



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

BOLSA DE ENERGÍA EN EL SING – SIMULACIÓN VÍA TEORÍA DE JUEGOS

RODRIGO ESTEBAN ROJAS FERNÁNDEZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
HUGH RUDNICK V. D. W.

Santiago de Chile, 2001



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA
Departamento de Ingeniería Eléctrica

BOLSA DE ENERGÍA EN EL SING – SIMULACIÓN VÍA TEORÍA DE JUEGOS

RODRIGO ESTEBAN ROJAS FERNÁNDEZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

HUGH RUDNICK V.

DAVID WATTS C.

JUAN MANUEL CONTRERAS S.

DAVID FULLER P.

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, 2001

(A mi familia que siempre me ha apoyado y me ha entregado las herramientas para lograr mis metas, y en especial a mi novia Cecilia)

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mis sinceros agradecimientos en primer lugar a mi profesor guía el Sr. Hugh Rudnick, quién me apoyó desde un comienzo con la realización de este trabajo con su constante dedicación. También a los Srs. Juan Pablo Montero, David Watts y Juan Zolezzi que continuamente me guiaron en los análisis realizados. Es necesario dar los agradecimientos al proyecto Fondecyt N° 1000517 que entregó importante apoyo económico para la realización de este trabajo.

También debo destacar los aportes realizados por personas vinculadas a las empresas, como los Srs. Juan Manuel Contreras y Francisco Salazar (Electroandina S.A) y el Sr. Carlos Finat (CDEC-SING)

Por último, cabe mencionar el importante apoyo realizado por FIT Research en darme las facilidades para terminar este trabajo, en especial a Patricio Sandoval, Gerente del departamento de estudios.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. SISTEMA INTERCONECTADO DEL NORTE GRANDE (SING).....	3
III. TEORÍA DE JUEGOS	6
3.1 Eliminación de estrategias dominadas	6
3.2 Equilibrio de Nash	8
3.3 Duopolio de Cournot.....	9
3.4 Duopolio de Bertrand.....	9
3.5 Poder de Mercado	12
IV. MODELACIÓN DE SIMULACIÓN DE COURNOT: APLICACIÓN	
AL SING	14
4.1 Modelo de Cournot	15
4.2 Implementación del Modelo de Cournot.....	16
4.2.1 Generación.....	16
4.2.2 Demanda.....	19
4.2.3 Algoritmo de Cournot.....	21
4.2.4 Margen de ganancias de las firmas.....	24
4.2.5 Equilibrio indefinido.....	25

4.3	Resultados	26
4.3.1	Escenarios.....	27
4.3.2	Resultados simulación de Cournot.....	27
4.3.2.1	Precio de Cournot	27
4.3.2.2	Márgenes y oferta de energía.....	31
4.3.2.3	Poder de mercado	37
4.3.2.4	Restricción en generación.....	41
4.3.2.5	Fusión de firmas	53
4.4	Supuestos del Modelo	55
4.5	Discusión.....	56
4.6	Conclusiones	58
V.	MODELO DE OFERTA EN BOLSA CON INDISPONIBILIDAD	
	DE UNIDADES	60
5.1	Descripción del modelo.....	62
5.2	Implementación del modelo.....	63
5.2.1	Firmas.....	66
5.2.2	Demanda.....	68
5.2.3	La oferta.....	68
5.3	Resultados de la simulación de oferta en bolsa.....	71
5.3.1	Precio de despeje de mercado.....	71
5.3.2	Resultados y márgenes de generaciones.....	74
5.3.3	Medición de poder de mercado.....	76
5.3.4	Aplicación de la restricción de generación al modelo de ofertas en bolsa.....	78
5.4	Discusión del Modelo	83
5.5	Conclusiones.....	84
VI	CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	87
	ANEXO A.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Sistemas Eléctricos en Chile.....	3
Tabla 2.2: Capacidad Instalada por Empresa Generadora en el SING.....	4
Tabla 4.1: Márgenes totales obtenidos por los agentes generadores en el SING.....	48
Tabla 5.1: Centrales consideradas por el modelo de ofertas de precio y cantidad, en bolsa.....	66
Tabla 5.2: Costos y precios de despeje de mercado.....	72
Tabla 5.3: Costos y Precios de despeje del sistema.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1: Juego con dominación débil	7
Figura 3.2: Juego con eliminación indeterminada	8
Figura 4.1: Función de costos variables de firmas del SING.....	18
Figura 4.2: Costo variable del SING.....	18
Figura 4.4: Algoritmo de Simulación de Cournot.....	23
Figura 4.5: Margen de beneficio para cada firma	24
Figura 4.6: Intersección normal de Demanda con curva de Oferta Agregada	25
Figura 4.7: Intersección vacía de Demanda con curva de Oferta Agregada.....	25
Figura 4.8: Precios de Cournot	28
Figura 4.9: Comparación Cournot vs Competencia perfecta	30
Figura 4.10: Márgenes por firma para cada nivel de elasticidad	32
Figura 4.11: Margen total del sistema.....	34
Figura 4.12: Oferta por firma para cada nivel de elasticidad.....	36
Figura 4.13: Índice de Lerner del sistema.....	37
Figura 4.14: Índice de Lerner por firma.....	39
Figura 4.15: Índice HHI del sistema	39
Figura 4.16: Costos variables del SING con restricción de 180 MW.....	41
Figura 4.17: Precio de equilibrio de Cournot con restricción en generación.....	42

Figura 4.18: Comparación competencia perfecta y Cournot, con y sin restricción para elasticidad 0.4.....	43
Figura 4.19: Comparación competencia perfecta y Cournot, con y sin restricción para elasticidad 0.7.....	43
Figura 4.20: Comparación Cournot vs Competencia perfecta con restricción en generación.....	45
Figura 4.21: Margen por firma para cada nivel de elasticidad con restricción de generación.....	47
Figura 4.22: Oferta por firma para cada nivel de elasticidad con restricción de generación.....	50
Figura 4.23: Índice de Lerner del sistema con restricción en generación.....	52
Figura 4.24: Índice HHI del sistema con restricción en generación.....	53
Figura 4.25: Precio de Cournot con fusión de firmas.....	54
Figura 5.1: Algoritmo modelo de oferta en Bolsa con indisponibilidad de unidades.....	65
Figura 5.2: Costos variables del SING sin restricción en generación.....	67
Figura 5.3: Proceso oferta firma.....	69
Figura 5.4: Lista de mérito del sistema.....	70
Figura 5.5: Costos variables del sistema reducido sin restricción en generación.....	71
Figura 5.6: Precio de despeje de mercado versus costo variable del sistema.....	72
Figura 5.7: Generación por firma en modelo de simulación de bolsa.....	74
Figura 5.8: Margen por firma en modelo de simulación de bolsa.....	74
Figura 5.9: Comparación de márgenes entre el modelo de Cournot y el modelo de oferta.....	76

Figura 5.10: Índice Lerner y HHI del sistema reducido	77
Figura 5.11: Precio de despeje de mercado versus costo variable del sistema con restricción en generación.	79
Figura 5.12: Margen de operación firmas en el SING con restricción en generación.....	80
Figura 5.13: Generación de firmas en el SING con restricción en generación.....	80
Figura 5.14: Comparación márgenes del sistema con y sin restricción en la generación	81
Figura 5.15: Índices Lerner y HHI del sistema con restricción en generación.....	82

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar aproximaciones por medio de la Teoría de Juegos, a lo que sería un comportamiento de ofertas de firmas generadoras dentro de un esquema de Bolsa de energía en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Con este objetivo, se implementaron dos tipos de modelos de estrategias de juegos. El primero de estos utiliza un algoritmo de oligopolio de Cournot en el que actúan todas las firmas del sistema, y donde la estrategia de oferta es la cantidad de generación ofertada, quedando el precio determinado por medio de la curva de demanda. El segundo modelo aplicado intenta reflejar con mayor realidad un esquema de Bolsa de energía, considerando como estrategia de cada firma, el precio aplicado a cada una de sus unidades generadoras, sumando la estrategia de declarar unidades indisponibles. El mayor aporte de este trabajo se centra en el desarrollo del segundo modelo con ofertas de precio en Bolsa.

En ambas simulaciones se trabaja con algoritmos iterativos, producto de la utilización de curvas discretas de costos y precios variables. Este es el punto de mayor aporte de este trabajo, ya que para estudiar el SING, se debe reconocer la presencia de unidades de gran tamaño en comparación a la demanda. Una aproximación lineal del problema implicaría importantes errores.

Como principal resultado de este estudio, se detecta poder de mercado tanto en niveles bajos y altos de demanda, producto de la estructura que presenta el sistema con relación a la gran capacidad instalada de ciclos combinados con diferencias importantes entre sus costos variables. Sin embargo, este poder es menor en niveles medios de demanda. Por otra parte se observan bajos índices de concentración de mercado.

ABSTRACT

The purpose of this work is to use Game Theory to model a bid based dispatch, within the Power Exchange concept, of the Northern Interconnected Chilean System (SING).

Two types of game strategy models were implemented. The first one uses the oligopoly algorithm defined by Cournot, in which all the firms in the system will bid, and where the bidding strategy is the volume of generation offered, the price being determined by the demand curve. The second model tries to reflect with greater realism a Power Exchange scheme, where each firm uses as a strategy the price declared for each of its generator units. Non available units are also declared within the strategy. The second model is the main contribution in this work.

Both simulations use iterative algorithms, which utilize discrete curves for cost and for variable prices. This is the most important contribution of this work, due to the fact that to study the SING it is required to consider large size generating units when compared to demand. If linear analysis was used, big errors would ensue.

The main result of this study, is the detection of market power in the high and low levels of demand, due to the structure of the system with large installed capacity of combined cycles plants, with important differences between their variable costs. However, the power is reduced in mid levels of demand. Besides, low market concentration indexes were observed.

I. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los mercados eléctricos alrededor del mundo en la última década, han sido protagonistas de un profundo cambio con relación a la manera de manejar la participación de los distintos agentes que integran este sector. En la década de los ochenta, la gran mayoría de los mercados eléctricos presentaban una estructura estatal, marcada principalmente por el alto grado de propiedad que tenía el estado dentro de la generación, transmisión y distribución, y justificado principalmente por la aparente presencia de un monopolio natural que regía este ámbito de la economía. Con el transcurso del tiempo, y sobre la base de numerosos estudios en nuevos conceptos económicos, emergieron evidencias de que si podía existir una mayor competencia en el sector eléctrico, principalmente en generación, que permitiera llegar a una mayor eficiencia en el uso de los recursos naturales y en la realización de inversiones, con el propósito de obtener mejores niveles de precios, mayor calidad, y seguridad de suministro.

Chile fue uno de los primeros países del mundo en realizar una desregulación de su mercado eléctrico, pasando principalmente de empresas generadoras en manos del estado, a empresas generadoras manejadas por privados, producto de la creación de un marco regulatorio que reconoce la existencia de competencia en la generación eléctrica. Es por esto, que han surgido nuevas teorías económicas tratando de aplicar conceptos que generen mayor competencia, incluso en sectores de la industria que presentan importantes niveles de monopolio natural o economías de ámbito.

Dentro de los nuevos modelos económicos que han surgido en los últimos años para evaluar la aplicación de la desregulación de los sistemas eléctricos, aparece la Teoría de Juegos, que pretende entregar una visión acerca del comportamiento racional de los distintos agentes del mercado con el objetivo de maximizar el beneficio individual o global. La aplicación más frecuente que tiene la Teoría de Juegos en la actualidad, es la de ser una herramienta que permite analizar diversas variables que inciden en el comportamiento de los agentes del mercado, permitiendo encontrar los equilibrios del sistema e identificar el ejercicio del poder de mercado.

Esta Tesis se centra en la aplicación de la Teoría de Juegos en el segmento de la generación por medio de modelos que integran a todas las firmas generadoras presentes en el sistema junto con un ente centralizador de ofertas y despachador. Con este objetivo, se pretende aplicar Teoría de Juegos en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) sobre la base de ofertas de energía en Bolsa, y de este modo simular el comportamiento estratégico de las firmas generadoras, permitiendo llegar a resultados que muestren el equilibrio de precio y cantidad frente a distintos escenarios, e identificar posibles poderes de mercado. Para esto, en una primera parte se aplica el conocido modelo de oligopolio de Cournot con el principal propósito de sensibilizar variables de elasticidad y nivel de demanda frente a la aplicación de poder de mercado, y posteriormente en este estudio se trabaja con un modelo de Juego de estrategias discretas que pretende visualizar en forma más real lo que sería una oferta de precio y cantidad en una Bolsa de energía frente a distintos niveles de demanda del sistema, aplicando estrategias de indisponibilidad de unidades.

II. SISTEMA INTERCONECTADO DEL NORTE GRANDE (SING)

Chile posee cuatro sistemas eléctricos, el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), Sistema Interconectado Central (SIC), Sistema de Aysén y Sistema de Magallanes, que en la siguiente tabla se resumen sus principales características.

Tabla 2.1: Sistemas Eléctricos en Chile

Sistema Eléctrico	Potencia Instalada (MW) ¹	Energía bruta generada (GWh/año) ¹
SING	3.040,9	9.327
SIC	6.646	29.577
Sistema de Aysén	17,1	74,7
Sistema de Magallanes	64,5	163

En particular el SING posee una demanda de punta cercana a los 1.200 MW, lo cual demuestra que existe una sobrecapacidad de alrededor de 2,5 veces, y la capacidad instalada es un 99% térmica. Este sistema atiende al 6,5% de la población del país, pero provee cerca de un cuarto de la oferta eléctrica nacional como consecuencia de la gran cantidad de clientes industriales -principalmente minas de cobre- que operan en la región, y que conforman el 90% del consumo del SING. La alta sobrecapacidad presente en este sistema es explicada en parte por el gran desarrollo que ha tenido el sector minero, que impulsó a las generadoras a invertir en importantes proyectos para traer gas natural desde Argentina, y de este modo se construyeron dos gasoductos que originaron una capacidad de 2000 MW para ser

¹ Datos energía bruta generada y potencia instalada corresponden al año 2000

generada por centrales de ciclo combinado, y donde prácticamente cada firma construyó una central de este tipo.

También este efecto fue producto de una desaceleración de la realización de nuevos proyectos mineros.

En el SING operan seis firmas generadoras cada una de ellas con las siguientes características [CNE00]

Tabla 2.2: Capacidad Instalada por Empresa Generadora en el SING²

Firma	Capacidad Instalada (MW)	Participación (%)
Edelnor	722,5	23,8
Electroandina	628,9	20,7
Celta	181,8	6,0
Nopel	587,6	19,3
Gener	624,0	21,1
Norgener	277,3	9,1
Total	3.040,9	100

Se aprecia que las demás firmas generadoras poseen porcentajes de participación parecidos, lo que permite decir a priori la existencia de mayor competencia en generación en comparación con el SIC, en el cual solo existen tres firmas generadoras y donde una de ellas posee más del 50% de la capacidad instalada del sistema.

² Los datos de capacidad instalada por empresa corresponden a fines de 2000

Producto de la alta sobrecapacidad instalada existente en el SING, que permitiría absorber la demanda del sistema fácilmente por unos ocho años más, proyectando una tasa anual de crecimiento del 7%, no existen grandes proyectos de generación en un corto o mediano plazo.

Pero esta situación se vería drásticamente modificada producto de una reactivación del sector minero y de una posible interconexión con el SIC o país vecino, que ajustaría la demanda con la capacidad instalada. La alternativa de interconexión es cada vez más viable y apoyada especialmente por aquellas firmas que poseen participación en la operación de los gasoductos, ya que les permitiría incrementar el factor de planta de dichas inversiones y poder aumentar los retornos de capital.

