplea en la mayoría de los mercados en el mundo.

La operación eficiente de los mercados diarios de energía es fundamental para el correcto funcionamiento del mercado eléctrico en su conjunto, ya que el precio de este mercado tiene un impacto muy significativo en el precio final de la energía, y sirve además de referencia para otros mecanismos tales como los contratos bilaterales.

1.2 Objetivos

La presente tesis tiene como objetivo la mejora de la eficiencia de los mercados diarios de energía, disminuir la volatilidad de sus precios y persuadir a los agentes generadores de no ejercer poder de mercado. Para lograr este objetivo, se han diseñado nuevos mecanismos de subasta que potencian la

participación de la demanda en el proceso de establecimiento de precios en el mercado diario de energía. Para ello, se fijan los siguientes objetivos parciales:

1. Diseño del algoritmo de operación de una subasta uniforme iterativa basada en el principio de Walras [31], en el cual, se define un elemento ficticio llamado el “Subastador Walrasiano”, que facilita la casación de la oferta y demanda estableciendo el precio de equilibrio en los mercados. Este algoritmo pretende estimular una mayor revelación de costos y valoraciones en los agentes del mercado, y a su vez fomentar la participación de la demanda.

Para su validación se realizan las siguientes acciones:

- a. Diseño y desarrollo de experimentos económicos que validen las propiedades del mecanismo de subasta propuesto y lo compare con el mecanismo de referencia, en este caso, la subasta uniforme⁵. Los experimentos económicos permitirán captar algunas realidades cognitivas de la interacción entre los humanos y los mercados eléctricos.
- b. Desarrollo de un laboratorio experimental para subastas de energía, implementado en un portal Web, que sirva de plataforma de evaluación de las propiedades de diferentes mecanismos de subastas⁶.

⁵ Se ha seleccionado la subasta uniforme como mecanismo de referencia debido a su mayor implementación en los mercados internacionales.

⁶ Además de su uso específico en la presente tesis, se pretende que el laboratorio diseñado sirva como una herramienta didáctica que facilite en el educando la comprensión de los mercados de energía; a lo cual contribuye sin duda su ubicación en Internet.

2. Diseño del algoritmo de operación de una subasta uniforme que incluye en su proceso operativo la gestión de recursos de la demanda. Su aplicación a los mercados diarios de energía que operan con subasta uniforme busca otorgar a la demanda una mayor capacidad de controlar la volatilidad de precios y desanimar el ejercicio del poder de mercado

Debido a lo costoso de los experimentos económicos, se opta por validar este mecanismo de subasta con las siguientes acciones:

- a. Diseño del mecanismo de subasta propuesto a partir de los datos del programa resultante de la casación ejecutado por el operador de mercado.
- b. Análisis comparativo entre los resultados de la simulación del mecanismo propuesto y los resultados del mercado diario del Mercado Ibérico de la Electricidad (MIBEL)

Los nuevos mecanismos de subasta propuestos pretenden potenciar el concepto de Participación de la demanda, otorgándole un papel más activo en el mercado, de tal manera que su participación no se limite a modificar su consumo en respuesta a las variaciones de los precios del mercado, sino que el precio de mercado sea una expresión directa de la Participación de la demanda.

1.3 Estructura de la tesis

El trabajo desarrollado para alcanzar los objetivos de esta tesis, se encuentra estructurado en seis Capítulos.

En el Capítulo 2 se realiza una breve descripción general de los sistemas eléctricos liberalizados, se señala su evolución, componentes y características

operativas. En este mismo Capítulo, se abordan de manera general los mecanismos de subasta y de mercado, así como su aplicación al mercado mayorista de energía eléctrica.

El Capítulo 3 describe los fundamentos teóricos de la economía experimental, las etapas de la experimentación, así como los elementos que componen un experimento económico. En su parte final, se relacionan las aplicaciones y ventajas del método experimental en la Economía, y se hace especial hincapié en su aplicación en el análisis de mercados eléctricos.

La descripción de los nuevos mecanismos de subasta propuestos para los mercados diarios de energía se realiza en el Capítulo 4. Primero se describe el mecanismo de subasta uniforme iterativa y el diseño del experimento económico empleado en su validación. Posteriormente, se detallan las características del nuevo mecanismo de subasta uniforme con recursos de demanda.

En la primera parte del Capítulo 5, se muestran los resultados del análisis comparativo experimental entre el mecanismo propuesto de subasta uniforme iterativa y el grupo de control sometido a la subasta uniforme. Se analiza la eficiencia general del mercado, la magnitud y variabilidad de sus precios. En la segunda parte, se muestra el impacto de la aplicación del nuevo mecanismo de subasta uniforme con recursos de demanda en el mercado diario del Mercado Ibérico de la Electricidad.

Por último, en el Capítulo 6, se detallan las conclusiones más relevantes del presente trabajo, se resumen las principales aportaciones realizadas, y se plantean líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES: MERCADOS ELÉCTRICOS Y SUBASTAS DE ENERGÍA

En el presente Capítulo se describe de manera general la evolución de los sistemas eléctricos a lo largo de los años, las bases de operación de sus mercados en entornos liberalizados y estudios económicos experimentales que analizan la eficiencia de los mercados de energía eléctrica.

Como punto de partida se presentan las diversas actividades necesarias para llevar a cabo el suministro eléctrico, y se comentan las acciones liberalizadoras que han afectado los sistemas eléctricos tradicionales; también se describen las actividades y funciones de los nuevos agentes que han surgido en dicho proceso, así mismo, se detallan las características de la participación de la demanda y las múltiples barreras a las que ésta se enfrenta.

En la parte final del Capítulo, se exponen las características básicas de los mecanismos de subasta empleados en los mercados mayorista de energía, para lo cual, primero se presentan los fundamentos de rigen a las subastas, señalando su aplicación en los mercados y sus principales fallos.

2.1 Actualidad en los mercados eléctricos

Como todos los bienes de consumo, la electricidad se produce, transporta, comercializa y consume, pero presenta la característica muy particular de no ser almacenable⁷ ; por lo cual debe producirse y transportarse en el mismo momento que se consume. La generación, transporte y consumo de energía eléctrica, aun siendo actividades económicas susceptibles de realizarse por empresas distintas, producen bienes y servicios que técnicamente son inseparables y que requieren una operación centralizada que garantice la calidad y fiabilidad en el suministro.

2.1.1 Características de operación en la industria eléctrica

Las diferentes actividades realizadas en el sector se pueden separar en actividades físicas: generación, transporte, operación del sistema, distribución y en actividades comerciales.

Estas actividades se caracterizan de la siguiente manera:

- **Generación.** Produce energía eléctrica por medio de la transformación de energías primarias; además suelen contribuir en la prestación de otros servicios complementarios que son indispensables para mantener el suministro de manera eficiente y segura:

⁷ Se considera así debido a que la cantidad de energía eléctrica que puede ser almacenada es muy inferior con respecto a su consumo. Sin embargo, medios eficaces para almacenar electricidad son las centrales hidroeléctricas reversibles (o de bombeo) y en forma de aire comprimido.

1. Ofrecen reservas de operación, con capacidad de actuación en distintas escalas de tiempo, para responder a las variaciones de la demanda.

2. Contribuyen en la regulación de la tensión en la red.

3. Colaboran en la recuperación del servicio en caso de un fallo generalizado

- **Transporte.** Conducción de la electricidad producida por los generadores a las subestaciones mediante líneas de alta tensión, siendo su operación muy delicada debido a la fragilidad del mismo.
- **Operación del Sistema.** Garantiza el funcionamiento del sistema eléctrico en condiciones de seguridad y calidad, de manera que sea compatible con las decisiones de producción y consumo.
- **Distribución.** Transportan la electricidad desde la red de transporte (subestaciones) hasta el consumidor.
- **Comercialización.** Realiza las ventas a los consumidores finales, pudiendo ser diferenciada entre la realizada entre pequeños y grandes consumidores.

Una representación de la configuración típica de un sistema eléctrico considerando las actividades físicas que en él se realizan se puede observar en el esquema siguiente:

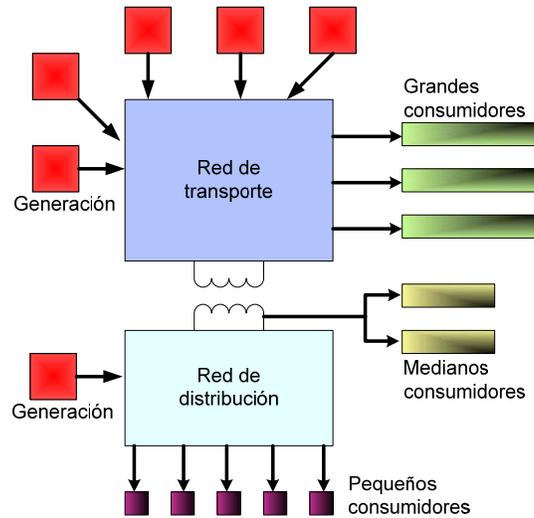


Figura 2.1 Estructura típica de un sistema eléctrico.

De las actividades mencionadas anteriormente, la realizada por el Operador del sistema es crítica, ya que debe garantizar la continuidad y seguridad del suministro, así como la adecuada coordinación del conjunto generación-transporte, es decir, brindar las condiciones técnicas (tensión y frecuencia) admisibles para que la electricidad fluya continuamente desde los centros de generación hasta los centros de consumo.

El Operador del sistema cuenta con diversos mecanismos de corrección (servicios complementarios) para la resolución de los desequilibrios que puedan surgir entre generación y demanda, ya sea por diferencias entre las transacciones de energía acordadas en el mercado de producción y la gestión de su transporte, o bien por fallo de alguna línea o unidad de generación. Generalmente se considera que el Operador del sistema debe contar con una reserva de generación capaz de afrontar la pérdida de su mayor unidad generadora o línea de transporte en el momento del fallo, para lo cual aplica el criterio n-1.

La reserva de generación a disposición del Operador del sistema puede ser de tres tipos:

- **Reserva primaria:** tiene por objeto la corrección automática de los desequilibrios instantáneos que se producen entre la generación y el consumo. Es aportada por los generadores mediante la variación de la potencia de sus centrales como respuesta a las variaciones de la frecuencia del sistema. Su horizonte temporal de actuación varía desde 0 hasta 30 segundos.
- **Reserva secundaria:** su finalidad es mantener la capacidad de restablecer los desequilibrios entre generación y demanda en un plazo que va desde los 30 segundos hasta los 15 minutos. Suelen ser retribuidos en función de su disponibilidad (banda) y utilización (energía).
- **Regulación terciaria:** su objetivo consiste en restituir la reserva de regulación secundaria cuando haya sido utilizada. El producto que se negocia es la variación de potencia que es posible conseguir en un tiempo máximo de 15 minutos.

Existen otros servicios complementarios necesarios para que el Operador del sistema pueda desarrollar su función de manera conveniente, los cuales generalmente son de carácter obligatorio:

- **Control de tensión:** consiste en el conjunto de actuaciones sobre los elementos de generación y transporte, orientadas a mantener las tensiones dentro de los márgenes especificados en los nodos de la red de transporte, a fin de garantizar el cumplimiento de los criterios de seguridad y calidad de suministro eléctrico.

- **Arranque autónomo:** tiene por objeto facilitar la reposición del servicio en caso de una perturbación o pérdida de suministro. Se basa en la capacidad que tienen determinados grupos generadores para arrancar sin necesidad de alimentación exterior en un tiempo determinado, y mantenerse generando de forma estable durante el proceso de reposición de servicio.

2.1.2 Operación tradicional de los sistemas eléctricos.

En los orígenes de los sistemas eléctricos de potencia, surgió el concepto de empresas eléctricas verticalmente integradas, es decir, que producían, transportaban, distribuían y comercializaban. Debido a las características de economía de escala y alcance que presentaba la electricidad se constituyeron monopolios. Siendo considerado por muchos gobiernos el suministro de electricidad como un servicio público, fue necesaria su regulación por parte del Estado con la finalidad de garantizar una calidad y servicio razonables.

Las empresas eléctricas integradas verticalmente, se caracterizan por ser los únicos proveedores de electricidad en la región donde se ubican. Esta forma de operación presenta aspectos muy positivos, tales como: minimiza el costo total de operación del sistema satisfaciendo las restricciones técnicas; centraliza la planificación de las actividades para incrementar la generación y el transporte, así como el mantenimiento a medio plazo. En la figura 2.2, se observa la estructura de una empresa integrada verticalmente, indicándose en ella los flujos de energía, dinero e información.

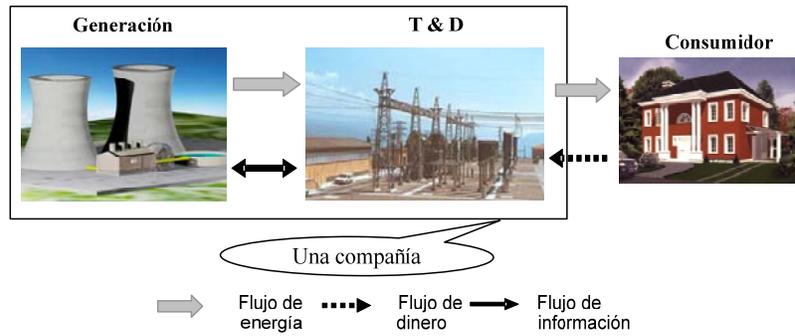


Figura 2.2 Estructura típica de una empresa verticalmente integrada.

Se puede observar en la figura anterior, la existencia de un flujo bidireccional de información entre los generadores y el sistema de transporte; en cambio el dinero que se paga por la energía recibida sólo fluye en una dirección.

Debido a la integración de las actividades en este tipo de empresas, resultan fáciles de coordinar, sin embargo, la determinación de los costos de cada actividad se dificulta. Así entonces, en muchas ocasiones, a los clientes se les asignan tarifas dependientes del incremento de costos ocasionados en un periodo; siendo los precios determinados por entidades reguladoras independientes.

Definiéndose la actividad de regulación como “una forma de intervención pública que restringe, influye o condiciona las actuaciones de los agentes económicos, y obliga a las empresas reguladas comportarse de una manera distinta a como actuarían si tal regulación no existiera” [10].

Las entidades reguladoras deben ser independientes del gobierno y de las empresas reguladas, teniendo como mandato claro defender los intereses de los consumidores, obligándose a dar cuenta periódica de sus actividades, y exigiendo la máxima transparencia posible en los procedimientos de regulación.

El Regulador, mediante el establecimiento de tarifas trata de maximizar el bienestar social representado por el excedente de los consumidores y el beneficio de los productores, considerando los costos de producción y preferencia de los consumidores. El criterio generalmente empleado en la actividad del Regulador es la restricción en la evolución de precios, los ingresos o los beneficios de la empresa regulada, del cual se derivan diversos mecanismos:

- **Regulación según tasa de beneficios.** El Regulador aprueba cada cierto tiempo tarifas de suministro, de manera que los ingresos obtenidos con estas tarifas permitan cubrir los costes razonables en los que ha incurrido la empresa, incluyendo una retribución a los capitales invertidos en los activos fijos utilizados. Este mecanismo tiene como principales inconvenientes que proporcionan escasos incentivos para una gestión eficiente; e incentivos a que la empresa eleve el importe de los costos incurridos en el servicio; adicionalmente, no incentiva la rápida sustitución de activos tecnológicos obsoletos, y puede incentivar la sobreinversión (efecto Averch-Johnson)⁸.
- **Regulación mediante IPC-X.** Las tarifas autorizadas para un periodo dado no deben generar ingresos medios superiores a los del periodo anterior, en una tasa establecida con anterioridad. La tasa se obtiene restando y en ocasiones sumando, una cierta cantidad de algún indicador de precios, tal como el Índice de Precios al Consumidor (IPC). Este mecanismo incentiva a que las empresas controlen sus

⁸ Si las empresas reguladas tienen funciones de producción en las que es posible elegir distintas composiciones de bienes productivos para cubrir una demanda dada, y el regulador fija una tasa de recuperación de capital mayor que el coste de capital en los mercados, las empresas podrían gastar en activo fijo por encima del nivel óptimo.

gastos acercándose a su nivel de eficiencia productiva; sin embargo, no incentiva una gestión de la calidad en el servicio; requiere además una gran cantidad de información para su implementación, y es necesaria una revisión periódica de sus parámetros.

- **Regulación mediante techos de precios.** Se establece un precio máximo por varios años sin considerar los costes de la empresa, permitiendo ajustes anuales inflacionarios y de productividad, además de otros factores. Este mecanismo incentiva a las empresas a reducir costes, pero las empresas venden a precios superiores al coste marginal.

2.1.3 Proceso de liberalización del sector eléctrico

En la operación de los sistemas eléctricos regulados, los consumidores asumen la mayoría de los riesgos y en ocasiones la mayoría de los beneficios (si el regulador hace un buen trabajo); la introducción de nuevas tecnologías más económicas, no suele reducir el pago de los consumidores ya que continúan pagando por las viejas tecnologías; la reducción de la demanda de un consumidor no suele causar reducción en los precios aún existiendo exceso de capacidad de generación. Bajo un esquema de competencia los riesgos asociados a las unidades generadores corresponden a sus propietarios (sólo al principio, antes de la operación) [17]. Sin embargo, hay que señalar que durante la operación de las unidades privadas, los precios ofertados por su energía incluyen los costos generados por estos “riesgos”, con lo cual, el consumidor es quien finalmente paga el riesgo del generador privado.

A principios de la década de los 80s en el siglo pasado, el paradigma sobre la necesidad de la administración centralizada de las decisiones económicas y gestión técnica de la operación del sistema eléctrico fue cuestionado por economistas y reguladores. Las justificaciones fueron diversas, pudiendo incluir consideraciones tecnológicas, económicas y políticas, [10],[32],[33]

diferenciándose generalmente entre las presentadas en países desarrollados y subdesarrollados [34]:

- Mejora y abaratamiento de los instrumentos de medición y telecomunicaciones.
- Centrales de generación de ciclo combinado de gas de tamaño pequeño (150-300MW), con menores costos fijos y una mayor eficiencia.
- Desarrollo de ordenadores necesarios para la coordinación del sistema y operación de los mercados de energía.
- La competitividad económica global requería reducción de costos.
- Déficit público de los gobiernos propietarios de los monopolios, requerimientos de inversión en infraestructura elevados. En los países subdesarrollados los cambios fueron resultado de la presión de organismos económicos internacionales.
- Eliminación de barreras de entrada en el sector por parte de los entes reguladores, soportado o motivado por cambios ideológicos y políticos; que desencadenaron en muchos casos la privatización del sector.

Las modificaciones realizadas en los sistemas eléctricos tradicionales han dependido de las características propias del sistema, los problemas percibidos por la sociedad y la ideología de los gobiernos: razón por lo cual, cada sistema modificado presenta particularidades que lo hacen único. Fereidoon [33] identifica diferentes enfoques aplicados en el cambio de paradigma que afecta a los sistemas eléctricos:

- *Reestructuración*. Referido a los intentos de reorganizar el rol de los jugadores del mercado, el regulador y/o reglas del juego; no implica necesariamente “desregular” el mercado.

- *Liberalización.* No es sinónimo de reestructuración. Se refiere a intentos de introducir competencia en algunos o todos los segmentos del mercado, y remover las barreras del mercado.
- *Privatización.* Generalmente se refiere a vender las empresas del sector propiedad del Estado, tal como se realizó en la mayoría de los países donde se han realizado modificaciones en el sector.
- *Desregulación.* Se refiere a la reducción de la regulación aplicada al sector. Ningún mercado puede estar completamente desregulado.

Los primeros cambios que experimentó el sector eléctrico fue la reestructuración de las compañías eléctricas, separando las actividades de transporte de las de generación, mediante la creación de un mercado de energía que operase con transacciones bilaterales o mediante ofertas en subastas de energía. De este modo, cada empresa decide individualmente cuándo y cuánto producir; las decisiones de inversión en nuevas plantas de generación son descentralizadas y tomadas por inversores privados que consideran que su inversión será rentable.

El sistema de transporte y distribución presenta características de monopolio natural⁹ que debe ser regulado por entidades públicas que permitan el libre acceso al sistema.

En los últimos años se ha liberalizado gradualmente la actividad de comercialización, lo cual ha podido conseguirse gracias a los avances tecnológicos en las áreas de medición, comunicación y procesado de información. A pesar de estos avances tecnológicos, en la gran mayoría de estos

⁹ El cual se presenta “cuando una determinada tecnología impone una función de costos, según la cual resulta más caro producir la cantidad demandada de un determinado bien o servicio por dos o más empresas que por una sola” [10]

sistemas, los medidores de consumo de los pequeños consumidores carecen de equipos de tele medida, con lo cual, la verificación de sus consumos no ha presentado cambios, realizándose como siempre de manera manual.

Asimismo, para garantizar el funcionamiento del sistema eléctrico en condiciones de seguridad, se creó una entidad ajena al mercado, denominada Operador Independiente del Sistema.

2.1.4 Componentes del mercado liberalizado

En el proceso de liberalización deben analizarse las ventajas e inconvenientes en las decisiones de asignación de actividades a sujetos, así como en la fijación de los niveles de separación, considerando la estructura inicial del sector que se liberaliza.

La separación de actividades identificadas no implica necesariamente una multiplicidad correspondiente de sujetos para realizarlas, ya que existen sinergias y costos de transacción que aconsejan, que en algunos casos, un sujeto se haga cargo de varias actividades; sin embargo, se deben y pueden aplicar cuatro niveles o tipos de separación: contable, de gestión, jurídica¹⁰ y de propiedad; que deben adecuarse a cada caso particular.

A continuación se hace un análisis de las diferentes entidades que componen los sistemas liberalizados, aun cuando, como ya se dijo antes, pueden existir variaciones en sus estructuras, dependiendo del país de que se trate.

- **Compañías generadoras.** Producen y venden energía eléctrica en el mercado mayorista, o bien directamente mediante contratos a empresas

¹⁰ Pueden ser sociedades distintas, pero pertenecer a los mismos propietarios, a través de un grupo empresarial.

comercializadoras o clientes, teniendo como finalidad maximizar sus beneficios asumiendo totalmente los riesgos asociados a sus decisiones. Adicionalmente, venden mediante mecanismos de mercado servicios complementarios que requiere el Operador de Sistema para mantener la fiabilidad y calidad en el suministro. Una compañía puede poseer una o varias unidades de generación de diferentes tecnologías.

- **Compañía transportadora.** La red de transporte es un monopolio natural, por lo que se establece una compañía encargada de conducir la electricidad de los generadores a los consumidores; para lo cual, debe asegurar que todos los generadores tienen la misma oportunidad de inyectar su energía en la red, así como que todos los consumidores tienen la misma posibilidad de extraer electricidad de la red.
- **Compañías distribuidoras.** La red de distribución presenta características de un monopolio natural, sin embargo, se pueden crear varias entidades propietarias y operadoras de redes locales de distribución en un área determinada, las cuales deberán ser independientes de las entidades comercializadoras. Se debe suministrar indiscriminadamente el servicio de distribución a todos los usuarios y comercializadores que lo requieran.
- **Operador del sistema.** Garantiza el funcionamiento del sistema eléctrico en condiciones de seguridad, de manera que sea compatible con las decisiones de producción y consumo establecidas por los agentes del mercado. Estrictamente, realiza una actividad clásica de coordinación de todo el sistema eléctrico, que parte de la casación de ofertas y de los contratos bilaterales físicos que le proporciona el Operador de mercado, en vez del tradicional procedimiento de minimización de costos de producción.

El Operador del sistema está encargado de la aplicación de los criterios técnicos de acceso a las redes, y debe mantener informados a los agentes del sistema de las condiciones previsibles de utilización de las mismas a corto, mediano y largo plazo. Además, debe también garantizar un trato no discriminatorio a los agentes principalmente en la aplicación de las restricciones técnicas; sin embargo, su independencia es fundamental cuando al Operador del sistema se le asignan otras tareas, tales como la gestión de servicios complementarios, planificación de la expansión o mantenimiento de la red de transporte; pudiéndose generar conflictos de interés cuando el Operador del sistema ejerce como transportista.

- **Operador de mercado.** Se responsabiliza de la operación del mercado de electricidad, de dirigir el mercado spot¹¹, en el cual recibe las ofertas de los participantes y determina el precio de mercado basado en criterios dependientes de la estructura del mismo.

En ocasiones, también maneja otros mercados complementarios al spot, como pueden ser los de regulación y los intradiarios para ajustar la operación del sistema en el más corto plazo. Para operaciones a mediano y largo plazo maneja mercados de “contratos forward” o futuros eléctricos.

- **Comercializadores.** Entidades que compran la energía en el mercado mayorista y la revenden a los consumidores que no quieren o no pueden participar en el mercado mayorista. No poseen bienes en las compañías de generación, transporte y distribución. Todos sus clientes no tienen porque estar conectados a una misma compañía distribuidora. Existe un

¹¹ Este mercado spot es comúnmente un mercado del día siguiente, donde se fijan precios de cada periodo de mercado, generalmente cada hora.

tipo particular de comercializador que agrupa un conjunto de consumidores a los que vende energía, y obtiene de ellos productos que puede ofertar de manera agregada a otras compañías comercializadoras, de transporte y distribución; o bien, puede intentar comercializarlos en los mercados de servicios complementarios [35][36].

- **Clientes.** Consumen la electricidad a través de la red de distribución. En el mercado desregulado, tienen varias opciones para comprar electricidad, pues pueden hacerlo ofertando en un mercado spot, o directamente a una compañía generadora o comercializadora. En ocasiones pueden ofertar productos en el mercado de servicios complementarios mediante un agregador.

Una de las “mayores virtudes” de los sistemas liberalizados es la apertura a la competencia en el mercado minorista de energía, caracterizándose ésta en dos aspectos; el primero, en la creación de empresas comercializadoras no ligadas a las empresas ya establecidas; y segundo, la libertad de los pequeños consumidores (en su mayoría residenciales) en elegir la compañía comercializadora que le suministre el servicio. Defeuilley [1] considera que excepto en Gran Bretaña, Suecia y Noruega, los resultados obtenidos en Europa y los EEUU están lejos de ser los esperados. Principalmente debido a que las nuevas empresas deben ser creadas *ex nihilo*, y competir con las empresas establecidas resultantes de la desregulación del mercado; además de la dificultad de agregar un valor al producto; sin olvidar los costos para el consumidor que desea cambiar de compañía (costo de búsqueda, costo de aprendizaje y costo de la transacción).

En España, el mercado minorista no presenta condiciones favorables para la competencia, ya que se caracteriza por un alto grado de concentración y por el dominio conjunto de Endesa e Iberdrola, al igual que sucede en el área de

generación. La alta concentración en el sector, aunada a otras barreras de entrada ha generado la retirada del mercado de compañías comercializadoras que se crearon a partir de la liberalización de la comercialización en el sector [37] [38]. En adición al fallo de concentración y barreras de entrada, la Comisión Nacional de la Competencia ha denunciado a la Asociación Española de la Industria Eléctrica y las cinco grandes empresas que la integran por pactos reiterados para restringir el libre mercado y entorpecer el proceso de liberalización del mercado de suministro eléctrico [39].

Otro de los resultados de la introducción de competencia en los sistemas eléctricos, fue necesaria la creación de diferentes tipos de mercados que brindaran a las fuerzas del mercado la oportunidad de actuar libremente, todo esto sin descuidar las condiciones de seguridad y calidad de un producto tan especial y delicado como la electricidad. De manera general se han establecido tres tipos de mercado: Mayorista de energía, Servicios complementarios y Financiero, los cuales suelen presentar variaciones dependiendo del sistema en el que se encuentren ubicados.

- **Mercado mayorista de energía.** En ellos se comercializan contratos físicos de compra-venta de energía. Existen dos mecanismos típicos para su realización:
 1. *Casación central o subasta uniforme.* Se reúnen todas las ofertas de compra-venta y se establece el punto de equilibrio entre ellas a un precio único para el mercado. Este mecanismo es el que suele aplicarse en muchos mercados spot y pool.
 2. *Casación individual o subasta discriminatoria.* Los agentes pueden seleccionar ofertas publicadas por otros agentes, respetando los precios ofertados. Este mecanismo suele aplicarse en los Power Exchanges.

En la gran mayoría de los mercados mayoristas, además de las ofertas de compra y venta que participan en la subasta diaria, el Operador de mercado recibe los contratos bilaterales de energía, a fin de notificar al Operador del sistema la cantidad total de energía a comercializar. Si bien el volumen de energía comercializado a través de contratos bilaterales es significativo¹², el precio de mercado obtenido en las subastas suele ser utilizado como una referencia importante para la firma de contratos bilaterales. [40]

- **Mercado de servicios complementarios.** Tiene la finalidad de proporcionar al Operador del sistema los recursos necesarios para mantener al sistema eléctrico dentro de las condiciones de seguridad y calidad establecidas para el suministro. La manera de agenciarse estos servicios puede variar, ya que ocasiones se realiza a través de contratos entre el Operador del sistema y los agentes suministradores del servicio (generadores, consumidores, agregadores), o bien recurriendo al uso de mercados individuales para cada tipo de servicio.
- **Mercado financiero.** Este mercado tiene la finalidad de brindar a los agentes una herramienta de protección contra el riesgo que representa la volatilidad de los precios de la energía. Existen diversos mecanismos para llevar a cabo esta protección, entre ellos podemos mencionar:
 - **Contratos financieros.** Tienen por objeto asignar el costo de los riesgos generados por la volatilidad de precios, cubriendo las diferencias entre los precios finales y los precios previamente contratados o acordados; asignando el pago de estas diferencias a

¹² En el mercado español, durante el año 2010 la energía adquirida en el mercado diario por comercializadores y consumidores directos fue de 158,7TWh, mientras que la energía ejecutada en contratos bilaterales fue 110,8TWh [40]

los compradores si el precio final es superior, o a los vendedores si el precio final es inferior.

- **Contratos de futuros.** Eliminan el riesgo de volatilidad de precios, se firman identificando precios referidos a puntos de entrega en los que no existan restricciones de transporte, y si suficientes transacciones para que la liquidación del contrato pueda hacerse mediante la entrega de dinero. Estos contratos son generalmente por precio y cantidad fijos.
- **Contratos por diferencias.** En él se fijan precio y cantidad, obliga únicamente a pagar las diferencias existentes entre el importe de la cantidad y precio contratados, y el que resulta igual a esa misma cantidad por el precio del mercado de contados en el momento en que se cumple el contrato, pudiendo ser de dos tipos:
 1. *Por diferencia en el precio de generación.* Se paga la diferencia entre el precio del contrato y el precio del mercado en el momento señalado en el contrato, por la cantidad de energía contratada independientemente de cuál haya sido el consumo o la generación real de los contratantes.
 2. *Por diferencia respecto a dos nodos cualesquiera de la red.* También son conocidos como contratos de congestión en transporte TCCs (Transmission Congestion Contracts), que referidos a dos nodos de la red, dan derecho (u obligación) a sus poseedores, a recibir (o pagar) una cantidad, igual al resultado de multiplicar la diferencia entre los precios de esos dos nodos después del despacho, por la cantidad contratada.

Los resultados de los diversos procesos liberalizadores presentan particularidades propias en cada sistema. Hunt [17] y Kirschen [18] coinciden

en señalar que la aplicación de estos paradigmas ha resultado en cuatro tipos básicos de modelos en el sector eléctrico; Nagayama [41] analiza los modelos empleados en 83 países y los cataloga de acuerdo a los cuatro modelos básicos:

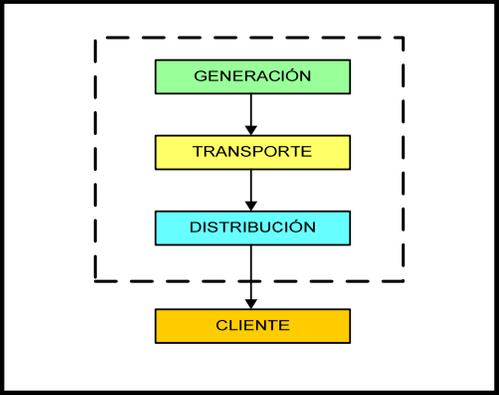
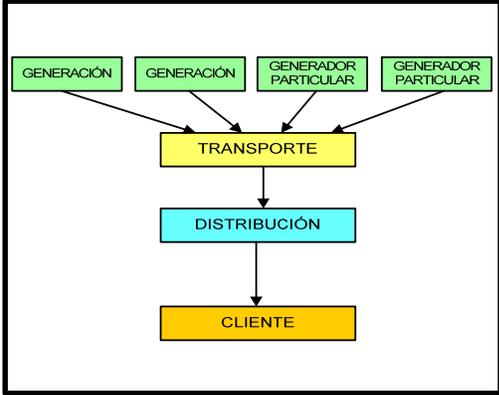
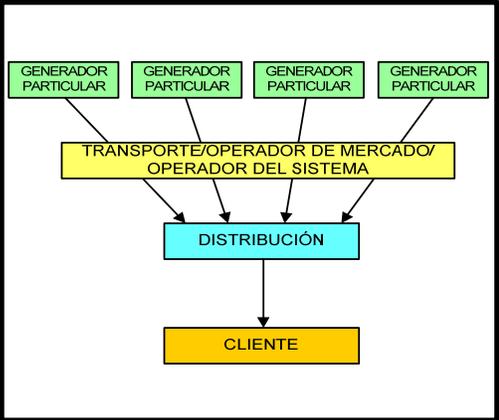
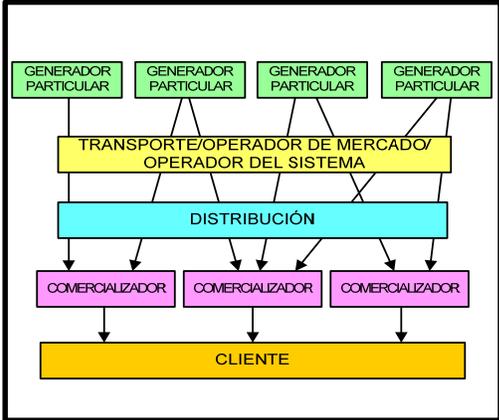
<p style="text-align: center;">Integración Vertical</p>  <p>Presente principalmente en países no desarrollados con excepción de Suiza, Sudáfrica y algunos estados dentro de los Estados Unidos.</p>	<p style="text-align: center;">Comprador Único</p>  <p>Aplicado principalmente en países no desarrollados con excepción de Corea; destacan entre ellos China y México.</p>
<p style="text-align: center;">Competencia en Mercado Mayorista</p>  <p>Empleado en países no desarrollados entre los que destacan India y Brasil.</p>	<p style="text-align: center;">Competencia Total en el Mercado</p>  <p>Modelo de referencia en casi todos los países desarrollados, y aplicado en algunos países no desarrollados.</p>

Tabla 2.1 Modelos de estructura de los sistemas eléctricos

El mercado eléctrico resultante del proceso de liberalización está lejos en muchos casos de ser perfecto, tal como sucede en la mayoría de los mercados, ya que muchos de ellos distan de cumplir las condiciones necesarias para la competencia perfecta [10]:

1. Que existan, al menos, cinco competidores con una cuota de mercado similar.
2. Que no exista una firma dominante que pueda imponer una estrategia de precios a los demás.
3. Que haya libre entrada o que los costes de instalarse en el sector, en igualdad de condiciones respecto a las empresas existentes, sean mínimos.

