

LA BOLSA DE ENERGÍA ELÉCTRICA A LA LUZ DE LA TEORÍA DE JUEGOS*

IE MSc Andrés Jaramillo Vélez
IC MSc Enrique Ángel Sanint (Asesor)

RESUMEN

Mediante este trabajo se pretende estudiar el impacto comercial que tienen algunos aspectos técnicos de la operación del Sistema Interconectado Nacional (particularmente las restricciones eléctricas), que alejan al mercado de la energía eléctrica de un esquema de libre competencia. Haciendo uso del análisis por agentes y teoría de juegos, se pretende determinar desde el lado de los agentes, el conjunto óptimo de estrategias para realizar ofertas de acuerdo a parámetros bien definidos. Del lado del sistema como un todo y los entes reguladores, se determinan aquellas situaciones y conductas que desoptimizan la operación del mercado de energía eléctrica en Colombia y posibles correctivos.

ABSTRACT

Some technical aspects of the operation of the National Interconnected System that displace the electricity market from

* Trabajo presentado como tesis de maestría en el posgrado de ciencias económicas de la Universidad Nacional de Colombia. Asesorado por IC MSc Enrique Ángel Sanint

perfect competence are studied, particular electric constraints. Using game theory, from the offer side, an optimal set of strategies to determine the quantity and price to offer are derived. From the demand side and the system as a whole, factors and behaviours de-optimizing the operation of the market are pointed and some possible solutions, presented.

1. INTRODUCCIÓN

El interés de este trabajo es el de estudiar las características del mercado de energía eléctrica en Colombia, específicamente con el objeto de caracterizar el comportamiento de la bolsa de energía y sus agentes. Esta caracterización es realizada mediante el uso de teoría de juegos, la cual permite determinar conductas económicas particulares y detectar posibles fallos del esquema actual.

Se pretende además, el diseño de un conjunto de estrategias de precio y cantidad de energía eléctrica, que permitan a los agentes participantes de la bolsa de energía, construir escenarios de oferta.

El comportamiento del mercado de energía eléctrica depende de decisiones tomadas en diferentes escalas de tiempo. Las herramientas y criterios usados para la toma de decisiones son diferentes para cada escala temporal y deben ser articulados para el correcto funcionamiento del sistema. La gráfica 1 ilustra res-

pecto al tiempo, la escala de decisiones y variables macro que influyen el mercado de energía eléctrica.

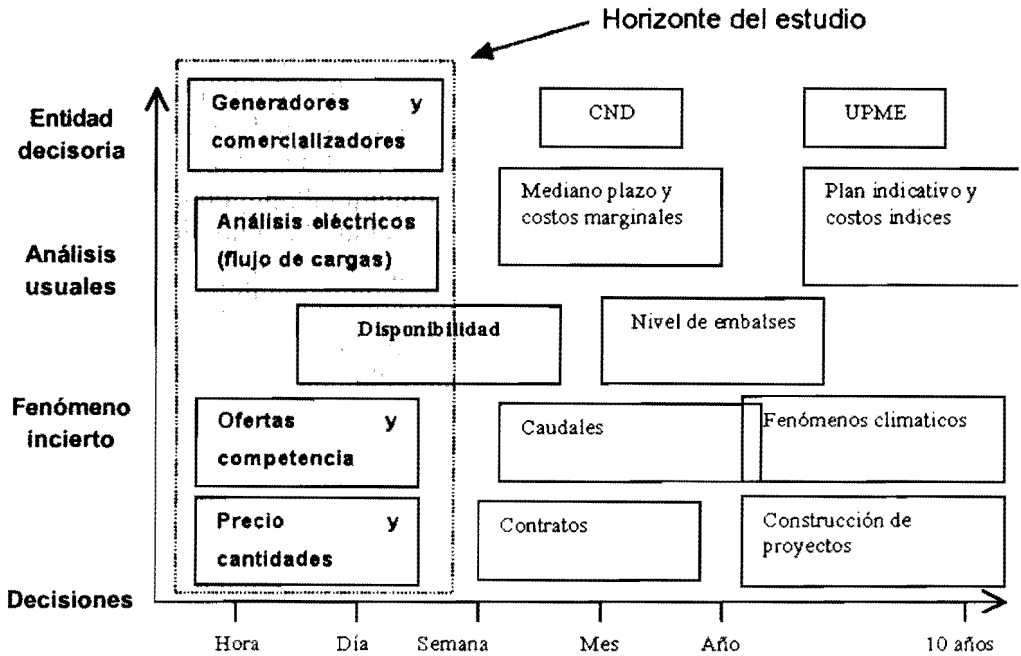
El horizonte de este estudio se centra en una resolución de días. Esto se hace con el fin de estudiar los fenómenos que suceden en el ejercicio del corto plazo.

2. BOLSA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El proceso de la bolsa de energía se trata básicamente de un sistema de subastas dinámico en sobre cerrado en el que se transan cantidades de energía y precios de la misma. Se dice que es dinámico porque las subastas dependen de las necesidades de la demanda, lo cual lo haría similar a un monopsonio donde existen muchos vendedores competitivos y un agente comprador (el sistema representado en la demanda total de energía).

Lo que hace compleja la caracterización del juego de la bolsa de energía eléctrica, es que

GRÁFICA 1
Escala temporal de las decisiones energéticas



en este entorno intervienen dos procesos de naturalezas muy diferentes como son el operativo y el comercial.

Cuando se habla de proceso operativo, se refiere al manejo de todas aquellas variables técnicas que intervienen en los procesos de generación y transporte de la energía eléctrica. Estos procesos van desde el planeamiento eléctrico-energético, hasta la operación misma del sistema (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 1995).

Todos los días antes de las 09:30 los agentes se ven ante la

pregunta: ¿Cuánto ofertar y a qué precio?

El despacho económico establece el programa de generación para cubrir la demanda esperada de tal forma que para cada hora se utilicen los recursos de menor precio, cumpliendo con las condiciones límites que tiene el sistema, como son los requisitos de reserva rodante, las inflexibilidades de las plantas y las restricciones del sistema.

El despacho de una planta no sólo depende del precio de oferta, sino de la manera como los agentes analicen las necesidades del sistema, es decir el cu-

brimiento de demanda y la generación de restricciones. La información del despacho se hace disponible a la vista de todos los agentes, lo que posibilita a cualquier agente determinar la manera como sus competidores están compitiendo.

Durante el día se pueden presentar eventos en el sistema que requieren el cambio del programa inicial originando lo que se denomina redespacho. En el redespacho existe la posibilidad de intervenir el curso del mercado, ya que los agentes pueden modificar la entrada y salida de unidades o aprovecharse de los cambios topológicos transitorios para sacar provecho comercial.