Con relación al sistema de transmisión, el sistema troncal se encuentra libre de problemas de saturación, generando un acople total del sistema, y permitiendo que los resultados encontrados en la siguiente investigación sean ampliamente válidos dentro del punto de vista de un análisis uninodal del sistema.

III. TEORÍA DE JUEGOS

La Teoría de Juegos es una aproximación interdisciplinaria para estudiar el comportamiento humano en el cual los resultados dependen de la interacción de estrategias de dos o más jugadores.

Se pueden identificar cuatro tipos de juegos en el contexto general: juegos estáticos de información completa; juegos estáticos de información incompleta; juegos dinámicos de información completa; y juegos dinámicos de información incompleta. En esta investigación se analizarán juegos estáticos de información completa, de acuerdo a la naturaleza de las posibles estrategias de los agentes que corresponde a ofertas de precio y cantidad para ciertos escenarios de demanda y elasticidad de demanda, y porque la información de costos reales de generación es pública o fácilmente calculable por medio de la información que se tiene de los costos de las materias primas.

La Teoría de juegos o el estudio de juegos da una importante ayuda para entender las reacciones de los distintos agentes en el sistema, e identificar el ejercicio de poderes de mercado, para luego replantear medidas para evitar al máximo las distorsiones económicas que existan.

Dentro de la literatura y en anteriores investigaciones acerca de la aplicación de la Teoría de Juegos en los mercados eléctricos, es posible encontrar reiteradamente el uso de algunos modelos. En este sentido se destacan los modelos de Cournot y Bertrand, que en forma académica manejan situaciones de duopolio, pero que en la práctica se hace una extensión de estos modelos para aplicar estos conceptos a un número mayor de agentes. Dentro de estos dos tipos de modelación de juegos estratégicos, es posible llegar a una solución de equilibrio llamado equilibrio de Nash, el cual se puede presentar en forma única, múltiple o nula.

3.1 Eliminación de estrategias dominadas

Sobre la base de trabajar en un esquema de juego estático de información completa, es posible encontrar estrategias dominadas, o sea, estrategias que siempre serán peores que otras, independiente del escenario en estudio. Fundamentalmente

para poder eliminar las estrategias dominadas dentro de un juego de estrategias, es necesario que todos los jugadores se comporten en forma racional y que este hecho sea de público conocimiento.

La eliminación de estrategias dominadas permite llegar a un equilibrio o solución del juego si es que este posee una única solución, o simplemente servirá para simplificar el espacio de estrategias posibles en el juego. Dentro de este contexto existe la presencia de estrategias débilmente dominadas, la cual se puede apreciar en el siguiente cuadro.

		Jugador 2	
		T 1	T 2
Jugador 1	S1	0 10	2 5
	S2	1 10	0 2

Figura 3.1: Juego con dominación débil

En la figura 3.1 se muestra un juego en el cual la estrategia S1 domina débilmente a la estrategia S2. Producto que si el jugador 2 elige T1 entonces ambas estrategias S1 y S2 son iguales, y si el jugador 2 elige T2, entonces S1 es estrictamente superior a S2. Si el jugador 1 asigna una probabilidad positiva a ambas estrategias T1 y T2, entonces siempre preferirá aquella estrategia débilmente dominante.

	T 1	T 2	T 3
S1	0 10	1 5	-200 4
S2	100 10	0 5	-100 0

Figura 3.2: Juego con eliminación indeterminada

La eliminación iterativa de estrategias débilmente dominadas puede causar problemas. La figura 2 muestra que si bien, S1 domina débilmente a S2, deja de hacerlo si primero se elimina la estrategia estrictamente dominada T3. Por lo tanto, en general no se deben eliminar estrategias débilmente dominadas, pues distintos órdenes en que se hace esta eliminación puede llevar a diferentes resultados finales [Sing98]

3.2 Equilibrio de Nash

Se define como aquel resultado de un juego en el cual ninguno de los jugadores puede mejorar su beneficio modificando unilateralmente la estrategia elegida. Un juego puede tener cero, uno o más equilibrios de Nash. El concepto de equilibrio de Nash fue desarrollado para juegos matriciales, pero también es aplicado en juegos proporcionales [Sing98]

Si se define un juego como $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$ en donde S_i es el set de estrategias posibles para el jugador i , y s_i denota una estrategia perteneciente a S_i . Por otro lado, se tiene u_i , que indica la función de beneficio dado el set de estrategias elegidas. Por lo tanto, el conjunto de estrategias (s_1^*, \dots, s_n^*) es un equilibrio de Nash si para cada jugador i , S_i^* es la mejor respuesta a las estrategias tomadas por los otros $n-1$ jugadores $(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$, cumpliéndose que:

$$u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*) \geq u_i(s_1^*, \dots, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$$

Para obtener este equilibrio de Nash para todas las estrategias posibles de s_i en S_i se debe resolver [Gibb92]:

$$\text{Max} \quad u_i(s_1^*, \dots, s_{i-1}^*, \dots, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$$

$$s_i \in S_i$$

3.3 Duopolio de Cournot

El duopolio de Cournot envuelve un juego en el cual dos firmas producen un producto idéntico y deben decidir cuánto producir sin conocer la decisión del otro. El precio es determinado por la combinación entre la curva de oferta agregada y la curva de demanda del mercado [Sin00].

Los productores maximizan sus beneficios bajo la suposición que todos los demás mantendrán sus ofertas fijas. En el juego de Cournot cada uno de los jugadores se les está permitido actuar sólo una vez, donde tienen que determinar su nivel de producción.

Los supuestos de este modelo son que todos los jugadores tienen el mismo set de información, el que incluye conocimiento de la función de la curva de demanda del mercado y la función de costos de producción de todos los otros jugadores. Esto se justifica en que a lo largo del tiempo se ha tenido un extenso conocimiento del sistema, situación que se aplica perfectamente al sector eléctrico, justificándose que las predicciones de demanda, las tecnologías empleadas en generación, y los costos de las materias primas son de público conocimiento o no presentan gran variabilidad en el mercado.

3.4 Duopolio de Bertrand

Desde el punto de vista de un mercado eléctrico, este modelo está basado en el hecho de que cada firma generadora presente en el sistema, tiene como estrategia el precio, al contrario del modelo de Cournot en el cual la estrategia es la cantidad ofertada. Las diferencias fundamentales con el juego de Cournot son que el

espacio de estrategias es diferente, las funciones de pagos son diferentes, y el comportamiento en el equilibrio de Nash es distinto.

El concepto de este modelo se basa en que disminuir un poco los precios permitiría captar un mayor mercado, y por lo tanto, se obtendrían mayores beneficios suponiendo que ambas firmas tendrán iguales producciones a igual precio.

Si se realiza el ejercicio algebraico de dos firmas en el mercado, representando la demanda de mercado por $x(p)$, los pagos o beneficios de la firma 1 pueden ser representados por:

$$\lambda_1(p_1, p_2) = \begin{cases} p_1 x(p_1) & \text{si } p_1 < p_2 \\ \frac{p_1 x(p_1)}{2} & \text{si } p_1 = p_2 \\ 0 & \text{si } p_1 > p_2 \end{cases}$$

La estructura del juego de Bertrand es similar al dilema del prisionero, en donde si ambos jugadores cooperan pueden llegar a tener ingresos de monopolio al ofrecer precios de esta naturaleza. Pero existe el incentivo a reducir en poca cantidad el precio y de esta forma capturar un mayor mercado, aumentando los beneficios, pero sabiendo que si ambos actúan de la misma manera, obtendrán menores utilidades que en la situación inicial.

Para encontrar el equilibrio de Nash a este modelo de juego, se asume que la función de pagos de cada firma es sólo sus beneficios. El beneficio de la firma i cuando el precio elegido es p_i y el precio de la firma j es p_j , es:

$$\prod_i(p_i, p_j) = q_i(p_i, p_j)[p_i - c] = [a - p_i + b p_j][p_i - c]$$

donde la cantidad consumida por la demanda de la firma i es:

$$q_i(p_i, p_j) = a - p_i + b p_j$$

$b > 0$ representa que el producto de la firma i es sustituto del producto de la firma j .

El equilibrio de Nash $(p1^*, p2^*)$ se encuentra al resolver para cada firma i :

$$\text{Max} \prod_i (p_i, p_j^*) = \text{Max}[a - p_i + bp_j^*][p_i - c]$$

$$0 \leq p_i \leq \infty$$

donde el resultado del problema arroja como respuesta:

$$p_i^* = \frac{1}{2}(a + bp_j^* + c)$$

Por lo tanto, el equilibrio de Nash $(p1^*, p2^*)$ debe satisfacer que:

$$p1^* = \frac{1}{2}(a + bp2^* + c)$$

y

$$p2^* = \frac{1}{2}(a + bp1^* + c)$$

dando como solución:

$$p1^* = p2^* = (a + c)/(2 - b)$$

3.5 Poder de Mercado

Dentro del marco de competencia perfecta, se establecen de base características de información completa, mercado abierto, atomización de la oferta que impida a un ente influir en el precio, etc. El mercado eléctrico está muy lejos de ser un mercado parecido al de competencia perfecta, producto de un sin número de factores, dentro de los que destacan la poca cantidad de participantes, restricciones técnicas y dificultad de identificar trasposos físicos de compra y venta. Es por esto, que se generan poderes de mercado dentro del sistema aprovechando ventajas del tipo estratégicas basados en los factores antes mencionados.

El poder de mercado ejercido por algún agente, viene siendo la habilidad de inducir el precio de mercado con el fin de conseguir un beneficio extra. Dentro del mercado eléctrico la mayoría de los agentes aplican un grado de poder de mercado, generando con esto una pérdida al sistema en su conjunto. Dentro de la literatura, se han desarrollado numerosas técnicas o índices que pretenden medir el poder de mercado, y dentro de los más usados en el análisis de mercados eléctricos se encuentran el índice Lerner y el HHI (Herfindahl-Hirschman Index) [Stof00].

El índice Lerner está definido de la siguiente manera:

$$Li = \frac{(P - CMi)}{P}$$

Donde P es el precio de mercado y CMi el costo marginal del productor i . También esta definición se puede extender a un modelo de oligopolio de Cournot.

$$Li = \frac{s}{\varepsilon}, \text{ donde } s = \frac{qi}{Q}. \text{ Siendo } Q \text{ la cantidad total ofertada, y } qi \text{ la}$$

cantidad ofertada por el productor i .

El índice HHI es el más usado dentro de los mercados eléctricos, donde originalmente fue usado para medir concentraciones de mercado indicando posibles ejercicios de colusión. Este índice se define de la siguiente manera:

$HHI = \sum_i (s_i)^2$, y s_i es la participación de mercado del participante i .

Analizando la definición del índice de Lerner dentro del modelo de oligopolio de Cournot mediante algunos arreglos algebraicos, se llega a la expresión:

$$\sum_i s_i L_i = \frac{\sum_i (s_i)^2}{\varepsilon};$$

$$\sum_i s_i L_i = \frac{HHI}{\varepsilon};$$

resultando que el promedio de los índices de Lerner de cada uno de los agentes es igual a $\frac{HHI}{\varepsilon}$.

Desde el punto de vista del regulador del sistema eléctrico, es necesario velar para que el poder de mercado ejercido dentro del sistema sea mínimo, y para esto es necesario estar constantemente monitoreando el mercado con distintas herramientas, dentro de las cuales está la aplicación de Teoría de Juegos.

IV. MODELO DE SIMULACIÓN DE COURNOT: APLICACIÓN AL SING

El objetivo en el cual se centra este capítulo de la tesis, es aplicar un modelo de oligopolio de Cournot a las firmas generadoras en el SING, que permita encontrar un equilibrio de mercado ante la presencia de un modelo de bolsa en el cual se transe la totalidad de la energía necesaria para la demanda del sistema. De este modo también se pretende analizar la implicancia de la elasticidad de la demanda en los resultados frente a distintos escenarios base de demanda del sistema.

En los modelos de Cournot, el precio es determinado por la combinación de la curva de oferta de cada uno de los productores con la curva de demanda del sistema. Es fácil darse cuenta a través de simples ejemplos de duopolios, que el precio de despeje del juego está siempre por encima del precio de equilibrio en un mercado de competencia perfecta, y genera una cota máxima del precio al que puede llegar un mercado frente a un modelo de oligopolio de firmas, producto que cada agente ejerce al máximo su poder de mercado para maximizar sus beneficios, llegando así al equilibrio de Nash.

El desarrollo de un modelo de juego de oligopolio de Cournot, el cual está basado en curvas de ofertas no lineales, es posible sobre la base del supuesto de contar con algún algoritmo que pueda encontrar una solución convergente mediante un proceso iterativo. De esta forma, el equilibrio encontrado será una aproximación discreta al equilibrio de Nash bajo un modelo de optimización lineal del problema.

Una de las mayores deficiencias del método de Cournot, es la definición del precio de despeje de mercado, porque el precio se obtiene por medio de la intersección de la curva de oferta agregada dada las distintas estrategias de los generadores, con la curva de demanda del sistema. El precio obtenido de esta forma, no representa necesariamente una buena aproximación del precio alcanzado en el mercado en la realidad, dado un esquema de bolsa de energía. Por otro lado, el precio es muy sensible a la elasticidad de la curva inversa de demanda, y a la forma con que se construye dicha curva. Por lo tanto, la utilidad de utilizar el modelo de juego de Cournot radica en el análisis comparativo que se puede realizar frente a la

sensibilización de distintos parámetros de mercado, dentro de los cuales destacan el nivel de demanda del sistema y la elasticidad de demanda. Basándose en estos hechos, en este capítulo lo que se pretende realizar, es encontrar cuales serán las reacciones del mercado frente a distintos escenarios, y observar por otra parte la presencia de poderes de mercado ejercidos por las firmas generadoras.

4.1 Modelo de Cournot

La implementación del modelo de Cournot considerará el comportamiento estratégico de las firmas del SING, donde cada una de ellas buscará maximizar sus beneficios, ofreciendo una cantidad de energía óptima que cumpla este objetivo.

Este modelo considera principalmente los costos y características de generación de cada una de las unidades generadoras de las firmas en el SING³. Además, para realizar un modelo de este tipo es necesario identificar la(s) variable(s) de estrategia que controla cada uno de los agentes, y las simplificaciones o suposiciones que se hacen con respecto a la operación económica y técnica del mercado.

La aproximación del equilibrio de Cournot-Nash, asume que las estrategias de las firmas son en base a la cantidad ofertada por cada uno de los agentes, lo que significa en este caso, que cada firma generadora tendrá que ofertar una cantidad a producir para maximizar sus beneficios, pero tomando en cuenta las estrategias tomadas por las demás firmas del sistema. Dentro del contexto teórico de la aplicación del modelo de juego de Cournot, es necesario distinguir las firmas o agentes que sólo son tomadores de precio, producto generalmente del reducido monto de participación de mercado que representan, en comparación al tamaño de los demás agentes que participan. Los agentes que se comporten como tomadores de precio no ejercerán posición estratégica en el mercado, y en el caso que alguna

³ Las características de las unidades generadoras del SING de cada una de las firmas se muestran en el ANEXO A

generadora se comporte de esta forma, generará en el momento en que el precio de mercado sea igual o superior a sus costos variables de generación. De este modo, solo se modelan las firmas capaces de tener un comportamiento estratégico dentro del mercado.