Las dos primeras condiciones pueden ser logradas durante el proceso de liberación a través de un adecuado proceso de desinversión y separación. Sin embargo, lograr la tercera condición es más complicado, ya que generalmente se presentan una serie de barreras de acceso en las áreas de generación y comercialización, entre las cuales podemos mencionar los siguientes:

1. El reparto de la información sobre el funcionamiento de la red de transporte y el comportamiento de sus usuarios, se realiza de manera asimétrica entre las empresas existentes y posibles nuevas entrantes.
2. La autorización administrativa para el emplazamiento físico de nuevas centrales de generación o empresas comercializadores pueden resultar muy difícil o costosa.
3. La gran inversión de capital con largo periodo de recuperación requerida para el establecimiento de nuevas centrales de generación puede suponer en si misma una barrera.

4. Las compañías generadoras establecidas, suelen contar con un conjunto de centrales con diferentes tecnologías y con emplazamientos que les permiten manejar mejor los riesgos de precios; sin embargo, las nuevas compañías empiezan con una o pocas centrales, lo que los coloca en una clara posición de desventaja inicial.
5. El marco regulatorio en ocasiones puede constituirse en una barrera de entrada, especialmente en lo que se refiere al posible cambio de las tarifas o reglas de mercado.

En el caso particular del mercado eléctrico español, las dos primeras condiciones necesarias para la competencia perfecta no se cumplieron al momento de liberalizar el sector, ya que se dejó más del 80% [42] del parque de generación en manos de dos empresas Endesa e Iberdrola¹³. En 2008, la Comisión Nacional de la Energía (CNE) [43], reconoce a ambas empresas la propiedad conjunta del 49,6% de la generación total y el 59,3% de la generación en régimen ordinario. Los indicadores empleados por la CNE para evaluar el potencial poder de mercado de los agentes, muestran que ambas compañías han contado a lo largo de los últimos años de oportunidades para ejercitar el poder de mercado en el mercado diario, identificándose además conductas anómalas en el mercado de restricciones técnicas. Este potencial de poder de mercado por parte de Endesa e Iberdrola continúa disminuyendo debido a la entrada de nuevos competidores.

En lo referente al mercado de suministro a clientes finales, la CNE señala un alto grado de concentración y una posición de dominio conjunta de las dos grandes compañías Endesa e Iberdrola, con cerca del 70% de cuota en 2008, siendo esta concentración superior en años anteriores.

¹³ Ambas empresas pertenecen a sendos grupos empresariales, siendo independientes contable y jurídicamente de las empresas de distribución y comercialización del grupo.

Los procesos de liberalización no han quedado exentos de polémica, ya que algunos autores señalan que a pesar de los avances tecnológicos aplicados en los sistemas eléctricos, no existen condiciones para el mercado en los sistemas eléctricos. Uno de ellos, Casazza [44], concluye que “la desregulación de la industria eléctrica fue una mala idea. Resultando en un incremento de los costos, y una disminución en la confiabilidad”. Por otra parte, Woo [45], señala que los modelos de mercado de adoptados en California, Noruega, Alberta y Reino Unido, es muy probable que fallen en un país con rápido crecimiento, limitados emplazamientos de generación y combustibles de generación importados.

2.2 Evolución de la participación de la demanda en el sector eléctrico.

Para la correcta operación de los mercados es necesaria la participación de los consumidores, ya que su ausencia puede disminuir la eficiencia y seguridad de los mercados, producir incremento de precio y fomentar el ejercicio de poder de mercado por parte de los generadores. La falta de participación activa de la demanda en los mercados es uno de los problemas que más aquejan a los mercados eléctricos a nivel internacional, en muchas ocasiones, esta escasa participación no puede ser atribuible en su totalidad a una apatía de los consumidores, ya que se encuentran con múltiples barreras que se lo imposibilita, en el punto 2.2.4 se abunda sobre este tema.

La Agencia Internacional de la Energía IEA (Internacional Energy Agency) ha definido la Participación de la Demanda de la manera siguiente:

“Participación de la Demanda es la habilidad de los demandantes de energía eléctrica de responder a las variaciones de los precios de la electricidad en el “mercado” o en “tiempo real”. Puede llevarse a cabo por medio de reducciones de carga o utilizando fuentes de generación propias” [46]. Por otra parte,

Escrivá [47] lo define “como toda acción por parte del consumidor que conlleva una modificación en su forma de consumir y provoca su participación en los procesos de obtención de precios de la energía”

2.2.1 Participación de la demanda en mercados regulados

En los sistemas eléctricos regulados, la participación de la demanda era únicamente considerada por las compañías dentro de programas de gestión de demanda o DSM (Demand Side Management), los cuales tenían la finalidad de reducir inversiones en la capacidad punta de generación de la compañía, así como el retraso en las inversiones en la red de transporte al emplearlos para aliviar congestiones en la red. Adicionalmente, las compañías promovían y subsidiaban campañas de eficiencia entre los consumidores. La mayoría de los beneficios económicos, de eficiencia energética y ambiental generados por los programas de DSM eran captados por las compañías eléctricas.

Los programas más comunes de DSM empleados son tarifas de demanda punta, tiempo de uso TOU (Time Of Use) y control directo de cargas DLC (Direct Load Control). En el inicio de los programas de DSM existían algunos programas dirigidos a consumidores residenciales, sin embargo, la mayoría de ellos estaban orientados a grandes consumidores, en los cuales, la electricidad tenía un alto impacto en el costo de producción, sin embargo, en la década de los ochenta se extendió su aplicación a consumidores residenciales a través del tarifas TOU y aplicando DLC a cargas tales como unidades de aire acondicionado, calentadores de agua y calefacción entre otros.

2.2.2 Participación de la demanda en mercados liberalizados

Con la liberalización del sector, surgieron nuevas y distintas compañías con diferentes incentivos e intereses, casi todas ellas interesadas e incentivadas en

participar y colaborar con la participación de la demanda. Bajo este nuevo escenario de competencia, se pudieron observar los beneficios que representan tanto para el sistema como para el mercado la participación activa de la demanda (ver figura 2.3):

Beneficios Mercado

- Disminución de precios.
- Mejora de la eficiencia.
- Reducción del poder de mercado.

Beneficios Sistema

- Mejora de la seguridad.
- Menores inversiones.

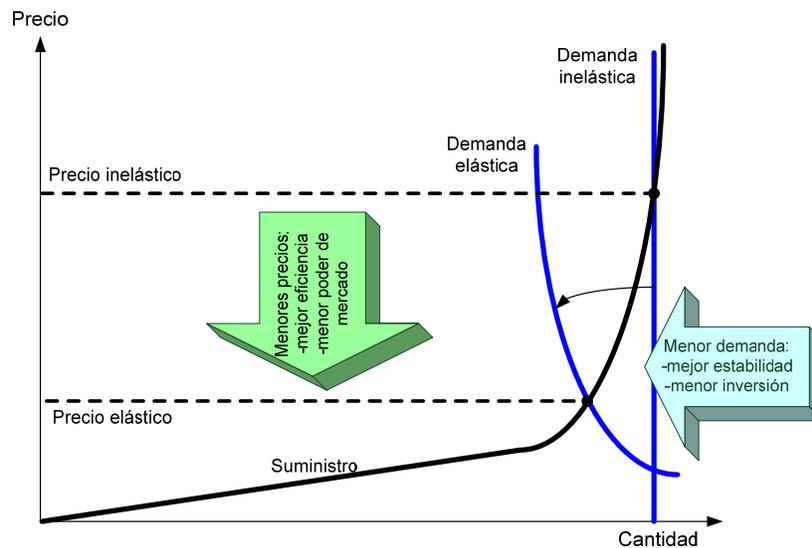


Figura 2.3 Mejoras en el sistema eléctrico debido a la participación de la demanda

En general, tanto en los sistemas regulados y liberalizados, los beneficios de la participación de la demanda se distribuyen entre los diferentes actores que en él participan. La Sociedad en su conjunto se beneficia de manera directa de la mejora de la eficiencia y seguridad del sistema, y de una reducción de los costos totales del suministro de energía; de manera indirecta se beneficia de la disminución de la contaminación ambiental generada en el proceso de suministro. Estos beneficios se reparten entre todos los miembros de la sociedad, sin importar si están implicados en la participación de la demanda.

2.2.3 Beneficios de la participación de la demanda.

Los beneficios de la participación de la demanda son muy amplios y se distribuyen entre los diferentes actores que en él participan [17] [14]:

- **Clientes participantes.** Son aquellos que proporciona los Recursos de Participación de la Demanda DRR (Demand Response Resources). Los beneficios pueden obtenerse a través de dos tipos de acciones:
 1. *Respuesta basada en el precio.* El cliente obtiene ahorros en su facturación al ajustar su consumo eléctrico en respuesta a la variación de los precios que paga por la energía consumida. Se participa a través de programas de precios en tiempo real, precios máximos y tarifas de tiempo de uso.
 2. *Respuesta a incentivos económicos.* El cliente recibe un pago por reducir la energía que normalmente habría consumido durante un evento. El estímulo financiero puede ser de diversas maneras, algunas a través de un porcentaje del precio de mercado de la energía, otras mediante un pago regular por disponibilidad de ser llamado a reducir carga.

- **Compañías distribuidoras.** Se benefician de la participación de la demanda incluyéndola dentro de sus opciones de suministro, y/o utilizándola en la planificación de sus redes de distribución para la disminución de la congestión, y postergación de inversiones de ampliación de la red o bien la instalación de nuevas subestaciones.
- **Comercializadores.** Obtienen beneficio de la participación de la demanda incluyéndola en sus opciones de suministro de la misma manera que lo hacen las compañías distribuidoras. Pueden usarla como herramienta para la Adquisición/Retención de clientes al incrementar el interés de los consumidores que desean proporcionar el servicio.
- **Agregadores.** Se dedican exclusivamente a la agregación de consumidores que ofrecen su capacidad de participación, y la ofrecen en el mercado de energía como opción de suministro, operando como “Plantas Generadoras Virtuales” obteniendo por ello un beneficio. Este tipo de empresas sólo esta disponible en algunos mercados liberalizados [35], [36].
- **Operador de mercado.** El mercado se beneficia de la participación de la demanda con la reducción de poder de mercado y la volatilidad de precios, así como una mejor gestión del riesgo.
- **Operador del sistema.** La participación de la demanda es un recurso distribuido que con apropiadas reglas de mercado, incentivos e infraestructura los Operadores pueden utilizarlo estratégicamente, para mantener la estabilidad del sistema cuando se presentan casos de congestión.
- **Reguladores.** La participación de la demanda incrementa su elasticidad reduciendo costos, con lo cual, ayuda a mitigar el poder de mercado que los generadores pueden tener durante eventos de precios punta.

- **Sociedad.** Se beneficia de un menor costo total del suministro y una menor contaminación. Los beneficios se distribuyen en toda la sociedad.

Si bien las fuentes anteriores no incluyen a las compañías generadoras dentro de los beneficiarios de la participación de la demanda, estas compañías también pueden beneficiarse de su uso en aquellos momentos en los cuales no cuentan con energía suficiente para cumplir sus compromisos de generación adquiridos, y suplen esta carencia contratando reducciones de demanda.

2.2.4 Barreras a la participación de la demanda

A pesar de los evidentes beneficios que aporta la participación de la demanda, existen múltiples factores o barreras que impiden su implementación y desarrollo, muchas de éstas pueden variar de un sistema a otro, sin embargo existen algunas que son comunes. Diversas organizaciones y entidades han realizado estudios sobre los obstáculos a los que se enfrentan los consumidores para poder participar activamente en sus mercados [14][48]. Los diversos tipos de barreras se pueden clasificar según su origen de la manera siguiente:

- **Regulatorias.** De manera general podemos decir que se trata de situaciones que aíslan a los consumidores del mercado, el tipo de barrera puede variar de país a país dependiendo del proceso desregulatorio llevado a cabo, de manera general se mencionan las siguientes:
 - Falta de libertad de cambiar a la compañía suministradora por parte de los consumidores. Existen sistemas en los cuales no es posible seleccionar libremente el suministrador, o bien, su sustitución por otro es desmotivada por la dificultad que implica el trámite administrativo.

- Uso de tarifas generalmente con coste inferior al precio de mercado, lo que elimina el deseo de participar activamente en el mercado. Estas tarifas motivan a los usuarios (pequeños y grandes) a mantenerse asilado del mercado, a fin de evitar los riesgos en precio que implica. El sistema eléctrico español es un buen ejemplo de esta situación.
- Inexistencia o insuficiencia de mercados y/o productos (programas de DRR) que permitan al consumidor desempeñar un papel activo en la determinación del precio de la energía. Generalmente sucede cuando en la normativa no fue considerada la creación de los mercados o productos en los que pudiese participar la demanda.
- Restricciones de acceso a los mercados en función del uso de la energía y capacidad instalada. Generalmente los pequeños consumidores se encuentran limitados por su bajo consumo a participar directamente en los mercados, viéndose necesitados de recurrir a compañías agregadoras.
- Falta de incentivos (económicos, fiscales y otros) que posibiliten la adquisición de tecnología y fomenten la participación de la demanda en los diferentes programas de DRR, ya sea a nivel industrial, comercial o residencial. La participación suele ser pequeña debido a que los mercados proporcionan señales de precio insuficientes.
- La incertidumbre en la regulación del sector, desfavorece la inversión necesaria para la participación activa en los mercados, ya que generalmente, se requieren realizar fuertes inversiones en tecnología y equipos para desarrollo de la participación.

- Tecnológicas. La tecnología desempeña un papel clave en lograr la participación de la demanda, ya que es necesario contar con dispositivos de monitorización, comunicación remota, control y facturación. La penetración tecnológica que posibilita estas acciones es más fuerte en el sector industrial (grandes y medianas industrias), debido normalmente, a ser requisito indispensable para ser suministrados de energía eléctrica; sin embargo, su implantación en el sector comercial y residencial es mucho menor (debido generalmente a su alto costo de instalación).

Actualmente, se disponen de una gran variedad de marcas y tecnologías que posibilitan la implantación de tarifas con discriminación horaria, en tiempo real, control directo de cargas, o cualquier actividad de DRR; todos los productos están disponibles a nivel mundial, por lo cual, son accesibles a todos los agentes de un sistema eléctrico independientemente del país donde se ubiquen. Desafortunadamente sus precios varían entre uno y otro país, por lo cual en muchos de ellos no son rentables económicamente.

La falta de regulación en la estandarización de muchos sistemas tecnológicos, ha permitido el desarrollo de equipos y sistemas que son en cierto grado incompatibles debido al empleo de parámetros técnicos diferentes (especialmente en medición y comunicación), lo que obliga a emplear en muchas ocasiones componentes de una sola marca comercial.

- Culturales. Se refieren a condicionantes sociales del comportamiento de los consumidores que desmotivan su participación activa en los mercados. Estos factores pueden variar entre los diferentes sistemas, los más destacados que podemos mencionar son:

- Información insuficiente o incorrecta con respecto a los programas de participación de la demanda, generalmente debido al poco tiempo relativo de su implantación.
- Consideración del suministro de electricidad como un servicio y no un producto, dificultando la reacción a precios.
- Fidelidad a las marcas, muchos consumidores no hacen uso de su poder de cambiar de suministrador por costumbre.
- Facturas de difícil interpretación que no permiten identificar los beneficios claramente.
- Falta de concienciación a todos los agentes de lo importante y beneficioso de su participación, con la finalidad de disminuir el problema de “la tragedia de los comunes”. La participación de la demanda en los sistemas eléctricos comparte con todos aquellos bienes públicos las cinco características que en conjunto generan un problema de coordinación social:
 - a. Las acciones de algunos, pero no todos, son suficientes para que los miembros del grupo disfruten del beneficio.
 - b. Si se logra el beneficio, será accesible a todos, incluso a los que no han contribuido.
 - c. No hay ningún método factible o que no sea muy costoso que evite que los no-contribuyentes se beneficien.
 - d. A cada contribuyente le cuesta algo participar.
 - e. El valor de lo que cada uno gana, si se obtiene el beneficio, supera el costo individual de su producción.

Además de las barreras antes mencionadas, existen teorías económicas defendidas por algunos economistas como Ruff [15], que consideran que la reducción de precios lograda con los programas de DDR socava la eficiencia del mercado; ya que sólo producen transferencias de rentas desde los generadores a los agentes que suministran los recursos de demanda.

Ruff considera que los agentes generadores cuentan con los beneficios obtenidos por precios de mercado elevados para recuperar sus inversiones en el tiempo requerido por los inversionistas, y si el agente regulador permite incentivos que reducen los precios, se origina escepticismo entre los inversores en generación, lo cual producirá en el largo plazo precios más elevados.

Esta teoría es la base de las principales objeciones para considerar como un “recurso” la participación de reducciones de carga en los mercados del día siguiente. Sin embargo, otro grupo de economistas [14] defiende que su uso permite alcanzar balances de energía más adecuados, los cuales eliminan las rentas artificiales de los generadores y por tanto corrigen una distorsión del mercado, previene además inversiones que no son necesarias en base a la valoración del consumidor.

Otra objeción que suelen declarar Ruff y algunos otros economistas, es que los consumidores que disfrutan del servicio no tienen propiedad o derecho sobre la energía; y por tanto cualquier pago recibido por ofertar un bien que no es de su propiedad genera ineficiencias en el sistema. Un buen ejemplo, son los pagos por reducciones de carga calculadas a partir de perfiles de consumo base. Esta anomalía puede corregirse de manera “sencilla”, si se establece como requisito de participación en el programa de reducción de carga, que se demuestre el derecho contractual sobre la energía ofertada a reducir.

2.2.5 Tipos de productos de participación de la demanda.

A pesar de las múltiples barreras a su implementación las investigaciones para su desarrollo continúan, su aplicación inicial dirigida consumidores residenciales e industrias intensivas se ha expandido a otros sectores económicos [49]-[54]. La Agencia Internacional de la Energía agrupa los diferentes tipos de productos de Participación de la Demanda en tres categorías [12]:

- Productos Económicos/Voluntarios
- Productos de Seguridad/Emergencia
- Productos de Tiempo de Uso/Precios en Tiempo Real

Productos Económicos/Voluntarios.

Están diseñados para incrementar la elasticidad de la demanda y por consiguiente la de los precios horarios de la energía. Con estos productos los consumidores toman decisiones sobre cuando vender su producto de capacidad de respuesta de la demanda considerando las señales de los precios horarios de la energía.

Estos productos pueden ser usados en los mercados del día siguiente e intradiario. Los consumidores tienden a tener tarifas fijas de consumo de energía a lo largo del año, pero cuando ellos consideran que las señales de los precios del mercado son adecuadas económicamente, deciden vender su capacidad de respuesta de la demanda durante esas horas específicas. Los participantes generalmente son compensados al recibir un porcentaje del valor de mercado para las horas que ellos han suministrado el servicio. Los consumidores siempre tiene la decisión de participar o no en el mercado.

Productos de Seguridad/Emergencia.

Están diseñados para proporcionar una capacidad de reserva operacional. Tienden a ser utilizados cuando la potencia en la red, o zonas específicas de la red se enfrentan a emergencias tales como problemas de congestión o riesgos de apagones.

Por lo general, los consumidores que proporcionan estos productos reciben un tipo de pago reservado, el cual puede ser de múltiples formas dependiendo de las características del mercado y de las metas de las compañías a las que prestan el servicio (Compañía distribuidora local, Comercializador). En algunos mercados se ofrecen pagos por capacidad y/o reserva operativa, mientras que en otros se ofrecen tarifas de interrumpibilidad. Un buen diseño de estos productos permite que sean financieramente comerciales y tener liquidez.

Productos de Tiempo de Uso/Precios en Tiempo Real

Estos productos también están diseñados para incrementar la elasticidad de la demanda y los precios horarios de la energía al igual que los productos anteriores, sin embargo, la principal diferencia es que los productos económicos permiten a los consumidores vender su producto directamente en los mercados, mientras que los productos de Tiempo de Uso/Precios en tiempo Real sujetan a los consumidores al mercado durante todo el año. Los consumidores entonces deciden si quieren consumir potencia o vender una reducción basándose en señales de precios.

Los productos económicos/voluntarios y de seguridad/emergencia pueden ser ofertados por los consumidores directamente en el mercado o bien a través de una compañía que agrupe los recursos de diversos clientes. Este tipo de productos influyen en el costo total de la operación del sistema eléctrico, sin embargo, esta influencia es limitada ya que no afectan el precio del mercado diario.

La participación de la demanda en los mercados de energía del día siguiente se realiza principalmente en algunos sistemas de los EEUU, por ejemplo, los operadores de Nueva York [55], California [56], Nueva Inglaterra [57] y el PJM [58]. En ellos, generalmente se ofertan reducciones de carga que se emplean para reducir el costo total de la operación del sistema. Su uso, no afecta el precio de cierre del mercado diario.

La descripción de productos de participación de la demanda que se aplican en diversos sistemas eléctricos liberalizados en el ámbito internacional se encuentra disponible en el portal de la Tarea XIII de la Agencia Internacional de la Energía [12].

2.3 Mecanismos de subasta y de mercado

Tal como se mencionó en la sección anterior, la liberalización del sector eléctrico trajo consigo cambios importantes, el más visible, fue la desintegración de monopolios verticalmente integrados a fin de generar competencia en la generación y comercialización; sin embargo, la transformación más importante se dio en la forma de entender los sistemas eléctricos, se pasó de una visión técnica en la que se busca la eficiencia técnico-operativa al menor costo, a una visión económica que entiende los sistemas eléctricos como mercados en los que se busca la eficiencia económica manteniendo la condiciones mínimas de operación.

Para entender los sistemas eléctricos liberalizados es imprescindible recurrir a la teoría económica, la cual nos dice que en cualquier mercado competitivo, todos los agentes se comportan como “tomadores de precio” al no poder influir individualmente en la fijación de los precios; se declara además la existencia de un precio de equilibrio, en el cual, la oferta y demanda agregadas se igualan. Sin embargo, la teoría no indica la manera en que se establece el precio de equilibrio, ya que al ser todos los agentes tomadores de precio ninguno de ellos

tiene teóricamente capacidad de establecerlo; esta carencia originó la creación de un agente ficticio denominado “el subastador de Walras”¹⁴ [31]. A falta de este agente ficticio en los mercados reales, se aplican subastas y otros mecanismos de licitación para alcanzar el punto de equilibrio.

La subasta se ha definido como una institución de mercado, que cuenta con un conjunto explícito de reglas que determinan la asignación de recursos y precios, basándose en las pujas presentadas por los participantes [59]. Su desarrollo teórico e influencia se logra en el siglo pasado, ya que la mayoría de los mercados más importantes operan mediante mecanismos de mercados de subastas.

Las subastas son empleadas prácticamente desde la aparición de la moneda en la sociedad; algunos autores señalan como primeros “productos” objeto de subastas las realizadas por los babilónicos con referencia a las esposas; en la antigua Grecia se subastaban esclavos así como concesiones para la explotación de minas; una de las subastas más famosas de la antigüedad fue la venta del Imperio Romano realizada por la guardia pretoriana en 193 d.c.

2.3.1 Tipos de subastas

Existen cuatro tipos de subasta primarias, para su descripción emplearemos un caso sencillo, es decir, cuando se ofrece un producto a varios compradores potenciales:

¹⁴ León Walras aportó a la Economía el concepto del equilibrio general, el cual consiste en un análisis de los fenómenos de la Economía en donde todos los sectores que la conforman son considerados de manera simultánea.

- **Subasta inglesa.** Los compradores potenciales anuncian ofertas sucesivamente más altas hasta que solamente queda un comprador, al que se le adjudica el bien al precio final, siempre y cuando el precio final supere el precio de reserva establecido. Una vez que se ha realizado una oferta no se puede retirar y sólo puede ser reemplazada por ofertas mayores; los potenciales compradores siempre conocen el nivel actual de la puja máxima.
- **Subasta holandesa¹⁵.** Es el mecanismo inverso del caso anterior. El precio del bien comienza muy alto y va disminuyendo sucesivamente hasta que un comprador lo acepta. La subasta ascendente y descendente se conocen también como subastas abiertas u orales.
- **Subasta del primer precio.** Los compradores potenciales presentan sus ofertas por escrito en un sobre cerrado, el bien se adjudica a la puja más elevada y el precio pagado es el precio indicado en la puja. A diferencia de la subasta inglesa, en la subasta al primer precio los compradores desconocen la valoración de los otros potenciales compradores al momento de realizar su puja, y sólo pueden presentar una sola puja.
- **Subasta del segundo precio.** Similar a la anterior ya que los potenciales compradores presentan sus ofertas en sobre cerrado, y el bien se adjudica a la puja más elevada; se diferencia en el precio pagado por el bien, ya que éste se iguala a la segunda puja más alta. El precio pagado es independiente de la puja presentada por el ganador.

Estos cuatro tipos de subasta primarias admiten múltiples variantes tales como anunciar o no un precio mínimo, establecer tasas por la opción a pujar, tiempos límite para realizar la puja, y otras.

¹⁵ Recibe su nombre por ser utilizada tradicionalmente en el mercado de flores en Holanda

Una característica especial de las subastas es la existencia de información asimétrica (conocidos en la teoría de juegos como juegos bayesianos), en caso de que se contara con información perfecta, los modelos de subasta serían muy sencillos. Existen dos tipos básicos de modelos en función del tipo de información de la que se dispone [60]:

- **Modelo del valor privado.** La valoración que cada comprador da al bien subastado, y las funciones de ganancia de los vendedores no son de dominio público, sino que únicamente son conocidos por cada uno.
- **Modelo de valor común.** El valor real del bien es el mismo para todos los compradores, sin embargo, ellos tienen diferente información privada acerca de cuál es el real valor del bien.

Un modelo de subasta por lo general debe considerar ambos modelos básicos, ya que se considera que cada comprador debe realizar su valoración del bien subastado, y además estimar la valoración del bien que realizan los otros compradores, en esta estimación se debe incluir la valoración que realizan los otros compradores sobre la valoración propia¹⁶.

2.3.2 Mercados

Todos los tipos de subastas mencionados en la sección anterior, se comportan como “mercados” de un solo lado, en los cuales el vendedor desempeña un papel pasivo, ya que vende su bien siempre y cuando el precio sea mayor que el precio de reserva por él estipulado. La mayoría de los mercados que existen son del tipo doble, y el mercado liberalizado de la energía eléctrica también lo es; en

¹⁶ Modelar este proceso en teoría de juego puede ser muy complicado, a propuesta de Harsanyi, a los juegos estáticos bayesianos se les agrega una fase inicial “ficticia” en la que el azar determina el tipo de jugador empleando distribuciones de probabilidad

él, un conjunto de vendedores y compradores a través de interacciones reales o potenciales determinan el precio de un producto o de un conjunto de productos [61].

Fallos de mercado

Las acciones independientes de los consumidores y vendedores que consideran los precios existentes, permiten que los mercados funcionen de manera económicamente eficiente, todo esto en función de la “mano invisible” de Adam Smith que asigna los recursos de una manera eficiente sin necesidad de que intervenga el Estado. Esta acción de la “mano invisible” da lugar al primero de los dos teoremas básicos de la economía del bienestar [10]:

1. Dejando en libertad a los agentes económicos para que intercambien sin restricciones bienes y servicios se consigue una asignación de recursos pareto-eficiente.
2. Cualquier asignación pareto-eficiente es alcanzable mediante intercambios libres realizados por los agentes económicos, partiendo de una asignación de recursos compatible con la que se desea alcanzar.

En base a estos teoremas solamente sería necesario realizar una distribución inicial compatible con la meta que se desea alcanzar, y posteriormente el mercado haría el resto. La eficiencia paretiana implica que para una función de costes determinada los consumidores adquieren los bienes al mínimo de los precios posible y, que para una demanda determinada, los vendedores producen al mínimo coste posible. A la primera condición se le conoce como eficiencia asignativa, y a la segunda eficiencia productiva.

Sin embargo algunos autores ponen en duda la generalidad de estos dos teoremas fundamentales de la teoría del bienestar, consideran que los fallos de mercado no son excepciones a una regla general, es el mercado como regla lo

que constituye una excepción; con esto justifican la regulación del mercado por parte del Estado.

De manera general se considera que existen cuatro diferentes tipos de fallos que afectan a los mercados:

1. **Problemas de información.** Cuando la información es incompleta, surgen problemas de selección adversa que impiden lograr una asignación pareto-eficiente, debido a que los agentes tratan de maximizar su beneficio a partir de esta diferencia en la información que poseen. No existe información suficiente capaz de eliminar las incertidumbres presentes en intercambios presentes y futuros. Este problema ataca el primer teorema de la economía del bienestar que se mencionó anteriormente.
2. **Poder de mercado.** “Significa el grado de control que una sola compañía o un pequeño grupo de compañías tiene sobre el precio y las decisiones de producción en una industria” [62] también se puede definir como la divergencia que existe entre el precio de un bien o servicio y el coste marginal de producirlo. Generalmente se presenta cuando existe una gran concentración horizontal en el mercado, pero en ocasiones se puede ejercer en subasta competitivas a través de comportamientos estratégicos relacionados con las reglas de funcionamiento del mercado. Esta problemática afecta al segundo teorema de la economía del bienestar, ya que no es posible separar los problemas de eficacia y distribución de las decisiones económicas.
3. **Externalidades.** En ocasiones las acciones de los consumidores o productores generan costos o beneficios económicos, que no están internalizados o incorporados en los precios libremente determinados.

4. **Bienes públicos.** La existencia de bienes que sólo pueden consumirse de manera no excluyente o diferenciada constituye también un problema, ya que implica un costo marginal de suministro nulo a un consumidor adicional. Este fallo de mercado exige la intervención pública.

2.3.3 Mercado mayorista de energía

Tal como se mencionó anteriormente, en los sistemas eléctricos liberalizados se aplican dos mecanismos para la fijación de precios, la subasta uniforme y la subasta discriminatoria. En la subasta uniforme, los ganadores en el mercado pagan o son pagados al precio de equilibrio por sus compras o ventas realizadas sin importar el precio al cual ofertaron. En el caso de la subasta discriminatoria o “pay-as-bid” los ganadores del mercado pagan o son pagados al precio de sus ofertas realizadas.

Actualmente no está claro que mecanismo de fijación de precios debe ser empleado, en defensa de la subasta uniforme algunos autores [16]-[19] señalan que induce a los agentes a revelar sus costos y valoraciones con lo cual se logra la eficiencia del mercado, todo ello con un mecanismo de fácil implementación; mientras que consideran que la subasta discriminatoria induce a no revelar los costos y valores reales, además de animarlos a la colusión. Por otra parte los defensores de la subasta discriminatoria consideran que su empleo reduce la volatilidad, generándose menores precios y un mayor excedente para el consumidor.

A lo largo de los años, se han desarrollado múltiples investigaciones que comparan ambas subastas, sus resultados obtenidos tanto teóricos como empíricos son controversiales:

Ethier *et al* en 1997 y 1999 lleva a cabo un experimento económico [24][25] que compara la subasta uniforme con una subasta híbrida discriminatoria-

inglesa, a partir de un comisionado de unidades centralizado considerando tres unidades generadoras gestionadas por un Operador Independiente del Sistema ISO (por sus siglas en inglés), el cual se encarga de establecer precios zonales. Los resultados señalan que la subasta uniforme presenta precios mayores que la subasta discriminatoria, pero sus precios suben más lentamente ante los cambios de las ofertas; los incentivos para manipular los precios en la subasta uniforme no son claros.

Zimmerman *et al* en el 2000 realiza un experimento económico [19] que analiza comparativamente las subastas uniforme, discriminatoria e híbrida (uniforme/discriminatoria), para lo cual considera un sistema formado por seis compañías generadoras y un ISO. La carga a suministrar se establece dentro de un rango de incertidumbre. No se consideran pérdidas en la red. El estudio concluye que la subasta híbrida presenta los mayores precios promedios; la subasta uniforme presenta los menores precios promedios y la mayor eficiencia; en el caso de la subasta discriminatoria la información disponible juega un papel importante ya que pueden presentarse abusos por parte de los generadores.