Una de las definiciones que tiene el precio de bolsa es "corresponde al mayor precio de oferta de las unidades con despacho centralizado que han sido

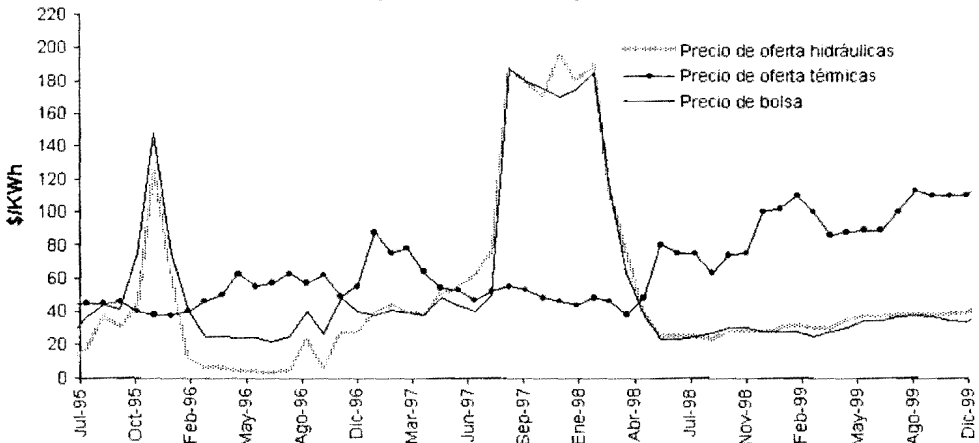
programadas para generar en el despacho ideal y que no presentan inflexibilidad" (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 1996).

Aunque el objeto de este trabajo es caracterizar el proceso de bolsa, es menester analizar la influencia que tienen los contratos en el juego de corto plazo.

Como puede observarse en la gráfica 2 (Interconexión Eléctrica S.A. ISACOM, 1999 (b)), el precio de bolsa está fuertemente influenciado por el precio hidráulico, sin embargo en períodos (desde mayo de 1998 hasta diciembre de 1999), los precios de energía térmica se incrementaron como consecuencia de un conocimiento más detallado de las restricciones, los atentados a la red eléctrica y la baja disponibilidad hidráulica. (Interconexión Eléctrica S.A., ISA., 1999 (b)).

GRÁFICA 2

Evolución de precios de oferta y precio de bolsa



3. APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE JUEGOS A LA BOLSA DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Actualmente una "moderna" teoría de juegos, intenta no solo la determinación de la existencia y unicidad de equilibrios estáticos de Nash sino comprender el comportamiento de los individuos en un contexto dinámico.

Desde el punto de vista del mecanismo de operación, la bolsa de energía puede analizarse como una subasta en sobre cerrado con características especiales como el acoplamiento hidrotérmico y posibilidades como la subasta sucesiva o iterativa. Estas últimas variantes permiten pujas sucesivas en diferentes etapas logrando finalmente una convergencia hacia la mejor oferta. Actualmente la bolsa de energía en Colombia no considera los acoples hidrotérmicos y realiza una optimización horaria.

Existe más o menos consenso entre los autores dedicados al tema, sobre lo que es un juego. En general se puede decir que un juego es "un conjunto de comportamientos de unos individuos que compiten en un escenario con el fin de ganar" (Binmore, 1994). Visto de esta sencilla manera, puede decirse que la bolsa de energía constituye claramente un juego en el que los agentes participantes tratan de maximizar sus utilidades.

La reglamentación actual del mercado de energía eléctrica en Colombia impide que los agentes se pongan de acuerdo en la manera de jugar, en otras palabras prohíbe la colusión, pudiendo determinar que por lo menos desde el punto de vista normativo, los jugadores compiten en un escenario no cooperativo.

4. RESTRICCIONES ELÉCTRICAS

Las restricciones eléctricas se generan por la incapacidad técnica de los elementos que posee la red, para transportar y transformar la energía necesaria para atender la demanda.

La restricción de tensión es la obligatoriedad para quienes operan las redes de transporte de energía eléctrica, de mantener el perfil de voltajes dentro de los rangos estipulados por el código de redes (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 1995).

Esta restricción hace necesario mantener generadores en línea con el objetivo de entregar potencia reactiva a la red (Mvars), o hacer que algunas máquinas generen potencia activa adicional (MWs). Este exceso de potencia o de unidades necesarias en línea se debe a la lejanía de los generadores respecto a las cargas o a la incapacidad de los elementos de transformación para entregar la energía en niveles más bajos de tensión.

La restricción de potencia, se genera por la incapacidad de la red para transportar y transformar la energía que requieren los usuarios finales. Estas restricciones implican una generación de seguridad en un área o superárea, la cual debe ser suplida solamente por los agentes de dicha área.

Cuando los sistemas de potencia son débiles, como es el caso colombiano⁽¹⁾, existen maneras de sacar provecho comercial de la forma de la red ya que la salida transitoria de un elemento puede provocar la crea-

ción de una restricción de potencia o tensión.

Para un mejor examen de la influencia de las restricciones en el mercado de energía eléctrica, se ha definido el siguiente concepto:

Cantidad Individual de Restricción del Agente (CIRA): Es la porción de restricción que le corresponde a cada planta de un área eléctrica y está definida como:

$CIRA = \text{Demanda total del área} - (\text{importación del área} + \Sigma \text{generación de los otros agentes}).$

El cuadro 1 ilustra numéricamente la expresión anterior.

CUADRO 1

Agente	Capacidad instalada [MW]	CIRA [MW]
1	50	0
2	100	50
3	150	100
4	200	150

Demanda del área = 500 MW
 Importación hacia el área = 50 MW

El agente 1 no tendría capacidad de ofertar en restricciones ya que la demanda del área podría suplirse con la generación de los otros y la importación. Este agen-

te se verá abocado a ofertar a un precio menor que los otros o aprovechar cualquier indisponibilidad de las unidades de sus competidores.

5. JUEGOS Y ESTRATEGIAS

En general, el juego de la bolsa de energía gira en torno a lo que se denomina el despacho. El despacho es la notificación a los agentes generadores de la hora y cantidad de energía que deben entregar al sistema. Tal como está diseñado el mecanismo de asignación de méritos, el agente debe ubicar su oferta dentro de un rango de precios, el cual puede ilustrarse de la siguiente manera:

El CEE es el costo equivalente de energía y el CR1-1\$ es el primer segmento de racionamiento menos 1 peso. Este último significa un precio de oferta tal que no amerite investigación.

Las posibilidades de oferta se definen así:

Segmento 1 (CEE - PB): En general, los agentes no estarán interesados en salir en un punto medio de este segmento, ya que si su interés es intentar salir despachados a toda costa pondrán un precio igual al CEE (sobre todo aquellos que están en áreas

sin restricción o con CIRA bajo o negativo). Aquellos agentes que desean salir despachados pero tienen un CIRA medio, desearán que su precio de oferta se ubique lo más cercanamente posible al precio de bolsa.

Segmento 2 (PB - CR1-1\$): En este segmento, aquellos agentes que buscan salir despachados pero su CIRA es medio-bajo, desearán que su precio de oferta se ubique ligeramente por debajo del precio de bolsa, ya que si sale despachado perdería la diferencia entre el precio de bolsa y el de oferta (Po-PB). Aquellos agentes que tienen un CIRA alto, ofertarán lo más alto posible (CR1-1\$), ya que el sistema los despacha por seguridad al precio de oferta.

Como se observa, aunque la recta plantea un conjunto infinito de posibilidades para ofertar, los agentes focalizan su atención en las fronteras de los segmentos ilustrados.

La presentación de los juegos se hará de manera estratégica y con la siguiente estructura:

Jugador 2

		Estrategia 1	Estrategia 2
Jugador 1	Estrategia 1	Pago a 1 Pago a 2	Pago a 1 Pago a 2
	Estrategia 2	Pago a 1 Pago a 2	Pago a 1 Pago a 2

Por simplicidad, se supondrá que el jugador 1 representa al agente que debe determinar la estrategia y el jugador 2 puede ser otro competidor o un agregado del resto del sistema. Tomando como base estudios similares realizados sobre casos como el inglés, Noruego y Australiano (Von der Fehr y Harbord, 1998), se simplifica el caso de estudio a un duopolio que enfrenta a dos generadores estratégicos: un generador frente a un competidor de capacidad semejante o enfrentado al sistema agregado (Stacchetti, 1999).