En el contexto de mercado eléctrico, el modelo de Cournot parece ser un punto de partida apropiado para analizar equilibrios de juegos no-cooperativos, y establecer índices de poder de mercado ejercido por cada uno de los agentes frente a distintas condiciones del sistema.

También existe el concepto del equilibrio de Bertrand, en el cual las firmas compiten en precios, esto basado en el hecho de que cada firma puede capturar completamente el mercado por precios más bajos que los demás y abastecer la demanda. Pero dada la realidad de los mercados eléctricos, esta última suposición viola restricciones de capacidad en el transcurso del cálculo, que puede llevar a un resultado erróneo.

El uso del modelo de Cournot puede reflejar apropiadamente las restricciones de capacidad que presenten las unidades generadoras de las firmas, considerando dentro de estas las generaciones mínimas y máximas, y restricciones de mantenimiento.

4.2 Implementación del Modelo de Cournot

Es necesario definir los parámetros que participan en el proceso de Cournot aquí implementado, como son las firmas generadoras, demanda, y también la manera con que se implementó el algoritmo de Cournot para obtener el equilibrio de Nash. Tarea que se realiza a continuación.

4.2.1 Generación

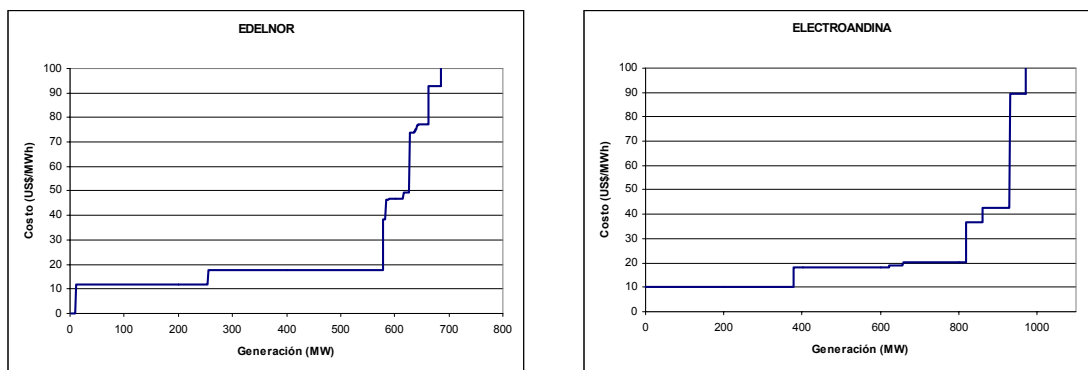
Para implementar un modelo de Cournot de ofertas discretas, es necesario definir las curvas de costos de cada una de las firmas presentes en el SING. Estas curvas son funciones escalones en donde el alto de cada escalón correspondiente al costo variable de la unidad generadora, se calcula con el promedio a capacidad máxima del costo de operación para cada planta, de esta forma

los costos a considerar son la suma de los costos variables de combustible y los costos variables de no combustibles. El ancho del escalón se calcula con la capacidad máxima de cada unidad, multiplicada por su factor de indisponibilidad histórico⁴.

Las restricciones de mantenimiento programado de las unidades generadoras no se consideran en el modelo, ya que puede coordinarse esta tarea en forma estratégica dentro del año.

En el SING, como se había anticipado en algunos capítulos atrás, existen seis firmas que participan en el mercado de la generación, siendo estas: Edelnor, Electroandina, Celta, Nopel, Gener y Norgener. Sin embargo, en la modelación del mercado que se establece en este trabajo, las firmas Gener y Norgener se consideran como una sola, denominándola Norgener, ya que pertenecen directamente a una misma matriz y que pueden ser operadas estratégicamente en forma conjunta. Las firmas Celta y Norgener también podrían haberse considerado una sola, pero la relación entre ellas no es tan directa ya que es a través de consorcios hechos con otras empresas.

Las siguientes figuras muestran los costos variables de cada una de las firmas consideradas en la simulación dependiendo de su nivel de generación.



⁴ Los datos de capacidad, factores de indisponibilidad, costos variables de combustibles y no combustibles, corresponden a los declarados por cada empresa frente a la dirección de operación del SING, vigentes al 13 de Septiembre de 2001.

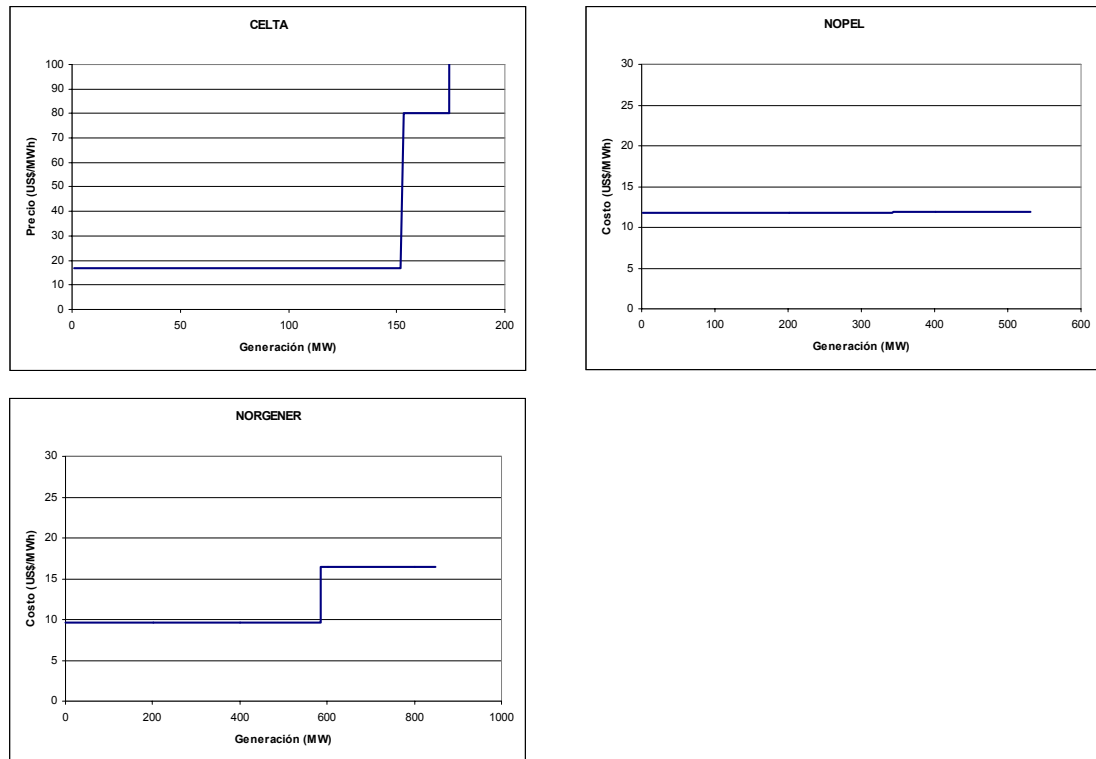


Figura 4.1: Función de costos variables de firmas del SING

Sumando en forma horizontal las curvas de costos variables de las firmas, se obtiene la curva de oferta agregada del sistema visualizada en la figura siguiente.

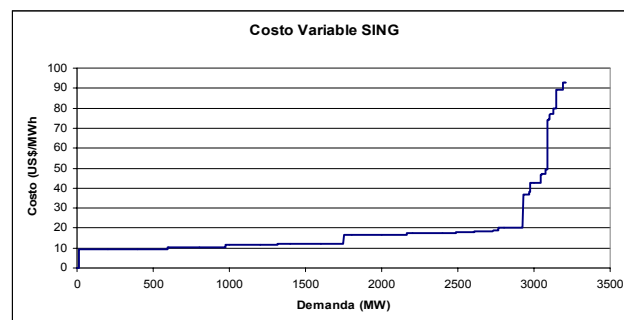


Figura 4.2: Costo variable del SING

En la figura 4.2, aparecen bajos costos variables del sistema dentro de un amplio rango de generación, y considerando que la demanda de punta del sistema del año 2000 fue de 1213 MW, se puede inferir que existe una sobreoferta importante, que de alguna forma repercute negativamente en la posibilidad de ejercer un poder de mercado importante, situación que se espera medir con los resultados de este estudio.

4.2.2 Demanda

Se ha determinado que el mayor o menor poder de mercado que se puede ejercer en un sistema eléctrico por parte de las firmas generadoras depende fuertemente del nivel y elasticidad de demanda del sistema. Por esto, en este ejercicio de Cournot se establecen distintos escenarios de demanda, los cuales incluyen demandas desde 100 MW hasta 2500 MW, incrementando en monto de 100 MW. Cabe destacar, que los resultados en el rango entre los 800 y 1200 MW es importante de estudiar con más detalle, ya que en esta banda se encuentran las demandas del SING dentro de un año normal.

Una de las dificultades de aplicar un modelo de Cournot, o cualquiera otro que pretenda simular el comportamiento de un sistema eléctrico ante un juego de ofertas, es determinar con relativa exactitud la curva de demanda del sistema, y principalmente el parámetro de elasticidad. De alguna forma es posible encontrar valores aproximados de elasticidad, fijándose en la naturaleza que presenta el consumo dentro del sistema, y para el caso del SING, este está conformado en un 90% por consumos de tipo industrial, especialmente minero. Dada esta característica, el SING podría tener una elasticidad de demanda mayor en relación a la mayoría de los sistemas eléctricos que poseen una proporción importante de consumo residencial y comercial. Pero existen numerosos estudios que indican que la elasticidad de demanda eléctrica de un sistema puede ser muy distinta entre uno u otro, y que no hay una correlación directa entre la composición del consumo [Mont01].

Dada la dificultad de determinar la elasticidad de la curva de demanda, y además, que el modelo de Cournot tiene su mayor aplicación en comparar las soluciones de mercado bajo distintos escenarios, en esta investigación se hace un análisis comparativo en el cual las variables involucradas son la elasticidad y nivel

de demanda. En el caso de la elasticidad se consideran casos desde un nivel de elasticidad de demanda de $-0,1$ hasta $-1,0$, pasando por niveles intermedios en pasos de 0.1 cada uno.⁵

La forma de construir la curva de demanda, corresponde a trazar una curva lineal por un cierto punto de referencia previamente definido. Este punto corresponde a la demanda base que se establece del sistema para hacer el análisis de Cournot, y un precio de referencia *-pref-* fijo de 16.37 US\$/MWh que corresponde al promedio de los costos marginales observados en el SING desde septiembre de 2000 a septiembre de 2001. Cabe mencionar, que el análisis se hace también a niveles de demanda fuera del rango de operación del sistema, por lo tanto, la validez de los resultados aquí expuestos se asegura dentro del rango de operación del sistema, que abarca demandas por sobre los 700 MW hasta los 1300 MW.

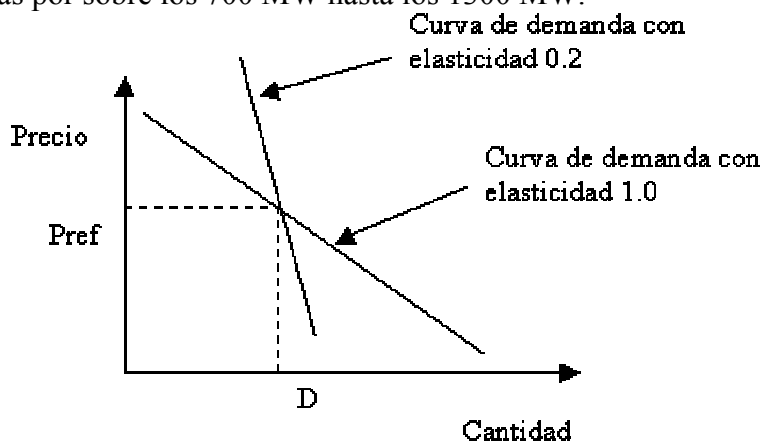


Figura 4.3: Construcción curvas de demanda

En la figura anterior se observa la construcción de la curva de demanda que se utilizará en cada caso para evaluar el comportamiento del modelo de Cournot. Otra posibilidad era construir curvas isoelásticas de la forma $D(p) = K * P^{-\epsilon}$ donde ϵ es la elasticidad de demanda, y K una constante que depende de un precio de referencia y la demanda base del sistema. Esta forma de construir la curva de demanda del sistema, si bien puede entregar mayor realidad, no es muy útil en la

⁵ En este documento se habla de valores de elasticidad positivos, pero en rigor, estos valores son magnitudes negativas

práctica con relación al número de iteraciones que son necesarias para llegar a un equilibrio, sobre todo en niveles bajos de demanda del sistema, en donde los precios de equilibrio obtenidos toman valores extremadamente altos, llevando claramente a un error.

Se habla de demanda base, en el sentido que estos ejercicios de Cournot no tienen la finalidad de encontrar una forma de despacho del sistema, sino que el nivel de demanda base es utilizado para establecer un escenario donde los distintos agentes generadores realicen sus ofertas con el objetivo de maximizar sus beneficios, dando como resultado la mayoría de las veces, que la cantidad total ofertada difiere de la demanda del sistema, dependiendo del mayor o menor poder de mercado que sea ejercido.

4.2.3 Algoritmo de Cournot

En el SING se establecen cinco firmas que serán utilizadas como agentes estratégicos para la realización del modelo de oligopolio de Cournot-Nash. En la mayoría de estos ejercicios, es necesario establecer la presencia de firmas tomadoras de precio con el objetivo de sustraerlas del juego, y de este modo trabajar con una curva de demanda residual que se obtiene de restar a la curva de demanda del sistema, la generación por parte de las firmas tomadoras de precio. En este sentido, en el SING se visualiza que la firma Celta podría presentar estas características, producto de su baja participación en la capacidad total instalada en el sistema - 5% -. A opinión del autor, sería de mayor utilidad considerar esta firma parte del pool de generadores estratégico dentro del modelo, con la finalidad de que los resultados demuestren la verdadera participación de la firma en el sistema.

Dada las cinco firmas presentes en la modelación, se calcula el equilibrio de Cournot-Nash en forma iterativa. El concepto que representa este modelo es que cada firma en forma sucesiva calculará su cantidad ofertada con el objetivo de maximizar su beneficio bajo una curva demanda dada del sistema y su propia curva de costos variables, pero con el supuesto que las ofertas de las otras firmas están fijas. Posteriormente viene el cálculo de la segunda firma, que enfrenta una curva de demanda residual producto que la oferta de la primera se tiene que restar a la demanda total del sistema, y de la misma forma se obtiene la oferta óptima de esta

segunda firma. Así sucesivamente con todas las firmas hasta llegar a la segunda iteración en la cual la primera firma tiene que rehacer la oferta tomando en cuenta ahora las ofertas ejercidas por las demás firmas en la iteración anterior. De esta forma se origina un proceso cíclico que impide que el orden de entrada de las ofertas de los participantes altere el resultado final.

Si bien, en este ejercicio se realizan ofertas sobre la base de curvas discretas de costos de cada una de las firmas mediante un proceso iterativo, la solución a que se llega está dentro de un rango cercano al óptimo que representaría el equilibrio de Nash del juego, siempre y cuando se establezca una convergencia a una misma solución partiendo de distintas condiciones iniciales. Esta condición se puede establecer con la modificación del orden de la secuencia con la cual las firmas van haciendo sus ofertas.

El proceso iterativo para cada uno de los escenarios modelados, termina cuando ninguna de las firmas es capaz de realizar un cambio en su oferta basado en las ofertas recientes de los otros participantes, que le permita aumentar su beneficio, llegando de este modo a que cada firma está ofertando una cantidad de energía que maximiza sus ingresos dada las decisiones estratégicas de los demás, generando de esta forma un equilibrio de Nash.