Hudson en 2000 [22] realiza una simulación de los mercados de energía y de servicios complementarios en un área de control de transporte grande; entre sus conclusiones señala que la subasta uniforme permite el poder de mercado en todos los mercados pero especialmente en los mercados de reserva rodante y no rodante; el uso del poder de mercado en una subasta uniforme es altamente probable en aquellos mercados en los cuales existe una alta demanda y una baja capacidad de generación.

Smith *et al* en 2003 [63] lleva a cabo experimentos económicos con la finalidad de analizar el efecto de la participación de la demanda mediante reducciones de carga por precio máximo en un mercado que opera con subasta uniforme, para lo cual, emplea un sistema eléctrico radial de tres nodos con cinco agentes generadores y cuatro consumidores. Concluye que la participación de la demanda ayuda a reducir los precios y su volatilidad cuando existe poder de

mercado; cuando no existe poder de mercado reduce los niveles de precio en los periodos punta y llano de la curva de carga, reduce también la volatilidad en los periodos valle y llano.

Smith *et al* en 2003 [21] compara a través de economía experimental a las subastas uniforme y discriminatoria, para lo cual emplea un sistema eléctrico radial de tres nodos con cinco agentes generadores y cuatro agentes compradores. En base a los resultados obtenidos concluye que bajo condiciones de demanda elástica la subasta discriminatoria presenta menor volatilidad con respecto a la subasta uniforme, pero converge a precios mayores que ésta en los periodos valle y llano de la curva de generación y, en condiciones de demanda punta ambas subastas se comportan de manera similar. Bajo condiciones de demanda inelástica, revelada y cíclica la subasta discriminatoria invita a los generadores a la colusión tácita sin comunicación explícita. Envía un mensaje a los órganos reguladores del mercado, en el cual, señala que el esfuerzo de aislar a los consumidores de incrementos de precio y su volatilidad al cambiar el empleo de una subasta uniforme a una discriminatoria puede fallar si se mantienen las demás condiciones constantes.

Galiana y Ren en 2004 [29][30] analizan comparativamente las expectativas de valores y las varianzas de los beneficios individuales de los generadores y los pagos realizados por los consumidores en las subastas uniforme y discriminatoria, para ello, emplean un mercado eléctrico casi perfecto con gran número de generadores y una demanda incierta dentro de un rango conocido. Establece un escenario en el que los costos marginales del sistema son conocidos a través de una función de densidad de probabilidad y, concluye mediante análisis teórico y simulaciones, que los beneficios esperados por los generadores individuales así como los pagos realizados por los consumidores son los mismos en ambos tipos de subastas; la varianza en los beneficios individuales de los generadores y los pagos realizados por los consumidores son

mayores en el caso de la subasta uniforme que en el caso de la subasta discriminatoria.

Xiong *et al* en 2004 [26] realiza una comparación de la subasta uniforme y discriminatoria a través de un enfoque multi-agente en un mercado sin poder de mercado, donde cada generador, utiliza un algoritmo Q-learning para llevar a cabo la formulación de sus ofertas al Operador del sistema que controla el mercado del día siguiente. Se establece un precio máximo del sistema y existen cuatro bloques de demanda interrumpible a disposición del Operador del sistema. La conclusión obtenida es que la subasta discriminatoria arroja menores precios y menor volatilidad en comparación que la subasta uniforme; la participación de la demanda disminuye los precios resultantes en la subasta uniforme, sin embargo no tiene efecto en los resultados obtenidos en la subasta discriminatoria ya que los resultados obtenidos sin ella ya son de por sí bajos.

Fabra *et al* [27][28][64] en diversos trabajos (2002-2006), desarrolla mediante teoría de juegos una comparación entre la subastas uniforme y discriminatoria, inicia el análisis considerando un duopolio y lo extienden hasta un oligopolio simétrico, se cuenta con un precio máximo en el mercado, y la demanda es elástica. Las ofertas pueden ser realizadas de dos formatos, cuando se conoce la demanda (ofertas de vida corta) y cuando existe incertidumbre en su magnitud (ofertas de vida larga). En base a los resultados obtenidos concluye que en caso de demanda conocida la subasta uniforme produce precios mayores que la discriminatoria, la evaluación comparativa de la eficiencia en este caso es más compleja, ya que depende de los valores de los parámetros y de los equilibrios jugados en la subasta uniforme. En el caso de demanda con incertidumbre y simetría perfecta en el mercado los pagos esperados a los suministradores son los mismos en ambas subastas. Reducciones en el precio de reserva del mercado reduce los precios promedios del mercado en ambas subastas; por otro lado, la reducción de la demanda ofrece resultados similares [5].

Tierney *et al* [65] considera que la transición de una subasta uniforme a una del tipo discriminatorio puede tener efectos adversos para la eficiencia general del mercado y del comisionado de unidades; además de desincentivar la participación de la demanda y la inversión en plantas de generación base. La subasta discriminatoria desmotiva la participación de pequeños generadores en el mercado diario, y por tanto, afecta los esfuerzos de reducir el poder de mercado.

La determinación de la superioridad entre las subastas uniforme y discriminatoria aplicadas en los mercados de electricidad es objeto de un animado debate, sin embargo en lo referente a su implantación, es evidente el dominio de la subasta uniforme en múltiples mercados. El caso más conocido de subasta discriminatoria es su aplicación al mercado eléctrico inglés, el cual inicialmente contaba con un mecanismo de mercado tipo pool con subasta uniforme, a partir de su implementación se observó una reducción en los precios de la energía, sin embargo no existe evidencia clara para adjudicar toda la responsabilidad de esta disminución de precios al cambio de tipo de subasta, ya que también se presentaron otras variaciones en el mercado tales como la reducción de la concentración e incremento de la capacidad total de generación en el mercado.

La victoria lograda por la subasta uniforme en cuanto a su implementación, se debe a que envía correctas señales económicas de largo plazo a potenciales inversores a través del precio de mercado, ya que refleja el exceso o déficit existente en la capacidad de generación [24].

2.3.4 Subasta iterativas

A lo largo de los años, se han propuesto diversos mecanismos de subastas aplicables al mercado mayorista de energía, destacando entre ellas las que

operan mediante la realización de varias rondas hasta alcanzar el equilibrio en el mercado, es decir, realizan múltiples iteraciones en el proceso.

Esta subasta iterativa retoma la idea del “subastador walrasiano” que se mencionó al inicio del presente Capítulo, en la cual, la convergencia al equilibrio supone la interacción repetida e independiente de todos los participantes del mercado con el “tasador”, el cual actualiza constantemente el precio al que se realizará la venta, a fin de garantizar que todos los participantes del mercado maximizan sus beneficios, logrando así el buen funcionamiento del mercado.

2.3.4.1 Subastas iterativas en el área económica

En estudios iniciales referentes a este tipo de subastas iterativas aplicados en ambientes estáticos y con agentes que disponían de una sola unidad para comerciar, se observó que el mecanismo de subasta tenía un comportamiento estable, con grandes propiedades de convergencia y eficiencias promedio superiores al 97% [66]. El mecanismo por si sólo es inestable, por lo cual es necesario incluir en el mecanismo reglas en la formulación de ofertas a los participantes a fin de asegurar su convergencia, evitándose así comportamientos que puedan derivar en caos.

Smith *et al* [67][68] analiza a través de experimentos económicos la aplicación de este tipo de subasta en los mercados financieros, se focaliza en la influencia que tiene la cantidad de información disponible por los agentes y las reglas de convergencia en la eficiencia del mecanismo; encuentra que el diseño que presenta mejor eficiencia es la combinación de información completa y sin reglas de formulación, sin embargo su eficiencia es menor que las subasta dobles. En la práctica, se aplican incentivos (cargos monetarios por la participación) que igualan la eficiencia de este mecanismo con los otros mecanismos de subasta.

2.3.4.2 Subastas iterativas en mercados eléctricos

En el área de los mercados eléctricos, Galiana [69][70] aplica subastas iterativas para determinar los precios zonales de un sistema, primeramente los agentes maximizan su beneficio en función de un conjunto de precios zonales dados y determinan las cantidades de energía (activa y reactiva) que comercializan al precio establecido; un Operador de mercado (que realiza la tarea del tasador), recibe las ofertas y actualiza los precios zonales a través de un algoritmo de Newton que considera la congestión de la líneas, proceso que dura hasta que el balance de potencia en cada nodo de la red es satisfecho. Los resultados obtenidos muestran que el sistema generalmente converge satisfactoriamente en un número razonable de iteraciones apoyándose en la regla de convergencia, sin embargo bajo ciertas condiciones, se puede producir una oscilación en el proceso, indicándole esta situación al tasador, que no será posible lograr el máximo beneficio para todos los participantes.

Contreras *et al* [71] propone un método iterativo para generar ofertas de venta de energía en los mercados del día siguiente. El modelo se basa en el equilibrio iterativo de Cournot, para ello considera inelástica la demanda y a todos los agentes participantes del mercado como “tomadores de precio” es decir ninguno tiene poder de influir significativamente en el precio del mercado. Aplica el teorema de la “telaraña”, mediante el cual, las decisiones de producción se establecen después de conocer el precio de mercado.

2.4 Conclusiones del capítulo

A lo largo de las dos pasadas décadas, en muchos países se presentó un cambio filosófico importante en la manera de entender la operación de los sistemas eléctricos de potencia, pasando de la idea del monopolio natural total, a la de áreas de libre mercado en la generación y comercialización. Esta nueva visión, trajo consigo cambios estructurales muy importantes en el sector, relacionados

con la manera de programar la generación de la energía eléctrica, gestionar la operación de las redes de transporte y distribución, y la manera como se establecen los precios de la electricidad.

Desde la fecha, las estructuras resultantes del cambio de paradigma distan mucho de ser uniformes, ya que se han realizado muchas propuestas de cómo realizar estas nuevas actividades, debido a que la viabilidad de la solución depende en alto grado del escenario político, económico, social e incluso geográfico que presente el sistema en cuestión. El grado de desestructuración del sistema eléctrico inicial verticalmente integrado es por lo general más elevado en los países desarrollados en comparación con el alcanzado en los países no desarrollados. La eficiencia y eficacia de los resultados obtenidos en lo general distan mucho de los declarados al inicio del proceso liberalizador, ya que las condiciones de competencia libre y participación activa de la demanda no se han cumplido.

En los últimos años, en algunos pocos países, el papel que desempeña la demanda en estos nuevos mercados se ha modificado de manera importante con la adquisición de una participación más activa en el mercado; sin embargo, a pesar de los beneficios que reporta para todos los agentes de los sistemas eléctricos se continúan presentando múltiples barreras para su desarrollo.

La aplicación de recursos de participación de la demanda dentro del mecanismo de fijación de precios en los mercados diarios de energía, es una tarea pendiente. Las dos principales barreras en este sentido son:

- El temor a que la disminución de beneficios en los generadores desmotive futuras inversiones para renovar o incrementar la capacidad de generación, lo cual ocasionaría precios elevados en el futuro.
- La idea proclamada por algunos economistas, de que los consumidores que disfrutan del servicio no tienen propiedad o derecho sobre la

energía. Cabe señalar que estas ideas no es compartida por todos los economistas.

Las creencias que generan estas barreras no son compartidas por todos los economistas. La primera barrera confirma la apreciación realizada por Hunt [17], de que los riesgos de la operación de unidades generadores los pagan finalmente los consumidores.

En opinión de algunos economistas, la segunda barrera se puede solucionar exigiendo al consumidor participante un comprobante del derecho contractual sobre la energía ofrecida a reducir.

Los mercados operan como subastas dobles en los que la demanda y la oferta tienen una participación activa, su máxima eficiencia se logra cuando el precio de equilibrio de mercado iguala al costo marginal de producción. Cualquier otro precio que se establezca en el mercado producto de la intervención del Estado o como consecuencia de un fallo de mercado, provoca un trasvase en el excedente de los agentes participantes, y puede ocasionar una reducción en la eficiencia y por tanto pérdidas en el bienestar social.

En lo relacionado a los mercados mayoristas de energía existen dos mecanismos para la fijación de precios:

- Subasta Uniforme. Los agentes ganadores pagan o son pagados al precio de equilibrio sin importar el precio que ofertaron.
- Subasta Discriminatoria. Los agentes del mercado ganadores pagan o son pagados al precio establecido en sus ofertas realizadas.

Existen diversos estudios que señalan las ventajas y desventajas de ambas con respecto a susceptibilidad al ejercicio de poder mercado, en lo referente a la eficiencia del mercado y la volatilidad de precios; desafortunadamente, en ocasiones estos estudios son contradictorios en sus conclusiones. Lo que si está

claro, es la superioridad de la subasta uniforme en lo que se refiere a su implantación, ya que es el mecanismo de casación más aplicado en los mercados eléctricos de energía liberalizados; algunos autores consideran que esto se debe a que esta subasta envía correctas señales económicas de largo plazo a potenciales inversores.

La subasta iterativa requiere la presencia de un tasador, el Operador de mercado, que gestione las ofertas y ajuste los precios de manera proporcional al desequilibrio que se presente entre generación y demanda. Este mecanismo brinda a la demanda la oportunidad de participar muy activamente en el proceso de fijación de precios, sobre todo en los modelos basados en aspectos físicos, ya que evita la necesidad de esperar a los mercados intradiarios o de gestión de desvíos para reaccionar. Si bien esta subasta no se ha aplicado a los mercados eléctricos, existen aplicaciones en los mercados financieros.

CAPÍTULO 3.

ANTECEDENTES: LA ECONOMÍA EXPERIMENTAL Y LOS MERCADOS ELÉCTRICOS

En el presente Capítulo se describen los fundamentos teóricos de la economía experimental, así como la metodología necesaria para llevar a cabo los experimentos económicos que se emplean en la validación del nuevo mecanismo de subasta uniforme iterativa propuesto en esta tesis.

El Capítulo inicia con una descripción de la metodología y experimentación seguidas en el desarrollo de los experimentos económicos, indicando las partes que los componen y requisitos básicos necesarios para dar validez a los experimentos económicos realizados.

En la parte final se relacionan las ventajas y aplicaciones del método experimental en la Economía, y se concluye con una descripción de la aplicación de experimentos económicos en mercados eléctricos.

3.1 Introducción

Durante muchos años, y para la mayoría de los economistas la Economía no fue una ciencia experimental, Schumpeter considera que es imposible analizar el comportamiento humano con la misma objetividad con que se analizan los

fenómenos físicos, ya que interfieren concepciones ideológicas, filosóficas, políticas y culturales; por lo cual, ante la imposibilidad de realizar experimentos controlados, los economistas debían concretarse a observar a fin de encontrar las leyes económicas [72].

Sin embargo Toulmin [73] señala que la creencia general de expertos economistas según la cual los “datos” que se han de considerar en tales decisiones pueden ser puramente “factuales”, y por lo tanto libres de presupuestos éticos y políticos, les impiden ver la totalidad de factores a tomar en consideración. Los aspectos fundamentales no dependen de lograr la correlación y coherencia formal de los cálculos; sino más bien de recoger toda la información relevante ya sea social, histórica, cultural e incluso personal de los agentes involucrados, además de sus necesidades reales.

Si bien el primer experimento en Economía se atribuye a Daniel Bernouilli en 1730 con la “Paradoja de San Petersburgo” [74], no fue hasta la década de los 60s del siglo pasado que se desarrollaron múltiples experimentos, lo cual permitió el desarrollo de una metodología y su normalización. En 2002, Vernon Smith fue premiado con el Nobel de Economía, por haber establecido la experimentación de laboratorio como una herramienta en el análisis económico empírico, especialmente en el estudio de mecanismos alternativos de mercado.

La Economía experimental permite realizar un estudio controlado de los mercados, considerando las reglas de negociación y el comportamiento de los agentes participantes. La mayoría de los experimentos se realizan en un laboratorio, donde los sujetos negocian con dinero real, y gracias al análisis de las respuestas de los sujetos el investigador aprende cómo y por qué los mercados reaccionan a los cambios en la regulación y las reglas de negociación.

3.2 Metodología y experimentación

Todo experimento tiene como finalidad dar respuesta a una pregunta originada en un cuerpo de ideas; es un medio, una vía y no un fin, tanto en la generación de nuevas ideas o su enriquecimiento, así como para la contrastación de las mismas [75].

La experimentación es un proceso por el cual tratamos de aprender cosas a partir de casos especiales o particulares que nos ayuden a enfrentarnos con la compleja realidad en la que se encuentra ubicado el objeto de nuestra investigación. Sin embargo, no podemos olvidar que el método experimental apoyado en la inferencia es tan limitado como para que el conjunto de conocimientos por él adquirido, sea en el mejor de los casos probable. En este sentido Russell *Op. Cit.* señala la constante y permanente duda sobre la inducción:

“Es necesario percatarse de la posición fundamental de la probabilidad dentro de la ciencia. En el mejor de los casos, la inducción y la analogía sólo nos dan una probabilidad. Toda inferencia que merezca ese nombre es inductiva; por tanto, todo conocimiento inferido es, en el mejor de los casos probable”

Una teoría física según Duhem [76] *“no es una explicación. Es un sistema de proposiciones matemáticas, deducidas de un pequeño número de principios cuyo objeto es representar de la manera más simple, más completa y más exacta posible un conjunto de leyes experimentales”*. Portoles [77] lo sintetiza: *“una teoría física no explica, sino que su finalidad es permitir la descripción y clasificación de los resultados experimentales”*. Hey [31] se pregunta cuál es el propósito de la teoría y responde: *“se espera que proporcione una aproximación a los fenómenos de la vida real. Entonces [...] se la debe someter a investigación empírica”*.

Para llevar a cabo la prueba de una teoría a través de la experimentación, es necesario añadir a la observación el control de determinados factores como consecuencia de determinados conceptos teóricos¹⁷, así como la medición de estos factores. Consecuentemente, todas las pruebas de una teoría son realmente una prueba de un conjunto de teorías, es decir la prueba de una teoría condicional sobre las teorías auxiliares.

El empleo de las teorías auxiliares nos permiten reducir la complejidad del modelo de representación de la realidad; sin embargo, esta situación nos enfrenta al problema conocido como la tesis *Duhem-Quine*, de acuerdo con la cual, una teoría siempre puede ser rescatada de un experimento adverso recurriendo vía *ex post hoc* a otras hipótesis auxiliares. En consecuencia, cada experimento positivo de una teoría puede ser cuestionado por medio de una revisión adecuada de las condiciones iniciales en los que se formuló la teoría. En otras palabras, esta tesis nos señala que unos mismos resultados experimentales pueden ser descritos por un número infinito de teorías diferentes y en ocasiones incompatibles entre sí, por lo cual deniega toda posibilidad de falsificación de una teoría, excluyendo así el principio falsacionista de Popper¹⁸.

En favor de la experimentación Smith [78] declara que algunos filósofos han exagerado la importancia de la tesis Duhem-Quine, ya que los experimentalistas pueden estar ignorando el poder de su influencia en sus actividades diarias. Si se tiene un problema de confusión con las hipótesis auxiliares, entonces es

¹⁷ Todas las pruebas de una teoría requieren de varias hipótesis auxiliares que son necesarias a fin de interpretar las observaciones como una prueba de la teoría. Estas hipótesis auxiliares se conocen con varios nombres: condiciones iniciales, cláusula *ceteris paribus*, antecedentes y otros.

¹⁸ Kart Popper consideraba que la ciencia no es capaz de verificar si una hipótesis es cierta, pero sí puede demostrar si es falsa, consideraba que la inducción no sirve porque es imposible analizar todos los casos posibles, y sólo basta una prueba fallida para rechazar la teoría. Por lo tanto, las teorías científicas no pueden nunca declararse verdaderas, sino en el mejor de los casos no refutada

necesario realizar nuevos experimentos para probarlas; por el contrario, si las hipótesis auxiliares no son probables, este es el problema crítico.

En el desarrollo del experimento, el objeto de experimentación se ve rodeado por un medio artificial controlado por el investigador en mayor o menor medida, con lo cual, es común el uso de variables con incertidumbre. Con respecto a la evaluación de la incertidumbre Journal [79] señala:

“No hay nada incierto en la realidad, es nuestra visión de esa realidad la que es incierta. La incertidumbre que no es intrínseca al fenómeno que se estudia no puede ser estimada, en cambio es modelada. Todas las medidas de la incertidumbre son modelos, todos basados en decisiones algo subjetivas sobre que debe ser considerado incierto [...] y que debe ser considerado incuestionable [...]. Es mejor un modelo subjetivo de la incertidumbre que una ilusión de la certeza.”

El método experimental es el sometimiento de un sistema material a ciertos estímulos, observando su reacción ante éstos con la intención de resolver un problema vinculado al *estímulo-respuesta* [72]. Los estímulos pueden ejercerse de dos maneras:

1. **Directamente**, sobre el objeto-sujeto de la experimentación.
2. **Indirectamente**, mediante la alteración de un elemento del ambiente que afecta la respuesta del objeto-sujeto de experimentación.

En lo referente al control de los estímulos durante el experimento se puede aplicar también de dos formas:

1. **Pasivo**, cuando después de realizado el estímulo nos limitamos únicamente a la medición y registro de los efectos.

2. **Activo**, cuando el estímulo es manipulado durante el experimento, por ejemplo, en su intensidad.

Los experimentos pueden ser del tipo cualitativo, cuando el control de los factores y productos no se sigue con exactitud cuantitativa, ya que se buscan nuevas variables o nuevas relaciones; en caso contrario, se trata de un experimento cuantitativo cuando las magnitudes de las variables relevantes son objeto de medición, presupone que ciertas variables y relaciones ya son conocidas.

Hey [31] para justificar la experimentación en la Economía señala que *“puesto que la teoría económica (neoclásica) emplea un sistema deductivo formal (al igual que las ciencias físicas), proporciona las bases de la abstracción y del diseño experimental (como sucede en las ciencias físicas). [...] uno puede utilizar técnicas experimentales para investigar cualquier área de la Economía (neoclásica), así como someter a prueba cualquier teoría económica (neoclásica)”*.

3.2.1 Etapas de la Experimentación

Las etapas de la experimentación son ampliamente conocidas, sin embargo conviene realizar una breve descripción de ellas dada la terminología que se emplea en los experimentos económicos.

Las técnicas experimentales se caracterizan por consistir siempre, en procedimientos para la manipulación y observación de las variables que resultan de nuestro interés dentro de un determinado estudio, para lo cual es necesario controlar:

1. Las condiciones en las que se producen los hechos, a fin de poder generar una cadena de causalidad.

2. La manera en que se realiza la observación, para evitar posibles influencias no deseadas en el comportamiento de los sujetos empleados en el estudio.

Con la finalidad de lograr cierto grado de objetividad e independencia en nuestras observaciones, es conveniente establecer un “testigo” o grupo de control, el cual no se encontrará sometido a los estímulos, o bien a las variaciones que puedan sufrir éstos.

Las diferentes etapas en las cuales se desarrolla la experimentación se pueden observar en el esquema siguiente [72]:

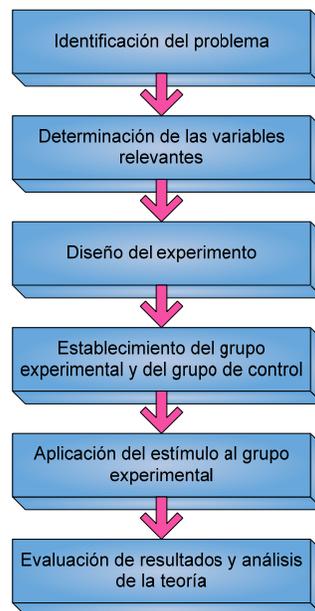


Figura 3.1 Etapas de la experimentación

Esto es:

1. **Identificación del problema.** Es necesario formular una pregunta de interés científico en el área de investigación de manera concreta, de tal manera que permita elaborar un ensayo de respuesta.
2. **Determinación de las variables relevantes.** Detectar las variables que se controlarán durante el experimento, a fin de poder dar respuesta a la pregunta formulada en el paso anterior.
3. **Diseño del experimento.** Es necesario establecer un procedimiento muy detallado de búsqueda de información en el laboratorio, de tal manera que se posibilite la réplica por parte de otros investigadores.
4. **Establecer el grupo experimental y el grupo de control.** Este proceso es importante para asegurar la calidad de la información que se obtendrá en el experimento, se debe considerar el método de selección, su aleatoriedad y la eliminación de comportamientos no deseados entre otros.
5. **Aplicación del estímulo al grupo experimental.** El incentivo económico es el estímulo más comúnmente empleado en los experimentos económicos, ya que asegura una cierta causalidad. El esquema de premios y castigos es una herramienta suficiente aunque no necesaria para esbozar ciertas pautas conductuales en Economía.
6. **Evaluación de los resultados y análisis de la teoría.** A través de inferencia estadística como técnica básica, se deben interpretar los resultados obtenidos, para definir si los estímulos han tenido efectos visibles significativos producto de la comparación entre el grupo experimental y el grupo de control.

3.2.2 Requisitos básicos para la investigación experimental

El diseño y ejecución correcta del trabajo experimental son fundamentales para obtener resultados válidos y útiles para otros investigadores. Sin embargo, la gran diversidad de diseños y objetivos de investigación en el desarrollo de experimentos, dificulta la identificación de normas o instrucciones para proceder en el desarrollo del mismo, muchos autores trabajan a partir de casos, pero no abundan en el método experimental.

En el diseño, implementación y desarrollo de los experimentos económicos realizados en la presente tesis se respetan y ejecutan los pasos que Rivas y Macadán [75] consideran deben ser tomados en cuenta en el diseño y proceso del trabajo experimental: regularidad procedimental, motivación, carácter no sesgado, calibración y paralelismo.

1. **Regularidad procedimental.** La utilidad de la experimentación y la credibilidad del experimentador que apoya su investigación en datos experimentales, dependen básicamente de que otros puedan replicar los resultados de laboratorio. Para facilitar la réplica es necesario que el procedimiento y el ambiente estén estandarizados, es decir claramente definidos. Deben tomarse en consideración los siguientes aspectos al momento de aclarar el proceso experimental:

- **Instrucciones:** deben ser claras y no mover a la confusión, para que los sujetos sepan qué dramatización deben llevar a cabo, así como las consecuencias asociadas a sus acciones. Ello implica:
 1. Determinar ejemplos y pruebas de comprensión si son necesarios.
 2. Establecer criterios para responder a las preguntas.

- *Naturaleza de las recompensas*: se requiere definir un cuadro de premios y castigos, con consecuencias directas sobre los resultados que el sujeto pueda obtener de participar en el experimento.
- *Ensayos previos*: en ocasiones es necesario diseñar experimentos pilotos, sin recompensas, previos a la experimentación con un esquema de incentivos económicos, para verificar que el diseño sobrevive a las respuestas de los sujetos.
- *La forma de reclutar a los sujetos*: los sujetos deben ser reclutados de forma que se conozcan lo menos posible entre ellos, con formación variada y a ser posible que no estén directamente vinculados con el experimentador. En ocasiones por las características del experimento es posible requerir sujetos con un perfil específico de conocimientos.
- *Tamaño de la muestra y nivel de experiencia de los sujetos*: el tamaño debe ser especificado y calculado en la medida de nuestras posibilidades. Se debe describir el nivel de conocimientos previos de los sujetos que se someten al experimento.
- *Lugar, fechas y duración de las sesiones*: como coordenadas de situación de la investigación.
- *Especificar el ambiente físico de las sesiones*: en algunas condiciones es conveniente determinar el entorno físico.
- *Aclarar los posibles engaños deliberados a los sujetos del experimento*: el mentir puede mermar la confianza entre los sujetos y el experimentador.

- *Si existen sesiones que se producen de modo irregular a las desarrolladas con anterioridad, justificar y aclarar.*
2. **Motivación.** Es muy importante que los participantes perciban claramente el esquema de recompensas que se corresponden a los incentivos asumidos en la teoría relevante o aplicación. Una de las ventajas de las recompensas monetarias es la condición de no saciedad, sin embargo, no se puede estar seguro a priori de que las recompensas sean las adecuadas sin considerar el contexto del experimento particular:
- Pueden existir sujetos que independientemente de sus recompensas tratan siempre de maximizar sus ganancias hipotéticas esperadas.
 - Puede ocurrir que en ausencia de incentivos económicos se produzcan desviaciones de conducta respecto a la norma.

Guala [80] resalta la importancia de los incentivos en los experimentos; reconoce que la idea de “recompensar con dinero” puede en ocasiones producir hilaridad entre los no economistas, ya que ellos opinan que *¡Se paga a sujetos por comportarse como los economistas quieren se comporten!*, también reconoce que en el caso contrario, la ausencia del estímulo, produce el rechazo de los economistas. Definir un estímulo adecuado resulta vital para la validez de los resultados obtenidos en la experimentación.

3. **Ausencia de sesgos.** Los experimentos deben ser dirigidos de tal manera que nunca se traslade al participante, la expectativa sobre cuál debe ser su respuesta o conducta adecuada o deseada por el investigador. Una de las fuentes de error más importante es la que conoce como *efecto experimentador*, el cual se subdivide en:

- Condicionamiento verbal o efecto Greenspoon.
 - Personalidad del investigador.
 - La sugestión.
4. **Calibración.** Implica el establecimiento de bases claras de comparación: un grupo de control o un experimento “inicial” cuyos resultados sirvan de punto de partida.
5. **Paralelismo.** Indica la proximidad a situaciones naturales. El grado de paralelismo depende del objetivo del experimento: si se desea contrastar una teoría, el entorno del laboratorio debe satisfacer la teoría y no las de un mercado natural; si se desea analizar un fenómeno real debemos en la medida de lo posible tratar de replicar las condiciones en las que se produce el fenómeno. Los diseños experimentales extremadamente complejos a menudo resultan en situaciones difíciles de analizar y de entender para los sujetos.

El proceso del trabajo experimental queda resumido en el siguiente esquema:

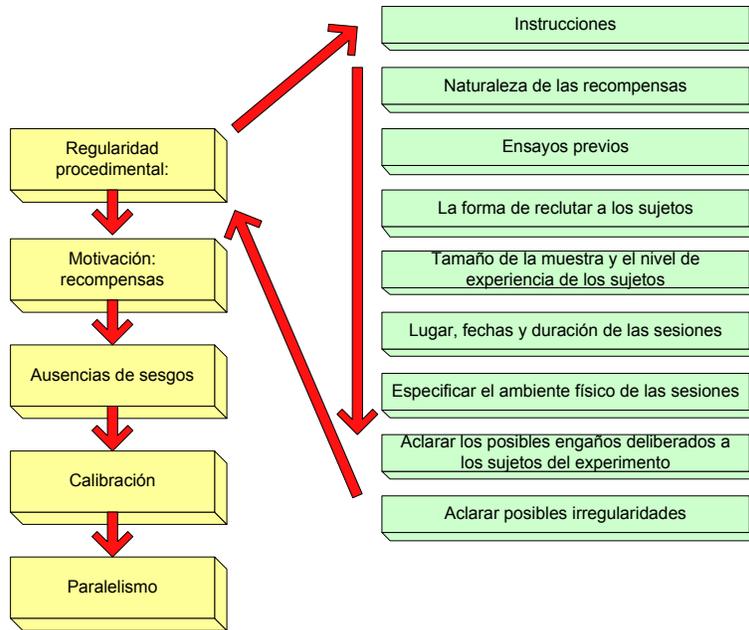


Figura 3.2 Proceso del trabajo experimental

Los errores más comunes que se pueden presentar en el trabajo de investigadores experimentales son de la siguiente naturaleza:

1. ***Instrucciones incompletas o sesgadas***, provocan una incorrecta comprensión de lo que se hace en el experimento, lo que evita tener una clara razón de la decisión adoptada por un sujeto en un momento dado.
2. ***Mala percepción de las recompensas***, provoca que la toma de decisiones se realice en base a expectativas difusas, confusas o equivocadas para el objeto perseguido en el diseño experimental.
3. ***Mala calibración de los resultados obtenidos***, producto de la inadecuada visión o perspectiva por parte del investigador.

4. *Manipular muchas variables simultáneamente*, impide establecer una vinculación causal entre variables independientes y variables dependientes, por lo cual es preferible concentrarse en aspectos más concretos.
5. *Inadecuado grado de complejidad del experimento*, es necesario que la complejidad seleccionada se ajuste a las pretensiones del diseño experimental.

Entre los diferentes requisitos a cumplir en el desarrollo de experimentos que se enlistaron anteriormente, el que se refiere a la regularidad procedimental es muy importante, razón por la cual abundaremos en los aspectos que le conciernen.

3.2.3 Replicabilidad y control

Tal y como se mencionó anteriormente, una de las ventajas de la experimentación es que permite a otros investigadores reproducir el experimento para verificar los resultados obtenidos previamente. La replicabilidad se refiere a la posibilidad de reproducir el experimento con todas sus condiciones y, así verificar los hallazgos en forma independiente.

Smith [78] relaciona el problema de “replicación” con la teoría Duhem-Quine, lo que implica que en Economía la replicación es inadecuada ya que no son exactamente iguales al caso original. Los economistas experimentales rara vez tratan de replicar exactamente un experimento en todas sus instrucciones, procedimientos, tipo de sujetos y resto de condiciones, y sólo acostumbran hacerlo cuando los resultados de un estudio difieren de los resultados de estudios previos a fin de determinar el porqué.

Si se realiza un experimento “replica” de uno anterior para evaluar la robustez de los resultados obtenidos, y realizando una variación de algunas hipótesis

auxiliares se obtienen resultados indistinguibles para ambos experimentos, se puede decir que el nuevo experimento proporciona más soporte a la teoría inicial, Smith considera que esta situación es mejor que realizar una “replica pura” que no añade más información o soporte a la teoría inicial¹⁹.