Las variables que intervienen en la notación de los juegos (y posteriormente de las estrategias) son:

CI: Es la cantidad de potencia instalada efectiva no inflexible, es decir, la generación que está disponible en cualquier momento.

CC: Es la cantidad de energía que el agente generador tiene vendida en contratos, la cual es fija y pactada con anterioridad.

CR: Se denomina cantidad de restricción local o regional. Esta restricción puede ser del tipo potencia o tensión y en ambos casos implica generación de seguridad.

CR1-1\$: Es el precio de oferta máximo que el agente puede declarar y que no amerita investigación.

PG: Es el costo de generación (no lo que se oferta sino lo que realmente le cuesta al agente generar), diferente para hidráulicos y térmicos⁽²⁾.

PB: Es el precio de bolsa estimado para el ejercicio siguiente.

PC: Es el precio pactado para los contratos a largo plazo.

Jugadores en un área con alta restricción (Racionamiento permanente)

En este juego se suponen dos jugadores para los cuales la suma de sus capacidades instaladas es menor que la cantidad de restricción del área, es decir no hay abastecimiento suficiente para la atención de la carga, en otras palabras, para cada uno de ellos $CIRA_i \geq CI_i$ ⁽³⁾. Más adelante se verá cómo este tipo de situación define un conjunto de estrategias especial.

Por simplicidad en el planteamiento se supone que las capacidades instaladas (CI_i) y costos de generación (PG_i) de los jugadores son iguales. Asumir esto no afecta sustancialmente el análisis, ya que en general aquellos jugadores que compiten por las restricciones tienen características similares.

El planteamiento anterior se puede sintetizar en la siguiente expresión:

$$CI_1 + CI_2 < CR_{\text{área}} \text{ Sujeto a } CI_1 = CI_2 = CI \text{ y } PG_1 = PG_2 = PG$$

En las anteriores condiciones, el juego podría plantearse de la siguiente forma:

Agente 2

		Marcar el marginal	Ofertar CR1-1\$
Agente 1	Marcar el marginal	[CI x (PB-PG)] [CI x (PB-PG)]	[CI x (PB-PG)] [CI x (CR1-1\$-PG)]
	Ofertar CR1-1\$	[CI x (CR1-1\$-PG)] [CI x (PB-PG)]	[CI x (CR1-1\$-PG)] [CI x (CR1-1\$-PG)]

Esta matriz de pagos, dado que $(CR1-1\$ > PB)$ ambos jugadores tienden a ofertar un alto precio por su energía, y no existe razón para que alguno de ellos elija otra estrategia. La estrategia dominante es la (2,2), y es allí donde se presenta un equilibrio puro de Nash, definido como una situación en la cual no existen incentivos para que ninguno de los jugadores cambie de estrategia.

Esta situación es sostenible en el largo plazo a menos que las condiciones de restricción cambien o se involucren nuevos agentes que varíen la composición de la generación del área. Como se puede ver, esta situación es ventajosa para los agentes pero bastante onerosa para el sistema, ya que la totalidad del sistema debe pagar como restricción regional o global la existencia de este equilibrio.

A este respecto algunos autores señalan: "la existencia de equilibrios de Nash, revela a menudo malos resultados para la sociedad como un todo y conlleva a que ésta sufra de la llamada tragedia de los bienes comunes" (Van der Laan y Tieman, 1996).

Jugadores en un área con capacidad de restricción condicionada

En este juego, la cantidad de restricción del área es menor que la suma de las capacidades instaladas de los agentes, pero mayor que la capacidad individual de cualquiera de ellos, es decir, individualmente los agentes no alcanzan a cubrir la restricción, pero unidos exceden la seguridad asignada para el área.

$$0 \leq CIRA_i \leq CI_i$$

$$CI_1 + CI_2 > CR_{\text{área}} \text{ Sujeto a } CI_1 = CI_2 < CR_{\text{área}} \text{ y } PG_1 = PG_2 = PG$$

Para este caso la matriz de pagos queda así:

Agente 2

	Marcar el marginal	Ofertar CR1-1\$
Agente 1 Marcar el marginal	$[Pr_1 \times (PB^- - PG) \times Cl_1 + Pr_2 \times (PB^+ - PG) \times (CR_{\text{área}} - Cl_2)]$ $[Pr_1 \times (PB^+ - PG) \times (CR_{\text{área}} - Cl_1) + Pr_2 \times (PB^- - PG) \times Cl_2]$	$[Cl_2 \times (PB - PG)]$ $[(CR_{\text{área}} - Cl_1) \times (CR_1 - 1\$ - PG)]$
Ofertar CR1-1\$	$[(CR_{\text{área}} - Cl_2) \times (CR_1 - 1\$ - PG)]$ $[Cl_1 \times (PB - PG)]$	$(CR_{\text{área}} / 2) \times (CR_1 - 1\$ - PG)$ $(CR_{\text{área}} / 2) \times (CR_1 - 1\$ - PG)$

Estos pagos significan que el área suple su carga solamente con los dos jugadores. La estrategia escogida y el pago respectivo dependen de la lejanía entre el valor de la restricción del área y la suma de las capacidades efectivas de los agentes.

En caso de que los dos agentes decidan marcar el marginal (ya que consideran que es más seguro ofertar precio de bolsa y no restricción), el pago respectivo dependerá de su cercanía al marginal por encima (PB+) o por debajo (PB-) respecto del presentado al final del ejercicio.

Los factores Pr_1 y Pr_2 en la expresión representan la probabilidad de obtener determinada cantidad en el largo plazo. Esta probabilidad dependerá de la posibilidad de que la restricción sea eliminada en el corto plazo.

En caso de que uno de los agentes (si es que existe uno más fuerte), decida ofertar un precio elevado, su pago será alto ya que la bolsa despachará pri-

mero al otro jugador barato (pero pequeño) y necesariamente deberá incluir al agente mayor por seguridad a un precio similar al CR1-1\$.

Este comportamiento, si es sostenible en el tiempo, llevará a que las ofertas del jugador pequeño se vayan acercando, hasta casi alcanzar las ofertas del jugador grande, creando una situación de colusión tácita (tácita porque no implica comunicación entre los agentes).

Agentes con capacidad autónoma de cubrimiento de restricción

En este juego cualquiera de los agentes puede cubrir la restricción con su capacidad instalada, es decir, $CIRA_i = 0$. Lo anterior se puede expresar de la siguiente manera:

$$Cl_1 = Cl_2 > CR_{\text{área}} \text{ Sujeto a } PG_1 = PG_2$$

Este caso es quizá el más cercano a una competencia perfecta, ya que los jugadores

ofertarán para quedarse con la cantidad de restricción del área sin más limitante que la incertidumbre de precios.