En la siguiente figura, se esquematiza el proceso por el cual se calcula el precio de Cournot que se había explicado anteriormente.

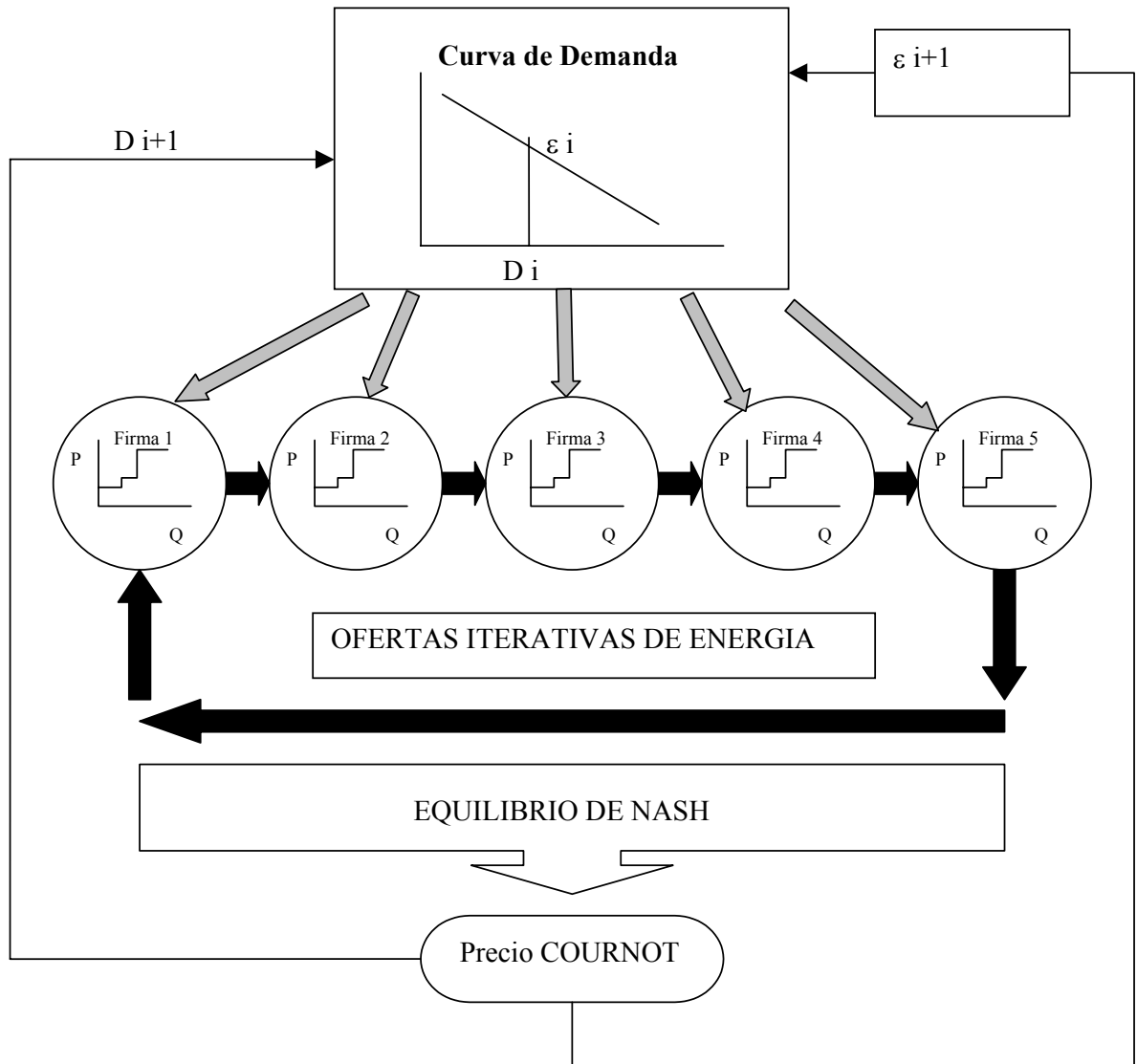


Figura 4.4: Algoritmo de Simulación de Cournot

Por medio de este algoritmo, es posible encontrar un perfil de precios de equilibrios de Cournot-Nash a través de distintos niveles de demanda base, y para cada caso de elasticidad de demanda del sistema supuesto.

4.2.4 Margen de Ganancias de las firmas

El margen de ganancia es la variable por el cual estas simulaciones establecen su punto de referencia para llegar a un resultado, determinando el equilibrio de Nash del juego. En cada iteración, cada firma establece un nivel de oferta tal que maximiza su margen en relación al precio que determina a través de la curva de demanda, quedando el margen determinado por el área entre el nivel de precio y la curva de costos de la firma, acotada por la derecha por la cantidad ofertada. En la figura 4.5 se explica la manera con que la firma opta por su mejor estrategia de cantidad.

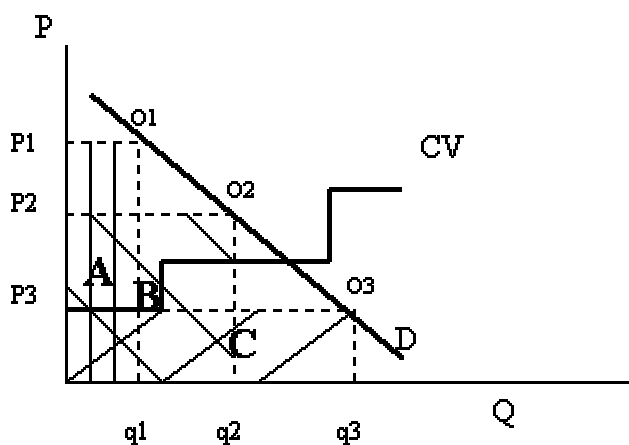


Figura 4.5: Margen de beneficio para cada firma

En la figura anterior se muestran tres posibles estrategias de cantidad ofertada por una firma, q_1 q_2 q_3 o, que determinan los precios p_1 p_2 p_3 respectivamente y quedando determinado los márgenes obtenidos en cada alternativa. Gráficamente la alternativa q_2 es la mejor entre las tres ya que el margen sería el área determinada por q_2 o_2 y p_2 menos el área bajo la curva de costos variables correspondiente. De esta misma forma, la alternativa q_3 genera un margen de cero negativo.

Este cálculo se hace para cada firma en cada iteración para llegar a un equilibrio de Nash.

4.2.5 Equilibrio indefinido

Producto que se trabaja con curvas de costos variables discretas, en ciertos casos se generan indeterminaciones en la obtención del precio de equilibrio de Cournot en el momento de hacer la intersección de la curva de demanda con la curva de oferta agregada al término de las iteraciones para encontrar las ofertas de equilibrio. Estas indeterminaciones se generan cuando la intersección es vacía, porque la curva de demanda pasa entre dos niveles de costos de la curva discreta de oferta agregada COA, situación que se muestra a continuación.

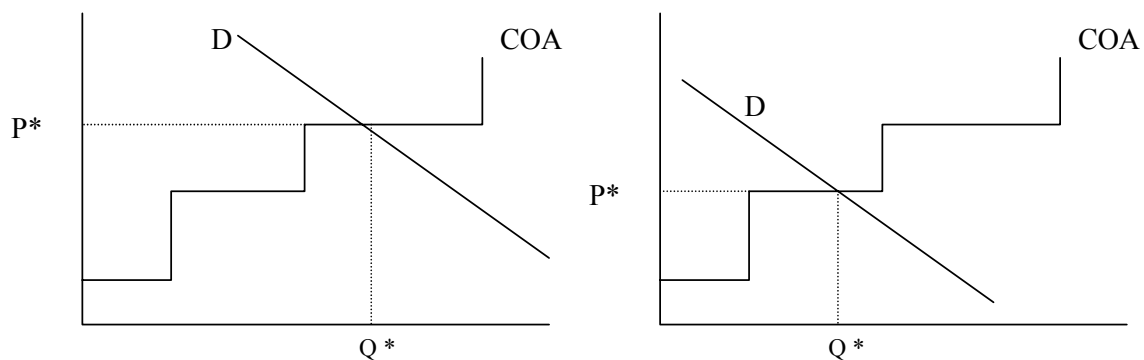


Figura 4.6: Intersección normal de Demanda con curva de Oferta Agregada

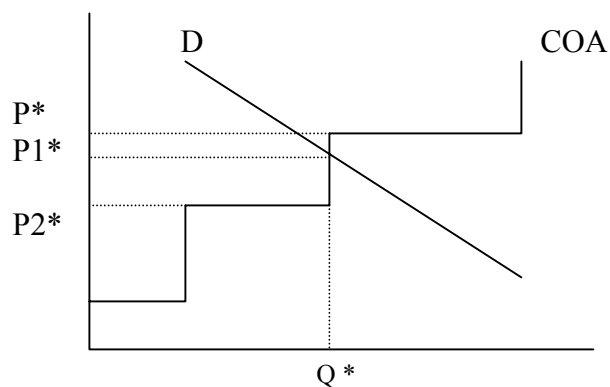


Figura 4.7: Intersección vacía de Demanda con curva de Oferta Agregada

En la figura 4.6 se señala la situación normal de intersección entre curva de demanda D y curva de oferta agregada COA , en el proceso de conseguir la oferta de energía Q^* que determina el precio P^* del equilibrio de Cournot. En la mayoría de los casos estudiados se da la situación anterior, pero en ciertas ocasiones se presenta la situación planteada en la figura 4.7, donde la solución queda indeterminada a causa de la discretización que presentan las curvas de costos variables de las firmas que originan obviamente una oferta agregada también discreta. En este caso, la suposición planteada por el autor, es asignar a la cantidad Q^* de equilibrio, el precio P^* de la figura. Existiendo también alternativas como $P1^*$ y $P2^*$, las cuales a opinión del autor podrían incurrir en un error mayor de la solución final. Si bien la solución $P1^*$ pareciera ser gráficamente la correcta, no se ajusta a la realidad por cuanto ese nivel de precio o costo del sistema no pertenece al conjunto de soluciones posibles de despacho del sistema, bajo las suposiciones realizadas en este estudio. Por otro lado, la solución $P2^*$ puede ser tan buena como P^* , ya que representa una solución real, pero el autor la deshecha porque en la solución final se quiere acotar por arriba el precio de equilibrio de Cournot al cual puede llegar el mercado, disminuyendo la posibilidad de aminorar el efecto de poder de mercado que puede ser ejercido.

4.3 Resultados

El cálculo del modelo de Cournot para las cinco firmas generadoras participantes entrega resultados de cantidad y precio de mercado para los distintos escenarios que se analizaron. También la finalidad del análisis de los resultados, es encontrar el nivel de poder de mercado de cada una de las firmas, y ver cual es el grado de estas frentes a diversos casos.

4.3.1 Escenarios

Los escenarios a estudiar comprendieron por un lado un barrido de distintos niveles de elasticidad que puede presentar la demanda, con valores desde -0,1 hasta -1.0. De esta forma, son relevantes los casos de elasticidad entre -0.4 y -0.7, el cual sería un posible rango en el cual podría situarse la elasticidad de demanda del SING. Pero como ya se había mencionado anteriormente, es difícil encontrar un valor aceptable para la elasticidad de demanda, dado que no existe una correlación directa entre el tipo de consumo la elasticidad de demanda. Esto demostrado en algunos estudios hechos al respecto [Mont01].

Observando las demandas históricas de los últimos años del SING, se observa que fluctúan entre los 700 y 1300 MW. En la simulación se analizaron demandas bases del sistema desde los 100 MW, aumentando de cien en cien hasta llegar a los 2500 MW.

4.3.2 Resultados simulación de Cournot

4.3.2.1 Precio de Cournot

El algoritmo antes explicado, entrega como resultado el precio de equilibrio de Cournot al que llegan las firmas participantes por intermedio de la estrategias de oferta que entrega cada una.

En el análisis de estos resultados se toman distintos niveles de elasticidad de demanda que permiten comparar el grado de poder de mercado ejercido.

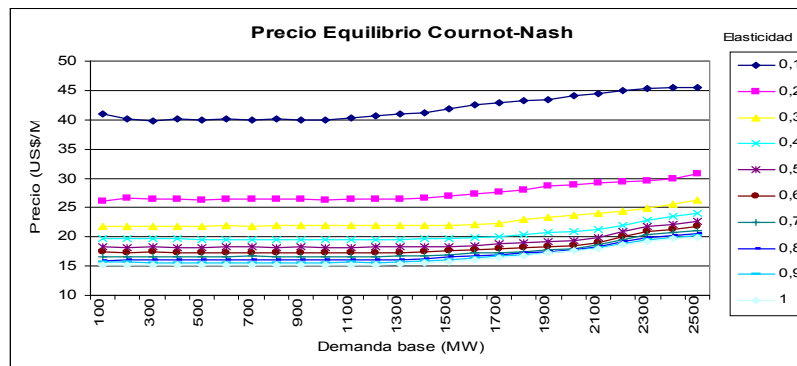


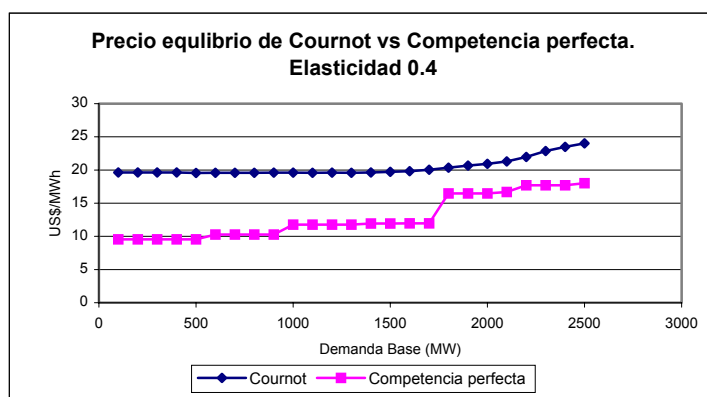
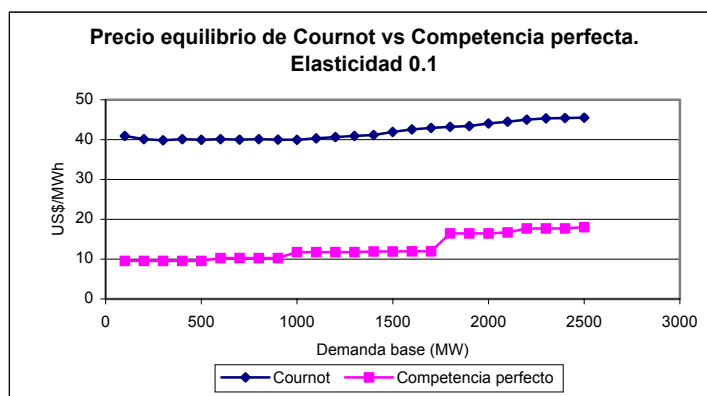
Figura 4.8: Precios de Cournot

En la figura 4.8 se aprecian los resultados de la aplicación del modelo de Cournot para los distintos niveles de elasticidad de demanda, indicando en primer lugar que existe una importante diferencia de precios de equilibrios en mercados de baja elasticidad, en comparación a otros casos. Hay que recalcar entonces que los mercados eléctricos se caracterizan por tener un alto nivel de inelasticidad -baja elasticidad de demanda-, generando con esto un alto riesgo de ejercer poder de mercado. Los resultados parecen demostrar que el efecto de la elasticidad es exponencial a medida que esta disminuye, ya que para niveles entre -0,5 y -1,0 la dispersión es mucho menor.