El control se refiere a la capacidad para manejar las condiciones del entorno, con el fin de evaluar teorías y políticas alternativas, a través de procedimientos que garanticen, en el caso ideal, que los cambios producidos en la variable dependiente son resultado de la manipulación de la variable independiente. En el caso que se sospeche que algunas variables pueden estar afectando el desarrollo del experimento, se pueden aplicar algunas técnicas que permiten eliminarlas:

1. **Eliminación:** lo mejor que podemos hacer con una variable perturbadora del experimento es eliminarla, en caso de no ser posible se debe recurrir a otras técnicas.
2. **Mantener constantes las condiciones:** en caso de certeza o sospecha de que una variable puede estar afectando a la variable dependiente, es conveniente mantenerla constante durante todo el experimento a todos los sujetos, a fin de producir un error sistemático en todos los casos pero que no afecte nuestras comparaciones.
3. **Balanceo:** consiste en equilibrar las condiciones que suponemos pueden influir en los resultados del experimento.
4. **Contrabalanceo:** se aplica a experimentos en los cuales los sujetos son expuestos a diversas condiciones experimentales cuyo orden de presentación puede afectar a los resultados; para lo cual, cada condición

¹⁹ Smith cita a Allan Franklin que señala que si deseamos conocer la hora correcta, es más informativo comparar nuestro reloj con el de otra persona, que mirar nuestro reloj dos veces.

debe presentarse a cada sujeto un número igual de veces en cada ensayo y de tal manera que al finalizar todos los ensayos, cada condición haya aparecido antes y después de todas las demás; con lo cual se hacen aleatorias las distintas presentaciones para evitar el error progresivo.

5. **Conversión de una variable extraña en variable experimental:** esta técnica se aplica en el área de la psicología, consiste en considerar a la variable extraña sobre la que tenemos poder de manipulación, como una variable más del experimento; normalmente es necesario recurrir a técnicas estadísticas de manera complementaria.
6. **Control por sujeto:** técnica también aplicada en el área de la psicología, para el caso de sujetos únicos al cual se le hace pasar por todas las condiciones, con lo cual sus variables orgánicas no influyen en los resultados al ser éstas constantes durante todo el desarrollo del experimento²⁰.

3.2.4 Instrucciones

Las instrucciones deben ser, ante todo, claras, completas y breves en la exposición para todos los sujetos que participan en el experimento, a fin de que su concentración no se vea afectada por el agotamiento. No debe aparecer ninguna frase que pueda sugerir al sujeto el tipo de comportamiento esperado por el experimentador.

Se puede realizar un control previo de asimilación de las instrucciones, que permita detectar a los sujetos que tengan dificultades en la comprensión del

²⁰ Esta técnica es muy empleada en investigaciones sobre aprendizaje animal

experimento y eliminarlos, a fin de que no interfieran en el desarrollo del experimento.

La realización de experimentos piloto es una buena oportunidad para detectar y corregir problemas que se generen por errores en las instrucciones.

Las instrucciones pueden realizarse mediante papel, vía oral o informática, o cualquier combinación de estas. El experimentador puede realizar aclaraciones verbales durante las sesiones siempre que éstas, sean controladas y no induzcan un comportamiento beneficioso para los intereses del experimentador.

3.2.5 Motivación y recompensa

En los experimentos económicos el estímulo es monetario, por lo tanto, las decisiones individuales de los sujetos deben tener un efecto económico a través del establecimiento de un esquema de premios y castigos; por lo que se requiere que los sujetos perciban las consecuencias que sus decisiones tienen sobre los resultados finales, y que la rentabilidad de tomar una decisión o negociación supere los costos subjetivos originados por su realización

Smith [81] en su Teoría del Valor Inducido, considera que es indispensable ejercer el control de las preferencias de los individuos que participan en el experimento económico, para ello, es necesario definir de manera clara un sistema de recompensas y una estructura de “propiedades” durante el experimento. Para lograr el control, Smith define cinco reglas:

1. **No saciedad.** Ante dos alternativas, los individuos siempre prefieren la alternativa que más beneficio les reporta. En este sentido, Bardsley [82] puntualiza que el beneficio total posible para un individuo al final del experimento no debe saciarlo.

2. **Claridad.** El beneficio del individuo se incrementa cuando obtiene buenos resultados, y se disminuye con malos resultados. Los resultados son definidos en función de la inducción que desea el experimentador.
3. **Dominancia.** La estructura de recompensas domina cualquier costo o valor subjetivo asociado a la participación en el experimento.
4. **Privacidad.** El individuo sólo recibe información sobre sus beneficios, se evitan así sentimientos de envidia o altruismo.
5. **Paralelismo.** Proposición de que los resultados obtenidos en el experimento, deben ser iguales a los que se obtendrían en la realidad si se mantiene el *ceteris paribus*. Con el cumplimiento de las cuatro reglas anteriores prácticamente se asegura esta condición.

A pesar del cumplimiento de las reglas anteriores, nunca existe la certeza de que la estructura elegida de premios y castigos sea la adecuada, ya que siempre existe una combinación de fuerzas motivadores, pueden existir sujetos que actúan únicamente por el deseo de hacer bien las cosas, u otros que tienen comportamientos erráticos o inconscientes independientes de la estructura de incentivos. Guala *Op. Cit.* avisa que se pueden realizar experimentos económicos válidos rompiendo todas o alguna de las cinco reglas, y que éstas, deben verse como condiciones hipotéticas y no como axiomas que deban darse por sentado.

Los ensayos previos se pueden realizar sin incentivos, ya que a partir de estos ejercicios se puede desarrollar el esquema adecuado al experimento. En el desarrollo del experimento se puede emplear una moneda imaginaria con un valor de conversión desconocido para el sujeto, el cual puede ser diferente para cada uno de los participantes del experimento y así evitar la comparación interpersonal.

El uso de monedas ficticias conlleva el riesgo de ilusión monetaria, consistente en un efecto de sobrevaloración de las pérdidas y ganancias obtenidas en el experimento, lo cual, puede ocasionar que los sujetos infravaloren los efectos de sus decisiones afectando la información que se obtiene en el experimento.

Se debe de contemplar un pago a los sujetos por el simple hecho de asistir al experimento independientemente de lo que puedan ganar o perder en el laboratorio.

3.2.6 Ensayos

Es recomendable la realización de ensayos, ya que nos permiten explorar aspectos decisivos para el buen desarrollo del experimento, tales como mostrar tendencias de resultados experimentales, necesidad de ajustar técnicas de control, y otros.

Los ensayos nos permiten observar los errores potenciales del diseño experimental, instrucciones incompletas, el grado de dificultad del experimento y posible incorporación de nuevas variables y parámetros.

Para el desarrollo de los ensayos puede emplearse la muestra o muestras que se han de emplear en la sesión experimental definitiva.

3.2.7 Muestras

Cuando existe incapacidad de disponer de todos los sujetos de la población nos vemos en la necesidad de recurrir a muestras, para lo cual debemos considerar tres parámetros:

1. **Aleatoriedad:** La selección de los sujetos que conforman la muestra debe ser aleatoria y no discrecional, para evitar que el experimentador pueda

manipular las muestras en conveniencia de sus objetivos deseados. La aleatoriedad es necesario ya que:

- Previene la aparición de sesgos.
- Evita la dependencia entre observaciones.
- Confirma la validez de los procedimientos estadísticos más comunes.

Es conveniente que no exista vínculo entre sujetos e investigador para evitar un efecto de actuación conforme a lo que desearía el experimentador; también es mejor que los sujetos en un primer momento sepan lo menos de la técnica y del objeto de investigación. Esto último puede no ser aplicable cuando se requiere cierta preparación por parte de los sujetos empleados en el experimento.

2. **Número de muestras:** Puede utilizarse una sola muestra que cuente con autocontrol a través del empleo de los contrastes para muestras dependientes en cuanto a los resultados, o bien más muestras donde una opere como referencia ante el cambio de los estímulos, o en función del tipo de contrastes necesarios para garantizar aquellos resultados que han sido obtenidos.
3. **Tamaño de las muestras:** El tamaño condiciona la técnica estadística a emplear, en el caso de muestras menores de 30 sujetos se empleará la inferencia no paramétrica.

3.2.8 Sesiones

El número de sesiones a desarrollar dependerá directamente del número de tratamientos²¹ considerados en el diseño experimental. En caso de existir dos o más tratamientos, puede resultar de interés variar el orden de aplicación de los tratamientos para observar que el entorno del laboratorio no condiciona las reacciones posteriores obtenidas al aplicar otro tratamiento diferente.

Es conveniente que la duración de las sesiones experimentales no sea muy prolongada en el tiempo, para evitar cansancio en los sujetos y sus efectos sobre las respuestas a los estímulos aplicados.

3.2.9 Repetición del Experimento

La varianza de la estimación de una media es σ^2/n . Si se desea identificar diferencias entre dos tratamientos existen dos opciones:

1. Disminuir σ^2 , lo que lleva al diseño de bloques base²² para obtener un material experimental lo más homogéneo posible.
2. Aumentar n , que conduce a repetir o replicar el experimento.

En la práctica se emplean ambos métodos, en el laboratorio suele ser más fácil tomar una pequeña muestra homogénea (reducción de σ^2), en experimentación

²¹ Los tratamientos o factores son las distintas situaciones a las que un conjunto se enfrenta, la alteración de alguno de los parámetros-condiciones del diseño experimental realizado por el experimentador supone un nuevo tratamiento que seguramente afectará el resultado.

²² Configuración de variables que se mantienen fijas

de campo suele ser necesario aumentar n para cubrir los efectos de las variables fuera de control.

Es necesario distinguir entre la repetición de cada observación y repetir cada experimento. Si se toman dos medidas seguidas en cada condición experimental se tiene la observación repetida pero no necesariamente el experimento repetido. Si se desea repetir el experimento es conveniente repetirlo todo desde el principio, ya que la variabilidad de dos medidas seguidas suele ser menor que la presente entre dos observaciones más separadas.

3.2.10 Validez de los experimentos

La validez de los datos empleados y obtenidos en el experimento se diferencia en dos tipos:

3. **Validez interna:** Tiene que ver con las relaciones propias generadas en el desarrollo del experimento; se refiere al grado de relación o afectación entre las variables independiente y dependiente. En el diseño del experimento se deben eliminar o anular cualquier otra variable que afecte a la variable dependiente, a fin de excluir otras posibles explicaciones a los resultados obtenidos en el experimento.
4. **Validez externa:** Mide la capacidad de generalizar los resultados del laboratorio a la realidad; si se ha utilizado una muestra representativa de la población se puede tener confianza en la generalización.

3.3 Elementos de un experimento económico

Los economistas experimentales toman proposiciones de la teoría económica y la prueban con gente real en situaciones controladas [83]; sin embargo, antes de

desarrollar cualquier experimento económico es necesario definir los tres elementos básicos que le componen [72][84]:

1. **Entorno de laboratorio.** Especifica las dotaciones iniciales, preferencias y costos incurridos. Este entorno es controlado utilizando premios monetarios para inducir la configuración específica valor/costo que deseamos.
2. **Institución.** Define los mensajes de comunicación que se emplearán en el mercado (pujas de compra, pujas de venta, etc.), las reglas que gobiernan el intercambio de información, y las reglas que controlan el establecimiento de contratos.
3. **Comportamiento.** Se observa el comportamiento de los sujetos participantes en el experimento como una función de la institución y el entorno que constituyen las variables controladas.

En un experimento económico un grupo de personas, seleccionadas especialmente para el experimento, reciben un conjunto de instrucciones que les brindan una representación esquemática de una situación económica específica; en esta situación ellos juegan el papel de los agentes económicos (compradores, vendedores y otros). Los participantes pueden elegir entre múltiples opciones, las cuales implican ganancias monetarias específicas. Los experimentadores observan y registran las decisiones tomadas por cada uno de los participantes en el experimento y emplean los datos como una fuente de información sobre el problema económico estudiado [72].

La correcta selección de los sujetos participantes en cualquier experimento es vital para los resultados fiables. Friedman y Cassar [85] consideran que los estudiantes universitarios a nivel licenciatura son una muy buena opción por cuatro razones:

1. Al realizar un experimento en una universidad, son un recurso abundante, disponible para reclutar y participar.
2. Tienen un costo de oportunidad bajo.
3. Suelen tener una curva de aprendizaje con una gran pendiente.
4. Suelen desconocer las hipótesis analizadas.

Así mismo, consideran que estudiantes de doctorado y profesores no son adecuados, ya que a menudo no responden a los incentivos propios del experimento, ya que su interés recae en qué y cómo se está investigando.

Por otra parte, Chaudhuri [86] considera excesiva la crítica de algunos detractores de la economía experimental por el uso de estudiantes sin experiencia sobre algunos temas analizados, ya que en la mayoría de los experimentos que involucran toma de decisiones su comportamiento no varía demasiado del desarrollado por participantes con experiencia sobre el tema. Adicionalmente señala que en algunos experimentos, la experiencia puede ser una espada de doble filo, ya que en ocasiones los jugadores experimentados tratan de aplicar su sabiduría en el tema a problemas en apariencia similares a retos superados, pero que en realidad son bastante diferentes.

3.4 Aplicación del método experimental en la Economía

Los diversos experimentos económicos que se han desarrollado a la fecha se pueden agrupar en tres categorías fundamentales:

1. ***Teoría de la decisión individual.*** Tratan de avanzar en la comprensión de la teoría de la utilidad esperada y examinar el contenido de sus axiomas. El primer trabajo desarrollado en esta área fue desarrollado por

L.L. Thurstone²³ en 1931 para determinar la curva de inferencia de los individuos.

2. **Organización industrial.** Enfocados a la operación y funcionamiento de los mercados. Chamberlin en 1948 inicia las investigaciones rechazando la teoría de la competencia perfecta. Smith ha desarrollado una experimentación muy amplia en esta área, tal como se verá en las secciones siguientes de este Capítulo.
3. **Teoría de juegos.** Se enfocan en los juegos no cooperativos analizando las implicaciones conductuales derivadas de éstos. En 1950 Dresher y Flood conducen el experimento denominado el K.

Observando las fechas de realización de los primeros experimentos se puede concluir que llevan muchos años aplicándose a la Economía, sin embargo, no ha sido hasta principios de la década de 1970 cuando se empezó a desarrollar gran cantidad de trabajos de investigación, pasando de ser considerado una curiosidad intelectual a un instrumento útil para realizar investigaciones de una gran cantidad de fenómenos económicos.

Smith [78] señala que existen siete prominentes razones para que los economistas lleven a cabo experimentos:

1. **Probar una teoría o elegir entre varias de ellas.** Verificamos una teoría comparando su mensaje o las implicaciones de sus resultados con las observaciones experimentales. Cuanto mayor es la frecuencia con la que las observaciones son consistentes con las predicciones de dicha teoría

²³ La mayoría de los autores consideran este experimento como el primero en la historia de la economía experimental, sin embargo existen algunos autores que consideran que este honor corresponde al experimento realizado por Bernouilli en 1738 relacionado a la Paradoja de San Petersburgo.

en el contexto de un diseño en el cual dichas consistencias no puedan ocurrir por casualidad, mejor es la teoría.

2. ***Explorar las causas del fallo de una teoría.*** Cuando las observaciones de un experimento fallan en la conformación de las implicaciones de la teoría, primeramente es necesario revisar el diseño (entorno, institución), a fin de asegurarse que el fallo proviene de la teoría. En el caso de que el diseño sea correcto y la teoría falla, se hace necesario intentar un examen experimental que descubra las causas del fallo.
3. ***Establecer regularidades empíricas como base para una nueva teoría.*** Las teorías bien formuladas en muchas ciencias suelen ir precedidas por mucha observación²⁴, la cual estimula la curiosidad por encontrar regularidades documentadas. La construcción de teorías producto de la acción experimental directa puede ser mucho más fructífera que la pura especulación matemática sobre reflexiones construidas, a su vez, en el mismo terreno estrictamente teórico y apriorístico [72].
4. ***Comparar entornos.*** La comparación de entornos empleando la misma institución permite una investigación sobre la robustez de la institución. El objetivo es valuar la teoría bajo condiciones extremas en el entorno, a partir de las cuales las propiedades establecidas de una institución pueden comenzar a fallar.
5. ***Comparar instituciones.*** Usando idénticos entornos, pero variando las reglas de intercambio en el mercado es un modo de establecer las diferencias comparativas entre distintos marcos institucionales.

²⁴ Acompañadas de las consiguientes críticas por el uso de la inferencia como punto de partida de la formulación de la teoría.

6. ***Evaluar propuestas políticas.*** Una medida de política económica es susceptible de contrastación experimental si, de alguna manera, el agente económico y sus decisiones están implicados en los resultados más o menos esperanzadores de la propuesta sugerida. Entidades privadas y gubernamentales han financiado estudios sobre los incentivos de intercambio “off-floor” en mercados de subasta doble continua, instituciones alternativas para subastar permisos de emisión, mecanismos para asignar satélites, entre otros. Los experimentos de laboratorio no ofrecen una respuesta absoluta para algunas interrogantes dentro de la Economía, en cambio ofrecen un modo rápido y eficaz de detectar fallos en los mercados y las políticas antes de que las ideas y las teorías se conviertan en iniciativas públicas [87]

7. ***El laboratorio como un banco de pruebas para el diseño de instituciones.*** A diferencia del punto 5, aquí se busca desarrollar la capacidad creativa para el desarrollo de nuevos diseños.

Kagel y Roth [74] coinciden en que existen múltiples razones para realizar experimentos, adicionalmente sugieren que pueden clasificarse de manera general dependiendo de quién lo realiza y a quién va dirigido:

1. ***Hablar con teóricos.*** Incluye experimentos diseñados para probar las predicciones de teorías formales bien articuladas, y observar regularidades no explicadas en entornos controlados que permitan realizar estas observaciones con un mínimo grado de ambigüedad en relación con la teoría. Por sus características estos experimentos forman parte del diálogo entre teóricos y experimentadores.

2. ***Búsqueda de hechos.*** En esta categoría se incluyen aquellos experimentos que estudian los efectos de variables sobre las cuales la teoría existente tiene poco que decir. Comúnmente estos experimentos están motivados por la existencia de fenómenos interesantes e

inexplicables, se diseñan para aislar las causas de las regularidades conocidas, variando detalles en la manera en que fueron conducidos los primeros experimentos. Este tipo de experimentos forman parte del diálogo entre experimentadores, y suelen estar justificados para tratar de comprender mejor o analizar anteriores observaciones experimentales.

3. ***Susurrar a los oídos de los príncipes***. Son experimentos desarrollados para el diálogo entre los experimentadores y los responsables de toma de decisiones en la sociedad (*policy makers*). Estos experimentos suelen estar dirigidos a las entidades regulatorias, ya que analizan el efecto de cambios en la manera en que el mercado está organizado. El entorno diseñado en los experimentos trata de simular el entorno natural en donde se pretende efectuar la acción derivada de la decisión política.

Si bien la mayor parte de los estudios experimentales difícilmente pueden ser clasificados en una única categoría, esta clasificación sugiere que los experimentos pueden potencialmente desempeñar una actividad en muchas de las cosas que hacen los economistas. Así mismo, los experimentos no sólo se pueden emplear para refinar teorías referenciadas a individuos o pequeños grupos, sino que también aplican para grandes mercados, organizaciones industriales y microeconomía.

3.4.1 Experimentos económicos desarrollados en mercados eléctricos

Los avances en la tecnología y la teoría económica han hecho posible la desregulación de instituciones, y los experimentos económicos son la mejor herramienta para construir e investigar estas nuevas instituciones, para hacerlas más valiosas y eficientes [88]. En la década de los 90s del siglo pasado, se incrementó el uso de experimentos económicos para testar cambios regulatorios antes de su aplicación, tal como un “túnel de viento regulatorio”, ya que éste

permite ahorrar grandes costos para los contribuyentes, así como reducir la incertidumbre en los consumidores, empresas y reguladores. Smith [89] considera que el laboratorio debe utilizarse como banco de pruebas para examinar nuevas instituciones, modificar sus reglas y características de implementación a la luz de los resultados de las pruebas.

Los experimentos económicos con seres humanos difieren de las simulaciones en ordenador, pero pueden ser complementarios. En las simulaciones con ordenador, los agentes del mercado se comportan en la manera que son programados que se comporten. En los experimentos con humanos, el investigador intenta inducir un patrón de comportamiento en los agentes, sin embargo, éstos pueden seguir estrategias y comportarse oportunistamente en formas que el investigador no puede anticipar, y por lo tanto, estos comportamientos no pueden ser programados en una simulación por ordenador. Otro de los grandes beneficios de los experimentos con humanos es su habilidad de captar algunas realidades cognitivas de la interacción entre los humanos y la infraestructura física de redes complejas [88].

La literatura sobre métodos experimentales aplicados a los mercados eléctricos es bastante reciente, y esta ligada al inicio de los procesos de liberalización de estos mercados. La contribución de la economía experimental en este campo es poca si se compara con las obtenidas en otros campos, tales como la teoría de juegos, toma de decisiones y teoría de subasta entre otros. Esta escasez es debida principalmente a la novedad del enfoque, las barreras de entrada a su entendimiento y la complejidad de las características de los sistemas eléctricos [90].

En 1984, la Arizona Corporation Commission (ACC) solicitó un estudio sobre desregulación del sector eléctrico a V. Smith y su grupo [91] de la Universidad de Arizona. En este estudio, se aplicaron por primera vez experimentos económicos en sistemas eléctricos. El resultado de la investigación concluyó que era posible llevar a cabo la descentralización de las funciones del sistema

eléctrico. La ACC consideró que la propuesta era impráctica, idealista y políticamente inviable.

En Australia, en 1993, V. Smith y S. Rassenti y representantes gubernamentales del sector eléctrico desarrollaron experimentos económicos relacionados a prototipos de mercados mayoristas de energía, con la finalidad de demostrar la seguridad y eficiencia de estos, así como las posibles características de un mercado mayorista descentralizado cuya forma y extensión estaban por determinar. Posteriormente, en 1996 evaluaron una propuesta de prototipo de mercado, para lo cual condujeron nuevos experimentos de laboratorio que consideraban las características de diseño del mercado y de software; se desarrolló un experimento de transacciones electrónicas para dos semanas (con 7 horas por día), en los cuales se emplearon sujetos ajenos a la industria eléctrica capacitados para tal fin, logrando de esta manera que fuesen imparciales ante los cambios propuestos.

Otras investigaciones experimentales aplicadas a los mercados eléctricos, fueron realizadas por el Centro de Investigación de Ingeniería en Sistemas de Potencia, PSERC (por sus siglas en inglés); en las cuales, se probaron diseños de mercado para el Operador Independiente del Sistema de Nueva York. Las investigaciones se centraron en verificar el rendimiento de mercados que incorporan las restricciones técnicas de la red de transporte, tanto en la producción como en la entrega de la electricidad [92].

Posteriormente, y una vez aceptada la posibilidad de liberar el sector eléctrico, se han realizado diversos experimentos para el análisis de aspectos específicos de los nuevos mercados, tales como: análisis de eficiencia de los mecanismos de subasta, ejercicio de poder de mercado, participación de la demanda y congestión de la red de transporte. A continuación, en la tabla 3.1 se presenta una visión general de algunas investigaciones sobre mercados eléctricos, que emplearon experimentos económicos en su desarrollo

Autores	Objetivo de la investigación	Mecanismo de mercado	Características de la demanda	Características de la generación	Integración de la red de transporte
Bernard, Ethier, Mount, Schulze Zimmerman, Gan, Murillo Thomas, y Schuler [93] 1997	Eficiencia y precio (zonal)	Tres mecanismos: -Uniforme simple (precio= última oferta casada) - Uniforme simple (precio= primera oferta rechazada) -Inglesa	2 compañías	Dos escenarios: 6 compañías 2 compañías	Dos escenarios: -Red de 30 nodos -Sin restricciones
Ethier, Zimmerman, Mount, Thomas, y Schulze [24][25] 1997-1999	Eficiencia y precio (zonal)	Dos mecanismos: -Subasta uniforme -Subasta híbrida discrimin./inglesa	Determinada por el ISO	3 compañías (jugadores computarizados)	Red radial de 3 nodos
Denton, Rasseni y Smith [94][95] 1998-201	Impacto del poder de mercado en eficiencia, precios (zonal) y beneficios de los agentes.	Dos mecanismos: -Subasta doble uniforme única -Subasta doble uniforme continua	4 compañías, 3 perfiles de demanda, sin flexibilidad en la demanda punta.	Dos escenarios: 3 compañías 6 compañías	Red radial de 3 nodos.

Autores	Objetivo de la investigación	Mecanismo de mercado	Características de la demanda	Características de la generación	Integración de la red de transporte
Zimmerman, Bernard, Thomas y Schulze [13],[96]-[98] 1998-2000 96 [97][98]	Eficiencia y precio de mercado	Tres mecanismos: -Uniforme simple (precio= última oferta casada) - Uniforme simple (precio= primera oferta rechazada) -Híbrida Uniform./Discrim.	Determinada por el ISO	Tres escenarios: -6 compañías -4 compañías -2 compañías	2 áreas de operación
Thomas, Mount, Zimmerman y Murillo [19] 2000	Eficiencia y precio de mercado	Tres mecanismos: -Uniforme simple (precio= última oferta casada) -Discriminatoria simple -Híbrida Uniform./Discrim.	Determinada por el ISO	6 compañías	

Autores	Objetivo de la investigación	Mecanismo de mercado	Características de la demanda	Características de la generación	Integración de la red de transporte
Rassenti, Smith y Wilson [21][99] 2000-2003	Participación de la demanda vs. Poder de mercado y su efecto en precios (zonal)	Dos mecanismos: -Subasta doble uniforme -Subasta doble discriminatoria	4 compañías, 3 perfiles de demanda. Dos escenarios: - No flexible - Si flexible	Información completa en generación Dos escenarios: - 5 compañías sin poder de mercado - 5 compañías con poder de mercado	Red radial de 3 nodos
Olson, Rassenti, Smith y Rigdob[100] 2001	Eficiencia del Mercado diario y el Mercado de reserva	Dos mecanismos: -Subasta doble uniforme única -Subasta doble uniforme continua	8 compañías	9 compañías	
Thomas, Mount, Zimmerman, Schulze, Schuler, y Chapman [92] 2002	Participación de la demanda vs. Demanda inelástica y su efecto en precios	Dos mecanismos: -Subasta uniforme -Subasta uniforme con límite de precio máximo	Determinada por el ISO Dos escenarios: -Elástica -Inelástica	5 compañías	Red de 25 nodos sin congestión

Autores	Objetivo de la investigación	Mecanismo de mercado	Características de la demanda	Características de la generación	Integración de la red de transporte
Rassenti, Smith y Wilson [63] 2003	Participación de la demanda vs. Poder de mercado y su efecto en precios (zonal)	Subasta doble uniforme continua	4 compañías, 3 perfiles de demanda. Dos escenarios: - No flexible - Si flexible	Dos escenarios: - 5 compañías sin poder de mercado - 5 compañías con poder de mercado	Red radial de 3 nodos
Rassenti, Smith y Wilson [101] 2003	Participación de la demanda vs. Poder de mercado y su efecto en precios (zonal)	Subasta doble uniforme única	4 compañías, 3 perfiles de demanda. Dos escenarios: - No flexible - Si flexible	Dos escenarios: - 5 compañías sin poder de mercado - 5 compañías con poder de mercado	Red radial de 3 nodos
Kunz, Baumgärtner, Leuthold, Seeliger y Stolze [102][103] 2008-2009	Aversión al riesgo vs. Eficiencia y precios	Dos mecanismos: -Subasta doble uniforme -Subasta doble discriminatoria	Lineal y fija	5 compañías	

Tabla 3.1 Experimentos económicos aplicados a los mercados eléctricos

Tal y como se observa en la tabla anterior, en los estudios que se relacionan en ella, existen variaciones en la manera de representar la realidad de los mercados eléctricos, en este sentido, cabe recordar que *“aunque el diseño experimental se simplifique lo más posible, estos tipos de experimentos mantienen cierta complejidad, y mantienen un alto grado de paralelismo con la realidad, integrando un gran número de variables que describen la industria y el bien”* [90].

Los primeros estudios publicados analizan diversos mecanismos de subasta aplicables al mercado mayorista de energía, principalmente del tipo uniforme. Posteriormente una vez ya “clarificados” los mecanismos con mejores propiedades se realizan evaluaciones relativas a su susceptibilidad a la concentración de mercado por parte de los generadores, y su impacto en la eficiencia y precios del mercado.

En estudios posteriores, los investigadores han evaluado los beneficios de la participación de la demanda en la eficiencia del mercado y su capacidad de menguar el poder de mercado de los generadores en situaciones de concentración en el parque de generación.

Coincidiendo con la aplicación de la subasta discriminatoria en el mercado inglés, se realizan estudios comparativos entre este mecanismo de subasta y el mecanismo de subasta uniforme, por ser este último el mecanismo de subasta aplicado en la mayoría de los mercados liberalizados a nivel mundial.

Con excepción de las investigaciones realizadas por Zimmerman y su grupo, en el resto de trabajos la red de transporte no es incluida o bien no tienen un impacto importante en la investigación. Esta situación, se corresponde con la situación en el mundo real, ya que en la mayoría de mercados de energía los precios no son del tipo zonal.

En lo referente a la demanda, Smith y su grupo emplean siempre agentes que desempeñan un papel activo en el desarrollo de los experimentos; por el contrario Zimmerman y su grupo, casi nunca emplean agentes en este tipo de rol, ya que la demanda es definida por el Operador del sistema.

3.5 Conclusiones del capítulo

Los economistas experimentales toman proposiciones de la teoría económica y la prueban con gente real en situaciones controladas, la experimentación puede ser aplicada a la Economía ya que la teoría económica usa la deducción formal en la formulación de sus teorías. Smith considera que no se le debe dar mucha importancia a la tesis Duhem-Quine, ya que los resultados obtenidos a través de la economía experimental han mostrado ser positivos en sus aplicaciones.

Las etapas y requisitos exigidos en el proceso de experimentación deben ser respetados y ejecutados, a fin de poder obtener un producto con validez interna y así, atrevernos a extrapolar sus resultados a la realidad (validez externa), es muy importante alcanzar la regularidad procedimental que posibilite la replicación por parte de otros investigadores.

En el desarrollo del experimento es necesario definir las condiciones en las cuales se va a llevar a cabo (*Entorno de laboratorio*), las reglas para la transacción de productos e información (*Institución*) y observar la actuación de los agentes participantes (*Comportamiento*).

Un aspecto fundamental en el diseño del experimento económico son los incentivos a los agentes, ya que es indispensable para ejercer control sobre las preferencias; para ello es necesario definir una estructura de recompensas.

Para el diseño de la estructura de recompensas, normalmente se exige y basta con cumplir las cinco reglas definidas por Smith: No saciedad, Claridad,

Dominancia, Privacidad y Paralelismo. Sin embargo, se pueden considerar experimentos económicos válidos violando alguna o todas las reglas anteriores. Nunca existe la certeza absoluta de que la estructura de incentivos sea la adecuada, ya que siempre existe una combinación de fuerzas motivadoras, comportamientos erráticos o inconscientes en los sujetos participantes, por ello es necesario realizar ensayos previos que permitan aclarar la eficiencia de la estructura seleccionada.

Los experimentos con humanos son diferentes de las simulaciones en ordenador, pero pueden ser complementarias. Las principales ventajas de los experimentos con humanos son dos:

1. Captan algunas realidades cognitivas entre los humanos y la infraestructura física analizada.
2. Al permitir que los agentes se comporten libremente, éstos en ocasiones presentan comportamientos no esperados por el investigador, por lo cual, no es posible programar estos comportamientos en un ordenador.

Las principales desventajas de los experimentos son sin duda:

1. Requerimiento de infraestructura importante.
2. La necesidad de un equipo de trabajo para el desarrollo de cada una de las sesiones y etapas del experimento.
3. Su elevado coste económico.
4. La coordinación de un grupo de trabajo

Los experimentos han permitido remarcar la importancia de la estructura de las instituciones y de la cantidad de información disponible, han encontrado que existe una optimización inconsciente en los sujetos, que las estrategias dominadas no se eliminan, la eficiencia y la no-revelación son compatibles, y que la información común no produce expectativas o conocimientos comunes.

La aplicación de experimentos en mercados eléctricos se ha visto limitada debido a la novedad del enfoque, por las barreras de entrada a su entendimiento y la complejidad de los sistemas eléctricos. Sin embargo, los experimentos pueden aplicarse muy bien en los mercados eléctricos en la comparación de instituciones, mecanismos de mercado, análisis de eficiencia y detección de problemas, tal como lo señalan los estudios citados. Unos buenos ejemplos que aplican estas razones, son los experimentos realizados en Smith previos a la desregulación del mercado australiano y los llevados a cabo por el PSERC para el mercado de Nueva York.

Sin importar las simplificaciones asumidas para el diseño del entorno de laboratorio e instituciones, el experimento mantiene un alto grado de paralelismo con la realidad, esto es, a mismo *ceteris paribus*, los resultados del experimento son validos y extrapolables al mercado real.

Los experimentos pueden servir como “túnel de viento regulatorio” o “banco de pruebas” para la verificar la validez y funcionalidad de propuestas de cambios regulatorios antes de su implementación, a fin de reducir posibles costos no esperados por fallos en la nueva regulación.

En este Capítulo se han presentado las etapas y los requisitos metodológicos en una investigación experimental, además de señalarse los componentes de un experimento económicos válido. Todos estos conceptos han sido aplicados en función de la necesidad del objetivo de la presente tesis; el desarrollo de estos conceptos se realiza en el Capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA Y EXPERIMENTACIÓN DE LOS NUEVOS MECANISMOS DE SUBASTA APLICADOS AL MERCADO DIARIO

En el presente Capítulo, se expone la metodología experimental desarrollada para el análisis de los dos nuevos mecanismos de subasta desarrollados en la presente tesis. Primeramente, se presentan los objetivos y el alcance de la investigación desarrollada.