La matriz de pagos correspondiente a este juego puede expresarse así:

Agente 2

		Marcar el marginal	Ofertar CR1-1\$
Agente 1	Marcar el marginal	$\begin{bmatrix} [Pr_1 \times (PB^- - PG_1) \times CR_{\text{área}}] \\ [Pr_2 \times (PB^- - PG_2) \times CR_{\text{área}}] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} [0] \\ [CR_{\text{área}} \times (PB - PG)] \end{bmatrix}$
	Ofertar CR1-1\$	$\begin{bmatrix} [CR_{\text{área}} \times (PB - PG)] \\ [0] \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} (CR_{\text{área}} / 2) \times (CR1-1\$ - PG) \\ (CR_{\text{área}} / 2) \times (CR1-1\$ - PG) \end{bmatrix}$

En este caso la estrategia dominante se presenta aparentemente en (2,2). Si la diferencia entre la cantidad de restricción del área y la capacidad de los agentes es grande, por ejemplo 500 a 100, cualquiera de los agentes tendría energía de sobra para cubrir la restricción y lamentablemente para el sistema, el excedente quedaría atrapado por insuficiencia en la transmisión.

Los factores Pr_1 y Pr_2 en la expresión representan la probabilidad de obtener determinada cantidad en el largo plazo. A diferencia del juego anterior, esta probabilidad dependerá del conocimiento que tenga el agente de la estructura de precios y oferta de los otros agentes.

En este caso los agentes podrían ofertar un alto precio, y si esos altos precios coinciden (colusión tácita) irían a un desempate por orden de méritos. Ya que en teoría los agentes no conocen

la oferta de los demás, la lucha por el despacho los llevaría a una guerra de precios, la cual en el largo plazo convergiría necesariamente en el costo marginal del sistema.

Jugadores en un sistema sin restricciones

Este es el juego del libre mercado, la red se supone de infinita capacidad de transporte de energía, los grupos de transformación de suficiente capacidad y la demanda conocida. Este caso de competencia perfecta, enfrentaría necesariamente a los agentes a una guerra de precios, la cual daría como resultado, un precio de operación del sistema, cercano al precio marginal del sistema.

En este juego el agente se enfrentaría a todo el sistema (ya que $CR_{\text{área}} = 0$) como un com-

petidor más, por tanto el éxito de su estrategia se deberá al análisis de la probabilidad de repetición en la estrategia de sus competidores, y deberá por tanto analizar la estructura de precios y

cantidades de sus competidores (resultado del redespacho).

La matriz de pagos correspondiente a este juego puede sintetizarse de la siguiente manera:

Agente 2

		Marcar el marginal	Ofertar CR1-1\$
Agente 1	Marcar el marginal	$P_1 \times (PB-PG) \times P_2(CG)$ $P_1 \times (PB-PG) \times P_2(CG)$	[0] $P_1 \times (PB-PG) \times P_2(CG)$
	Ofertar CR1-1\$	$P_1 \times (PB-PG) \times P_2(CG)$ [0]	[0] [0]

Este caso ha sido simulado por otros autores mediante el llamado "modelo de subasta multi-unidad" (Von der Fehr y Harbord, 1998), caracterizado como un sistema de subastas con acoplamientos mutuos.

Agentes que poseen generación térmica e hidráulica en zonas con y sin restricción

Este juego es tanto más complicado si se tiene en cuenta que el agente deberá estudiar juegos distintos para cada área y para cada tipo de generación teniendo en cuenta los jugadores a los que se enfrenta y el tipo de juego en cada zona. La oferta de este agente deberá considerar una combinación de los juegos anteriores para intentar maximizar su beneficio.

Un ejemplo ilustrativo lo presenta un agente que tiene una pequeña porción de generación térmica en un área con restricción y una mediana o gran generación hidráulica en un área sin restricciones. En el caso de la generación térmica, el jugador deberá determinar el CIRA de los otros agentes del área para saber cómo ofertar (de acuerdo con los juegos presentados anteriormente). Además, para maximizar su beneficio con la generación hidráulica, deberá tratar de ajustarse al precio de bolsa (ligeramente por debajo), ya que su interés es salir despachado a precio de bolsa en el área sin restricciones.

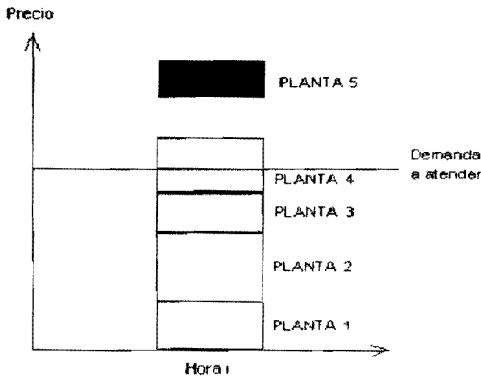
Aquí se genera un efecto cruzado entre ambas situaciones, ya que si su estrategia es errónea puede que la generación térmica haga bajar el precio de bol-

sa, ya que desplaza recursos baratos en detrimento de lo que obtendría por el despacho de su generación hidráulica.

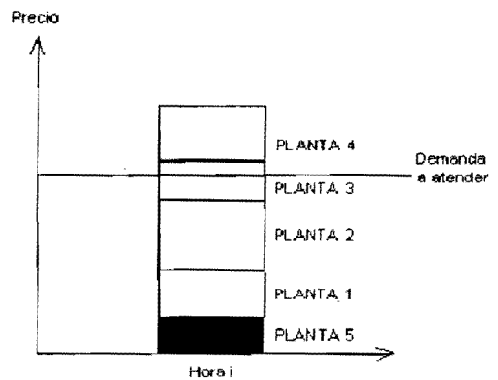
Como se ilustra en la gráfica 3.a, en un despacho sin restricciones, el orden de méritos dejaría a la planta 5 por fuera debido a su alto precio de oferta. Debido a restricciones de potencia o tensión, es necesario des-

pachar en el grupo de la seguridad a la planta 5⁽⁴⁾ (gráfica 3.b), y desplazar los otros 4 recursos. En el primer caso la planta 4 marcaba el precio de bolsa, mientras que en el segundo lo hace la planta 3. Dado que la planta 3 tiene un precio de oferta más barato que la planta 4, el despacho de la seguridad, hace que el precio de bolsa baje.

Gráfica 3.a



Gráfica 3.b



Estrategias de oferta

Las llamadas "estrategias" son una combinatoria de cantidades y precio de energía eléctrica, mediante la cual el agente puede diseñar su oferta y la manera de jugar.

Dentro de estas estrategias se considera agente a un generador con capacidad propia y contratos de venta de energía en los que se ha pactado con anterioridad cantidad y precio. Con-

viene definir algunos conceptos: "ganar" es el valor neto que se obtiene si la estrategia adoptada se logra (este valor puede ser positivo o negativo), en caso de ser negativo implica una salida de dinero. "Perder" es el valor neto que se obtiene si la estrategia adoptada no se logra (este valor puede ser positivo o negativo), en caso de ser negativo implica una salida de dinero. La "estrategia" como tal es la ubicación relativa deseada entre

precios y cantidades, por medio de la cual el agente intenta maximizar su beneficio.

Un elemento novedoso introducido en este análisis de estrategias es el de los contratos de largo plazo. Una manera de involucrar los contratos en los juegos, ya que tienen un tiempo y resolución distintos a la bolsa, es

la de estudiar el impacto que tienen las cantidades y precios previamente pactados en los contratos dentro del resultado final de la escogencia de una estrategia y posterior desarrollo de los juegos.

El siguiente cuadro ilustra la matriz de posiciones relativas entre precios y cantidades.