Otro punto importante en este análisis es señalar que en el SING a medida que aumenta la demanda del sistema, los precios de equilibrio de Cournot no crecen en forma importante, es mas, para niveles de demanda hasta 1300 MW que representa la operación normal en la actualidad en el SING, los precios se mantienen casi constante. La razón de esto radica principalmente en la alta sobrecapacidad instalada en el SING con la presencia de un número no bajo de firmas con participaciones de mercado relativamente equilibrada, pero principalmente por el hecho del supuesto del precio de referencia que sólo asegura validez del modelo dentro del rango de operación normal del sistema en la actualidad. Cuando la demanda se acerca a los niveles de capacidad instalada, los precios suben alrededor de un 15%, valor que no es muy elevado en comparación a otros ejercicios que se han hecho en otros sistemas. Una de las razones por la que ocurre este fenómeno, es

la presencia de unidades generadoras de gran tamaño en comparación a la demanda, y en manos de la mayoría de los participantes. Otro factor relacionado a este fenómeno puede ser la manera de modelar la curva de oferta de los agentes, asignando un costo variable constante para cualquier nivel de generación para cada unidad, de este modo se impide tener una mayor atomización de la oferta. Sin duda este es una deficiencia del modelo aquí desarrollado, pero con la justificación que no incidiría mayormente en el análisis del mercado a niveles normales de demanda, pero también por un problema de ahorro de tiempo computacional en encontrar la solución de Cournot.

Viendo en más detalle los resultados, es necesario dimensionar la desviación del resultado de Cournot con el nivel de precio que se establece en un mercado de competencia perfecta.



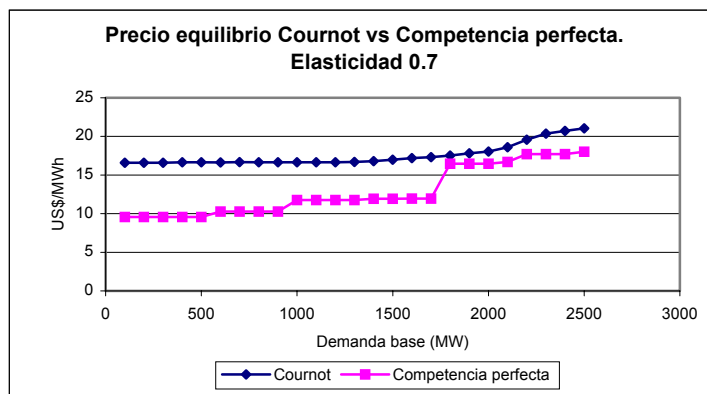


Figura 4.9: Comparación Cournot vs. Competencia perfecta

La figura 4.9 muestra para cuatro escenarios de elasticidad de demanda, la desviación que se origina entre los precios de equilibrio que se llega por medio del método de Cournot implementado, y el sistema despachado a costo marginal de las unidades para cumplir la demanda.

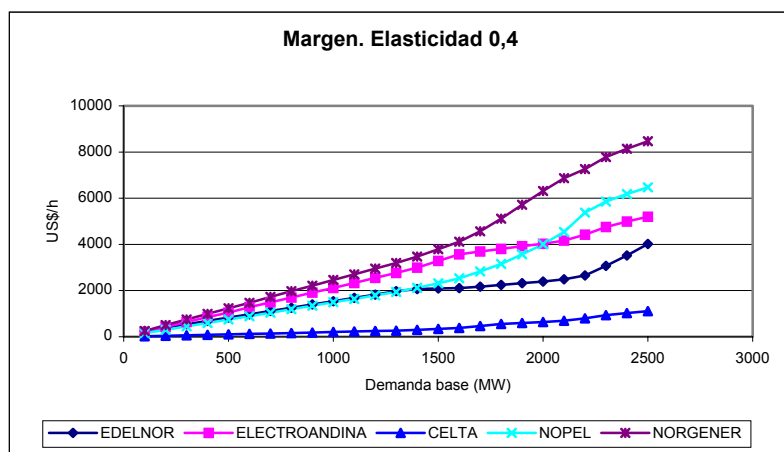
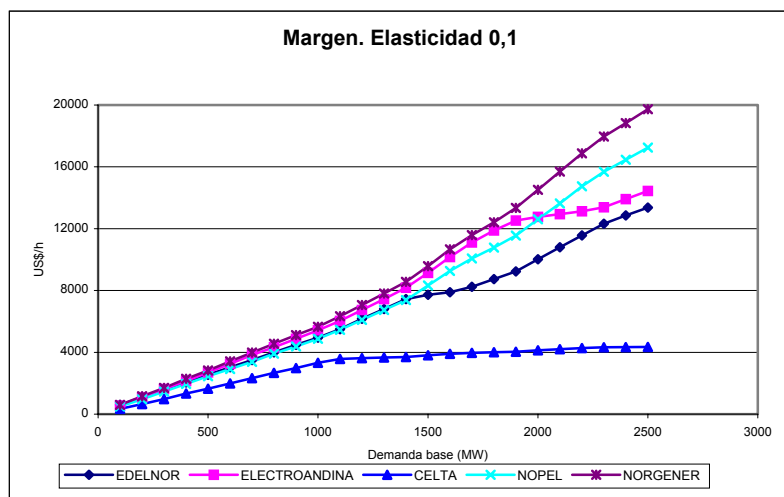
En otros estudios de este mismo tipo [Bore99], es característico que para niveles de demanda bajos se observe que el precio de Cournot es muy parecido al precio de competencia perfecta, y que a medida que crece la demanda, aumenta el valor del precio de Cournot. Pero los resultados aquí entregados para la simulación del SING, muestran una situación en la cual para niveles bajos de demanda existe una diferencia considerable que se extiende desde los 100 MW a los 1700 MW de demanda del sistema, o sea, abarcando todo el rango de operación en la actualidad. La razón de esto es la presencia de unidades de gran tamaño en comparación a la demanda del sistema, generando que las firmas den una oferta de cantidad restrictiva ejerciendo un importante poder de mercado. En promedio, la oferta total por parte de las firmas dentro del rango de demanda hasta 1700 MW es menor en un 5% a la demanda base del sistema.

Analizando valores mayores de demanda base, existe la presencia de poder de mercado, pero relacionada mayormente por la menor sobrecapacidad del

sistema, que sin duda para valores por sobre los 2500 MW de demanda la diferencia sería considerable y tendiendo a valores de costos de las centrales más caras o costos de falla.

4.3.2.2 Márgenes y ofertas de energía

Ahora para dimensionar el ejercicio de poder de mercado por parte de cada una de las firmas, es necesario medir la evolución de su oferta y margen a través de los escenarios calculados



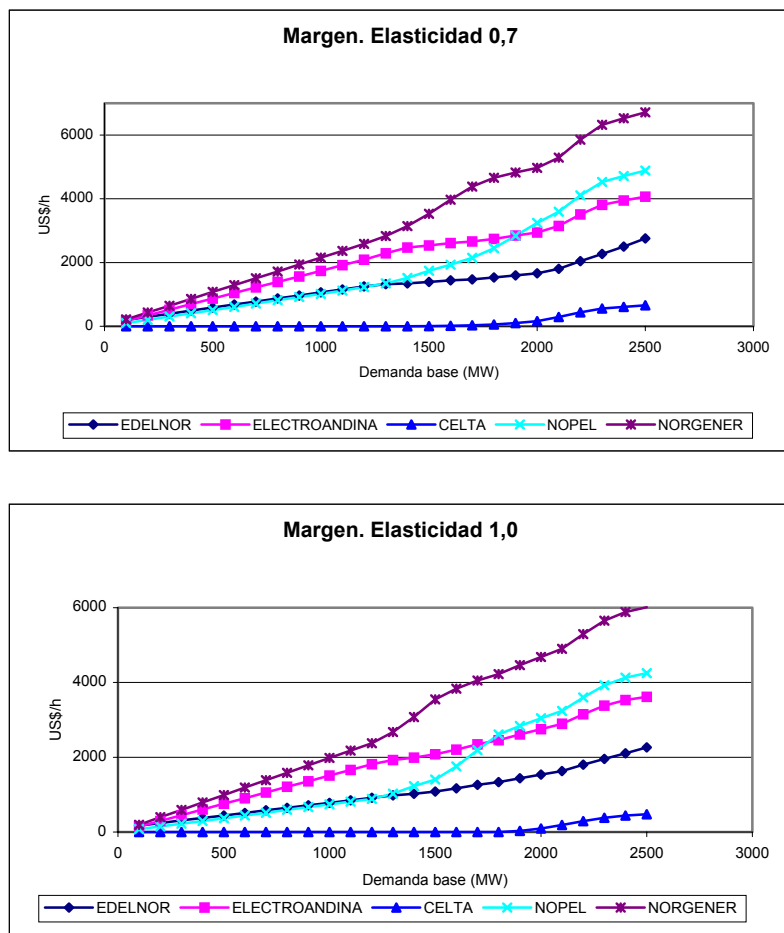


Figura 4.10: Márgenes por firma para cada nivel de elasticidad

Principalmente lo que se quiere reflejar en la figura 4.10, es la evolución del margen de cada una de las firmas con el motivo de hacer un análisis comparativo entre ellas. Se observa que la evolución de los márgenes de cada una de las firmas se mantienen proporcionales en cada uno de los niveles de elasticidad estudiados, lo que significa que no existen niveles de demanda en donde el ejercicio de poder de mercado varíe en forma importante de una firma a otra. Este efecto es producto que para gran parte de la demanda base aquí analizada, el efecto de falta de suministro sea aprovechado por algunas de las firmas para ejercer un poder de mercado excesivo.

Es casi obvio el hecho de que el sistema posea mayor o menor elasticidad de demanda, influye directamente en el poder de mercado ejercido, y por ende del margen extra que puedan extraer del sistema las firmas generadoras.

La firma Norgener en este caso aparece como la firma que logra obtener un mayor margen dentro del mercado por cada MWh generado en casi todo el perfil de demanda. Esta situación es interesante porque Norgener sólo posee un porcentaje de capacidad instalada de 8.3%, pero posee un ciclo combinado de capacidad máxima de 585 MW⁶ con el menor costo variable del sistema, por lo tanto, esta firma ejerce una estrategia de oferta de cantidad en un amplio rango de nivel de demanda a través del uso de sólo este ciclo combinado. En conclusión, el orden de las firmas de mayor a menor margen está directamente relacionado con los costos que poseen las unidades más baratas de cada firma, siendo en este caso unidades de ciclo combinado, donde la diferencia entre ellos es principalmente por razones de costos de materias primas y usos de distintas técnicas de generación. En el Anexo A se pueden observar las características de cada una de estas unidades.

Para añadir un análisis más al tema anterior, se puede ver la evolución del margen de la firma Celta, la cual no posee una central de ciclo combinado de bajo costo, por lo tanto, queda impedida de ejercer algún tipo de estrategia para ejercer poder de mercado y así obtener algún mayor margen. Es así como a medida que aumenta la demanda del sistema, disminuyendo con esto la posibilidad de establecer significativamente mayores precios, esta firma casi no tiene la posibilidad de generar en gran parte del rango de demanda del sistema analizada.

Una conclusión inmediata a raíz de la situación anterior, es que la firma Celta dentro de este tipo de simulaciones se podría considerar prácticamente como una firma tomadora de precio. También cabe señalar que debido a las características que presenta el sistema del SING en cuanto a sobrecapacidad basada en la abundante instalación de ciclos combinados, se hace pertinente que para cualquier competidor

⁶ En los 585 MW de capacidad de generación de Norgener ya está descontado un monto por indisponibilidad histórica.

interesado en entrar al mercado o mantenerse en él, le es necesario contar por lo menos con una planta de ciclo combinado de bajo costo variable. Este último punto queda fuera de la discusión de que si entrar a competir en este mercado es todavía rentable, y más allá de esto el hecho de que las firmas existentes pueden hacer un normal retornos de sus inversiones. En la realidad, este problema las firmas lo solucionan por medio de contratos bilaterales que les garantizan permanentes ingresos, pero en el caso de existir una Bolsa de Energía para el total de compras y ventas, el problema de los retornos se agudizaría bastante.

En resumen, se puede apreciar cual es la evolución del margen total del sistema.

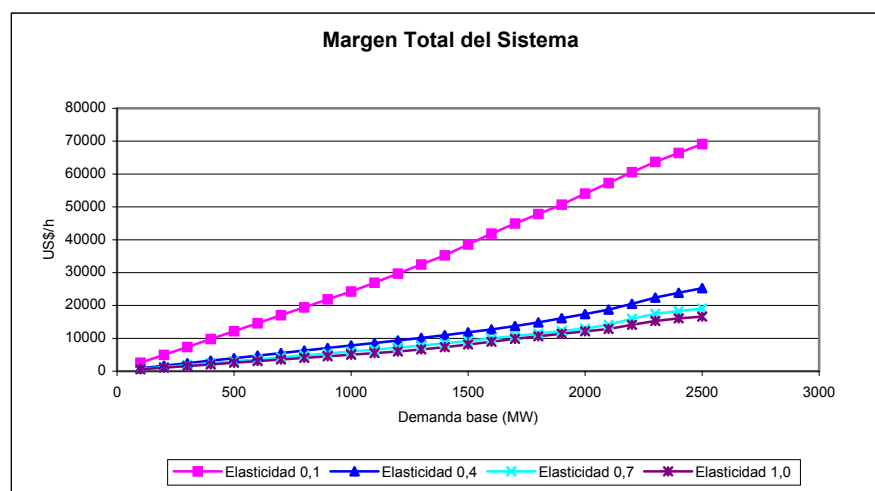
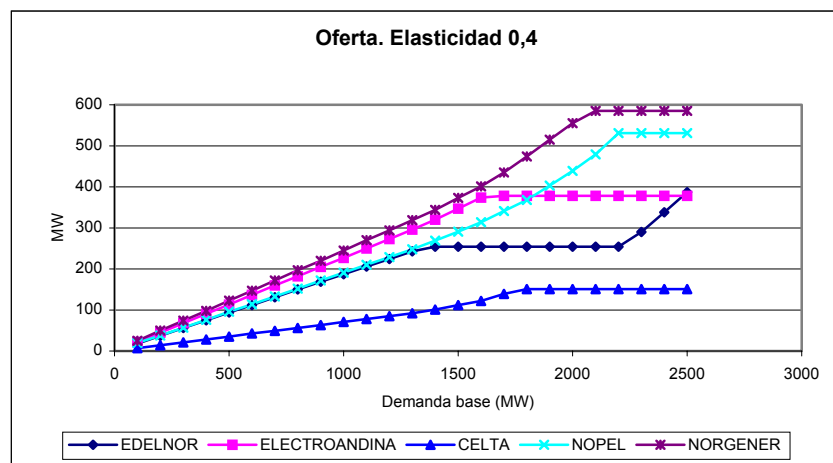
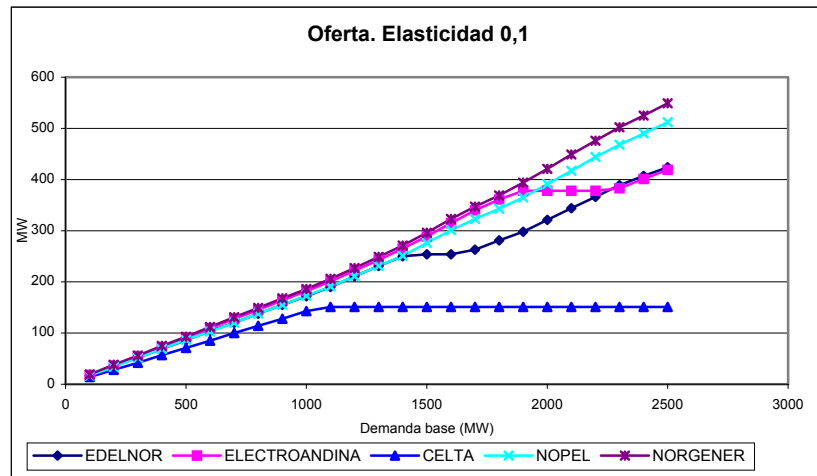


Figura 4.11: Margen total del sistema

Al igual que en el análisis del precio de Cournot bajo distintos niveles de demanda, aquí se presenta una correlación similar, por cuanto para niveles de elasticidad bajos de -0.1 , el poder de mercado que se puede ejercer es bastante mayor que con niveles de demanda medio de alrededor de -0.4 . Es necesario destacar que los sistemas eléctricos pueden tener niveles de elasticidad bastante bajos, pero con una gran dispersión analizando distintos casos.