En la segunda parte del Capítulo, se realiza una descripción de la metodología experimental empleada para evaluar el nuevo mecanismo de subasta uniforme iterativa; además de definir el algoritmo del mecanismo de subasta, se detallan los elementos constitutivos del experimento económico diseñado para la validación del mecanismo propuesto.

Posteriormente, se expone la metodología experimental que estudia el nuevo mecanismo de subasta uniforme con recursos de demanda. Se describe el algoritmo del nuevo mecanismo de subasta y se detallan las características del experimento de evaluación.

4.1 Introducción

Los sistemas eléctricos liberalizados, como cualquier mercado de bienes carente de competencia perfecta, se enfrentan a problemas de eficiencia económica. En ocasiones, ésta se manifiesta a través del ejercicio de poder de mercado por parte de las compañías generadoras, o bien, en pérdidas de eficiencia en el proceso de establecimiento de los precios de mercado.

Las entidades reguladoras se enfrentan con grandes obstáculos en su labor de asegurar la eficiencia del mercado, principalmente debido al gran poder económico y social de las compañías generadoras. Esto se debe, a que la mejora de la eficiencia económica del mercado eléctrico, implica generalmente una transferencia del excedente de los generadores hacia los consumidores.

El diseño correcto del mecanismo de subasta en el mercado diario de energía, es fundamental para lograr la máxima eficiencia económica del mismo, ya que el precio del mercado diario es el componente más importante del precio final de la energía.

Con excepción de algunos mercados, los mecanismos de subasta se han mantenido prácticamente inalterados o con pequeñas modificaciones a lo largo de su operación. Las modificaciones importantes surgen generalmente cuando se detectan anomalías importantes en su operación.

Tal como se explicó en el Capítulo 2, los modelos de subasta uniforme y discriminatoria de oferta única aplicados a los mercados diarios de energía presentan problemas de eficiencia económica. Diversos estudios señalan los problemas de estos mecanismos ante el ejercicio de poder de mercado por parte de los generadores, volatilidad de precios y eficiencia general del mercado.

La participación de la demanda es reconocida como una herramienta importante y necesaria para mejorar la eficiencia de los mercados, sin embargo, en los

mercados eléctricos del día siguiente, sus recursos de participación no se emplean directamente en el mecanismo de creación de precios de mercado, por el contrario, se emplean como respuesta a situaciones de precios elevados o requerimientos técnicos.

4.2 Objetivos

Tal como se declaró en el Capítulo 1, la presente tesis tiene como objetivo mejorar la eficiencia de los mercados diarios de energía, además de disminuir la volatilidad de los mercados precios y persuadir a los agentes generadores de no ejercer poder de mercado.

Para lograr este objetivo, se han diseñado dos nuevos mecanismos de subasta que potencian la participación de la demanda en el proceso de establecimiento de precios en el mercado diario de energía:

1. **Subasta Uniforme Iterativa.** Basada en el principio de Walras, donde el Operador de mercado define el precio de la energía en el mercado, y lo notifica a los agentes; en respuesta, los agentes ofertas sus capacidades y requerimientos en función del precio. El proceso es iterativo hasta que el mercado alcanza el equilibrio.

La evaluación se realiza a través de uno experimento económico, empleando para ello un laboratorio económico Web para subastas iterativas y uniformes (WEL-IUA, por sus siglas en inglés) [104][105], el cual, permita en primera instancia la evaluación comparativa del mecanismo de subasta propuesto y la subasta uniforme convencional; y en segundo término, sirva también de plataforma base para análisis futuros de otros mecanismos de subasta.

2. **Subasta Uniforme con Recursos de Demanda.** Los agentes envían al Operador de mercado sus capacidades y requerimientos, éste, antes de definir el precio de mercado evalúa la aplicación de Recursos de Demanda a fin de incrementar la eficiencia del mercado y del sistema en su conjunto.

La evaluación se realiza a través de un experimento comparativo que analiza el impacto de su aplicación en el Mercado Ibérico de la Electricidad, para lo cual, se emplean datos históricos del mercado.

4.3 Subasta Uniforme Iterativa

Una vez definido el objetivo de la investigación, y las metodologías de validación de los mecanismos de subasta propuestos, se procede a desarrollar los pasos de la metodología experimental expuestos en el Capítulo anterior.

4.3.1 Identificación del problema

Actualmente, los mecanismos básicos de subasta aplicados a los mercados diarios de energía, uniforme y discriminatoria, enfrentan problemas en el proceso de establecimiento de precios. Es decir, presentan pérdidas de eficiencia económica, debido al ejercicio de poder de mercado por parte de los generadores, o bien, debido a la baja participación de la demanda en los procesos del mercado.

Estas pérdidas de eficiencia económica generalmente se manifiestan en precios altos de la energía, y en ocasiones por una gran volatilidad de los mismos.

4.3.2 Hipótesis

Las pérdidas de eficiencia económica en los mercados diarios de energía, se suelen presentar principalmente en los periodos de demanda Punta, es decir, aquellos periodos en los que la demanda es cercana a su máximo, y a la vez, muy próxima a la máxima capacidad de generación disponible²⁵. En los periodos de demanda Valle y Llano, dada la abundancia de recursos de generación es difícil que algún agente generador pueda ejercer poder de mercado.

La hipótesis principal de trabajo es, que incrementando la revelación de costos y valoraciones de los agentes del mercado a través de la aplicación de un mecanismo de subasta uniforme iterativa, se logra incrementar la eficiencia económica general del mercado, mitiga además el efecto del poder de mercado por parte de las compañías generadoras, y reduce la volatilidad de precios.

De acuerdo a los diferentes periodos de demanda a lo largo del día y su relación con la capacidad de generación disponible, se formulan las siguientes hipótesis secundarias:

- H1. En condiciones de competencia entre generadores, los mecanismos de subasta uniforme iterativa y uniforme, producen eficiencias y precios similares en todos los periodos de carga.
- H2. En condiciones de concentración en la generación, los mecanismos de subasta uniforme iterativa y uniforme, producen

²⁵ En el mercado diario, algunos generadores premeditadamente suelen ofrecer su energía a precios muy elevados a fin de que no se acepten sus ofertas, ya que se saben indispensables para resolver las restricciones técnicas de la red, por lo cual, sus servicios serán requeridos por el Operador del sistema, y por ende, su beneficio es mayor.

eficiencias y precios similares en los periodos de baja y mediana demanda (Valle y Llano).

- H3. En condiciones de concentración en la generación (factibilidad de poder de mercado) y periodos de gran demanda (Punta), el mecanismo de subasta uniforme iterativa presenta una mayor eficiencia y menor precio que el mecanismo de subasta uniforme

4.3.3 Variables relevantes

El comportamiento de los mercados diarios de energía, suele ser evaluado a través de los precios obtenidos en la casación y su eficiencia general. También es motivo de análisis el nivel de concentración de la capacidad de generación entre los agentes, ya que su impacto puede ser muy importante en la evolución del mercado. En base a lo anterior, durante el experimento económico, las variables a monitorizar son:

- Precio de mercado.
- Concentración de la capacidad de generación.
- Eficiencia general del mercado.

Precio de mercado

Se analiza su magnitud y variabilidad en los diferentes periodos de demanda durante el desarrollo del experimento.

Concentración de la capacidad de generación

El comportamiento del mecanismo de subasta uniforme iterativa se analiza en dos escenarios relativos a la distribución de la capacidad de generación entre los

agentes, escenario de competencia y escenario con concentración de generación que posibilita el ejercicio de poder de mercado. Estos escenarios se describen de manera más amplia en el punto 4.4.1.3.

Eficiencia general del mercado

Para el análisis de la eficiencia general del mercado, es necesario calcular en cada etapa el bienestar social $W(p)_e$ a través de la suma de los excedentes de los consumidores y productores, $E(p)_e$ y $\pi(p)_e$. En cada etapa, $W(p)_e$ se compara con el bienestar social ideal $W(p)_{e-ideal}$, éste último, se corresponde al bienestar social que se obtiene cuando todos los agentes compradores ofertan la totalidad de sus necesidades energéticas OwC_i , a un precio igual al costo de sustitución OcO_i , y todos los agentes vendedores ofrecen toda su capacidad OwG_i a un precio igual al costo de producción OcG_i , es decir:

$$W(p)_{e-ideal} \Rightarrow \sum_j \sum_i OwG_{ij-MAX} * OpG_{ij-MIN} \wedge \sum_j \sum_i OwC_{ij-MAX} * OcC_{ij-MAX}$$

Dada la característica de no continuidad de las curvas de oferta y demanda en los mercados eléctricos, el precio de mercado pm que maximiza el bienestar social $W(p)$, puede no ser un valor único en cada etapa, sino que es un rango comprendido entre el precio más bajo de las ofertas de compra aceptadas en la casación (pmc), y el precio más elevado de las ofertas de venta aceptadas en la casación (pMv); es decir, $pm\{pmc, \dots, pMv\}$. Esta propiedad de $pm\{pmc, \dots, pMv\}$ Smith [67][68] lo define como Túnel de Precio Competitivo. Aplicando este concepto a los excedentes de los agentes y el bienestar social, podemos también hablar de un Túnel de Máxima Eficiencia. La representación gráfica de este concepto se observa en la figura siguiente:

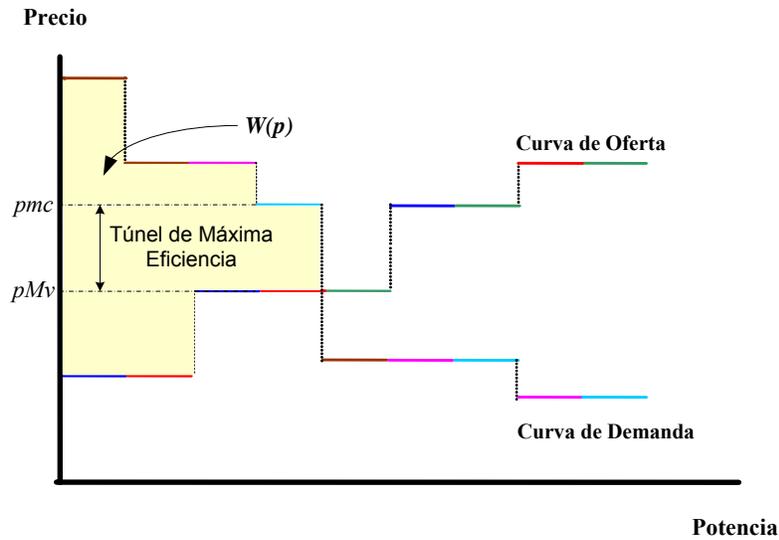


Figura 4.1 Túnel de máxima eficiencia del bienestar social.

Tal como se declaró en el Capítulo anterior, y es visible en la figura anterior, la variación del precio de mercado $pm\{pmc, \dots, pMv\}$ no afecta la magnitud del bienestar social $W(p)$, ya que únicamente se ve afectada la distribución de éste entre los agentes compradores y vendedores. Una de las funciones básicas del órgano de regulación, es definir cuál es precio de mercado en estas situaciones de túnel de máxima eficiencia, ya que el criterio empleado afecta la manera en que el bienestar social es distribuido.

En el experimento, el precio de mercado se define como el precio de la oferta de venta más cara casada, es decir, $pm = pMv$. Durante el desarrollo del experimento es posible que se presenten etapas en las cuales el pm es mayor que el pm_{ideal} y se alcance la eficiencia máxima. Así mismo, es posible alcanzar un pm_{etapa} igual al pm_{ideal} y sin embargo alcanzar eficiencias menores al ideal, esto debido a que se han transado menos unidades de energía que en caso ideal.

Por estas razones es importante monitorizar tanto la eficiencia como el precio de mercado en cada etapa, a fin de obtener una imagen más clara de la evolución del mercado y sus agentes.

4.3.4 Diseño del experimento

Tal como se comentó en el Capítulo anterior, es necesario realizar una descripción detallada del experimento, a fin de permitir la réplica del mismo por otros investigadores, y cumplir así con la propiedad de replicabilidad experimental. Para ello, se ha destinado la sección 4.4, en la que se realiza una descripción amplia del Entorno de laboratorio y de la Institución.

Para el desarrollo del experimento, se reclutaron estudiantes de Ingeniería Industrial y de Licenciatura de Administración en Empresas que cursaban el último año de estudios²⁶, tal como sugiere Friedman [85] y aplica Smith [21][63] en sus experimentos.

Dada la carencia de un Laboratorio Económico Experimental donde llevar a cabo las sesiones del experimento, la “portabilidad” del “laboratorio virtual” diseñado fue vital para la realización del experimento.

4.3.5 Establecer el grupo experimental y el grupo de control

El grupo experimental y de control, son un conjunto de agentes que se encuentran sometidos a mecanismos de subasta diferentes. El primero,

²⁶ Inicialmente se planteó el desarrollo de los experimentos con alumnos de la Universidad Politécnica de Valencia, pero debido a limitaciones presupuestales, se optó por deslocalizar el experimento, y desarrollarlos con alumnos del Instituto Tecnológico de Veracruz en México, ya éstos presentaban un costo de oportunidad bastante más bajo.

interactúa con el mecanismo propuesto (subasta uniforme iterativa), y el segundo, sometido a un mecanismo de subasta uniforme convencional.

La selección del mecanismo de subasta uniforme para el grupo de control, se debió a que este mecanismo es el que se encuentra operando en la mayoría de los mercados diarios en el mundo. No se realizó comparación alguna con la subasta discriminatoria, debido a que tal como se detalló en el Capítulo 2, no existen diferencias contundentes entre los resultados ofrecidos por esta subasta y los de la subasta uniforme.

En el análisis comparativo de los mecanismos de subasta uniforme iterativa y uniforme, el Entorno de laboratorio será el mismo en ambos casos, es decir, las dotaciones son las mismas. El Entorno de laboratorio se describe ampliamente en el punto 4.4.1

Con la finalidad de anular el efecto de cualquier otra variable que impacte en las variables monitorizadas, y garantizar así la validez interna del experimento, se opta por un diseño experimental equilibrado de 2x2, con cuatro sesiones para cada caso. El diseño se puede observar en la tabla siguiente:

Experimento (No. sesiones, No. Días, No. Etapas)		
	Grupo Experimental Subasta Iterativa	Grupo de control Subasta Uniforme
Competencia	(4,12,48)	(4,12,48)
Concentración de Generación.	(4,12,48)	(4,12,48)
Subtotal	(8,24,96)	(8,24,96)
Total	(16,48,192)	

Tabla 4.1 Diseño del experimento.

4.3.6 Aplicación del estímulo al grupo experimental

A los participantes del experimento se les aplica un estímulo económico, tal como ocurre en la gran mayoría de los experimentos en Economía. Siguiendo el criterio aplicado por Olson *et al* [100], se decide que la magnitud de la retribución al jugador sea en función de dos términos, uno fijo y otro variable. El término fijo corresponde a la retribución mínima por participante (2,5€), y el variable en función de los beneficios obtenidos en el experimento.

Se cuenta con una “bolsa” de beneficio extra de 50 €, la cual se reparte entre los jugadores en función del beneficio obtenido al finalizar el juego, para ello se compara el beneficio logrado por el jugador en la sesión experimental, con el beneficio que obtendría en caso de que todos los participantes ofertaran siempre a costo marginal. De esta manera, se obtiene que el costo de cada una de las 16 sesiones del experimento sea constante, en este caso 70 €²⁷. En una condición ideal en la cual todos los agentes siempre revelan sus costos y valoraciones, el beneficio obtenido por de cada agente es 12,5 € y; debido al bajo costo de oportunidad de los individuos participantes en el experimento, el beneficio ofrecido a los participantes otorga a la estructura de beneficios diseñada la propiedad de “Dominancia” explicada en el punto 3.2.5.

Tal como se detalló en el Capítulo 3, nunca existe la certeza de que la estructura elegida de estímulos sea la adecuada, ya que los agentes están sujetos a una combinación de fuerzas motivadoras difíciles de acotar. Existen sujetos que actúan únicamente por el deseo de hacer bien las cosas, y otros que tienen comportamientos erráticos o inconscientes independientes de la estructura de

²⁷El coste final del experimento no se limita tan solo a las 16 sesiones reportadas, ya que debe agregársele el coste de las sesiones de prueba y de las sesiones descartadas, además de otros costes de material, personal e indirectos.

incentivos; en otros casos, podemos encontrar con sujetos que poseen una curva de aprendizaje con muy poca pendiente.

Durante el desarrollo de más de una sesión experimental se detectó un jugador del tipo “saboteador inconciente”, que con su comportamiento “dinamitó” la institución definida en el experimento, y por ende, los resultados de la sesión quedaron invalidados. Esta anulación provocó la repetición de la sesión con el consiguiente incremento del gasto en recursos económicos, humanos y materiales.

Dada la amarga experiencia con los “saboteadores inconcientes” en el desarrollo de las primeras sesiones, se decidió crear un estímulo económico adicional, que incrementase la pendiente de aprendizaje de los individuos. El estímulo adicional consistió en una multa económica por no vender o comprar la totalidad de la energía de los dos primeros generadores o cargas asignadas en cada etapa. La cuantía de la multa es equivalente a la ganancia promedio por etapa de cada jugador.

4.3.7 Evaluación de los resultados y análisis de la teoría

Se realizará un análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados obtenidos, a fin de poder determinar si las hipótesis se han cumplido, es decir, si se presentan diferencias significativas al comparar el grupo experimental y el grupo de control.

4.4 Experimento económico

Una vez definida la metodología experimental, se procede a detallar lo referente al diseño del experimento. Tal como se definió en el Capítulo anterior, un experimento económico está compuesto por tres partes: Entorno de laboratorio,

Institución y Comportamiento. A continuación se detallan las características de las dos primeras:

4.4.1 Entorno de laboratorio

En la definición del Entorno de laboratorio, se cuantifican las dotaciones de los agentes a lo largo del experimento, en este caso, se definen las características de la red de transporte del sistema eléctrico, los diferentes perfiles de carga y generación a lo largo del día, los costos de producción y sustitución de cada uno de los agentes.

4.4.1.1 Sistema eléctrico

En el experimento no se consideran restricciones ni pérdidas en la red de transporte, tal como sucede en la mayoría de los mercados spot de energía y en gran parte de los estudios efectuados con experimentos económicos.

4.4.1.2 Periodos de demanda

Al igual que en la mayoría de los experimentos económicos aplicados a mercados eléctricos, se han definido tres tipos de periodos de demanda Valle, Llano y Punta. A lo largo del día, la demanda presenta un patrón de evolución Llano-Punta-Llano-Valle. Las características de estos periodos se han definido tomando en consideración las curvas promedio del sistema eléctrico español en el año 2009 [106] Los periodos de demanda se describen a continuación:

Valle. La demanda total en este periodo es equivalente al 40% de la demanda punta.

Llano. La demanda total en este periodo es equivalente al 65% de la demanda punta.

Punta. La demanda total en este periodo es equivalente al 90% de la oferta disponible.

La generación disponible a lo largo del día se mantiene constante, a fin de simplificar el proceso de toma de decisiones de los jugadores con rol de generadores. Las curvas agregadas de generación y demanda para cada periodo se observa en la figura siguiente:

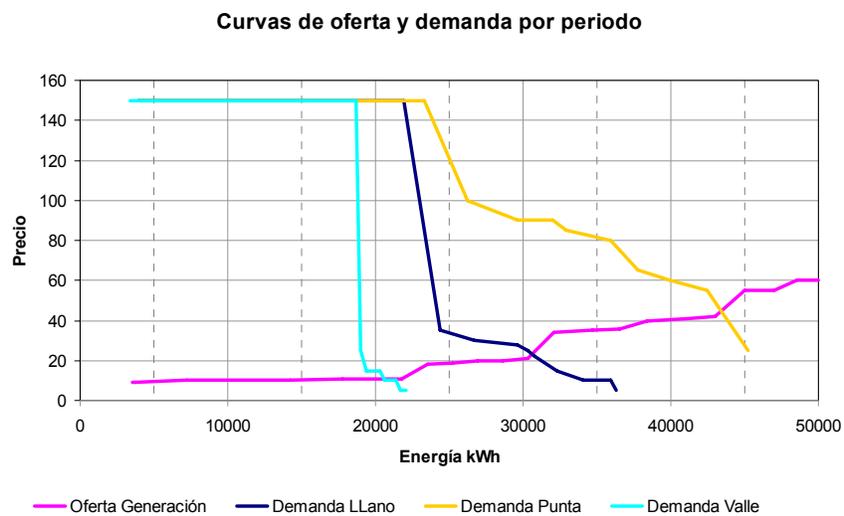


Figura 4.2 Curvas agregadas de oferta y demanda en el experimento.

Cada sesión experimental consta de 12 días, por lo cual, los jugadores deben someterse a un total de 48 etapas. Cada sesión se replica cuatro veces, tal como se detalló en la tabla 4.1

4.4.1.3 Distribución de los recursos de generación y demanda

Tomando en consideración las curvas agregadas de oferta y demanda, las dotaciones a los generadores se realizan de tal manera que en un escenario se den condiciones de competencia, y en otro, se posibilite el ejercicio de poder de

mercado (concentración de generación). En ambos casos, la dotación de los agentes consumidores se mantiene constante.

En la condición de competencia en generación se establecen cinco agentes vendedores de características similares, tal como se señala en el Capítulo 2. Para la condición de concentración de generación, se han empleado sólo cuatro agentes vendedores, y dos de ellos poseen conjuntamente más del 66% de la capacidad total de generación.

En el lado de la demanda, tan sólo se establecen tres agentes compradores de características similares, esto se debe a dos razones: la primera, en este experimento no se analiza el efecto de la competencia en la demanda; y segunda, reducir el costo de cada sesión un 20% en comparación con el escenario de competencia en la demanda.

La dotación de unidades de carga y generación, costos de sustitución y de producción se muestran en las figuras siguientes:

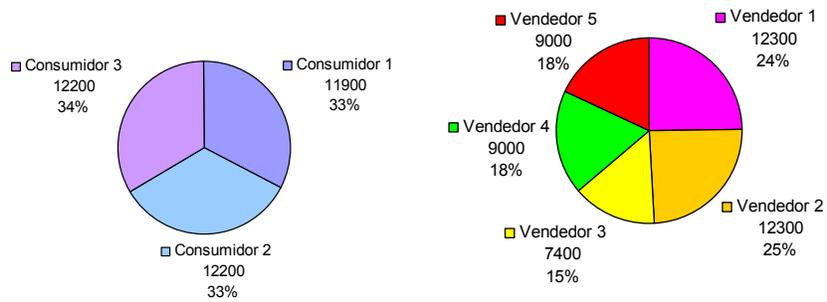
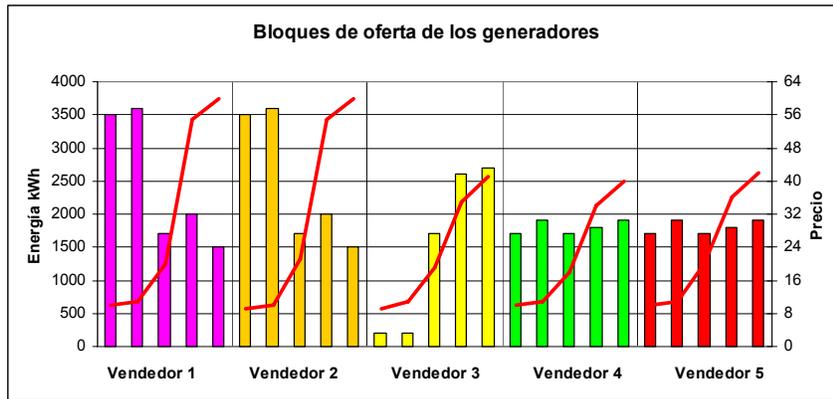
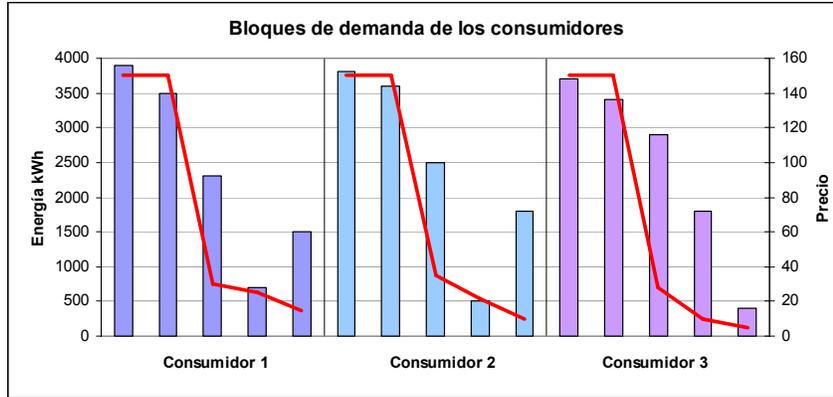


Figura 4.3 Dotación de los agentes en el escenario de competencia

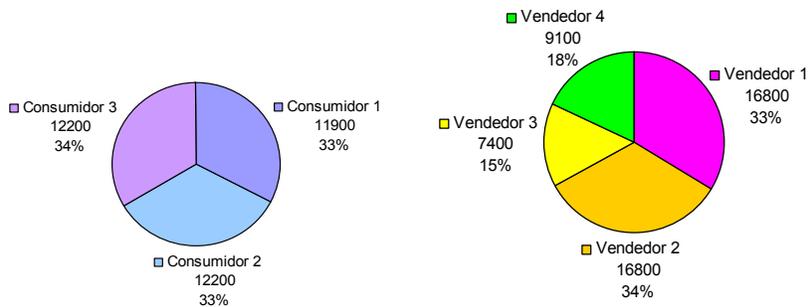
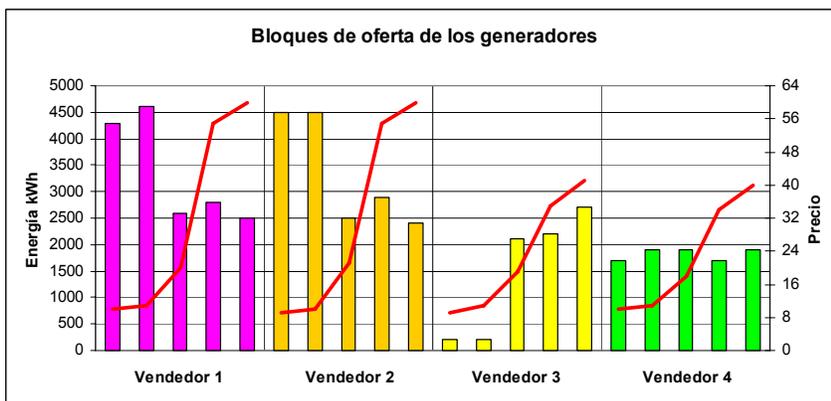
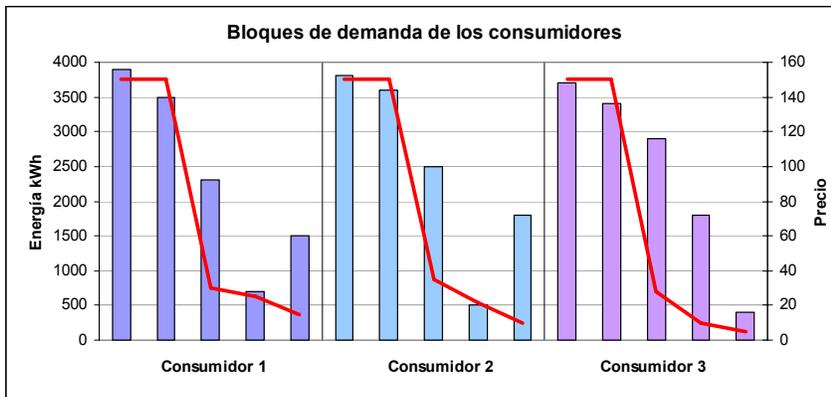


Figura 4.4 Dotación de los agentes en el escenario de concentración de generación

4.4.2 Institución

Tal como se mencionó en el Capítulo anterior, es aquí donde se definen los procedimientos, etapas del experimento y todas aquellas reglas que condicionan el accionar de los diferentes agentes. En ella interactúan los tres tipos de agentes de un experimento: el Operador de mercado virtual (OM), los agentes Vendedores y los agentes Compradores.

Para el desarrollo del experimento, en la Institución se han definido escenarios independientes entre sí para el grupo de control y el grupo experimental; cada uno con sus reglas de interacción, procedimientos específicos, y el mismo número de etapas del experimento, conservando siempre el mismo Entorno.

4.4.2.1 Grupo de control (Subasta Uniforme)

Una vez asignadas las variables de costo de producción/sustitución y dotación para cada uno de los agentes vendedores y compradores en el Entorno, cada jugador debe enviar sus ofertas duales energía-precio al OM; las características de cada tipo de agente se muestra a continuación.

Operador de mercado virtual en Subasta Uniforme

Para el caso del grupo de control, el OM realiza las siguientes acciones en cada etapa del experimento:

1. Recibe todas las ofertas duales (energía-precio) de los diferentes agentes vendedores ($OwGi-OpGi$) y compradores ($OwCi-OcCi$). Cada agente cuenta con un minuto²⁸ para enviar su oferta al OM; en caso de expirar

²⁸ Este límite de un minuto se implantó debido que en las sesiones experimentales previas, sin límite temporal en el envío de la oferta, algunos agentes tomaban demasiado tiempo en enviar su oferta, ocasionando que la sesión fuera extremadamente larga.

el tiempo señalado, el OM considera las ofertas no recibidas igual a cero. Aplica el método simplex para maximizar el beneficio social, lo cual, es equivalente a encontrar el punto de intersección entre las curva agregadas de demanda y generación. La maximización queda:

$$\text{Max} = \sum_1^j \sum_1^i O_w G_{ij} * O_p G_{ij} - \sum_1^j \sum_1^i O_w C_{ij} * O_c C_{ij}$$

con las restricciones siguientes:

$$O_p G_{ij} \geq 0$$

$$O_w C_{ij} \geq 0$$

$$\sum_1^j \sum_1^i O_w G_{ij} - \sum_1^j \sum_1^i O_w C_{ij} = 0$$

2. El precio de mercado pm , corresponde al precio de la oferta de venta con mayor precio aceptada en la optimización; una vez establecido pm , se calculan las ganancias de la etapa para cada jugador en función de sus ofertas aceptadas. La ganancia de cada agente es determinada por:

- a. Ganancia de Vendedor:

$$\text{Potencia Vendida} * (\text{Precio de Mercado} - \text{Costo de Producción})$$

- b. Ganancia de Comprador:

$$\text{Potencia Comprada} * (\text{Precio de Sustitución} - \text{Precio de Mercado})$$

3. Se notifica a los agentes las ventas/compras realizadas, y las consecuentes ganancias obtenidas

El procedimiento anterior se representa en el siguiente diagrama de flujo:

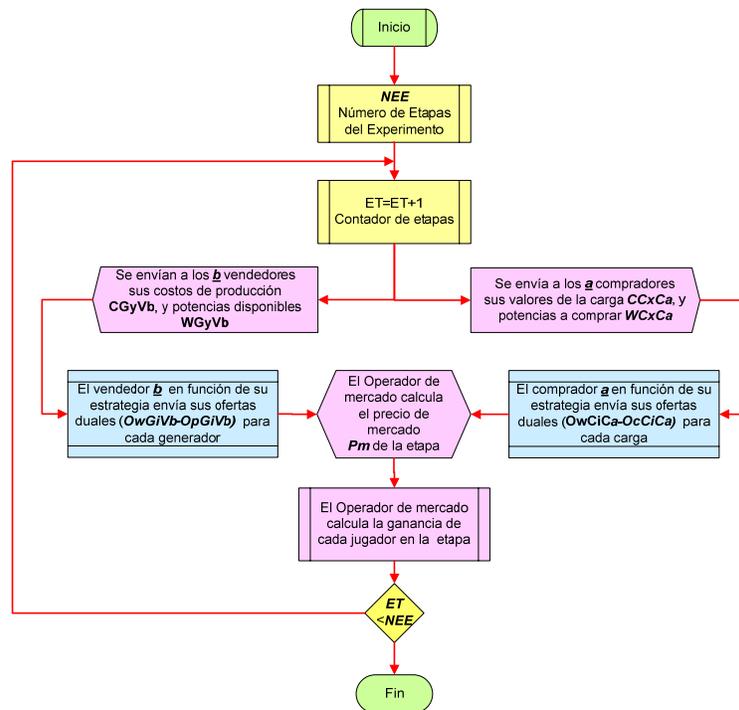


Figura 4.5 Diagrama de flujo de la Subasta Uniforme.

Agentes vendedores

Cada agente vendedor, ha sido dotado en el Entorno con cinco unidades generadoras independientes entre si, con una energía disponible wGi y un costo de producción cGi . En cada etapa del experimento, el jugador envía al OM ofertas duales de energía-precio ($OwGi-OpGi$) para cada unidad generadora. Cada oferta puede ser diferente en precio y energía. Sólo se vende la energía por un precio igual o superior al señalado en la oferta.

Agentes compradores

Cada agente comprador, ha sido dotado en el Entorno con cinco unidades de carga independientes entre si, con una energía a suministrar wCi y costo de sustitución cCi . Al igual que los agentes vendedores, los compradores envían

ofertas duales energía-precio ($OwCi-OcCi$) al OM. Cada oferta puede ser diferente en precio y energía, y sólo se comprará por un precio igual o inferior al señalado en la oferta.

4.4.2.2 Grupo experimental (Subasta Iterativa)

Para el caso del grupo experimental sometido al mecanismo de subasta iterativa, las dotaciones y variables definidas en el Entorno se mantienen iguales a las definidas para el grupo de control, únicamente cambia la manera en que interactúan los agentes Vendedores y Compradores con el OM.