Cantidad	CR CI	CI CR	CR CC	CC CR	CI CC	CC CI
Precios	CI CC	CC CC	CI CI	CI CI	CR CR	CI CR
PG PB PC	1	2	3	4	5	6
PB PG PC	7	8	9	10	11	12
PG PC PB	13	14	15	16	17	18
PC PG PB	19	20	21	22	23	24
PB PC PG	25	26	27	28	29	30
PC PB PG	31	32	33	34	35	36

Las columnas representan la posición del agente respecto a las cantidades de energía y las filas representan la posición respecto a los precios. Cada una de las celdas de la matriz, represen-

ta una estructura de oferta tanto de precio como de disponibilidad del recurso. A continuación se analizarán características de algunas de las combinaciones.

- Caso (1,1) La estructura de precios y cantidades para este caso es: $CR > CI > CC$ y $PG > PB > PC$. Desde el punto de vista de cantidades significa que la CIRA para el agente es mayor que su capacidad instalada, lo cual enfrentaría al área en cuestión a un racionamiento permanente.

La función de pago para el agente en esta condición será:

$$\pi = CI \times (CR - 1\$ - PG) - CC \times (PB - PC)$$

Lo anterior indica que el agente debe ofertar un precio tal que no amerite investigación (ligera-mente menor al CR_1) y su generación será despachada por seguridad a ese alto precio.

La primera parte de la expresión, es decir $CI \times (CR - 1\$ - PG)$ corresponde al proceso de "reconciliación" donde a los agentes que generan por restricción se les paga la diferencia entre el despacho ideal y el despacho real. La segunda parte de la expresión, es decir $CC \times (PB - PC)$ indica lo ganado por el agente en el proceso de bolsa propiamente dicho. Esta última expresión indica que el agente maximizará sus ganancias, si efectivamente PB es mayor que PC haciendo la diferencia lo más grande posible.

Dentro de las señales para el generador o el inversionista estarían instalar una capacidad generadora equivalente a $CIRAI_i$, lo cual aseguraría que ese agente siempre saldrá despachado a

altos precios de oferta por cuenta de la restricción.

Caso (1,2): $CI > CR > CC$ y $PG > PB > PC$. En este caso el agente tiene capacidad instalada suficiente para atender la restricción unitaria y los contratos.

El resultado de los pagos dependerá de la percepción del riesgo que tiene el agente durante la elaboración de su oferta. El agente debe comparar los dos pagos siguientes:

$$\pi_1 = CR \times (CR - 1\$ - PG) - CC \times (PB - PC)$$

$$\pi_2 = (CI - CC) \times (PB - 1\$ - PG) + (CC \times PC)$$

En el caso π_1 , el agente oferta un precio alto porque considera que la restricción, aunque poca será mejor que π_2 , caso en el cual decide ofertar por debajo del precio bolsa para aprovechar el alto PB , y salir despachado por méritos con una cantidad mayor. Si el autor elige la opción π_2 y no sale despachado por méritos su pago será:

$$\pi_3 = CR \times (PB - 1\$ - PG) - CC \times (PB - PC)$$

Como puede observarse la ganancia es menor que en los casos π_1 y π_2 , ya que solo ganará la poca restricción al precio de bolsa.

En el caso π_1 , el óptimo se daría si el agente no tiene pactados contratos ya que ganaría un margen superior al reducir la expresión $CC \times (PB - PC)$.

Ya que en este caso el precio de bolsa es mayor que el precio de los contratos, el agente venderá sus contratos baratos pero generará por restricciones, lo cual podría compensar esa pérdida. Ya que sus costos de generación son altos, este agente debería ofertar alto para generar por restricciones y reconciliar para cubrir contratos.

Caso (1,5): $CI > CC > CR$ y $PG > PB > PC$. La función de beneficio para este caso depende de la percepción del riesgo que tiene el agente durante la elaboración de su oferta. La capacidad instalada para el agente es alta pero su cantidad individual de restricción CIRA es baja.

En este caso, el precio de bolsa es mayor al precio de los contratos pactados, lo que haría desfavorable tener que comprar caro en bolsa para cubrir contratos más costosos.

La elección de una estrategia dependerá de la posición relativa de precios y el agente deberá comparar las funciones de beneficio:

$$\pi_1 = CR \times (CR1 - 1\$ - PG) - CC \times (PB - PC)$$

$$\pi_2 = (CI - CC) \times (PB - 1\$ - PG) + (CC \times PC)$$

En el caso π_1 , la estrategia es ofertar alto para generar por restricciones, y se escogería sólo en caso de que $CR \times (CR1 - 1\$ - PG)$ sea mayor $CC \times (PB - PC)$,

la función de pagos π_2 se daría en caso de escoger la estrategia contraria. Si el agente elige la estrategia de salir despachado por méritos debe tener en cuenta que sus costos de generación para este caso son altos.

Caso (1,6): $CC > CI > CR$ y $PG > PB > PC$. Este caso es similar a los anteriores pero la cantidad pactada en contratos es mayor. Esta posible sobrecontratación puede deberse entre otras razones a:

1. En el momento de pactar los contratos, consideraba que el precio iba a ser mayor que el de bolsa en cualquier caso.
2. La cantidad pactada en contratos es muy superior a la capacidad instalada.

En el caso actual, el costo de generación es muy alto y el precio de bolsa superior al de los contratos. La estrategia no parece clara. Dado que el agente tiene una gran cantidad pactada en contratos, y que no tiene capacidad instalada suficiente para cubrirlos, deberá reconciliar para cumplir con el excedente.

Si la diferencia entre la cantidad pactada en contratos y la capacidad instalada es muy grande quizá sería mejor ofertar para cubrir su CIRA aunque pequeño. Además, ya que los costos de generación para este agente son altos, la estrategia presentada parece la óptima.

La estrategia seleccionada presenta la siguiente función de beneficio:

$$\pi = CR \times (CR1 - 1\$ - PG) - CC \times (PB - PC)$$

Caso (5,6): $CC > CI > CR$ y $PB > PC > PG$. El precio de bolsa es más alto que el de los contratos. Este caso presenta dificultad en la escogencia de la estrategia ya que el agente tiene un CIRA bajo y de todas maneras deberá reconciliar para cumplir con sus contratos. La estrategia elegida dependerá de qué tan alejados estén los precios de bolsa y contratos.

Si el precio de bolsa es muy superior al precio de los contratos, quizá sea rentable para el agente generar por méritos, ofer-

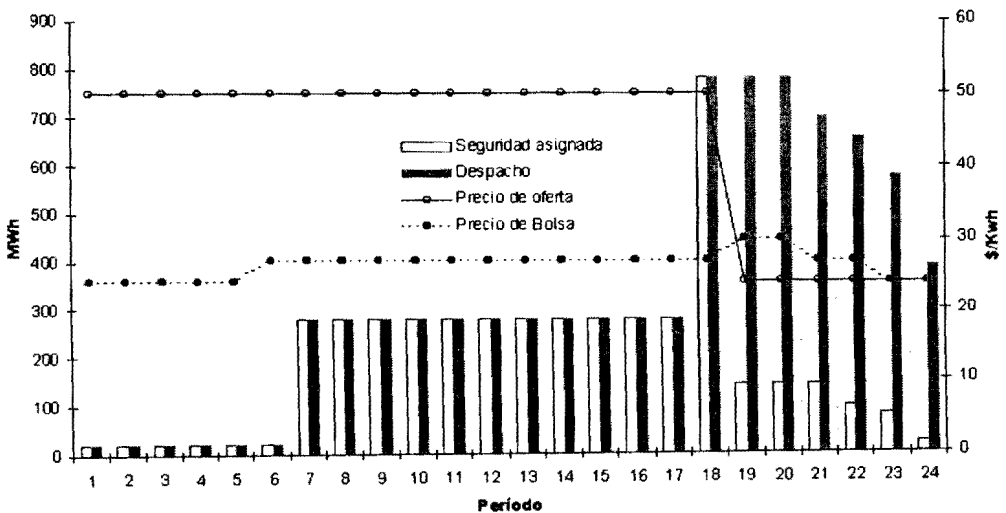
tando un precio que esté ligeramente por debajo del precio marginal. De todas maneras deberá comprar a un alto precio en bolsa para cumplir con sus contratos. Si los precios de bolsa y de contratos no están muy alejados, el agente deberá evaluar la posibilidad de ofertar su CIRA a un alto precio y reconciliar para cubrir sus contratos.