Analizando las soluciones desde el punto de vista de la oferta de energía de cada firma, se aprecia lo siguiente.



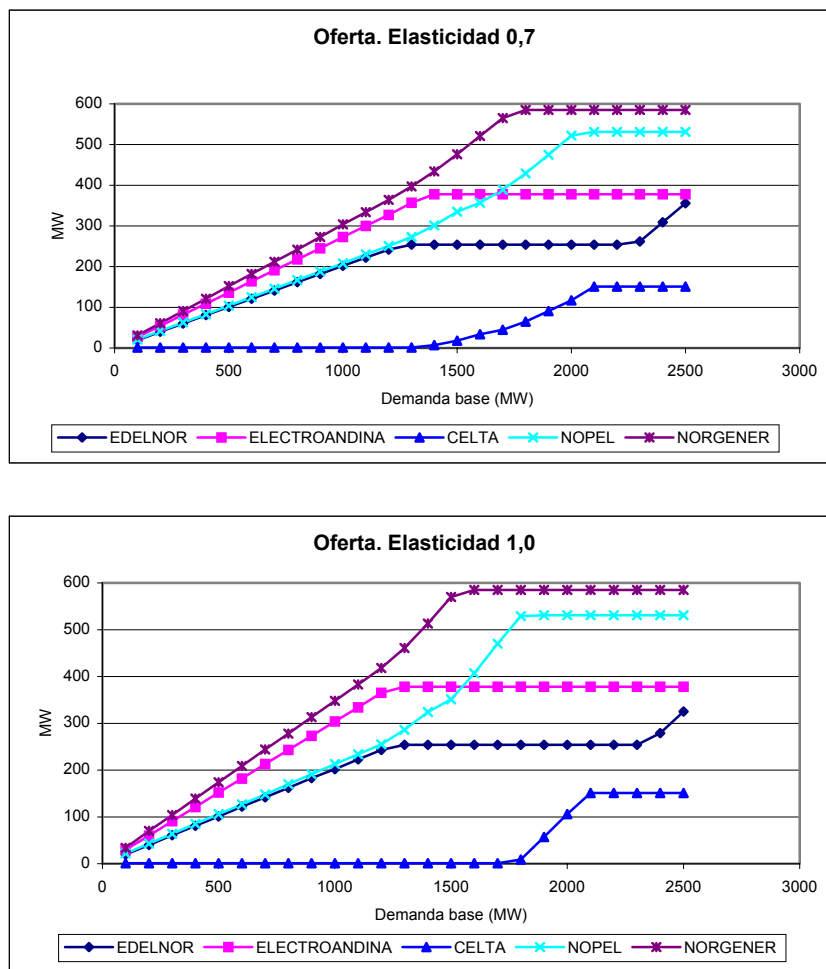


Figura 4.12: Oferta por firma para cada nivel de elasticidad

Interesante es observar la evolución de las ofertas de cada una de las firmas dentro del perfil de demanda, ya que primero se observa que para una menor elasticidad de demanda, existe una oferta menor producto del ejercicio del poder de mercado de restringir la oferta con el objetivo de obtener precios más altos. Si bien, para un ejercicio de compra y venta de energía en Bolsa, siempre debe estar calzada la oferta con la demanda en cada segundo, esto indica que según la elasticidad que demuestren los consumidores a la hora de comprar energía en la Bolsa, los grandes generadores restringirán su oferta con el objetivo que la demanda se complete con la entrada de unidades más caras, generando un precio de despeje de mercado mayor.

Por otro lado, acá nuevamente se confirma el hecho que la central Celta actúa como tomadora de precio, porque su generación está siempre restringida a la oferta de los demás competidores.

4.3.2.3 Poder de mercado

Uno de los principales objetivos en la aplicación de la teoría de juegos, es reconocer la existencia de poderes de mercado y el grado con que estos son aplicados.

Con los resultados antes mostrados, se aprecia que en el SING existe una particular aplicación de poder de mercado dentro de una simulación de Bolsa de Energía, que atañe directamente a todo el rango de demanda del sistema producto de la existencia de unidades de gran tamaño en un mercado relativamente pequeño en demanda.

Como ya se han definido los conceptos de los índices de Lerner y HHI, ahora serán aplicados a los resultados encontrados. Partiendo por el análisis del índice Lerner del sistema, que se aprecia en la siguiente característica.

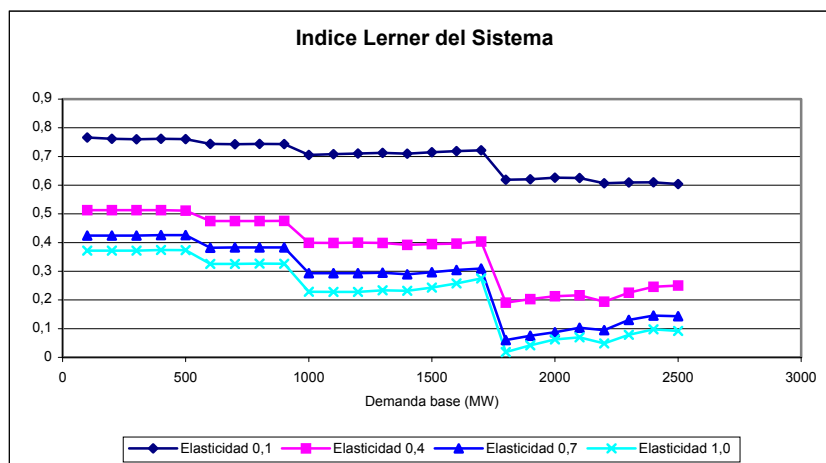


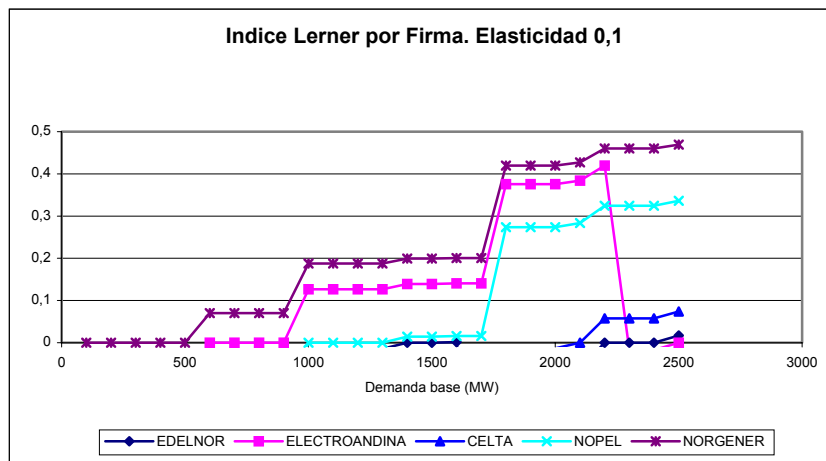
Figura 4.13: Índice de Lerner del sistema

Si bien, el índice Lerner no indica satisfactoriamente la magnitud del poder de mercado ejercido dentro de un análisis de oligopolio de Cournot, porque el

precio de mercado no es obtenido en forma directa, si se puede hacer un análisis comparativo de distintos escenarios de elasticidad y demanda del sistema.

En este caso, la figura 4.13 entrega una buena comparación de la evolución del índice de Lerner, indicando lo antes adelantado en relación con que en el SING frente a un sistema de oferta en Bolsa, el ejercicio de poder de mercado se realiza para demandas bajas incluyendo todo el rango de operación actual del sistema, situación relevante que queda demostrada. Se aprecia en la figura 4.13 que este indicador va decreciendo a medida que aumenta la demanda, demostrando que el poder de mercado ejercido por las firmas por medio de la utilización de sus ciclos combinados toma relevancia en niveles bajos y medios de demanda, y siendo mucho mayor en el caso de elasticidades bajas cercanas a -0.1 . Por otra parte, se observa que el índice comienza a crecer a partir de los 1800 MW de demanda base producto ya de una situación normal de disminución de sobrecapacidad restringiendo estratégicamente la oferta, y por la distorsión del precio de referencia para la construcción de la curva de demanda.

También se puede aplicar este índice a cada firma, con el objetivo de reconocer cual de ellas ejerce un mayor poder de mercado u obtiene mayores márgenes. En esta ocasión, este índice no es una buena herramienta para asignar mayor o menor poder de mercado a una u otra firma, ya que el precio es establecido en forma indirecta, y no es una decisión estratégica de la firma.



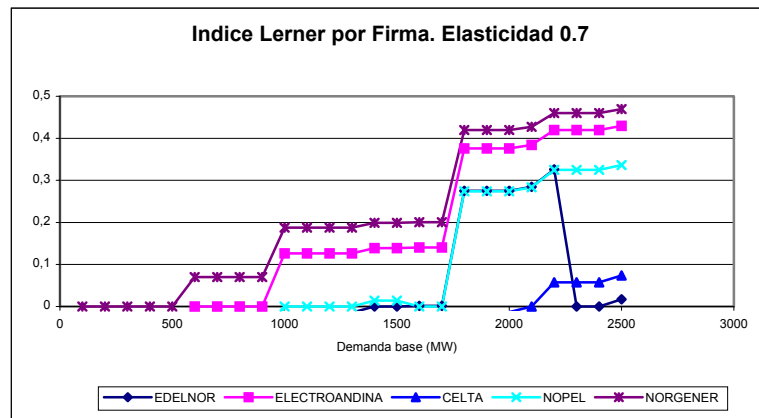


Figura 4.14: Índice de Lerner por firma

La figura 4.14 viene a demostrar lo dicho anteriormente con respecto al mayor poder estratégico que posee Norgener sobre las demás firmas al poseer una unidad de ciclo combinado de gran tamaño con menor costo variable que el resto⁷.

Aplicando el índice HHI a los resultados de la simulación, se obtiene lo siguiente.

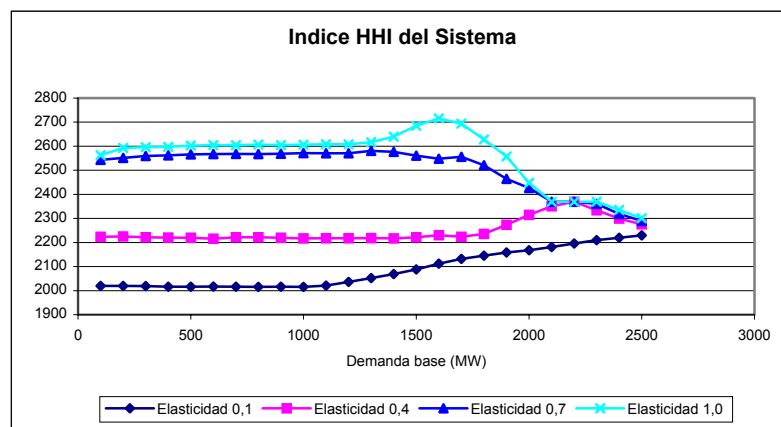


Figura 4.15: Índice HHI del sistema

⁷ El costo variable asignado a cada unidad es el costo en su mayor rango de operación

El índice HHI, además de reflejar concentración de mercado dada la definición que aparece en la sección 3.5, también se puede aplicar como medidor de poder de mercado.

La figura 4.15 muestra la evolución del índice HHI en el perfil de demanda bajo distintos escenarios de elasticidad. Se observa que a medida que aumenta la elasticidad de demanda, aumenta la concentración de mercado, significando con esto que la participación relativa de algunas firmas aumenta con respecto de las demás y generando un poder de mercado mayor por algunas de ellas. En este sentido, estas observaciones concuerdan con los resultados anteriores, los cuales indicaban que para mayores elasticidades la oferta por parte de las firmas era menos restrictiva con relación a la demanda base, y producía mayor oferta por parte de algunas firmas como Norgener, Electroandina y Nopel principalmente, en desmedro de firmas como Celta. Entonces a mayor elasticidad, menor es la participación de aquellas firmas que son incapaces de competir estratégicamente.

En general, los niveles del índice HHI⁸ a que se llega, independientes del nivel de elasticidad de demanda, son bajos en comparación a estudios del mismo tipo en otros sistemas eléctricos, ya que por ejemplo un sistema con cuatro participantes, todos ellos firmas competitivas dentro del mercado, puede aspirar a tener como mínimo un valor del índice HHI de 0.25. Y si observamos la figura 5.8, el promedio está por debajo este valor, de esta forma indicando que en el SING existe una baja concentración de Mercado en la operación.

Otra característica importante de estos resultados, es que existe una aparente convergencia en el nivel de HHI que tiende el sistema a medida que aumenta la demanda, producto que se torna obligatorio la generación de todas las firmas para cumplir con la demanda, y que ninguna de las firmas tiene permanentemente una estructura de costos más barata que las demás, lo que generaría un aumento en la concentración de mercado.

⁸ Los valores del índice son multiplicados por 10000 para evitar usar excesiva cantidad de decimales.

4.3.2.4 Restricción de generación

El SING es un sistema eléctrico en donde se ha generado una alta sobrecapacidad producto de la entrada de un número importante de centrales de ciclo combinado. Además, estas centrales pueden generar grandes bloques de energía, por lo que en rigor, con tres unidades de este tipo se podría abastecer la demanda la mayor parte del tiempo. Entonces, lo que sucede es que ante una falla de algunas de estas centrales de ciclo combinado generando en el sistema, es casi imposible respaldar dicha generación con la partida de otra central porque la falla representaría un alto porcentaje de la demanda y el sistema perdería estabilidad crítica drásticamente produciéndose un “Black-out”.

Para solucionar este problema, en la actualidad se ha restringido la generación de las unidades a no ser más allá de 180 MW. Esta restricción perjudica fuertemente la operación de los ciclos combinados, por impedir un uso eficiente a mínimo costo.

Entonces, es necesario poder de alguna forma reflejar cual es el impacto dentro de los resultados de la simulación implementada, la restricción de 180 MW de generación.

Para empezar, la curva de costos variables agregada del sistema se modifica, quedando de la siguiente manera.