Operador de mercado virtual en Subasta Iterativa

El OM realiza la función del subastador ficticio de Walras mencionado en el Capítulo 2, para ello, lleva a cabo un proceso iterativo en el cual, el precio del mercado al cual que se transa la energía es establecido por el OM, las modificaciones del precio a la alza o baja dependen del desequilibrio existente entre la oferta y la demanda de energía. El mecanismo de subasta iterativa aplica en cada etapa los siguientes pasos:

1. El OM envía a todos los agentes el precio de mercado de la iteración en curso PI_{IT} al cual se pagarán todas las transacciones de energía²⁹.
2. Los compradores deciden la cantidad de energía a comprar $OwCij$ en función de su costo de sustitución; los vendedores deciden cuanta energía vender $OwGij$ en función de su costo de producción. Todos los agentes envían sus ofertas de compra y venta al OM. Cada agente cuenta con un minuto para enviar su oferta al OM; en caso de expirar el tiempo señalado, el OM considera sus ofertas igual a cero.

²⁹ Existe un vector de precios para cada etapa del experimento, a partir del cual de manera aleatoria se selecciona el PI_{IT} enviado a los agentes del mercado.

3. El OM calcula el desequilibrio de energía DP_{IT} , resultante de las múltiples ofertas recibidas.

$$OpG_{ij} \geq 0$$

$$OwC_{ij} \geq 0$$

$$\sum_j \sum_i^i OwG_{ij} - \sum_j \sum_i^i OwC_{ij} = DP_{IT}$$

4. Si el desequilibrio de energía DP_{IT} , es menor que valor de tolerancia permitido α , el sistema establece las ganancias de cada jugador y pasa a la siguiente etapa del experimento. Se considera aceptable para α un valor igual al 5% de la capacidad de generación.
5. Si el desequilibrio es mayor que α , se modifica el precio de la energía PI_{IT} a la alza o baja dependiendo del desequilibrio existente; si la potencia ofertada es mayor que la solicitada el precio disminuye; en caso contrario el precio disminuye. Para obtener el precio de la energía de la siguiente iteración PI_{IT}^* se emplea un algoritmo similar al de la “telaraña” empleado por Contreras *Op. Cit.*, a partir de:.

$$PI_{IT}^* = PI_{IT} - \frac{DP_{IT}}{\sum_j \sum_i^i OwC_{ij}} * \beta$$

donde β es un valor de ponderación del desequilibrio de energía, a fin de evitar oscilaciones bruscas en el precio de mercado de la iteración.

6. Si el desequilibrio permanece después de realizar el máximo de iteraciones establecido, en este caso tres, la potencia es repartida de manera proporcional entre los diferentes ofertantes, a fin de pasar a una nueva etapa.

Los pasos anteriormente mencionados pueden visualizarse en el diagrama siguiente:

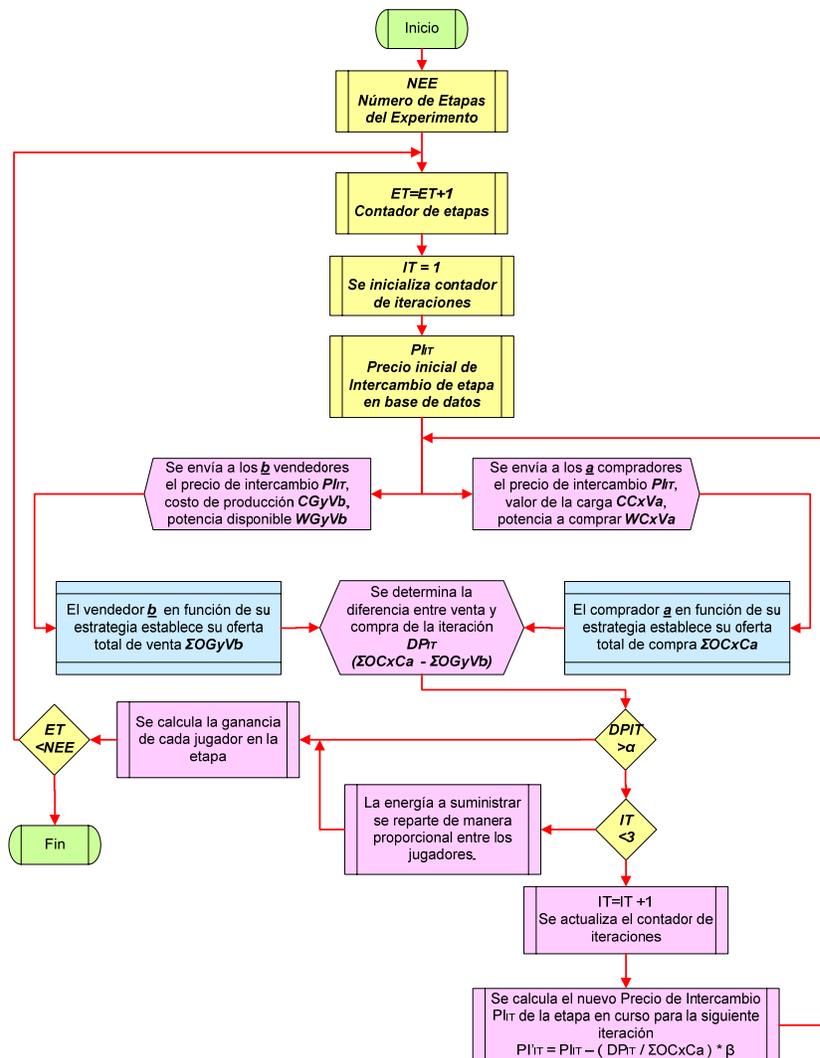


Figura 4.6 Diagrama de flujo de la Subasta Uniforme Iterativa.

Agentes vendedores

En el Entorno, a cada agente vendedor le han sido asignadas cinco unidades generadoras independientes entre si, con una energía disponible wGi y un costo de producción cGi . En cada etapa del experimento, el jugador recibe del OM el precio de mercado al cual se pagará la energía, en respuesta, el jugador envía al OM ofertas simples de energía ($OwGii$) para cada unidad generadora. Todas las ofertas aceptadas serán pagadas al precio previamente notificado por el OM.

Agentes compradores

A cada agente comprador, le han sido asignadas en el Entorno cinco unidades de carga independientes entre si, con una energía a suministrar wCi y un costo de sustitución cCi . Al igual que los agentes vendedores, los compradores reciben del OM el precio de mercado al cual se pagará la energía; los compradores envían ofertas simples de energía ($OwCi$) al OM.

4.5 Subasta Uniforme con Recursos de Demanda

A continuación se describe la metodología de validación de esta subasta [107]; se procede a desarrollar los pasos de la metodología experimental expuestos en el Capítulo anterior. Para la validación de este mecanismo de subasta se emplean los resultados obtenidos en el Mercado Ibérico de la Electricidad a lo largo del año 2010.

4.5.1 Identificación del problema

Actualmente, los Recursos de demanda no se emplean durante el proceso de definir el precio en los mercados diarios de energía. Los mercados que declaran su implementación, los utilizan realmente después de que se han definido los precios del mercado; por lo tanto, estos programas no evitan la aparición de

precios elevados o la volatilidad de los mismos. Su utilización tiene realmente como fin principal disminuir el costo total del sistema en que se incurre para satisfacer la demanda de energía³⁰.

Durante los periodos de gran demanda, se pueden presentar pérdidas de eficiencia económica del mercado debido principalmente a precios muy elevados. Esto bien puede ser debido a una escasez de capacidad de generación, o bien, debido al ejercicio de poder de mercado por parte de los generadores.

4.5.2 Hipótesis

En este mecanismo de subasta, la hipótesis principal de trabajo es que la integración de los Recursos de demanda dentro del mecanismo de subasta uniforme aplicado a los mercado diarios, incrementará la flexibilidad de la demanda, lo cual, mejorará la eficiencia económica general del mercado en los periodos de gran demanda, mitigando el efecto del poder de mercado por parte de las compañías generadoras, y reduciendo la volatilidad de precios.

Si el Operador de mercado permite a los consumidores realizar propuestas de variar su demanda a cambio de una retribución, es posible que con pequeñas variaciones en la preferencia en el consumo, la eficiencia del mercado se incremente en periodos de alta demanda, ya que evitan rentas artificiales a los generadores y se envían señales claras a los inversores sobre las necesidades reales de incrementar la capacidad de generación.

³⁰ En estos mercados el Operador del sistema es el encargado de controlar los mercados de energía, ya que no existe la figura del Operador de mercado.

4.5.3 Variables relevantes

El comportamiento de los mercados diarios de energía, suele ser evaluado a través de su eficiencia general y el comportamiento de sus precios. Debido a que la validación del mecanismo se realiza con datos reales del Mercado Ibérico de la Electricidad, en el análisis se consideran los excedentes de los agentes y el volumen económico total del mercado.

Las variables a monitorizar en el análisis son:

- Cambios en la energía demandada.
- Precio de mercado.
- Volumen económico total.

4.5.4 Diseño del experimento

A continuación se detallan las características del Entorno de laboratorio y la Institución.

4.5.5 Entorno de laboratorio

En el experimento se realiza un análisis comparativo del Mercado Ibérico de la Electricidad, por lo tanto, las dotaciones están definidas por las ofertas de compra y de venta registradas y publicadas por el Operador del Mercado Eléctrico (OMEL) en el Programa Resultante de la Casación [106]. Las ofertas casadas en el mercado se obtienen después de retirar aquellos tramos de ofertas afectados por condiciones complejas, o por limitaciones de la capacidad de conexión.

La demanda máxima anual³¹ registrada en el sistema eléctrico suele oscilar entre los 40.000MW y los 45.000MW [108]. Se cuentan con 2.112MW³² de cargas interrumpibles en la península [109], esto es, poco más del 4,5% de la demanda máxima. Para la validación del método de subasta propuesto, se analizan los resultados del mercado en el año 2010.

4.5.6 Institución

Es aquí donde se definen tanto el grupo de control como el grupo experimental empleados en el análisis comparativo.

4.5.6.1 Grupo de control (Situación actual)

En el grupo de control los agentes interactúan bajo un mecanismo de subasta uniforme, por ello, los resultados presentados por el OMEL se consideran como los resultados del grupo control.

4.5.6.2 Grupo de experimental (Subasta Uniforme con Recursos de Demanda)

La operación del mecanismo de este mecanismo de subasta se realiza de la siguiente manera:

1. Todos los agentes del mercado envían ofertas duales (energía-precio) al Operador de mercado (OM), es decir, los vendedores $OG(OwGi-OpGi)$ y los compradores $OC(OwCi-OcCi)$. Adicionalmente, los agentes compradores pueden enviar ofertas duales por variar su consumo $Wdi(OdCi-PdCi)$.

³¹ Considerando el periodo 2006-2010.

³² Última actualización correspondiente al 1 de enero de 2010.

2. El OM maximiza las ofertas de compra y venta de los agentes de manera similar al punto 4.4.2.1, y establece la demanda de energía a cubrir Wtc , el precio de mercado pm y el volumen económico total VET del mercado. Esto es:

$$Maz = \sum_1^j \sum_1^i OwG_{ij} * OpG_{ij} - \sum_1^j \sum_1^i OwC_{ij} * OcC_{ij}$$

con las restricciones siguientes:

$$OpG_{ij} \geq 0$$

$$OwC_{ij} \geq 0$$

$$\sum_1^j \sum_1^i OwG_{ij} - \sum_1^j \sum_1^i OwC_{ij} = 0$$

el resultado de la maximización además del precio de mercado pm , nos indica que ofertas de generación y compra son casadas en el mercado, esto es OGc y OCc respectivamente. Por lo tanto:

$$Wtc = \sum OCc$$

$$Gtc = \sum OGc$$

$$VET = Wtc \cdot pm$$

3. El OM asigna prioridad a los N paquetes de Wdn recibidos en función del precio ofertado de desconexión, teniendo mayor prioridad el paquete más barato.
4. El OM evalúa de manera iterativa reducciones de carga Wdn en Wtc , y analiza su impacto en pm y en VET , obteniendo unos nuevos pm_n y VET_n en cada iteración. De manera adicional, se calcula WDO_n , es decir, el ratio de reducción de volumen económico total por MW reducido, a través de:

$$WDO_n = \frac{(VET - (Wtc - \sum Wd_n) \cdot pm_n) + \sum PdC_n}{\sum Wd_n}$$

5. El MO identifica el valor óptimo de MW a reducir WDO_o , el cual corresponde al máximo valor de todos los WDO_n . A partir de esta condición, se obtiene la reducción de carga óptima Wd_o y el nuevo precio de mercado pm_o .

Este cambio del precio de mercado, de pm a pm_o , provoca la salida de la casación de la unidad o unidades marginales que incrementan de manera significativa el precio de mercado.

6. Los agentes generadores suministran una carga final igual a $Gtc - Wd_o$, y son pagados al precio pm_o . Los consumidores pagan la energía consumida al precio de compra óptimo pc_o , dado por:

$$pc_o = pm_o + \frac{\sum PdC_o \cdot}{Wtc - Wd_o}$$

con este nuevo precio de compra, todos los compradores contribuyen de manera proporcional a cubrir el costo de la reducción de demanda Wd_o . A pesar de este sobre coste con respecto al precio que reciben los generadores, $pc_o > pm_o$, todos los consumidores obtienen un ahorro producto de la reducción del precio de pm a pm_o .

Los pasos anteriormente mencionados pueden visualizarse en el diagrama siguiente:

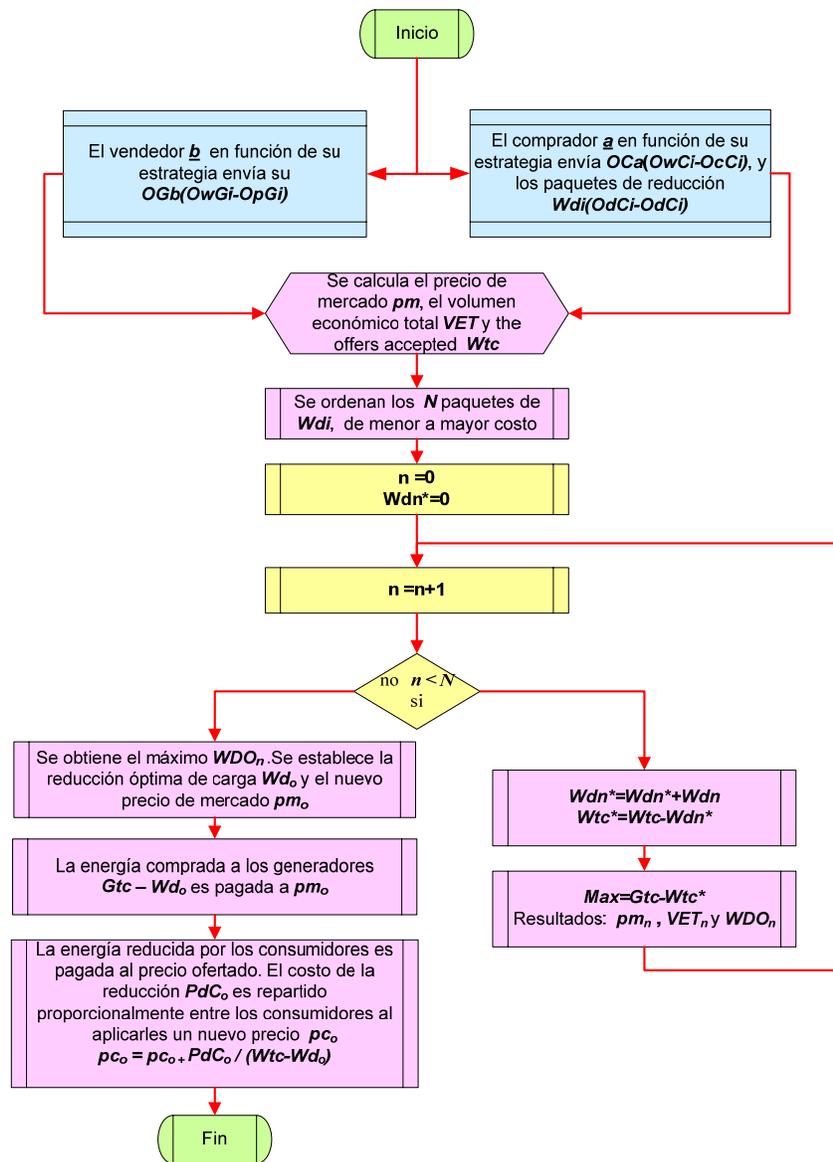


Figura 4.7 Diagrama de flujo de la Subasta Uniforme con Recursos de Demanda.

4.6 Conclusiones

Para la mejora de la eficiencia de los mercados diarios de energía, y mitigar su susceptibilidad al ejercicio del poder de mercado por parte de los generadores, se proponen los nuevos mecanismos de subasta uniforme iterativa y subasta uniforme con recursos de demanda.

Subasta Uniforme Iterativa

En el mecanismo de subasta iterativo, el Operador de mercado, desempeña la función del “subastador de Walras”. En cada iteración de cada etapa, el Operador de mercado envía a los agentes el precio de transacción de la energía; y recibe de ellos sus ofertas de compra y venta de energía. Si el desequilibrio de energía es menor al factor α , se pasa a la siguiente etapa; en caso contrario, el precio se actualiza aplicando un algoritmo tipo de la “telaraña”

Dada la validez de la aplicación de la economía experimental en mercados eléctricos, y su ventaja de incluir la parte cognitiva del individuo en su relación con los mercados, se decidió realizar la validación del nuevo mecanismo propuesto, a través de un experimento económico.

El experimento económico se ha estructurado como un análisis comparativo de Instituciones, manteniendo constante el Entorno de laboratorio durante todas las etapas del experimento. Se ha definido como grupo experimental, aquel que emplea como Institución el mecanismo de subasta uniforme iterativa; mientras que el grupo de control, es sometido a una Institución que opera con el mecanismo de subasta uniforme convencional.

El mecanismo de subasta uniforme se utiliza en el grupo de control, por ser este mecanismo el más empleado en los mercados diarios de energía a nivel mundial, además de no existir evidencia contundente de que el mecanismo de la subasta discriminatoria sea mejor.

El experimento cuenta con un diseño balanceado de 2x2, en el que se analizan los dos Instituciones (subasta uniforme iterativa vs subasta uniforme), en dos Entorno de Laboratorio diferentes, condición de competencia y condición de concentración de generación.

Las variables que se monitorizan en el experimento son la eficiencia general del mercado, la magnitud y volatilidad de sus precios.

La estructura de incentivos está conformada por tres estímulos:

1. Componente fijo de 2,5 €. Este pago es equivalente a un pago por asistir al experimento.
2. Componente variable, existe una “bolsa” de 50 € por sesión del experimento. Esta bolsa se reparte entre los agentes en función de su rendimiento obtenido al final de la sesión experimental, y el rendimiento que obtendría en el caso hipotético de que todos los agentes revelaran totalmente sus valoraciones durante toda la sesión experimental. El monto del beneficio por agente empleado asegura la “Dominancia”.
3. Se aplica una penalización por no vender/comprar la totalidad de las dos primeras unidades generadoras/cargas asignadas en cada etapa de la sesión experimental. Este estímulo busca acelerar la curva de aprendizaje de los individuos, y persuadirles que eviten comportamientos anómalos que invalidan los resultados del experimento.

Debido al elevado costo de los experimentos económicos, no se elaboró un escenario que incluyese la participación de recursos de la demanda dentro del mecanismo de subasta uniforme iterativa.

Subasta Uniforme con Recursos de Demanda

Los Recursos de la demanda no son empleados en la definición del precio en los mercados diarios de energía. En el mejor de los casos, sólo se emplean para disminuir el costo total del sistema en que se incurre para satisfacer la demanda de energía. Lo cual no impide la aparición de precios elevados y ejercicio del poder de mercado por parte de los generadores.

La integración de recursos de participación de la demanda en el mercado diario, permite incrementar la eficiencia del mercado significativamente en periodos de gran demanda, ya que con pequeñas variaciones en las preferencias de consumo se pueden obtener ahorros significativos en el Volumen económico total del mercado. Esta variación en las preferencias del consumo elimina rentas artificiales a los generadores, y envía señales efectivas sobre las necesidades de inversión en el parque de generación.

El Operador de mercado recibe las valoraciones de compra y venta de los agentes del mercado, adicionalmente, algunos consumidores ofertan variar su preferencia de consumo a cambio de un pago.

Si los cambios en la preferencia del consumo incrementan la eficiencia del mercado y disminuye significativamente el Volumen económico total del mercado se establece dos precios en el mercado; el primero y menor de ellos se refiere a precio al que son pagados todos los generadores. El segundo y mayor precio se refiere al precio que pagan los consumidores por la energía consumida.

El precio de los consumidores es igual al precio de los generadores más un suplemento que compensa el pago dado por los recursos de participación de la demanda empleados. Este nuevo precio para los consumidores es inferior al precio de mercado inicial, lo cual aporta un ahorro a los consumidores.

En caso de que no exista mejora significativa en la eficiencia y en el precio del mercado inicial, este precio es el mismo para todos los agentes del mercado.

Dado lo costoso de los experimentos económicos, se realiza un análisis comparativo entre el mecanismo de subasta uniforme convencional y el propuesto, a partir de los resultados del Mercado Ibérico de la Electricidad durante el año 2010.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

En este Capítulo se muestran los resultados de los experimentos realizados, a partir de los cuales, se procede a la validación de las hipótesis declaradas en el Capítulo anterior. En la primera sección se detallan los resultados del mecanismo de subasta uniforme iterativa obtenidos en el experimento económico. En la segunda parte del Capítulo se presentan los resultados de la aplicación del mecanismo de subasta uniforme con participación de recursos de la demanda.

5.1 Mecanismo de subasta uniforme iterativa

Tal como se detalló en el Capítulo anterior, el experimento económico desarrollado en escenarios de competencia y de concentración de generación compara dos Instituciones, la subasta uniforme iterativa y la subasta uniforme convencional.

Para la realización del experimento inicialmente se reclutaron indistintamente estudiantes de Ingeniería Industrial y de Licenciatura en Administración de Empresas que cursaban el último año de estudios³³. Los resultados obtenidos en esta primera fase no fueron los esperados, ya que algunos jugadores presentaron

³³ V. Smith emplea ocasionalmente alumnos del área de económicas en sus experimentos con mercados eléctricos, y éstos suelen obtener rendimientos similares a los alumnos de ingeniería.

un comportamiento “irracional”, también se detectó que en general los estudiantes de Administración tenían una curva de aprendizaje menor que los alumnos de Ingeniería Industrial. Esta diferencia de comportamientos es atribuible a la terminología eléctrica empleada en el experimento, la falta de familiaridad les generó cierto grado de confusión. Por esta razón, varias de las sesiones experimentales iniciales fueron desechadas, lo cual incrementó el costo total del experimento ya que se pagó a todos los participantes de estas sesiones fallidas. En las sesiones experimentales posteriores se desarrollaron sólo con alumnos de ingeniería.

Con la finalidad de mitigar comportamientos anómalos e incrementar la curva de aprendizaje se implantaron sesiones de prácticas más extensas y se definieron sanciones económicas en caso de no satisfacer la compra o venta total de las dos primeras unidades asignadas; de manera paralela, se detallaron más las instrucciones dadas a los agentes participantes. Con estos nuevos criterios se redujeron las sesiones experimentales fallidas, reduciendo así los costos extras del experimento.

A lo largo de las 16 sesiones que constan el experimento, son monitorizados el comportamiento promedio del precio de mercado resultante en cada institución y la eficiencia general durante cada uno de los periodos evaluados. De manera complementaria también se monitorizan la energía demanda, el bienestar social y los excedentes de los generadores y consumidores. A manera de ejemplo, se muestran en las figuras 5.1 y 5.2 la evolución de las variables monitorizadas a lo largo de la sesión experimental 1 del grupo de control en escenario de competencia.

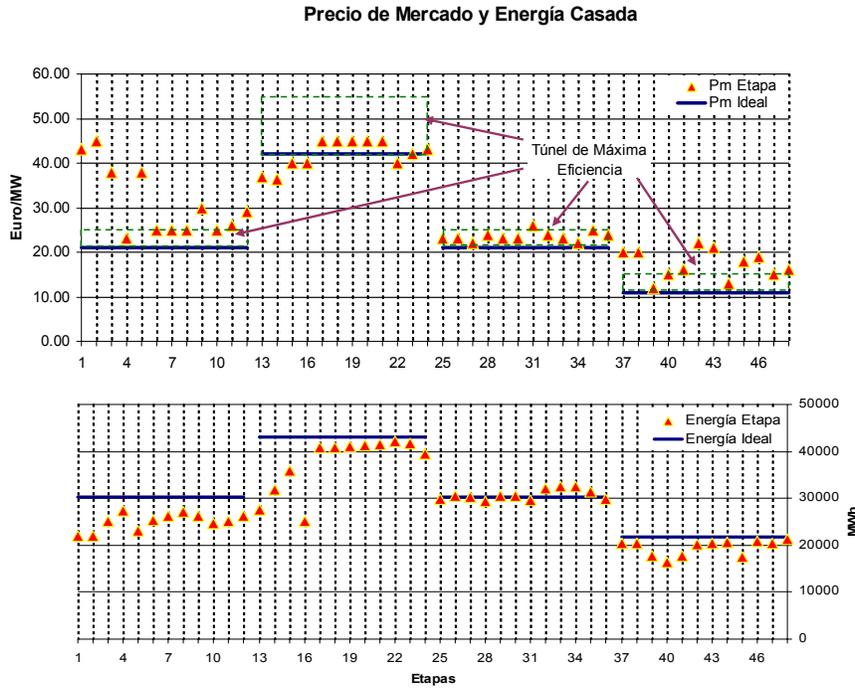


Figura 5.1 Precio de mercado y energía casada, sesión 1, escenario de competencia, grupo de control.

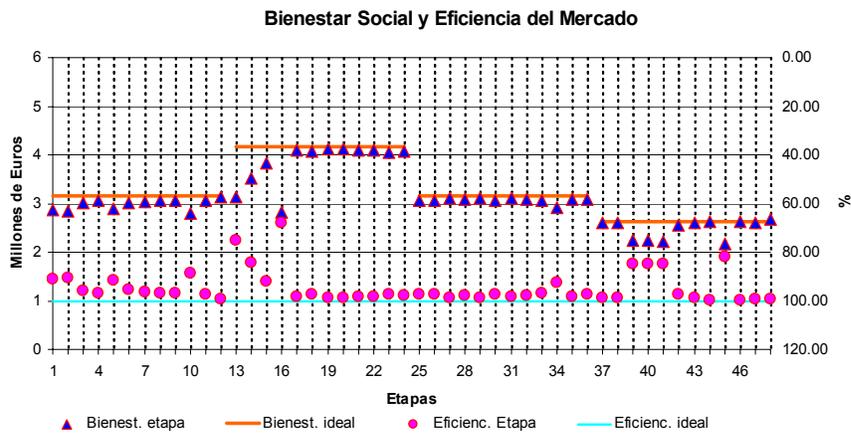


Figura 5.2 Bienestar social y eficiencia, sesión 1, escenario de competencia, grupo de control.

En las figuras 5.1 y 5.2 se observa que las etapas que presentan un precio de mercado superior al precio ideal y fuera del túnel de máxima eficiencia, van acompañadas de un consumo menor de energía con la consiguiente disminución del bienestar social y la eficiencia general del mercado. En lo referente al excedente de los agentes, se presenta una transferencia de renta de consumidores a vendedores, ver figura 5.3.

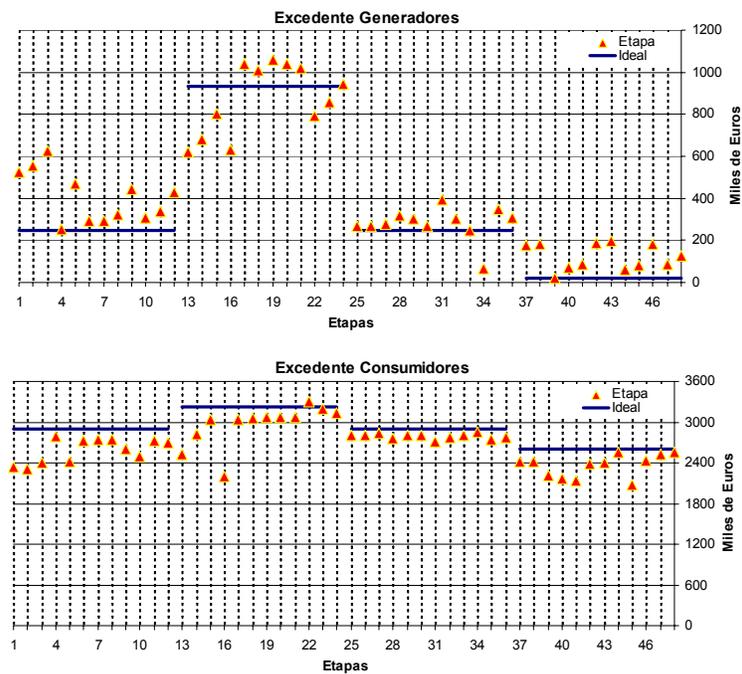


Figura 5.3 Excedente de los agentes, sesión 1, escenario de competencia, grupo de control.

En las etapas que presentan un precio dentro del túnel de máxima eficiencia, la eficiencia general del mercado será mayor cuanto más próxima sea la energía consumida a la energía ideal de la etapa.

Durante el desarrollo de esta sesión se presentaron etapas en las cuales el precio está dentro del túnel de eficiencia máxima y la demanda es mayor que la ideal;

esto se debe a que agentes generadores ofertaron parte de su energía a un precio inferior a su costo de producción, lo cual merma significativamente su excedente (ejemplo: etapa 34).

Etapas con precios inferiores al precio ideal (etapas 13-16), se conjugan con energía consumida y eficiencia de mercado menores a la ideal; además de reducción en los excedentes de ambos tipos de agentes.

La muy baja demanda de la etapa 16 es debido al error de un agente consumidor que no envió sus ofertas antes de finalizar el minuto establecido. Esta situación ocasionó una pérdida significativa de eficiencia, bienestar social y excedentes de los consumidores. Esta etapa no ha sido considerada en el análisis estadístico final del experimento, sin embargo si se consideró para realizar el pago a los jugadores al final de la sesión.

En las siguientes secciones se presentan los promedios obtenidos para cada variable relevante en ambas Instituciones y escenarios.

5.1.1 Resultados en el escenario de competencia

Después de realizadas las ocho sesiones experimentales establecidas en el punto 4.3.5, se realizó el análisis y depuración de resultados anómalos tal como se explicó en el apartado anterior. Finalmente se obtienen los comportamientos promedio del precio y la eficiencia general del mercado para ambos grupos, control y experimental, para cada uno de los diferentes periodos de demanda. Los resultados se observan en las figuras siguientes:

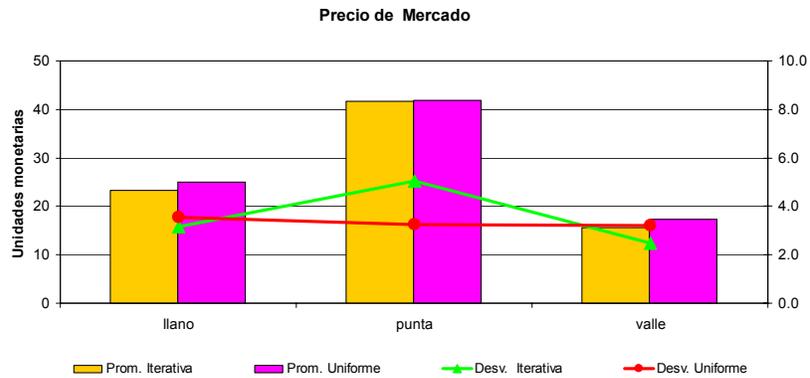


Figura 5.4 Precio de mercado promedio y desviación estándar en el escenario de competencia.

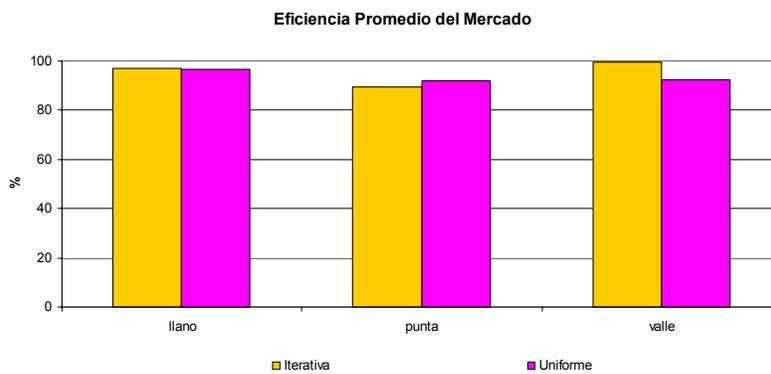


Figura 5.5 Promedio de la eficiencia general del mercado en el escenario de competencia.

Etapa	Escenario de Competencia					
	Iterativa			Uniforme		
	Precio	σ Precio	Eficiencia %	Precio	σ Precio	Eficiencia %
Llano	23,3	3,1	97,1	25,0	3,6	96,4
Punta	41,6	5,1	89,6	41,9	3,2	92,1
Valle	15,6	2,5	99,7	17,3	3,2	92,2

Tabla 5.1 Resultados del escenario de competencia.