5.1. Ilustración del comportamiento de un agente

Este apartado describe el comportamiento de un agente en particular (Chivor) y las estrategias adoptadas de acuerdo con las condiciones operativas como topología, demanda y restricciones. La gráfica 4 (Interconexión

GRÁFICA 4

Caso Chivor: Generaciones y precios



Eléctrica S.A., 1999 (c)) ilustra el comportamiento de oferta y despacho de Chivor.

Se observa cómo la oferta es uniforme hasta el pico 2 de carga (período comprendido entre las 18:00 y 21:00), y disminuye en el período comprendido entre las 21:00 y 24:00. Durante los períodos de la madrugada (01:00 a 06:00) la planta sale poco despachada ya que su precio de oferta es superior al precio de bolsa. El agente presentado tiene un CIRA medio-bajo, lo cual quiere decir que el sistema la despachará por su gran capacidad cuando la demanda esté alta y deberá competir por méritos el resto del día.

A partir del período 19 la planta baja su oferta a la mitad, ya que la demanda del sistema aumentará (punta 2) y el sistema necesitará de su capacidad instalada, esto hace que salga despachada con toda su generación a un precio de bolsa ligeramente superior que el del resto del día.

5.2. Análisis de las estrategias de los agentes

Este apartado presenta un análisis del comportamiento de los agentes del mercado de energía eléctrica en Colombia, teniendo en cuenta las posibilidades de juegos y estrategias presentados anteriormente. De acuerdo con lo presentado en el capítulo 3, los

jugadores pueden intentar maximizar su beneficio, sacando partido de condiciones técnicas como las restricciones de tensión y potencia.

Se presentará un estudio del comportamiento de los agentes, mediante el análisis de las restricciones con base en las generaciones de los agentes.

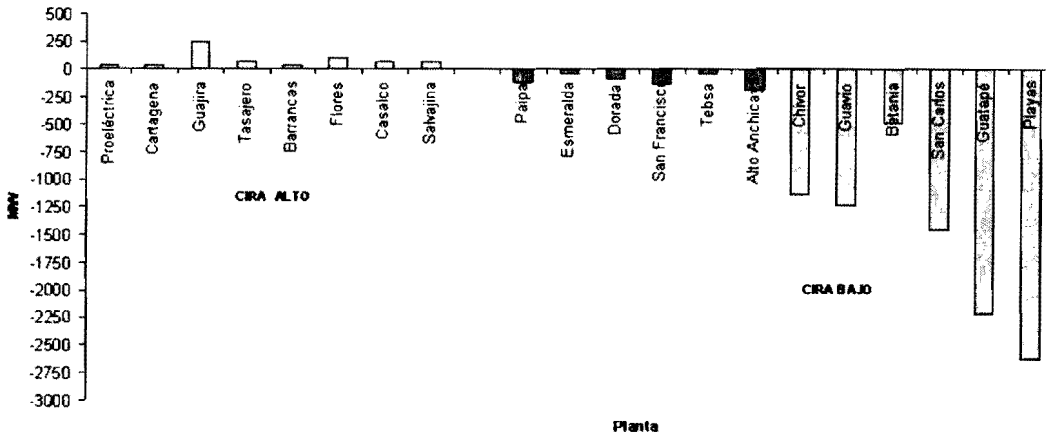
La gráfica 5 presenta el resultado del cálculo del CIRA para las principales plantas del sistema (tomando como base la demanda promedio de cada área y los factores de importación de energía para cada área en el período enero de 1997 a diciembre de 1999). Esta gráfica permite dividir los agentes seleccionados en dos grupos así:

Grupo 1 (CIRA alto): Las plantas que conforman este grupo son Proeléctrica, Cartagena, Termoguajira, Tasajero, Barranca, Flores, Casalco y Salvajina.

El grupo 2 (CIRA bajo): Este grupo lo conforman las plantas Paipa, Esmeralda, Termodorada, San Francisco, Riogrande, Alto Anchicayá, TermoBarranquilla, TermoCentro, Chivor, Jaguas, Playas, San Carlos, La Tasajera, Guatapé, Betania, Guatrón y Guavio. Las plantas pertenecientes a este grupo tienen un valor de CIRA negativo, lo cual significa que son exportadoras y por tanto están obligadas a competir por precio frente a unidades de otras áreas del sistema.

GRÁFICA 5

Capacidad individual de Restricción del Agente, CIRA



A la luz de las estrategias presentadas en el capítulo 3, aquellas unidades que se encuentran en el grupo 1 (CIRA alto), deberían adoptar la estrategia de ofertar alto, ya que el sistema los necesita por seguridad eléctrica.

Las unidades pertenecientes al grupo 2, deberían adoptar una estrategia de oferta tal que les permita salir despachados por méritos con una cantidad cercana a su generación total. Estas plantas deberían salir despachadas por debajo de lo que el sistema sin restricciones (ideal) lo haría.

Para corroborar el análisis del comportamiento de los agentes en el período elegido (enero de 1997 a diciembre de 1999), se hace uso de la comparación de

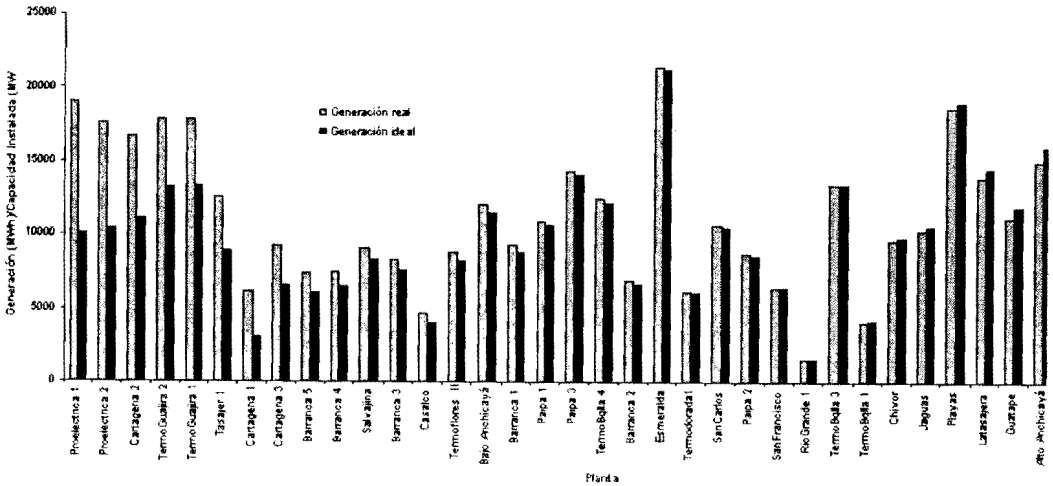
la generación real (redespacho) y la generación ideal (despacho sin restricciones) para este mismo período de tiempo. La gráfica 6 presenta tal comparación.