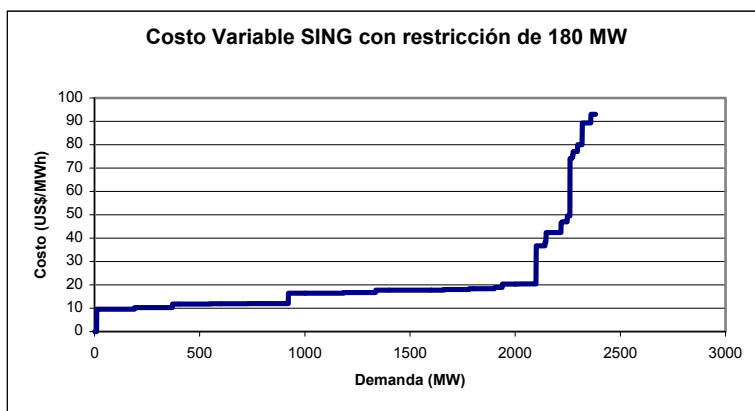


Figura 4.16: Costos variables del SING con restricción de 180 MW

En comparación a la misma curva pero sin restricción, ahora el costo comienza a elevarse por sobre los 20US\$/MWh alrededor de los 2200 MW en comparación a los 2900 MW que era en el caso anterior. Por lo tanto, el equilibrio de Cournot también se modifica de la siguiente manera.

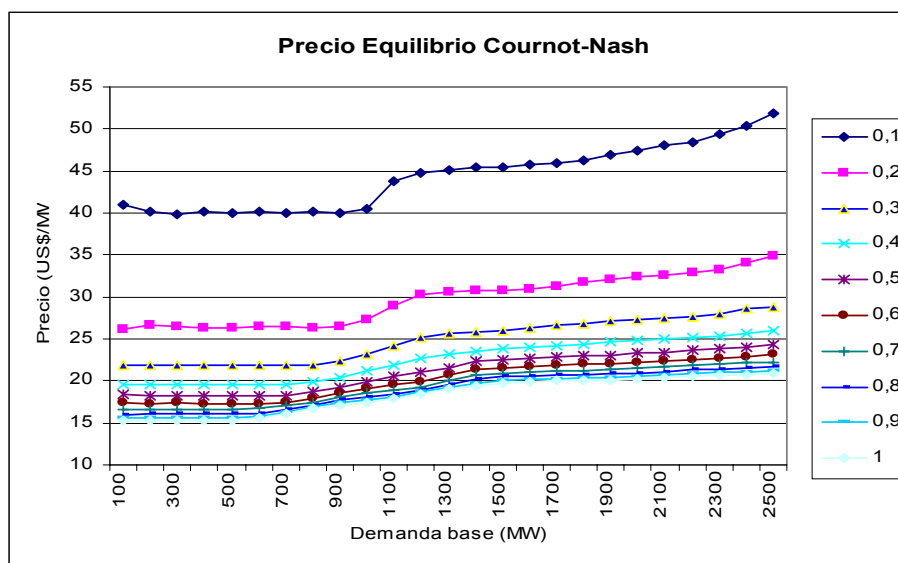


Figura 4.17: Precio de equilibrio de Cournot con restricción en generación

Ahora se aprecia un mayor precio de despeje de mercado, producto de la restricción en capacidad de generación, que afecta directamente las unidades de menor costo que son las de ciclo combinado, provocando una entrada prematura de centrales a carbón que logran un importante aumento alrededor de una demanda base de 1000 MW. Por lo tanto, en el caso de aplicar un esquema de Bolsa de energía con este tipo de restricciones los precios aumentarían.

Para hacer un paralelo entre el precio de Cournot y competencia perfecta en los análisis con y sin restricción en generación, se presenta las siguientes figuras

4.18 y 4.19 que muestran esta comparación para niveles de elasticidad de -0.4 y -0.7 ⁹.

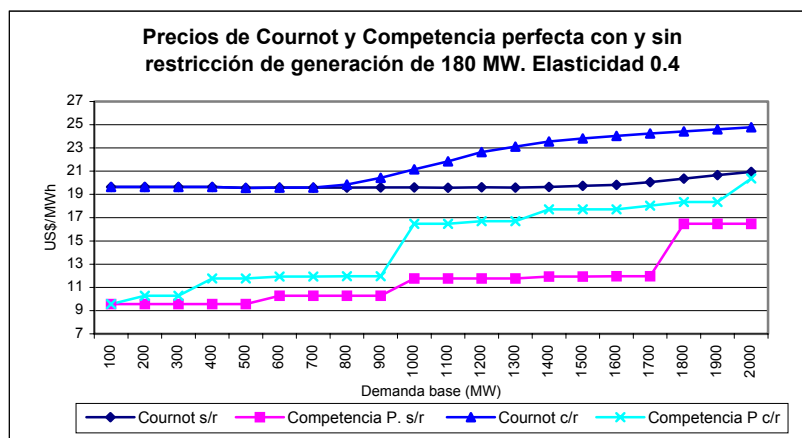


Figura 4.18: Comparación competencia perfecta y Cournot, con y sin restricción para elasticidad 0.4

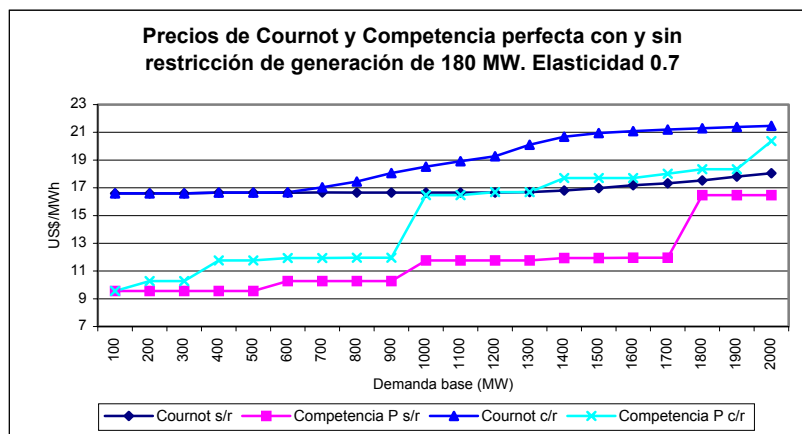
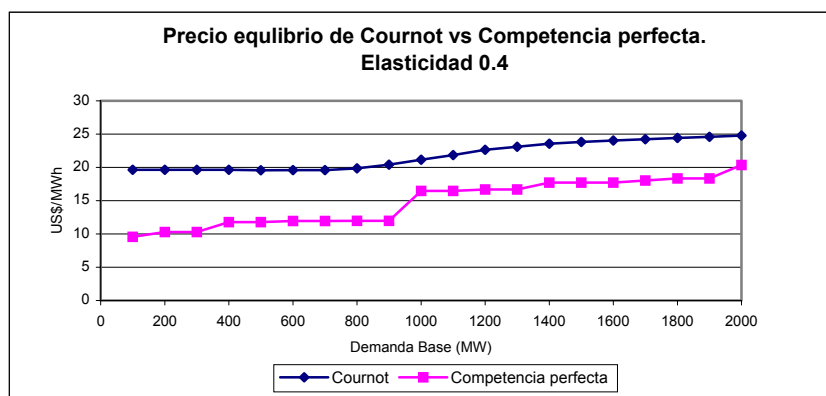
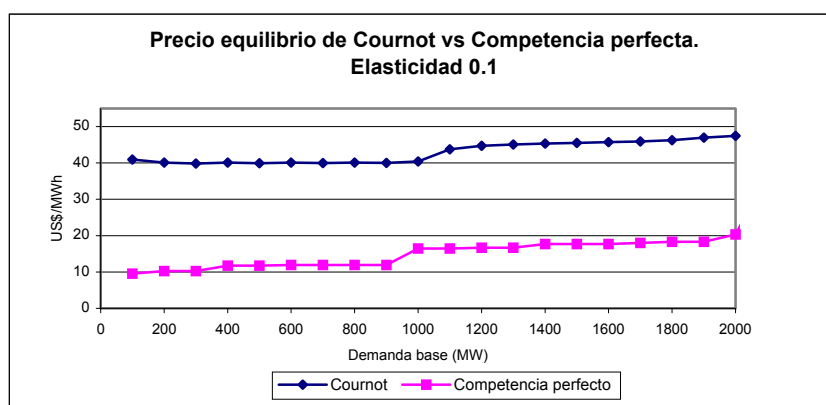


Figura 4.19: Comparación competencia perfecta y Cournot, con y sin restricción para elasticidad 0.7

⁹ Los resultados numéricos en su totalidad se encuentran en el Anexo B

Por otra parte, con este tipo de restricciones es probable que se beneficie la generación de algunas firmas que posean una importante capacidad instalada con unidades a carbón o diesel de menor capacidad de generación.

Analizando al igual que en caso anterior los escenarios de elasticidad de demanda -0.1, -0.4, -0.7 y -1.0.



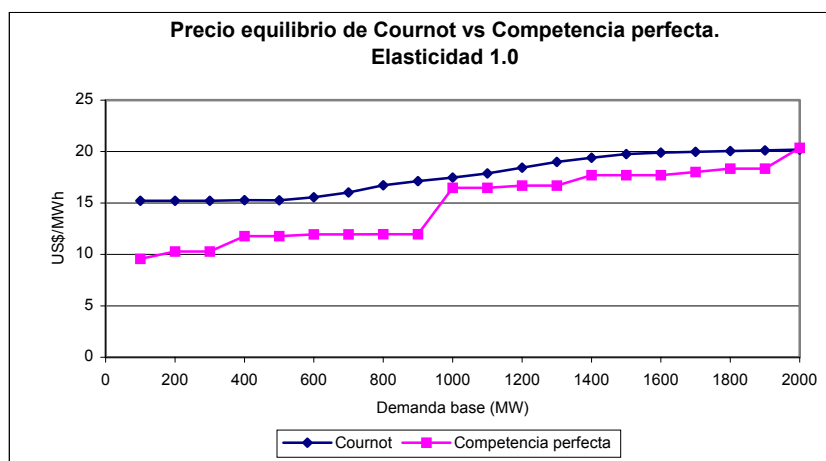
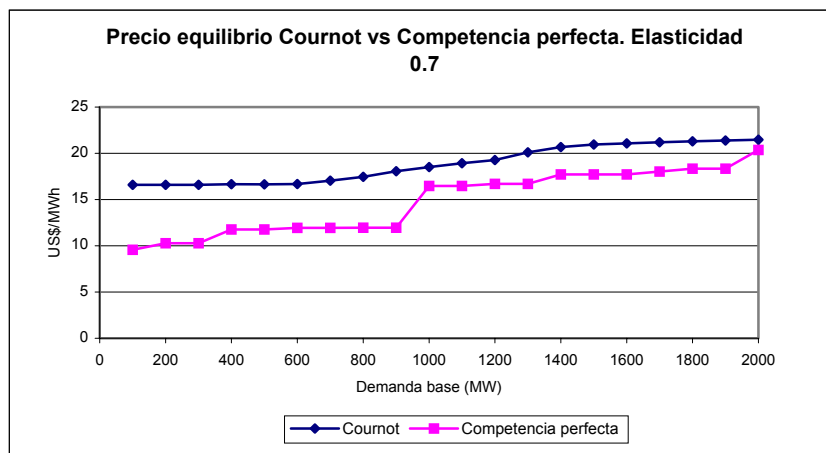
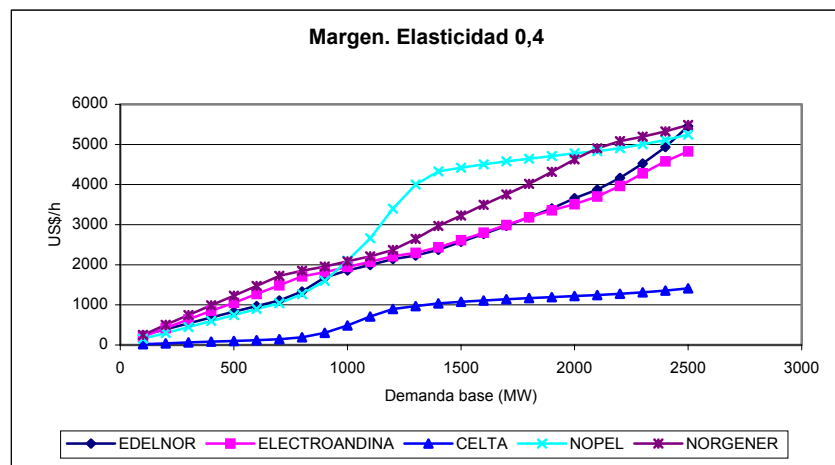
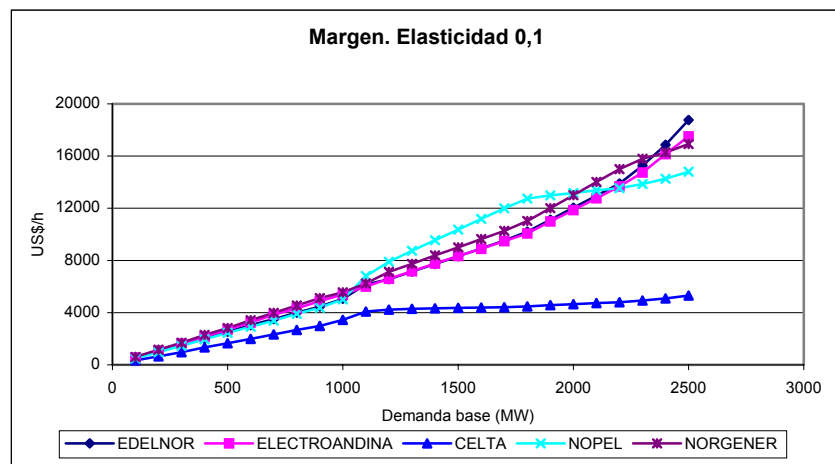


Figura 4.20: Comparación Cournot vs. Competencia perfecta con restricción en generación

La relación entre el precio de Cournot y el precio de competencia perfecta se mantiene para los niveles más bajos de demanda base, pero ambos precios ahora son mucho más parecidos en el rango. El efecto de la restricción en capacidad tuvo una mayor influencia en la curva de precios de competencia perfecta, la cual refleja el costo variable del sistema, pero no tan así la curva de precios de Cournot. Esta diferencia se puede deber al efecto que provoca en los resultados de la simulación, el valor del precio de referencia para trazar la curva de demanda en cada caso. Como simplificación se utilizó el mismo en ambas simulaciones, con y sin

restricción, ya que para la segunda simulación, representa la operación del sistema en estas condiciones. En todo caso, este factor influye casi proporcional en la mayoría del rango de la demanda del sistema.

Analizando lo que ocurre con los márgenes de cada una de las firmas, se observa la figura 4.21.