5.1.2 Resultados en el escenario de concentración de generación

De acuerdo a lo establecido en el punto 4.3.5, y de manera similar al escenario anterior, se realizaron ocho sesiones experimentales. Después del análisis y depuración de resultados anómalos se obtienen los comportamientos promedio del precio y la eficiencia general del mercado para ambos grupos en cada uno de los diferentes periodos de demanda. Los resultados se observan en las figuras siguientes:

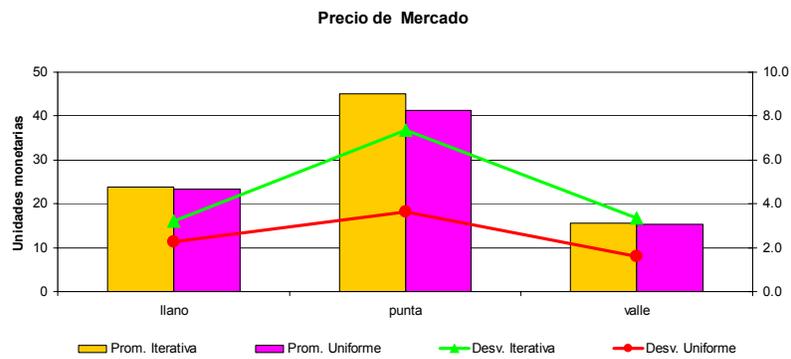


Figura 5.6 Precio de mercado promedio y desviación estándar en el escenario de concentración de generación.



Figura 5.7 Promedio de la eficiencia general del mercado en escenario de concentración de generación.

Etapa	Escenario de Concentración de Generación					
	Iterativa			Uniforme		
	Precio	σ Precio	Eficiencia %	Precio	σ Precio	Eficiencia %
Llano	23,7	3,2	99,8	23,4	2,2	99,0
Punta	45,1	7,4	87,6	41,2	3,6	85,3
Valle	15,6	3,3	99,8	15,4	1,6	99,9

Tabla 5.2 Resultados del escenario de concentración de generación.

5.1.3 Validación de las hipótesis

A partir de los resultados obtenidos en el experimento económico, se procede al análisis de la validez de las tres hipótesis formuladas en el punto 4.3.2 del Capítulo anterior.

“H1. En condiciones de competencia entre generadores, los mecanismos de subasta iterativa y uniforme producirán eficiencias similares en todos los periodos de carga.”

Tal como se observa en la figura 5.4 y en la tabla 5.1, en etapa Llano, el precio de mercado en el caso de la subasta iterativa es ligeramente inferior al obtenido en la subasta uniforme; ambas instituciones arrojan un precio de mercado dentro del túnel de eficiencia máxima, que va desde las 21 hasta 25 unidades monetarias por MWh. La variación de precios en el mecanismo iterativo es ligeramente menor que la variación presentada en la subasta uniforme. La eficiencia de la subasta iterativa es ligeramente mayor que la obtenida con la subasta uniforme, tal como se observa en la figura 5.5.

En la etapa Punta, el precio de mercado en la subasta iterativa es ligeramente menor que la subasta uniforme, sin embargo, ambos precios se encuentran fuera del túnel de eficiencia máxima, que en esta etapa va desde las 42 hasta las 55 unidades monetarias. Por esta razón, al tener un precio menor fuera del túnel de eficiencia máxima, la eficiencia en la institución iterativa es menor que en el caso uniforme. La variación de precios en el mecanismo iterativo es mayor que la variación en la subasta uniforme

A lo largo de la etapa Valle, el precio de mercado resultante en la subasta iterativa es bastante menor que el obtenido en la subasta uniforme, cerca del 10% menos; sin embargo, es importante señalar que ambas instituciones arrojan un precio fuera del túnel de eficiencia máxima correspondiente, el cual va desde las 11 hasta las 15 unidades monetarias. La variación de precios en el mecanismo iterativo es ligeramente menor que la variación resultante en la subasta uniforme. En lo que corresponde a la eficiencia general del mercado, la subasta iterativa proporciona una mayor eficiencia

“H2. En condiciones de concentración en la generación los mecanismos de subasta iterativa y uniforme producirán eficiencias similares en los periodos de baja y mediana demanda (Valle y Llano).”

En la etapa de Llano del escenario de concentración de generación, el precio de mercado en la subasta iterativa es ligeramente superior al resultante en la

subasta uniforme, ver figura 5.5 y tabla 5.2; ambos precios están comprendidos dentro del túnel de eficiencia máxima. La variación de precios en el mecanismo iterativo es ligeramente mayor que la variación presentada en la subasta uniforme. En lo referente a la eficiencia general del mercado, la subasta iterativa presenta una eficiencia ligeramente superior a la que se obtiene en la subasta uniforme.

En la etapa Valle, el precio de mercado en la subasta iterativa es ligeramente mayor con respecto a la subasta uniforme, ambos precios se encuentran fuera del túnel de máxima eficiencia. La variación de precios en el mecanismo iterativo es ligeramente mayor que la variación presentada en la subasta uniforme. La eficiencia en ambas instituciones es prácticamente igual, ya que la subasta uniforme es tan sólo 0,1% mejor que la presente en la iterativa

“H3. En condiciones de concentración en la generación (factibilidad de poder de mercado) el mecanismo de subasta iterativa presenta mayor eficiencia que el de subasta uniforme en los periodos de gran demanda (Punta).”

En la subasta iterativa, el precio de mercado es mayor que el resultante en la institución uniforme en casi cuatro unidades monetarias; sin embargo el precio de mercado resultante en la subasta uniforme se encuentra por debajo del túnel de máxima eficiencia. La variación de precios en el mecanismo iterativo es el doble de la variación presentada en la subasta uniforme. La eficiencia general del mercado en la institución iterativa es mayor en poco más de dos puntos porcentuales en comparación con el resultado obtenido en la institución uniforme.

5.2 Mecanismo de subasta uniforme con recursos de demanda

Tal como se comentó en el Capítulo anterior, punto 4.5.6, la validación del mecanismo de subasta propuesto se realiza a través de un experimento

comparativo aplicado al mercado diario del Mercado Ibérico de la Electricidad. Para ello se emplea como grupo de control los resultados publicados por el Operador del Mercado de Electricidad sobre el Programa Resultante de la Casación. Para el grupo experimental (Subasta Uniforme con Recursos de Demanda), se establece dentro de la cláusula *ceteris paribus* que el Operador de mercado siempre tiene a lo largo del año disponible un 5% recursos de demanda sobre la demanda horaria del sistema.

Las variables monitorizadas durante el análisis son el precio de mercado inicial pm , el precio de mercado resultante de la aplicación del nuevo mecanismo pm_o ; el Volumen económico total del mercado VET y el cambio óptimo en la preferencia del consumo Wdo el cual se deduce a partir del ratio WDO_o .

A fin de visualizar el proceso operativo del mecanismo de subasta propuesto, se presentan los efectos de su aplicación a los resultados del mercado diario el día 26 de diciembre de 2010 en la sesión de las 22:00 horas.

Iteración	Demanda MW	Precio €/MW	VET k€	Reducción Wd_n		Ahorro VET k€	WDO_n k€ /MW
				MW	%		
0*	28.564	145,0	4.142	-	-	-	-
1	28.466	136,5	3.886	98,0	0,34	256,2	2,61
2	28.466	103,5	2.946	98,1	0,34	1.195,6	12,19
3	27.266	103,5	2.822	1.298,1	4,54	1.319,8	1,02
4	27.258	103,5	2.821	1.306,5	4,57	1.320,6	1,01
5	27.250	103,5	2.820	1.314,2	4,60	1.321,4	1,01
6	27.228	103,5	2.818	1.335,6	4,68	1.323,6	9,91
7	27.227	95,0	2.587	1.336,6	4,68	1.555,2	1,16

* Se toma como condición inicial del proceso iterativo el resultado del mercado.

Tabla 5.3 Resultados de la aplicación de recursos de demanda en el mercado diario de MIBEL el 26/12/2010 22:00 horas.

En la tabla anterior se observa que el ahorro en VET se incrementa en cada iteración al ir reduciendo la energía demandada, la progresión de este parámetro nos indica que se puede obtener un ahorro del 100% a costa de no consumir energía. Evidentemente este parámetro no puede ser tomado como indicador de la eficiencia del uso de recursos de demanda en el mercado diario y, es por ello, que se ha definido WDO_n como el ratio de reducción de Volumen económico total por MW reducido.

Se observa en la tabla 5.3 que en la segunda iteración obtenemos el máximo WDO_n (12,19 k€/MW), este valor óptimo se logra con tan sólo una reducción Wd_o igual a 98,1 MW. El efecto de esta reducción es bastante significativo, ya que se pasa de un precio inicial de mercado pm de 145€/MW a un nuevo precio pm_o de 103,5 €/MW, con lo cual el valor económico de la sesión disminuye un 28,6%. La representación gráfica de lo anterior se observa en la figura siguiente:

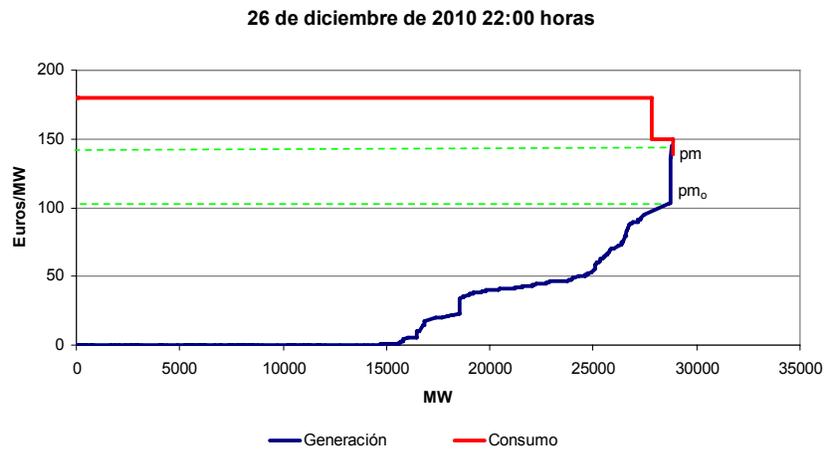


Figura 5.8 Curvas de oferta y demanda del Programa resultante de la casación ejecutado por el OMEL y nuevo precio de mercado obtenido con el uso de recursos de demanda.

En el análisis comparativo no se ha incluido el cálculo del nuevo precio pagado por los consumidores pc_o dado que se considera que los consumidores tienen libertad para establecer los costes de los cambios en las preferencias de consumo Wd_i . Sin embargo, con la finalidad de presentar un análisis económico más completo de los resultados del experimento comparativo se establece el criterio “sencillo” de pagar los Wd al precio de mercado inicial pm , de manera similar a como sucede en los mercados que declaran utilizar recursos de demanda en los mercados diarios.

5.2.1 Resultados anuales

A continuación se presenta el comportamiento de las variables monitorizadas en el experimento comparativo, que emplea los resultados de mercado diario del Mercado Ibérico de la Electricidad durante todo el año 2010.

Precio de mercado inicial pm y final pm_o

El efecto de la aplicación del nuevo mecanismo de subasta en el precio del mercado puede visualizarse en las figuras siguientes:

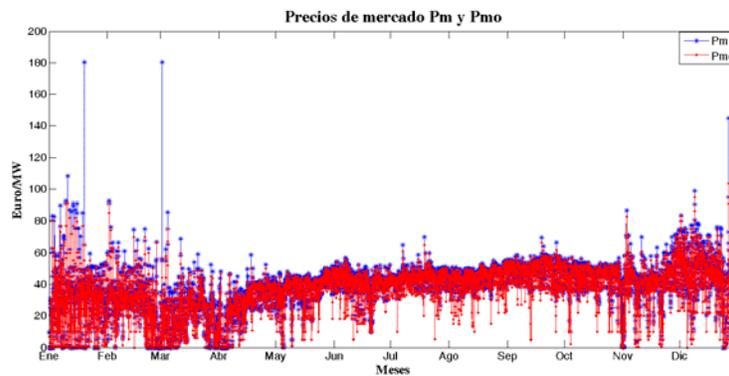


Figura 5.9 Evolución del precio de mercado Pm y el nuevo precio Pmo en el año 2010.

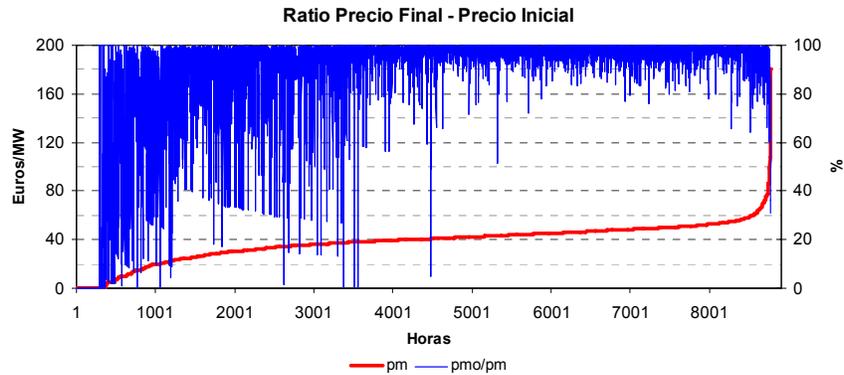


Figura 5.10 Precio inicial pm y ratio de precio inicial pm y precio final pm_o de mercado.

En la figura 5.9 se observa que la aplicación del nuevo mecanismo de subasta reduce de manera muy significativa los precios muy elevados, tal como sucede en enero (día 19 21:00 horas)³⁴, marzo (día 1 21:00 horas)³⁴ y diciembre (día 26 22:00horas). En la figura 5.10 se presenta una relación precio final vs. precio inicial en función del precio inicial; para el caso de pm mayores a cero y menores a 20 €/MW se obtiene una disminución promedio en el precio de 36,55%; para el siguiente rango, 20 €/MW $<pm<40$ €/MW la disminución en el precio es 10,83% en promedio; si 40 €/MW $<pm<60$ €/MW el beneficio es una disminución promedio de 2,81%, para 60 €/MW $<pm<100$ €/MW la disminución promedio es de 6,37%, y por último, para precios mayores a 100 €/MW se obtiene una reducción de 44,2% en promedio. El beneficio general de la aplicación del nuevo mecanismo de subasta es una disminución del 8,36% en el precio inicial de mercado.

³⁴ Precios máximos correspondientes al precio marginal de Portugal, ya que se presentaron restricciones en la red de transporte.

Volumen económico total del mercado *VET*

Por definición, a demanda constante la variación del *VET* es proporcional a la variación del precio de mercado; sin embargo, una variación grande en el precio no indica que se obtengan ahorros muy cuantiosos en el *VET*, ya que para ello es condición necesaria que exista una demanda grande. A continuación se presenta la evolución de *VET* a lo largo del año 2010.

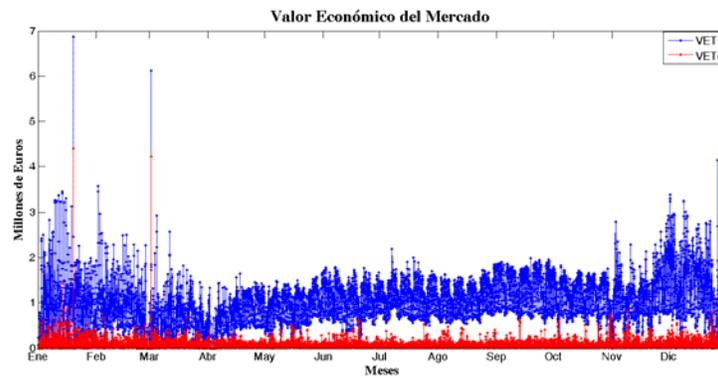


Figura 5.11 Volumen económico del mercado y ahorro económico producido por el uso de recursos de demanda.

En la figura anterior se observa que durante las horas de precios muy elevados el importe del *VET* se reduce considerablemente. Los principales ahorros se obtienen cuando existen unidades marginales que entregan poca energía a un precio muy superior al resto de unidades generadoras. En el año 2010 el *VET* ascendió a poco más de 8.935 millones de euros, la aplicación del mecanismo de subasta obtiene ahorros en *VET* de 472,9³⁵ millones de euros, es decir un

³⁵ Este ahorro es el obtenido si se pagan las reducciones de demanda Wd_i a precio de mercado inicial pm . La disminución total de excedente de generadores es de 568,2 millones de euros

ahorro anual del orden del 5,29%. La evolución del ahorro en VET presenta estacionalidad al igual que la demanda, los mayores ahorros se presentan en los meses de invierno y verano, tal como se puede observar en la figura siguiente.

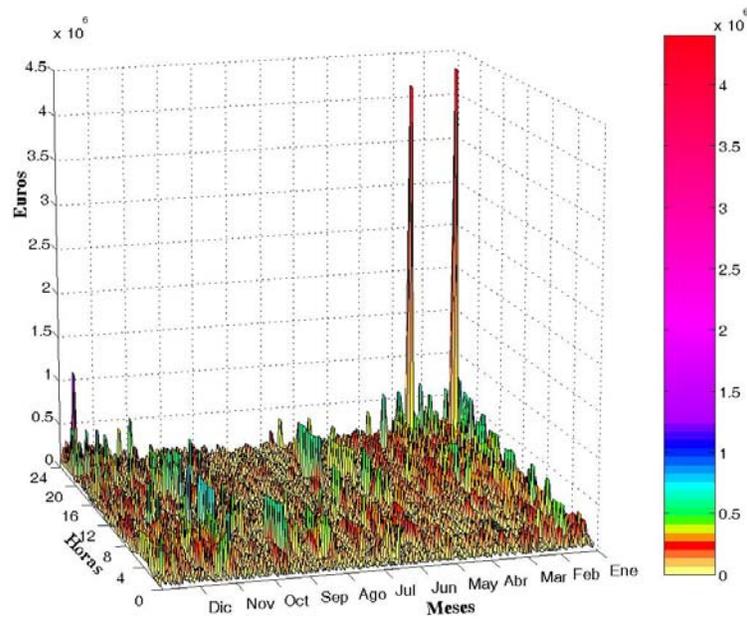


Figura 5.12 Ahorro en VET por uso de recursos de demanda a lo largo del año 2010.

En la figura anterior destacan los ahorros obtenidos en los 19 de enero y 1 de marzo, ya que superan los 4 millones de euros cada uno, en orden de magnitud le sigue el 13 de enero con 1,4 millones de euros y el 26 de diciembre con casi 1,2 millones de euros. Se presentan ahorros de más de 100.000 euros en poco más de 1.800 ocasiones a lo largo del año.

Reducción óptima de demanda

El aspecto clave en la operación del nuevo mecanismo de subasta es la identificación de las unidades marginales que elevan el coste de suministro. A continuación se presentan los 100 mayores DWO_o obtenidos en el experimento comparativo y la evolución de la reducción del precio de mercado en función del DWO_o aplicado.

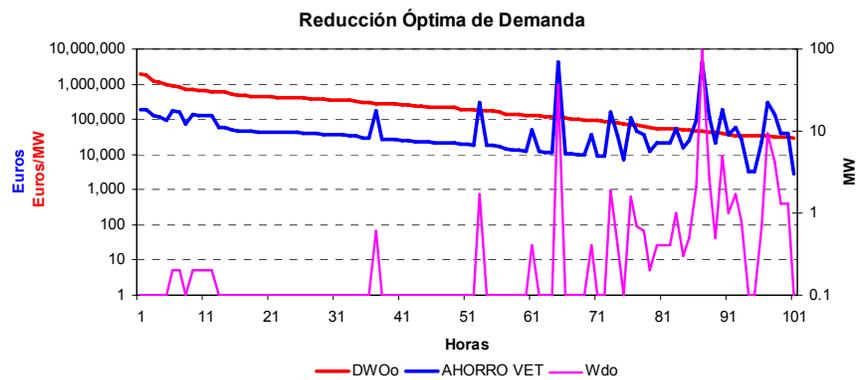


Figura 5.13 Los 100 mayores DWO_o en el año 2010, el Wdo empleado y su efecto en VET .

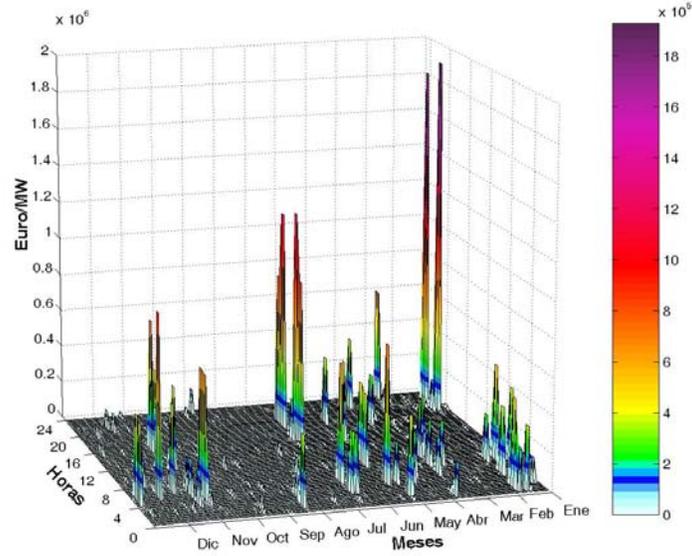


Figura 5.14 Evolución del *DWO* a lo largo del año 2010.

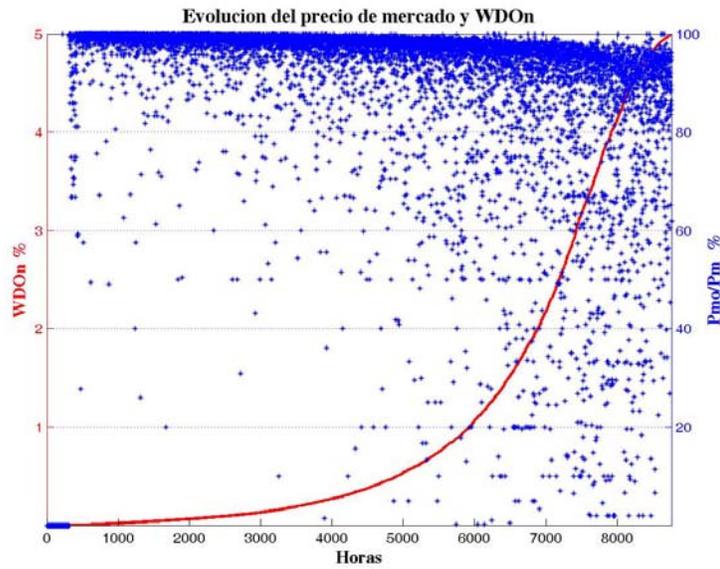


Figura 5.15 Reducción en el precio de mercado en función de la demanda reducida.

En la figura 5.13 se observa que durante muchas horas, pequeños Wdo pueden generar $WDOo$ muy grandes y ahorros en VET muy significativos. En la figura 5.14 se observa que existe estacionalidad al igual que la demanda, sin embargo, si se compara con la figura 5.12 se comprueba que elevados $WDOo$ no implican elevados ahorros en VET .

En la figura 5.15 se observa que durante casi el 75% de las horas del año es óptimo aplicar reducciones menores al 1% de la demanda inicial, se observan también grandes disminuciones en el precio con reducciones que van del 2% al 5%. En la Tabla 5.4 se presentan los ahorros obtenidos en VET en función del porcentaje de demanda inicial reducida, cabe recordar que en el cálculo del ahorro en VET se ha incluido el pago de las reducciones de los consumidores Wd_i al precio de mercado inicial pm .

Reducción de demanda inicial %	Reducción de pm %	Ahorro en VET		Horas de aplicación de reducción
		M€	%	
5,00	8,36	472,9	5,29	8.444*
3,00	6,15	297,2	3,33	7.106
2,00	5,40	240,7	2,69	6.566
1,00	4,05	163,0	1,82	5.613
0,50	3,04	104,9	1,17	4.595
0,25	2,49	65,2	0,73	3.561
0,10	2,15	31,6	0,35	2.298

* El resto de horas el precio de mercado fue cero.

Tabla 5.4 Ahorros en VET en función del porcentaje de demanda reducida.

5.2.2 Validación de la hipótesis

“La integración de los Recursos de demanda dentro del mecanismo de subasta uniforme, incrementa la flexibilidad de la demanda, lo cual, mejora la eficiencia económica general del mercado en los periodos de gran demanda,

mitigando el efecto del poder de mercado por parte de las compañías generadoras, y reduciendo la volatilidad de precios”

En la tabla 5.4 se observa de manera evidente el impacto positivo que tiene la participación activa de la demanda en el precio final del mercado. Pequeños *Wdo*, pueden producir a los consumidores ahorros importantes al sacar de la casación generadores marginales que suministran poca energía y elevan el precio significativamente. Estos ligeros cambios en sus preferencias de consumo eliminan rentas artificiales a los generadores, mejorando así, la eficiencia del mercado en su conjunto.

Además de la evidente reducción general en el precio de mercado obtenida a lo largo del año, es en los periodos con precios iniciales muy elevados donde el nuevo mecanismo de subasta produce sus mejores resultados. De acuerdo a los datos del mercado en el año 2010, los periodos con precios superiores a 100 €/MW ven reducida su magnitud en un promedio del 44% si se hace uso de los recursos de demanda.

En España durante el año 2010, el precio del mercado diario representó en promedio el 84,1%³⁶ del precio final³⁷ del total de la demanda nacional, por lo tanto, es evidente la necesidad imperiosa de tener un mercado diario eficiente. Sin embargo, durante los últimos años se ha investigado mucho y en ocasiones incentivado la participación de la demanda en mercados intradiarios, de balance y auxiliares de regulación; con lo cual, cualquier mejora en la eficiencia de estos mercados no impacta de manera significativa en el precio final de la energía.

³⁶ Dato obtenido de los informes mensuales del año 2010 realizados por Red Eléctrica de España, disponibles en http://www.ree.es/publicaciones/publicaciones_boletines.asp#boletin_mensual

³⁷ El precio final publicado incluye: mercado diario, intradiario, restricciones, procesos de operación técnica y pago por capacidad.

5.3 Conclusiones

En este Capítulo se presentan los resultados de la eficacia de los mecanismos de subastas propuestos para incrementar la eficiencia de los mercados diarios de energía eléctrica. El primer mecanismo analizado, subasta uniforme iterativa, fue evaluado con un experimento económico, mientras que el segundo, subasta uniforme con recursos de demanda, fue evaluado a través de un experimento comparativo con los resultados reales del mercado diario del Mercado Ibérico de la Electricidad, no optándose por un experimento económico debido a lo costoso de su implementación.

Subasta Uniforme Iterativa

El análisis comparativo de los resultados experimentales demuestra que en condiciones de competencia, el mecanismo de subasta uniforme iterativa obtiene menores precios de mercado en todos los periodos de demanda. En lo referente a la eficiencia económica del mercado, el mecanismo propuesto presenta en lo general mejores resultados de eficiencia; sin embargo, en el periodo punta de demanda su eficiencia es ligeramente menor debido a que el precio de mercado obtenido está por debajo del túnel de eficiencia máxima; en los periodos Valle y Llano la eficiencia del mecanismo propuesto es mayor.

En el escenario de concentración de la generación, los resultados del mecanismo de subasta uniforme iterativa presentan precios de mercado ligeramente mayores. La eficiencia del mecanismo propuesto durante el periodo Valle de demanda es menor, pero casi igual a la obtenida con el mecanismo de referencia; mientras que en el resto de periodos de demanda, Llano y Punta, la eficiencia de la subasta uniforme iterativa es mayor.

El mecanismo iterativo de casación permite una participación más activa de la demanda en el proceso de establecimiento de precios en el mercado de energía, lo cual se refleja, en una mayor revelación de las valoraciones personales de los

diferentes agentes que concurren en el mercado, propiciando un incremento en la eficiencia del mercado, y por ende, en la eficiencia del sistema eléctrico en su conjunto.

Subasta Uniforme con Recursos de Demanda.

El análisis de los resultados del mecanismo propuesto comparado con los datos reales del mercado es bastante positivo, ya que a partir de reducciones pequeñas de carga W_{do} , en muchas ocasiones menores al 1%, se puede obtener una disminución apreciable en el precio de mercado y, por tanto ahorros de 163 millones euros (1,82%) en el Volumen económico total VET del mercado. Si se incrementa el límite de reducción de demanda al 5%, el ahorro en VET se incrementa hasta los 472,9 millones de euros, es decir un ahorro del 5,29%.

La aplicación del mecanismo propuesto, resulta en la eliminación de la casación del mercado de aquellas unidades generadoras de alto costo y poca energía entregada al sistema, las cuales, incrementan de manera significativa el precio del mercado, reduciendo así la volatilidad en el precio del mercado.

La retribución por las reducciones de carga aceptadas W_{do} , debe ser analizada de manera amplia, ya que se requiere un mecanismo de pago que motive una mayor participación de los consumidores, pero sin llegar a excesos que distorsionen el mercado en su conjunto.

La participación de los recursos de demanda dentro del mecanismo de casación del mercado diario, puede reducir significativamente el precio de este mercado, y en consecuencia reducir de manera importante el precio final de la energía. Su uso elimina a los generadores rentas artificiales que distorsionan el mercado y proporciona señales correctas de precio a los futuros inversores. Sin embargo, su implementación requiere una actuación decidida del regulador del mercado, ya que los agentes generadores oponen una gran resistencia a cualquier modificación que merme sus beneficios.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las principales conclusiones y aportaciones que se desprenden del trabajo realizado; al final del mismo, se detallan las principales líneas de investigación y desarrollos futuros que se derivan de esta tesis.

6.1 Conclusiones

El trabajo desarrollado en la presente tesis se centra en el diseño de nuevas metodologías de subasta iterativas aplicables a los mercados diarios de energía, que posibiliten una participación activa de la demanda en los procesos de casación, con la intención clara de que su participación no se limite a una respuesta en función del precio de mercado, sino que por el contrario, el precio de mercado sea función directa de su participación.

Los objetivos de la aplicación de estas nuevas metodologías es incrementar la eficiencia general del mercado diario, disminuir la volatilidad de sus precios y disuadir a los agentes generadores de ejercer poder de mercado; y por consiguiente, mejorar la eficiencia del sistema en su conjunto. Las nuevas metodologías iterativas desarrolladas en esta tesis son:

Mecanismo de Subasta Uniforme Iterativa

Mecanismo basado en el principio del subastador Walrasiano, donde el Operador de mercado define para cada periodo horario el precio de la energía. Los agentes envían ofertas de sus capacidades y requerimientos en función del precio establecido. En caso de desequilibrio energético, el Operador de mercado modifica el precio inicial aplicando un algoritmo del tipo “telaraña”. El proceso es iterativo hasta que el mercado alcanza el equilibrio o se supera el número máximo de iteraciones por etapa.

El mecanismo de Subasta Uniforme Iterativa estimula una mayor revelación de costos y valoraciones en los agentes que participan en el mercado, logra así incrementar la eficiencia económica general del mercado, además de mitigar el efecto del poder de mercado por parte de las compañías generadoras.

La validación de este mecanismo de subasta se realizó mediante un experimento económico, a fin de captar realidades cognitivas entre los jugadores humanos y la Institución de mercado analizada. Si bien el reconocimiento de la validez de los experimentos en Economía ha sido gradual, actualmente goza el pleno reconocimiento de su utilidad para evaluar la eficacia y funcionalidad de diversas instituciones de mercado. Su aplicación en los mercados eléctricos se ha visto limitada por varios aspectos: la novedad del enfoque, las barreras de entrada a su entendimiento, la complejidad de los sistemas eléctricos, su elevado costo económico, la necesidad de un laboratorio con infraestructura, y requerir además la coordinación de un grupo de trabajo.

Los resultados obtenidos en el experimento económico nos indican que el nuevo mecanismo de Subasta Uniforme Iterativa, comparado con el mecanismo de Subasta Uniforme Convencional, arroja precios de mercado inferiores en todos los periodos de demanda bajo un escenario de competencia, mientras que en el escenario de concentración de la generación, el nuevo mecanismo presenta precios de mercado ligeramente mayores, sin embargo, los precios obtenidos en

los periodos Llano y Punta aun siendo superiores se encuentran dentro del túnel de máxima eficiencia.

En lo relativo a la eficiencia general del mercado, los resultados indican que el mecanismo de subasta uniforme iterativa obtiene en el escenario de competencia mejores resultados durante los periodos Valle y Llano, mientras que en el periodo Punta la eficiencia obtenida es ligeramente menor debido a que presenta un precio de mercado por debajo del túnel de máxima eficiencia. En el escenario concentración de generación, la eficiencia del nuevo mecanismo es prácticamente igual a la del mecanismo convencional en el periodo Valle, sin embargo para el resto de periodos de demanda la eficiencia del nuevo mecanismo es mayor.

Subasta Uniforme con Recursos de Demanda

Integra dentro del mecanismo de casación uniforme convencional el uso de recursos de demanda en un proceso iterativo de optimización. A través de modificaciones en las preferencias de los consumidores, se logra retirar de la casación del mercado unidades generadoras marginales que elevan significativamente el precio; con lo cual, se reduce el precio de mercado y se eliminan rentas artificiales de los generadores que merman la eficiencia del mercado, y envía correctas señales de precio a futuros inversores. Su aplicación otorga a la demanda una mayor capacidad de controlar la volatilidad de precios y desanimar el ejercicio del poder de mercado.

Después de la casación inicial, el Operador de mercado evalúa de manera iterativa el uso de recursos de demanda, analiza su impacto en el precio y en el Volumen económico total del mercado. Obtiene el nivel óptimo de reducción de demanda a partir del máximo ratio de reducción del volumen económico total por MW reducido; en correspondencia a esta variación de la demanda, establece el nuevo precio a pagar a los generadores, y el nuevo precio que pagan los consumidores. El precio pagado por los consumidores compensa el pago

realizado a los generadores y el costo de los recursos de demanda empleados en la nueva casación.

Debido al elevado costo económico que implicaba el desarrollar un experimento económico, se decidió realizar la validación de este nuevo mecanismo a través de un experimento comparativo con los datos reales del programa resultante de la casación del mercado diario del Mercado Ibérico de la Electricidad correspondientes al año 2010.