Las plantas pertenecientes al grupo 1 (CIRA alto) presentan alto despacho en la asignación real y bajo en la asignación ideal. Lo anterior quiere decir que si no existiese la restricción individual (CIRA), estas plantas deberían competir por méritos o no saldrían despachadas.

Las plantas pertenecientes al grupo 2 (CIRA bajo) presentan una asignación real similar al despacho ideal, lo cual quiere decir que compiten estrictamente por méritos y salen despachados como tal.

GRÁFICA 6 ⁽⁵⁾

Despacho económico comparativo (Período enero 1997 a diciembre 1999)



Con el fin de realizar un estudio de la conducta de los agentes frente a las estrategias que se han señalado como óptimas de acuerdo con su CIRA, se realizó el siguiente análisis:

Se diseñó una aplicación computacional que permite seleccionar los precios marginales del despacho hora a hora⁽⁶⁾ durante el periodo (enero 1997 a diciembre 1999), calculando para cada planta el porcentaje del tiempo que su precio de oferta coincidió con el precio marginal del sistema.

Los datos encontrados en la selección fueron escalados, dividiéndolos por la capacidad instalada total, es decir, se determinó un índice de porcentaje del

tiempo que el agente marcó el marginal por cada unidad (MW) de capacidad instalada. Este escalamiento se hizo para permitir la comparación de estrategias entre agentes con capacidades instaladas diferentes.

Luego de esta selección, se agregaron las unidades generadoras por agente

La gráfica 7 muestra plantas como Flores 2, Barrancas y Cartagena, que teniendo un CIRA alto, presentan un porcentaje importante de colocación del precio marginal. En la misma gráfica se observan plantas como Guavio, Betania (incluso San Carlos con CIRA medio - bajo) o Chivor, que teniendo un CIRA bajo, presentan un bajo porcen-

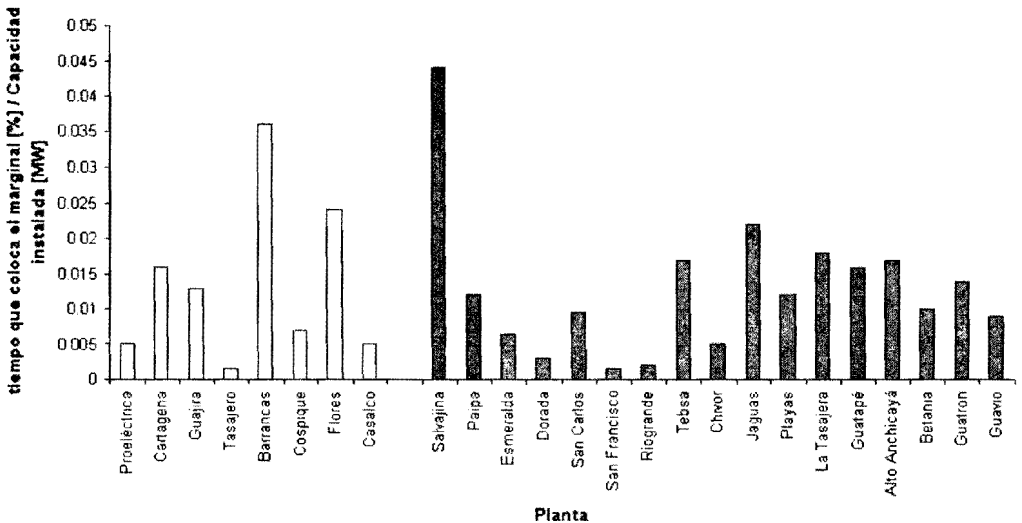
taje de colocación del marginal, lo cual indica que la estrategia en el período considerado no fue exitosa.

La gráfica 7 revela una estrategia exitosa para plantas como Termotasajero, Proeléctrica y TermoGuajira que al tener un CIRA alto, no se vieron en la nece-

sidad de colocar el marginal y seguramente su estrategia de oferta fue colocar un precio alto. Otras plantas como Salvajina, Jaguas, Guatapé, La Tasajera, Guatrón o Playas, presentan un alto porcentaje de colocación del marginal, ya que al tener CIRA bajo o medio, se ven en la necesidad de competir por méritos.

GRÁFICA 7

Colocación del precio marginal
Período enero 1997 a diciembre 1999



La gráfica 8 presenta una agregación por agente, y puede observarse que agentes como EPM, CHIDRAL, EMGESA, tuvieron una estrategia global exitosa, ya que presentan un alto índice de colocación del marginal, debido a que sus plantas tienen un CIRA bajo (Guavio, Tasajera, Guatapé, etc.) y deben ser des-

pachadas esencialmente por méritos. Otros agentes como Flores, Promotora de energía de Cartagena o Corelca también tuvieron éxito en su estrategia, ya que su índice de colocación del precio marginal es bajo al tener sus plantas un CIRA alto (Cartagena, Guajira, etc.) y sus plantas ser despachadas principal-

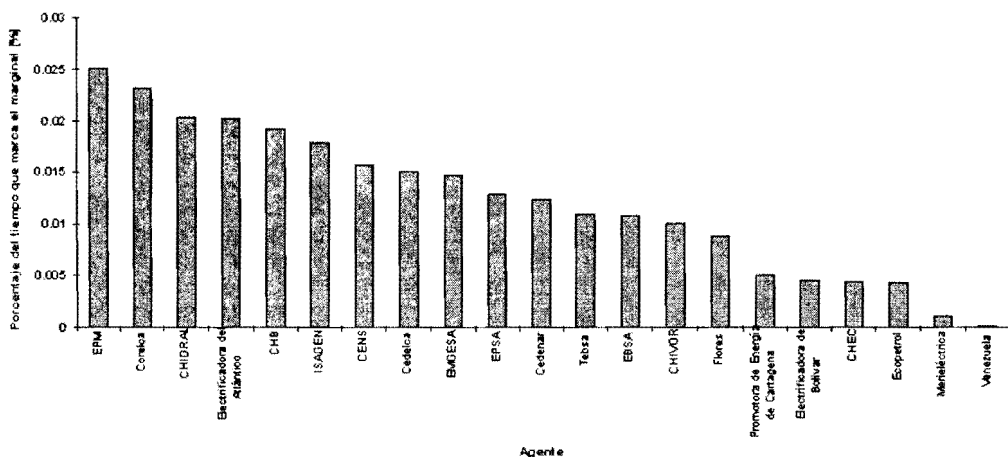
mente por restricciones eléctricas.

Agentes como CENS o Electricadora del Atlántico, no tuvieron suerte en su estrategia ya que teniendo plantas con un CI-RA alto, colocaron el marginal en alguna proporción. Otros agentes como ISAGEN, CHIVOR y EPSA, no presentan un alto índice de colocación del precio marginal, a pesar de que sus plantas salen despachadas esencialmente por méritos.

La estrategia de precios y cantidades de los agentes no sólo depende de la relación entre su capacidad instalada y la totalidad del sistema, sino entre aquella y su CIRA. Un agente de pequeña o mediana capacidad instalada, (50 a 150 MW), localizado en una zona con CIRA alto, podría imponer su condición de precio sobre la totalidad del mercado; lo anterior llevaría a repensar, desde el punto de vista operativo, el concepto de posición dominante.