Los resultados del experimento comparativo son bastante positivos, nos indican que con cambios menores al 1% en la preferencia de consumo Wdo , se obtiene un ahorro del 1,82% (163 M€) en el Volumen económico total del mercado; en caso de incrementar el límite de reducción de demanda al 5%, el ahorro obtenido es de 472,9 M€, es decir un ahorro del 5,29%.

La principal conclusión que se deriva del presente trabajo, es que los mecanismos de subasta iterativos propuestos otorgan un papel activo y de gran impacto a la demanda en los mercados diarios de energía, ya sea aplicando un mecanismo walrasiano, o bien mediante el uso de recursos de demanda en el proceso de casación. Su aplicación permite obtener incrementos muy importantes en la eficiencia de estos mercados diarios y, por consiguiente, en todo el sistema en su conjunto.

6.2 Aportaciones

La presente tesis realiza tres aportaciones principales:

1. Desarrollo del mecanismo de subasta uniforme iterativa que busca incrementar la eficiencia del mercado estimulando una mayor revelación de los costos y valoraciones de los agentes, los cuales interactúan repetitivamente a través de un subastador walrasiano.

2. Desarrollo del mecanismo de subasta uniforme con recursos de demanda que busca incrementar la eficiencia del mercado diario eliminando rentas artificiales a los agentes generadores; consigue además el envío de correctas señales de precios para futuras inversiones.
3. Desarrollo del laboratorio experimental basado en un portal Web para el desarrollo de experimentos económicos; siendo diseñado desde la perspectiva docente como herramienta didáctica en la enseñanza de los mercados eléctricos.

6.3 Futuras líneas de investigación

Los resultados obtenidos en la investigación invitan a seguir explorando nuevos mecanismos que incentiven una participación más activa de la demanda en el proceso de establecimiento de precios en el mercado diario. Las líneas futuras de investigación y desarrollo se agrupan de la siguiente manera:

Mecanismos de Subasta:

- Analizar subastas uniformes iterativas en el lado de la demanda, en la cual, la oferta tenga sólo una oportunidad de realizar su oferta por etapa.
- En subastas uniformes con participación de recursos de demanda, desarrollar una metodología para cálculo de la retribución óptima a los consumidores que modifiquen sus preferencias de consumo, de tal manera que incentive la participación, compense el efecto de la “tragedia de los comunes” y evite comportamientos especulativos en la demanda.

Plataforma de Experimentación:

Actualmente se está llevando a cabo la reestructuración del programa informático del laboratorio económico Wel-Iua, con la finalidad de obtener las siguientes características:

- Módulo de diseño de interfaces para la construcción de ventanas de interacción de los diferentes agentes.
- Módulo de programación para la creación del algoritmo de operación de la subasta, con disponibilidad de funciones de optimización, despacho económico y flujos de potencia entre otros.
- Interfaz de generación de imágenes y gráficos que mejoren la calidad de la información disponible para los jugadores.
- Desarrollo de jugadores “virtuales e inteligentes”, programados por el experimentador y que puedan desempeñar su actividad en el experimento de manera automática, posibilitando experimentos totalmente virtuales sin agentes humanos, o bien experimentos mixtos.

ANEXO A

LABORATORIO VIRTUAL WEL-IUA

En el presente apartado se describen las características técnicas y operativas del laboratorio virtual.

A.1 Introducción

El portal Wel-Iua ha sido construido para funcionar como un laboratorio de simulación basado en Internet, en el cual se desarrollan experimentos económicos, empleando seres humanos para probar teorías económicas, en este caso en particular, relacionadas con las subastas uniforme e iterativa.

Wel-Iua brinda muchas facilidades al investigador, ya que éste tiene a su disposición una interfaz denominada “Diseño y control del experimento” muy amigable para la configuración del mismo, y que no requiere conocimientos de programación. Además de ésta, los jugadores participantes, compradores y vendedores, cuentan con sendas interfaces dedicadas denominadas “Ventana de compra” y “Ventana de venta”.

La flexibilidad de Wel-Iua no se limita a su uso, ya que también es muy flexible en la implementación física del experimento, no requiriéndose un espacio exclusivo dedicado a experimentos económicos. La mayoría de los laboratorios económicos son locales donde se ubican ordenadores personales conectadas en red a un servidor interno, y emplean un software rígido operado por un programador especializado. Al estar diseñado en una plataforma Web los

experimentos pueden desarrollarse en cualquier espacio que cuente con ordenadores con acceso a Internet sin necesidad de contar con un programador especializado para la configuración de la red, sin ningún detrimento en la calidad del experimento; ya que los tres elementos básicos de los experimentos económicos, mencionados en el Capítulo 3 se mantienen inalterados.

El escenario en el cual los jugadores se encuentran en diferentes localidades, es una configuración que no suele gustar a los economistas experimentales tradicionales, ya que la manipulación, estimulación y observación de las variables analizadas no se garantiza en su totalidad; sin embargo, en Wel-Iua la implementación de estos casos “especiales” es muy sencilla dada su operación en un entorno Web.

A.2 Interfaz de diseño y control del experimento

Una vez realizado el diseño del experimento, Capítulo 4, su implementación en Wel-Iua es muy sencilla, sólo debe seguir los siguientes pasos:

A.2.1 Configuración - Parámetros generales

En este módulo se selecciona el tipo de subasta a implementar, el número de etapas por experimento, las sanciones a los vendedores por no vender el mínimo señalado, y las sanciones a los compradores por no comprar el mínimo requerido, ver figura A.1. Estas sanciones tienen como finalidad regular el estímulo de participación de la demanda y la flexibilidad del parque de generación.

The screenshot shows a web application interface for an auction system. At the top, there is a blue header with the text 'Sistema de Subastas EXPERIMENTO'. Below the header, there are three menu items: 'Crear simulación', 'Modificar simulaciones', and 'Estadísticas'. A navigation bar contains tabs for 'Configuración', 'Sesiones', 'Compradores', and 'Vendedores'. The 'Configuración' tab is active, displaying a configuration window with the following fields and values:

Nombre:	TEST
Fecha de inicio:	23 Feb 2009 @ 09:01 AM
Tipo de subasta:	NEWTON
Número de sesiones registradas:	0
Sanción compradores:	100
Sanción vendedores:	120
Tiempo límite de subasta:	60
Tiempo de actualización de los usuarios:	10

A 'Guardar' button is located at the bottom of the configuration window.

Figura A.1 Ventana para el establecimiento de parámetros generales.

En esta misma ventana, el experimentador define el tiempo máximo de recepción de ofertas y el de actualización de datos a cada jugador.

A.2.2 Parámetros de los compradores

Primeramente se definen el número de jugadores con este papel, posteriormente, se introduce para cada etapa los bloques de energía a consumir con su respectivo costo de sustitución, ver figura A.2. Aquí también se define qué bloques de energía son restringidos, es decir deben ser comprados de manera forzosa, ya que en caso contrario, el jugador recibe una sanción económica que merma sus beneficios.

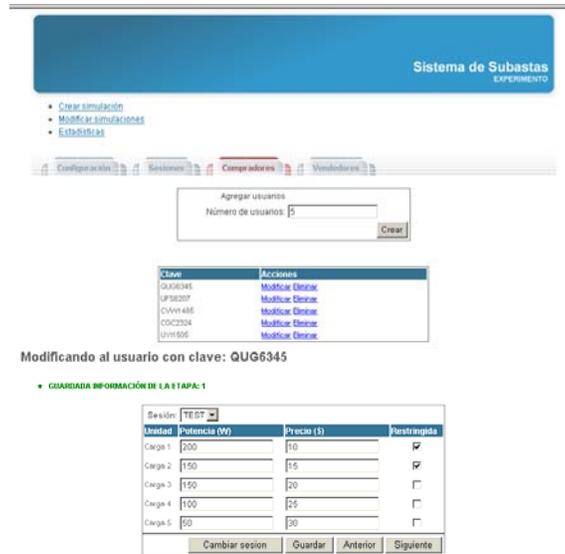


Figura A.2 . Ventana de parámetros de consumidores.

Las claves de acceso al sistema para cada uno de los compradores son generadas por Wel-Iua de manera automática.

A.2.3 Parámetros de los vendedores

Al igual que en el apartado anterior, primeramente se define el número de jugadores vendedores, seguido de los bloques de energía a vender con su respectivo costo de producción para cada etapa del experimento, ver figura A.3. Finalmente, se declaran los bloques de energía de venta restringida, cuya venta es forzosa a fin de para evitar una sanción económica.



Figura A.3 Ventana de parámetros de Vendedores.

Las claves de acceso al sistema de cada uno de los vendedores son generadas de manera automática.

Con la finalidad de hacer más ágil la replicación de un experimento, el investigador puede copiar parámetros de un experimento anterior a otro nuevo, o bien introducir los datos desde un archivo en formato Excel. El portal Wel-Iua permite desarrollar múltiples experimentos de manera simultánea, lo cual incrementa la flexibilidad del sistema.

A continuación se detallan las características de las interfaces de los jugadores en función del mecanismo de subasta empleado.

A.3 Subasta uniforme

A.3.1 Agentes vendedores

La interfaz del vendedor disponible en Wel-Iua, ver figura A.4, muestra al jugador en cada etapa del experimento las energías disponibles para vender y el costo de producción por MWh de cada generador. Además, se muestra información histórica sobre las energías vendidas por cada unidad generadora en las últimas cinco etapas, así como el total acumulado de las ganancias de cada etapa.



Figura A.4 Pantalla de juego de un jugador “Vendedor” en subasta uniforme.

A través de la ventana, el jugador envía sus ofertas duales (precio-energía) al Operador de mercado OM, la magnitud de la energía ofertada nunca puede ser negativa ni superar el valor de energía establecido en el Entorno para esta etapa, sin embargo, el precio de venta nunca puede ser negativo.

A.3.2 Agentes compradores

La interfaz del comprador disponible en WEL-IUA, ver figura A.5, presenta al jugador en cada etapa del experimento los requerimientos en energía de las cargas a suministrar y el costo de sustitución por MWh de cada carga. Muestra también información histórica sobre las energías compradas para cada carga en las últimas cinco etapas, así como el total acumulado de las ganancias de cada etapa.

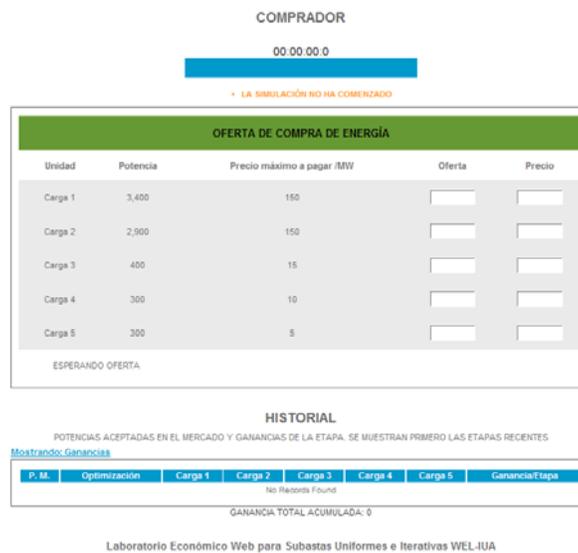


Figura A.5 Pantalla de juego de un jugador “Comprador” en subasta uniforme.

El jugador envía sus ofertas duales al OM, la magnitud de la energía a comprar nunca podrá negativa ni superar el valor de energía establecido en el Entorno para esta etapa, además, el precio de compra nunca podrá ser negativo.

A.4 Subasta iterativa

A.4.1 Agentes vendedores

En la figura A.6 se muestra la interfaz del vendedor del grupo experimental disponible en WEL-IUA, en ella, se muestra al jugador en cada etapa del experimento las energías disponibles para vender y el costo de producción por MWh de cada unidad generadora; también se muestra información histórica sobre las energías vendidas por cada generador en las últimas cinco etapas, así como el total acumulado de las ganancias de cada etapa.



Figura A.6 Pantalla de juego de un jugador “Vendedor” en subasta iterativa.

El jugador envía al OM sus ofertas simples de energía, las cuales nunca podrán ser negativas ni superar la magnitud establecida en el Entorno.

A.4.2 Agentes compradores

La interfaz del comprador perteneciente al grupo experimental disponible en WEL-IUA, ver figura A.7, presenta al jugador en cada etapa del experimento los requerimientos en energía de sus cargas a suministrar y el costo de sustitución por MWh de cada carga; muestra también información histórica sobre las energías compradas por cada carga en las últimas cinco etapas, así como el total acumulado de las ganancias de cada etapa.



Figura A.7 Pantalla de juego de un jugador “Comprador” en subasta iterativa.

El agente envía al OM sus ofertas simples de energía, las cuales nunca podrán ser negativas ni superar la magnitud establecida en el Entorno.

BIBLIOGRAFÍA

1. Christopher Defeuilley. Retail competition in electricity markets. Energy Policy. Energy Policy 37. 2009
2. S. Bornstein and J. Bushnell. An Empirical Analysis of the Potential for Market Power in California's Electricity Industry. 1998. NBER Working Papers 6463, National Bureau of Economic Research, Inc
3. Vernon L. Smith. Statement before the U.S. House of Representatives Committee on Financial Services. June 20, 2001. <http://financialservices.house.gov/media/pdf/062001sm.pdf>
4. J. Bushnell, E. Mansur, and C. Saravia. Market Structure and Competition: A Cross-Market Analysis of U.S. Electricity Deregulation. CSEM WP 126. Mayo 2004.
5. R. Rajaraman y F. Alvarado (Dis)proving Market Power. PSerc publication 02-06, March 2002 (www.pserc.wisc.edu) Revised September 2003.
6. IBERDROLA; El mercado eléctrico en Escandinavia, Estados Unidos, Reino Unido; Edita Fundación Generalitat Valenciana Iberdrola. 2001
7. National Grid. <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/AboutElectricity/>
8. Elexon. <http://www.elexon.co.uk/Pages/home.aspx>
9. Energy Market Reform: Competition in Electricity Markets; OECD / IEA 2001. Available: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/compet2001.pdf>

10. I Lasheras Merino, Miguel A. La regulación económica de los servicios públicos. Editorial Ariel S.A. 1999
11. Demand-Side Management Programme: International Energy Agency Available: <http://www.ieadsm.org/>
12. Task XIII - Demand Response Resources. International Energy Agency. Available: <http://www.demandresponseresources.com/>
13. Schulze, W.; Ede S.; Zimmerman, R.D.; Bernard, Mount T.; J.C.; Thomas, R.J.; Schulze, W.; " Can Experimental Economics Help Guide Restructuring of Electric Power". Workshop Future Research Directions for Complex Interactive Electric Networks, Washington D.C., November 16 and 17, 2000. Available at: www.pserc.wisc.edu/documents/.../can_experimental_economics.pdf
14. U.S. Department of Energy. Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them. A Report to the United states Congress Pursuant to Section 1252 of the energy Policy Act of 2005. February 2006. Available at: <http://eetd.lbl.gov/ea/emp/reports/congress-1252d.pdf>
15. Larry E. Ruff. Demand Response: Reality versus “Resource”. The Electricity Journal. Volume 15.Issue 10. December 2002.
16. Steven Stoft. Power System Economics: Designing Markets for Electricity. Wiley-IEEE Press. 2002.
17. Sally Hunt. Making Competition Work in Electricity. John Wiley & Sons. 2002.
18. Daniel S. Kirschen & Goran Strbac. Fundamentals of Power System Economics. John Wiley & Sons. 2004.
19. R. Thomas, T. Mount, R. Zimmerman and C. Murillo-Sanchez, A Comparison of the Results of Three Auction Experiments. Power Systems Engineering Research Center: December 2000, Available at: www.pserc.wisc.edu/documents/...by.../ThreeAuctionsExperiment.pdf.

20. Peter Cramton, Steven Stoft. Why we need to stick with uniform-price auctions in electricity markets. *The Electricity Journal*, Volume 20, Issue 1, January-February 2007.
21. S.J.Rassenti, V. Smith & B.J. Wilson. Discriminatory Price Auctions In Electricity Markets: Low Volatility At The Expense Of High Price Levels. *Journal of Regulatory Economics*. Volume 23, Number 2. 2003. Available at: <http://www.springerlink.com/content/j468513277632010/fulltext.pdf>
22. Randy Hudson. Analysis of Uniform and Discriminatory Price Auctions in Restructured Electricity Markets. Oak Ridge National Laboratory. July 2002. Available at: <http://www.ornl.gov/sci/ees/etsd/pes/pubs/pricing.pdf>
23. Alfred. E. Kahn, Peter C. Cramton, Robert H. Porter and Richard D. Tabors. Uniform pricing or pay-as-pricing: a dilemma for California and beyond. *The Electricity Journal*, vol. 14, Issue 6, July 2001.
24. R. Ethier, R. Zimmerman, T. Mount, R. Thomas, W. Schulze. Auction Design for Competitive Electricity Markets. HICSS Conference 1997. Hawaii. Disponible en: <http://www.pserc.cornell.edu/powerweb/papers/HICSS97.pdf>.
25. R. Ethier, R. Zimmerman, T. Mount, W. Schulze, R. Thomas. A uniform price auction with locational price adjustments for competitive electricity markets. *Electric Power and Energy Systems*, Vol. 21, 1999. Available at: <http://e3rg.pserc.cornell.edu/node/31>
26. G. Xiong, S. Okuma, H. Fujita. Multi-Agent Based Experiments On Uniform Price And Pay-As-Bid Electricity Auction Markets. *IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004)*. 2004. Hong Kong
27. Natalia Fabra, Nils-Henrik von der Fehr and David Harbord. Modeling Electricity Auctions. *The Electricity Journal*. Volume 15, Issue 7, August-September 2002.

28. Natalia Fabra, Nils-Henrik von der Fehr and David Harbord. Designing Electricity Auctions. The RAND Journal of Economics. Volume 37, Issue 1. March 2006.
29. Yongjun Ren and Francisco D. Galiana. Pay-As-Bid Versus Marginal Pricing—Part I: Strategic Generation Offers. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, November 2004.
30. Yongjun Ren and Francisco D. Galiana. Pay-As-Bid Versus Marginal Pricing—Part II: Market Behavior Under Strategic Generator Offers. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, No. 4, November 2004.
31. John D. Hey “Experimentos en Economía”, Fondo de Cultura Económica, 1996.
32. Geoffrey Rothwell & Tomás Gómez. Electricity Economics. regulation and Deregulation. IEEE Press. 2003
33. Fereidoon P. Sioshansi & Wolfgang Pfaffenderger. Electricity Market Reform - An International Perspective. Elsevier. 2006
34. Kankar Bhattacharya, Math H.J. Bollen & Japp E. Daalder. Operation of Restructured Power Systems. Kluwer Academic Publishers. 2001
35. Energy Response.Pty Ltd. Australia-New Zealand.
www.energyresponse.com
36. Direct Energy Marketing Limited.. Canada.
<http://www.directenergybusiness.com/demandresponse-ca.php>
37. Liberalización eléctrica nominal, pero no real. Expansión.com. Editorial publicada el 02 de marzo de 2010
38. Céntrica se harta de España y pone a la venta su filial. Expansión.com. Editorial publicada el 02 de marzo de 2010
39. Carmen Monforte. La CNC acusa a las eléctricas de pactos para impedir la competencia. Artículo publicado el 13 de mayo de 2010.

-
40. Operador del Mercado Eléctrico. Mercado de Electricidad. Evolución del Mercado de energía Eléctrica. Informe Mensual Enero-Diciembre 2010. Disponible en: <http://www.omel.es/inicio/publicaciones>
 41. Hiroaki Nagayama. Effects of regulatory reforms in the electricity supply industry on electricity prices in developing countries. *Energy Policy* 35. 2007
 42. Comisión Nacional de Energía, España. El funcionamiento del mercado eléctrico en el año 1998. Disponible en: http://www.cne.es/cne/contenido.jsp?id_nodo=148&&keyword=&auditoria=F
 43. Comisión Nacional de Energía, España. Informe sobre la evolución de la competencia en los mercados de gas y electricidad. Periodo 2006-2008. Disponible en: <http://www.cne.es/cne/doc/publicaciones/PA-competencia-010.pdf>
 44. Casazza Jack. Electric power deregulation – A bad idea?. *Today's Engineer*. IEEE. May 2005.
 45. Chi-Keung Woo, Debra Lloyd and Asher Tishler. Electricity Market reform failures: UK, Norway, Alberta and California. *Energy Policy* 31. 2003
 46. IEA DSM Task XIII Project Guidebook. Disponible en: <http://www.ieadsm.org/ViewTask.aspx?ID=17&Task=13&Sort=1#anc1168>
 47. Escrivá Escrivá Guillermo. Nuevas Herramientas para facilitar la respuesta active de consumidores. Tesis doctoral. Director. Dr. C. Álvarez. Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
 48. International Energy Agency. The Power to Choose - Demand Response in Liberalized Electricity Markets. OECD/IEA 2003. Available at: http://www.schneider-electric.us/documents/solutions1/demand-response-solutions/powertochoose_2003.pdf

49. C. Alvarez, A. Gabaldon, & A. Molina, Assessment and simulation of the responsive demand potential in end-user facilities: Application to a university customer, *IEEE Trans. Power Syst.*, 19(2), 2004.
50. Carlos Álvarez Bel, Antonio Gabaldón Marín, Iván Valencia Salazar, Manuel Alcázar Ortega, Guillermo Escrivá Escrivá. Market Integration of Responsive Customers: Application to Energy and Balancing Markets. *International Journal of Power and Energy Systems Design*, vol. 29, pp. 1-9, 2009.
51. I. Valencia Salazar , M. Alcázar Ortega, G. Escrivá Escrivá, C. Álvarez Bel, A. Gabaldón Marín. Customer participation in Short Term Electricity Markets: application to the Spanish case. *IEEE/PES – IAS Conference on Sustainable Alternative Energy*. Valencia, Spain, September 28-30, 2009.
52. Alcázar-Ortega, M., Escrivá-Escrivá, G., Valencia-Salazar, I., Álvarez Bel, C., Alfonso Solar, D. Validation of a methodology to assess customer demand response: application to the commercial sector. *IEEE/PES – IAS Conference on Sustainable Alternative Energy*. Valencia, Spain, September 28-30, 2009.
53. I. Valencia-Salazar, C. Alvarez, G. Escrivá-Escrivá, M. Alcazar-Ortega, Simulation of demand side participation in Spanish short term electricity markets, *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 7, July 2011, Pages 2705-2711.
54. Álvarez, C., Alcázar-Ortega, M., Escrivá, G, Gabaldón, A. Technical and economical tools to assess customer demand response in the commercial sector. *Elsevier Energy Conversion and Management*, 50, pp. 2605-2612, July 2009.
55. Day-Ahead Demand Response Program Manual July 2003. Available at: http://www.nyiso.com/public/webdocs/products/demand_response/day_ah_ead/dadrp_mnl.pdf
56. Draft Final Proposal for the Design of Proxy Demand Resource (PDR). Revised on August 28, 2009. Available at: <http://www.caiso.com/241d/241da56c5950.pdf>

57. ISO New England Manual for the Real-Time Price Response and Day-Ahead Load Response Programs- Manual M-RTPRP/DALRP Revision: 0.Effective Date: June 1, 2010. Available at:
http://www.iso-ne.com/rules_proceeds/isone_mnls/m_rtrpr_dalrp_revision_0_06_01_10.doc
58. PJM Demand Side Response. June 2010.
<http://pjm.com/training/~media/training/core-curriculum/ip-dsr/pjm-demand-side-response-slides.ashx>
59. R. Preston McAfee and John McMillan. Auctions and Bidding. of. Economic Literature, Vol. XXV, June 1987
60. Paul Klemperer. Auctions: Theory and Practice, The Toulouse Lectures in Economics. Princeton University Press, 2004
61. Bernard Guerrien. La Microeconomía. Disponible en <http://www.eumed.net/cursecon/libreria/bg-micro/>
62. R. Rajaraman y F. Alvarado (Dis)proving Market Power. PSERC.2002. Disponible en:
http://www.pserc.wisc.edu/documents/publications/papers/2002_general_publications/
63. S.J.Rassenti, V. Smith & B.J. Wilson “Demand Side Bidding Will Controll Market Power; And Decrease The Level And Volatility Of Prices”, Journal of Regulatory Economics, 2003
64. Natalia Fabra, Nils-Henrik von der Fehr and David Harbord. Designing Electricity Auctions: Uniform, Discriminatory and Vickrey. October 2002. Available at:
http://163.117.2.172/temp/Designing_Electricity_Auctions_PAPER.pdf
65. Susan F. Tierney, Todd Schatzki & Rana Mukerji. Uniform-Pricing versus Pay-as-Bid in Wholesale Electricity Markets: Does it Make a Difference?.March 2008. NYISO Available at:
http://www.nyiso.com/public/webdocs/newsroom/current_issues/uniform_pricing_v_payasbid_tierneyschatzkimukerji_2008.pdf

66. Patrick Joyce The Walrasian tâtonnement Mechanism and Information. RAND Journal of Economics, Vol 15. No. 3 (1984).
67. C. Bronfman, K. McCabe, D. Porter, S. Rassenti and V. Smith. An Experimental Examination of the Walrasian tâtonnement Mechanism. RAND Journal of Economics, Vol 27. No. 4 (1996)
68. C. Bronfman, K. McCabe, D. Porter, S. Rassenti and V. Smith. Chapter 12: The Walrasian Auction. Handbook of Experimental Economics Results. Volume 1. North-Holland. 2008
69. F. Galiana, A. Motto, A. Conejo and M. Huneault. Decentralized Nodal-Price Self-Dispatch and Commitment The Next Generation of Unit Commitment Models. International Series in Operations Research & Management Science. 2002. Volume 36.
70. A. Motto, F. Galiana, A. Conejo and M. Huneault. On Walrasian Equilibrium for Pool-Based Electricity Markets. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August 2002
71. J. Contreras, O. Candiles, J.I. de la Fuente y T. Gómez. A Cobweb Bidding Model for Competitive Electric Markets. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 1, February 2002.
72. I. Barreda “Introducción a la Investigación Experimental en Ciencias Económicas: Metodología”
73. Stephen. Toulmin. “Regreso a la Razón, el Debate entre la racionalidad y la Experiencia y la Práctica Personales en el Mundo Contemporáneo”, Ediciones Península, abril 2003
74. J.H. Kagel y A.E. Roth. The Handbook of Experimental Economics. Princeton University Press, 1995
75. J.Rivas y M. Magadán “Introducción a la Economía Experimental”, Minerva ediciones, 1999
76. Duhem “La Teoría Física: su Objeto y su Estructura”, Ed. Herder, 2003
77. P. Portoles “Explicaré”. Publicado en la Revista Electrónica del IFIC,REI 1. 2003, disponible en <http://ific.uv.es/rei/Articulos/explicare.htm>

-
78. V. Smith. "Economics in the Laboratory", *The Journal of Economic Perspectives*, Volume 8, Issue 1 (winter, 1994). Available at: <http://l-eme.gdcc.edu.cn/ztzy/V%20Smith%20%20economicsin%20the%20laboratory.pdf>
79. A. Journel. "Modeling uncertainty: some conceptual thoughts. in *Geostatistics for the next century*", Ed. Dimitrakopoulos, Kluwer, 1993
80. Francesco Guala. *The methodology of Experimental Economics*. Cambridge University Press. 2005.
81. Vernon L. Smith. Microeconomic system as an Experimental Science. *The American Economic Review*. December 1982. disponible: <http://time.dufe.edu.cn/jingjiwencong/waiwenziliao/371.pdf>
82. Bardsley N., Cubitt R., Loomes G., Moffatt P., Starmer C. & Sugden R. *Experimental Economics: Rethinking the Rules*. Princeton University Press. 2010.
83. M. Lynch y N. Gillespie "El Economista Experimental: Entrevista a Vernon L. Smith, Premio Nobel de Economía 2002", disponible: <http://www.biblioteca.cees.org.gt/topicos/web/topic-900.html>
84. V. Smith "Microeconomic System as an Experimental Science", *The American Economic Review*, December 1982, Available at: <http://time.dufe.edu.cn/jingjiwencong/waiwenziliao/371.pdf>
85. Daniel Friedman and Alessandra Cassar. *Economics Lab. An Intensive Course in Experimental Economics*. Routledge. 2004
86. Ananish Chaudhuri. *Experiments in Economics, Plating fair with money*. Routledge. 2009.
87. Jeremy Clift. "Entrevista a Vernon Smith: El hombre del laboratorio" *Finanzas y Desarrollo*, marzo 2003 , Available at: <http://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/spa/2003/03/pdf/clif.pdf>
88. Kiesling, Lynne. "Using Economic Experiments to Test Electricity Policy," *The Electricity Journal*, Elsevier, vol. 18(9), 2005.November. Available at:

- http://faculty.wcas.northwestern.edu/~lki851/Kiesling_ElecJNov2005.pdf
89. V. Smith. "Constructivist and ecological rationality in economics". Interdisciplinary Center for Economic Science.
<http://www.wcfia.harvard.edu/sites/default/files/Smith2003.pdf>
90. Carine Staropoli & Céline Jullien, Using Laboratory Experiments To Design Efficient Market Institutions: The Case Of Wholesale Electricity Markets. *Annals of Public and Cooperative Economics* 77:4 2006.
91. S.J.Rassenti, V. Smith y B.J. Wilson, "Using Experiments to Inform the Privatization/Deregulation Movement in Electricity" *Economic Science Laboratory*, University of Arizona
92. R. Thomas, T. Mount, R. Zimmerman, W. Schulze, R. Schuler, L. Chapman, "Testing the Effects of Price Responsive Demand on Pay-as-Offered and Soft-Cap Electricity Auctions," *hicss*, vol. 2, pp.54, 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'02)-Volume 2, 2002. Available at:
<http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/HICSS.2002.993958>
93. Bernard, J.C.; Ethier R.; Mount, T.; Schulze, W.; Zimmerman, R.D.; Gan, D.; Murillo-Sanchez, C.; Thomas, R.J. "Market for Electric Power: Experimental Results for Alternative Auction Institutions" *Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences*, 1997
94. M.J. Denton, S.J.Rassenti, V. Smith "Spot Market Mechanism Design and Competitvity Issues in Electric Power", IEEE, 1998
95. M.J. Denton, S.J.Rassenti, V. Smith "Market Power in a Deragulated Electrical Industry" *Decision Support Systems*, Elsevier, 2001
96. Bernard, J.C.; Mount, T.; Schulze, W.; "Alternative Auction Institutions for Electric Power Markets" *Agricultural and Resource Economics Review*. October 1998 Available at:
<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/31529/1/27020125.pdf>

-
97. Bernard, J.C.; Zimmerman, R.D.; Schulze, W.; Thomas, R.J.; Mount T.; Schuler R. "Alternative Auction Institutions for Purchasing Electric Power Markets," Bulk Power System Dynamics and Control IV – Restructuring, August 24-28, Santorini, Greece. 1998 Available at: http://e3rg.pserc.cornell.edu/files/Zim_Santorini.pdf
 98. Zimmerman, R.D.; Bernard, J.C.; Thomas, R.J.; Schulze, W.; , "Energy auctions and market power: an experimental examination" System Sciences, 1999. HICSS-32. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on , vol.Track3, no., pp.9 pp., 1999URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=772873&isnumber=16783>
 99. S.J.Rassenti, V. Smith y B.J. Wilson Structural Features that Contribute to Market Power in Electric Power Networks: Some Preliminary Results”, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2000
 100. Olson, M.A.; Rassenti, S.J.; Smith, V.L.; Rigdon, M.L.; Ziegler, M.J.; , "Market design and motivated human trading behavior in electricity markets," System Sciences, 1999. HICSS-32. Proceedings of the 32nd Annual Hawaii International Conference on , vol.Track3, no., pp.18 pp., 1999. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=772842&isnumber=16783>
 101. S.J.Rassenti, V. Smith y B.J. Wilson “Controlling market power and price spikes in electricity networks: Demand-side bidding”, Journal of Regulatory Economics, 2003
 102. Kunz, F.; Leuthold, F.; Bautngartner, M.; Seeliger, C.; Stolze, L.; , "Applying experiments to auctions in electricity markets," Electricity Market, 2008. EEM 2008. 5th International Conference on European , May 2008 available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4579083&isnumber=4578994>
 103. Kunz, Friedrich, Baumgärtner, Michael, Seeliger, Hans-Christian, Stolze, Linda and Leuthold, Florian U., The Impact of Participant’s Risk Attitude

- on Auctions Results: An Experimental Approach to Electricity Markets (October 14, 2009). Dresden University of Technology Electricity Market Working Paper No. WP-EM-22a. Available at SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1488834>
104. Web Economic Laboratory for Iterative and Uniform Auctions. <http://www.weliua.com:8080>
105. I. Valencia-Salazar, C. Álvarez-Bel, E. Merino-Hernández, E. Peñalvo-López, J. T. Jaber-López, “WEL-IUA a New Economic Laboratory Website for Energy Auctions”. 3rd International Youth Conference on Energetics 2011, 7th -9th July, Leiria Portugal
106. Operador del Mercado de Electricidad en España <http://www.omel.es/files/flash/ResultadosMercado.swf>
107. I. Valencia-Salazar, C. Álvarez-Bel, E. Merino-Hernández, E. Peñalvo-López, J. T. Jaber-López, Delia del C. Gamboa-Olivares, “Demand Response Resources Applied to Day Ahead Markets”, 3rd International Youth Conference on Energetics 2011, 7th -9th July, Leiria Portugal
108. El Sistema Eléctrico Español. Avance del Informe 2010. Red Eléctrica de España. Disponible en: http://www.ree.es/sistema_electrico/pdf/infosis/Avance_REE_2010.pdf
109. Gestión de Demanda-Servicio de Interrumpibilidad. Red Eléctrica de España. Disponible en: http://www.ree.es/operacion/servicio_interrumpibilidad.asp