GRÁFICA 8

Porcentaje del tiempo que marca el marginal [%] / capacidad instalada [MW] Análisis por planta. Periodo enero 1997 a diciembre 1999



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Las restricciones eléctricas constituyen un factor muy importante dentro de la determinación de las estrategias de precio y cantidad para los agentes participantes de la bolsa de energía eléctrica.
2. Las restricciones eléctricas de tensión y potencia son un condicionante importante dentro de los resultados comerciales

del mercado de la electricidad en Colombia.

3. El concepto del CIRA (Capacidad individual de restricción del agente) permite determinar la posición del agente frente al área eléctrica donde se encuentra ubicado y frente al sistema como un todo, permitiéndole determinar su conjunto de estrategias y la manera como debe jugar para maximizar sus utilidades.

4. Los contratos juegan un papel muy importante dentro de la determinación de las estrategias de oferta en el mercado "spot" (precio y disponibilidad), ya que influyen en la cantidad que el agente pueda ofrecer por restricciones o por méritos, dependiendo tanto de su CIRA como de su estructura de precios.

5. Los mercados de energía pueden caracterizarse como un conjunto de subastas de múltiples unidades donde la valoración de los diferentes productos está interrelacionada, haciendo que las subastas presenten acoplamientos entre sí. El mecanismo usado en Colombia de despacho simple horario sin considerar los acoplamientos entre horas, incrementa los costos de la operación.

6. La bolsa de energía eléctrica en Colombia es una combinación de juegos: Para los jugadores con CIRA bajo o cero es un juego de subasta en sobre ce-

rrado, no cooperativo, repetitivo, con información imperfecta e incompleta, de varios jugadores, con reglas no definidas totalmente e influenciado por componentes aleatorias como la hidrología y la demanda.

Para los jugadores con un CIRA del orden de magnitud de su capacidad instalada, el juego sigue siendo de subasta en sobre cerrado, repetitivo, con información imperfecta e incompleta, con reglas no definidas totalmente e influenciado por componentes aleatorias. Dependiendo de las restricciones de importación del área y del CIRA de los jugadores en su misma área, el juego puede ser de uno o dos jugadores, y convertirse en un juego cooperativo, donde ambos jugadores se adaptan mutuamente a las estrategias del contrario, para buscar llegar a un equilibrio de Nash.

7. La aparición de equilibrios de Nash (para los jugadores) dentro de los juegos presentados en este trabajo, evidencia un alejamiento del propósito fundamental del mercado de energía eléctrica, el cual pretende generar libre competencia entre los agentes (lo cual concuerda con lo encontrado por Van der Fehr y Harbord).

8. Según lo explicado en el apartado de las estrategias, los agentes deben diseñar su oferta de acuerdo a la evaluación

que hagan sobre su situación relativa de precios y cantidades. Un factor muy importante para que el agente determine su posición en la matriz y diseñe su estrategia, es la determinación de su CIRA.

9. La estrategia de precios y cantidades de los agentes no sólo depende de la relación entre su capacidad instalada y la totalidad del sistema, sino entre aquella y su CIRA, pues pueden existir agentes pequeños localizados en zonas con CIRA alto que imponen sus condiciones sobre la totalidad del mercado y se encontrarían en posición dominante.

10. Las restricciones eléctricas constituyen una situación indeseable desde el punto de vista económico, ya que aleja a la economía eléctrica de un esquema de libre competencia. Dentro de las recomendaciones que presenta este trabajo para rebajar el impacto de las restricciones en el mercado de energía eléctrica están:

- Realizar un monitoreo y control más estricto a las restricciones desde el punto de vista operativo y comercial que permita, no sólo cuantificar dicha generación sino cualificar las causas que la generaron y determinar si ese costo operativo es real u obedece a una manipulación.

- Asignar funciones de auditoría a los entes reguladores, con el fin de revisar desde el punto de vista técnico y comercial, elementos como los factores de demanda, cambios en los parámetros técnicos de las unidades, causales de mantenimientos no programados, fallas injustificadas para la no realización de mantenimientos programados, eventos no aclarados durante la operación, etc.

- No publicar las restricciones eléctricas que se derivan de la realización de mantenimientos, y que son analizadas por el Centro Nacional de Despacho, ya que esta publicación advierte al agente cuánta porción de su generación será despachada por seguridad, permitiendo el aumento desmesurado de los precios de oferta.

- Crear un mercado para la energía reactiva, ya que se optimizaría la operación del mercado mediante el levantamiento de restricciones de tensión que causan actualmente grandes costos a los usuarios.

- Realizar una optimización del despacho 24 horas (y no horario como actualmente se hace), ya que obliga a los agentes a reestructurar sus características técnicas, para competir con plantas más eficientes.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- BINMORE, Ken. *Teoría de Juegos*. Mc Graw Hill. 1ª edición en español. Madrid, 1994. 624 p.
- Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. Informes de Análisis Energético de largo plazo. Modelo AS. Documentos ISA-CN, 1998. Medellín (a).
- Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. - ISACOM. Publicación semanal. Medellín. 1998-1999. (b).
- Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. Seguimiento mensual a las restricciones eléctricas del SIN. Documentos CND. 1998-1999. Medellín. (c).
- Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. *Bolsa de Energía, Libre competencia: Economía y Eficiencia con Información*. Medellín, 1997. (d).
- SMITH, Ricardo y DYNER, Isaac. "Enseñanzas de la Reestructuración del sector Eléctrico Mundial". *Revista Energética*. Vol. 20. Noviembre de 1998. Medellín.
- VANDER LAAN, TIEMAN, XANDER. "Evolutionary Game Theory and the Modelling of Economic Behavior". *Technical Report*. Faculty of Economics and Econometrics, Free University, Amsterdam. November 1996. 26 p.
- VÁSQUEZ, Carlos. RIVIER, Michel. PEREZ-ARRIAGA, Ignacio. "Revisión de modelos de casación de ofertas para mercados eléctricos". 6as. jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica. Lisboa, Portugal. Julio 1999. 9 p.
- VON DER FEHR, Nils-Henrick. HARBORD, David. "Competition in Electricity Markets, Economic Theory and International Experience". *Memorandum from Department of Economics*. University of Oslo. Nº 5. January 1998. 59 p.
- VON DER FEHR, Nils-Henrick. HARBORD, David. "Capacity Investment and competition in Decentralised Electricity markets". *Memorandum from Department of Economics*. University of Oslo. Nº 27. November 1997. 38 p.

NOTAS

1. La debilidad se refiere a la radiabilidad de las interconexiones, poca reserva de generación, deficiencias en el control de las unidades y factores exógenos como falencias en la regulación y factores socio económicos.
2. La diferencia radica básicamente en el combustible usado. Si es agua, depende de la valoración que el agente haga de ese recurso, su estabilidad en el tiempo, capacidad de embalse, análisis hidrológico, etc.
3. Recuérdese que CIRA es la capacidad individual de restricción.
4. Recuérdese que el despacho económico elige primero las plantas que cubren seguridad eléctrica.
5. Ver Interconexión Eléctrica S.A. Informe anual de Operación. Medellín, marzo de 1999.
6. Los resultados del despacho y las ofertas de los agentes son información de público conocimiento y son publicadas para consulta de todos los agentes.