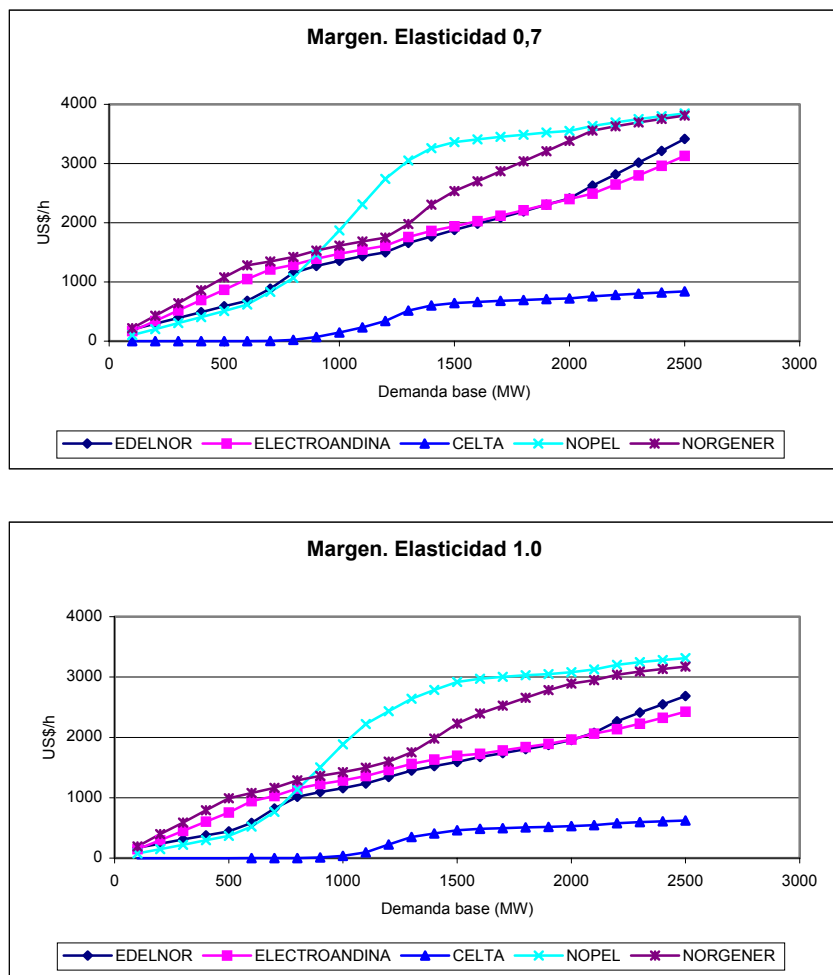


Figura 4.21: Margen por firma para cada nivel de elasticidad con restricción de generación

Interesante es el efecto que aquí se observa, porque cambia la situación vista anteriormente en relación a la firma que logra mejores márgenes en la elección de sus estrategias. Se observa que la firma Nopel, a partir de los 800 MW de demanda base logra tener los mayores márgenes de generación. Remontándose a la tabla del Anexo A, se aprecia que la firma Nopel posee dos unidades generadoras de 350 y 194 MW con costos relativamente bajos, con lo cual logra tener después de la aplicación de la restricción de 180 MW, una capacidad de generación de aproximadamente de 360 MW, que es superior al monto que pueden alcanzar las

otras firmas que poseen ciclos combinados, producto de esta restricción de generación.

Si bien, aplicar este tipo de restricciones va directamente en desmedro de obtener un menor precio de la energía en el sistema, en el SING genera una mayor competencia entre las firmas porque disminuye el poder de mercado que pueden ejercer las firmas capaces de generar a bajo costo grandes volúmenes.

Para hacer un paralelo de la evolución de los márgenes totales obtenidos por las firmas en la operación estratégica dentro de una Bolsa de energía en el sistema, se presenta la siguiente tabla¹⁰.

Tabla 4.1: Márgenes totales obtenidos por los agentes generadores en el SING

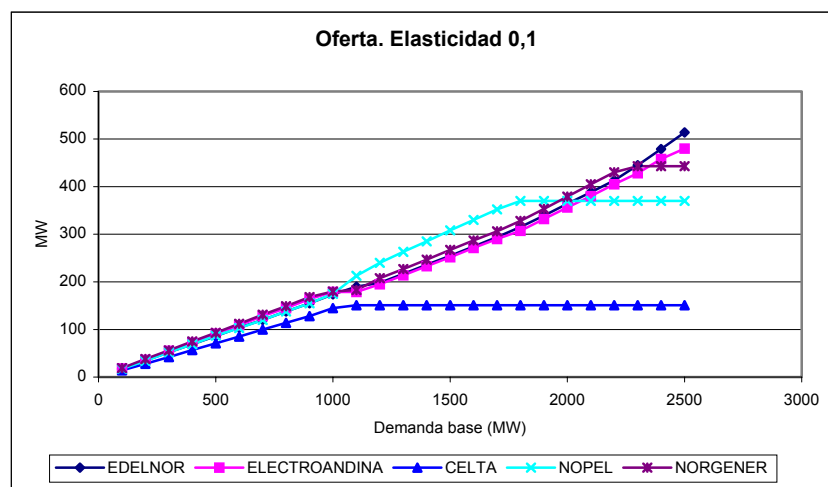
Demanda base (MW)	Elasticidad 0,1		Elasticidad 0,4		Elasticidad 0,7		Elasticidad 1,0	
	S/R	C/R	S/R	C/R	S/R	C/R	S/R	C/R
200	4.947	4.947	1.659	1.659	1.268	1.268	1.079	1.079
400	9.779	9.779	3.207	3.207	2.451	2.451	2.069	2.069
600	14.618	14.618	4.740	4.735	3.623	3.632	3.046	3.127
800	19.451	19.451	6.279	6.359	4.800	4.951	4.036	4.594
1000	24.231	24.479	7.820	8.485	5.974	6.462	5.014	5.789
1200	29.679	32.417	9.371	11.022	7.151	7.941	5.995	7.063
1400	35.259	37.756	10.946	13.143	8.480	9.797	7.319	8.331
1600	41.889	43.014	12.705	14.678	9.975	10.781	8.962	9.257
1800	47.814	48.500	14.868	16.195	11.441	11.625	10.632	9.837
2000	54.032	54.706	17.375	17.792	12.980	12.466	12.107	10.421
2200	60.596	60.885	20.510	19.396	15.953	13.566	14.130	11.222
2400	66.402	68.639	23.865	21.305	18.295	14.555	16.090	11.897

En la tabla 4.1, los valores de márgenes están expresados en US\$/h. Se observa que los generadores en el sistema en presencia de bajos niveles de elasticidad como -0.1, logran capturar bastante mayores ingresos con respecto a niveles de elasticidad mayores, quedando de manifiesto una pérdida social importante con la aplicación de un fuerte poder de mercado. Por otro lado, la aplicación de la restricción de 180 MW a la generación máxima por unidad en el

¹⁰ Los resultados en forma completa se encuentran en el Anexo C

SING, no influye mayormente en el menor o mayor margen total que se puede obtener de la operación, pero si se aprecia un mayor efecto en este sentido para niveles de demanda altos, donde en los casos con restricción el margen es menor producto del factor de proporción con que aumenta el costo marginal del sistema, que es mayor al que crece el precio de Cournot. Este efecto se agudiza para elasticidades mayores, donde el consumo adquiere un mayor poder de mercado, o más bien la posibilidad de ejercer poder de mercado por parte de los generadores es menor.

Afirmando el tema de la mayor competencia que se genera, se observa la evolución que tienen las ofertas de los participantes en el mercado bajo la restricción en generación.



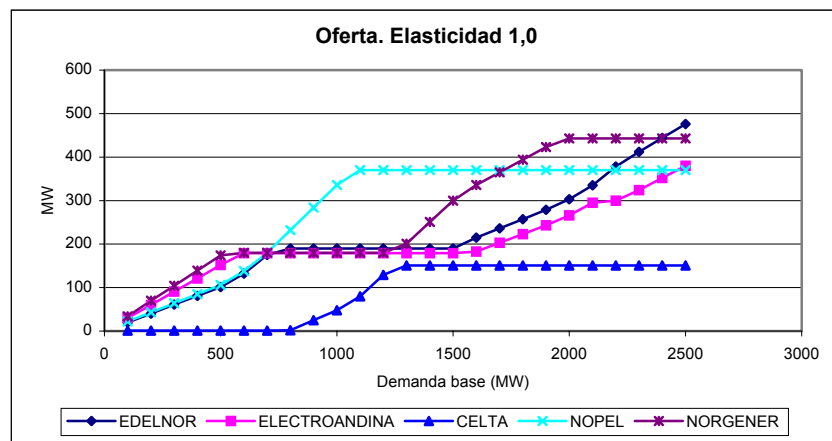
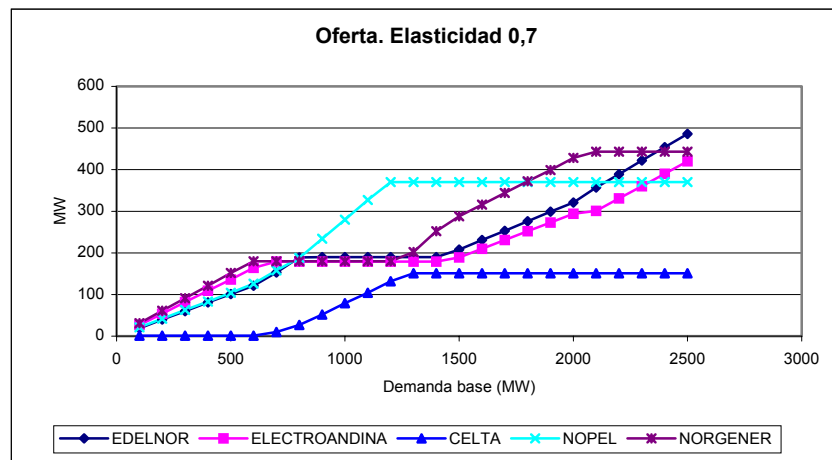
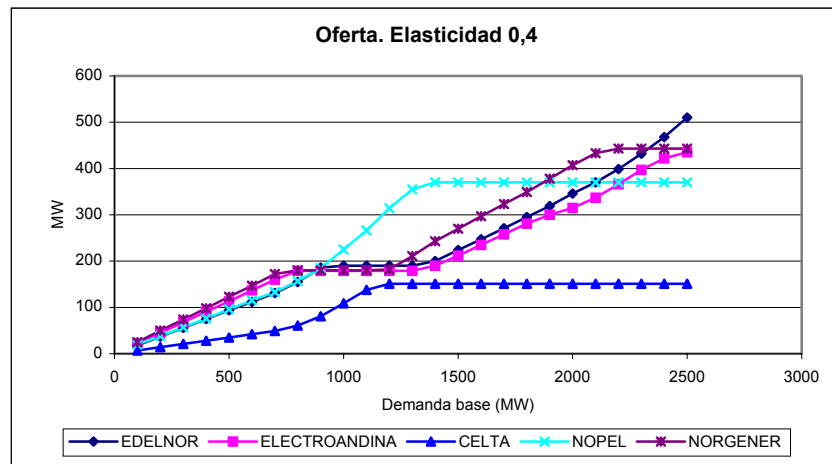


Figura 4.22: Oferta por firma para cada nivel de elasticidad con restricción de generación

En los cuadros de la figura 4.20, se reafirma la idea de que a causa de la restricción de generación, otras firmas se ven beneficiadas por tener una configuración de centrales de menor tamaño pero de costos bajos, como es el caso de Nopel. También se observa que Celta es capaz de ofertar de forma importante en todos los casos de elasticidad de demanda analizados, producto que ahora tiene una mayor relevancia en la capacidad instalada.

Por otro lado, se tiene que firmas como Norgener son tremendamente perjudicadas por la aplicación de esta restricción de generación, ya que posee una central capaz de generar casi 600 MW ubicada en Argentina en la región de Salta que ahora solo puede generar 180 MW, con lo cual aumenta la importancia relativa de las otras firmas que poseen costos de generación mayores.

Entonces como conclusión a este punto, la restricción en la generación máxima de las unidades, es una medida “no equitativa” para el mercado, ya que influye negativamente en algunas firmas y positivamente en otras. En este sentido, la situación más grave que se comete, es la aplicación de estas medidas en forma posterior a las inversiones, con lo cual los retornos de estas se distorsionan. Entonces en la medida que se aplique un esquema de Bolsa de Energía, será necesario que previamente se normalicen las normas de operación del sistema, retirando estas restricciones o haciendo más justa la medida.

Importante también es visualizar lo que ocurre con los índices de concentración o poder de mercado mencionados anteriormente, y de alguna forma corroborar las observaciones ya mencionadas.

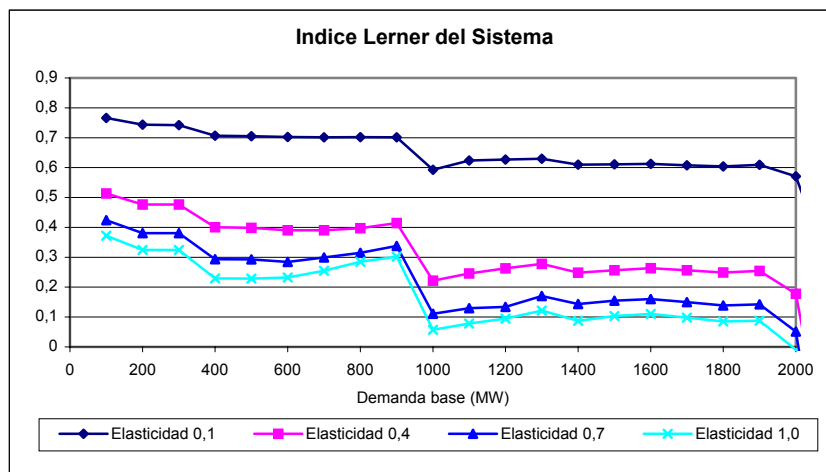


Figura 4.23: Índice de Lerner del sistema con restricción en generación

Comparando la figura 4.23 con la figura 4.13, se observa que constantemente en la primera, el índice presenta un menor valor, indicando que en el caso con restricción en la generación se establece una menor diferencia entre el precio de Cournot y el precio de competencia perfecta en niveles de demanda medios y bajos, situación que se puede comprobar con la figura 4.19, y producto de una menor reacción de los participantes en el juego en comparación al cambio en el costo marginal del sistema.

Esta menor reacción es producto directamente de la imposibilidad de ejercer un mayor poder de mercado de aquellas firmas que en el caso anterior podían ofrecer mayor volumen de energía barata. De este modo generando una menor concentración de mercado dando la posibilidad que sean competitivas otras firmas, como así lo demuestra el índice HHI en la figura 4.24.

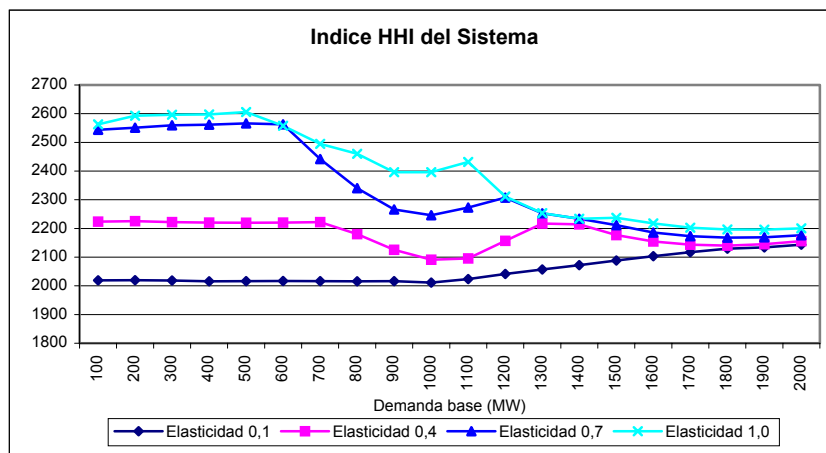


Figura 4.24: Índice HHI del sistema con restricción en generación

Importante destacar es el valor que tiende el mercado al aumentar la demanda base del sistema, alcanzando un valor de 2170 que es bastante bajo considerando que el menor valor a que se puede llegar en un mercado con cinco participantes es de 2000, reflejando de esta forma una baja concentración de mercado. También se observa una caída de este índice alrededor de los 700 MW producto que con la restricción en generación se equilibra la participación en generación con tecnologías de bajo costo - ciclos combinados -.

4.3.2.5 Fusión de Firmas

Siempre en el SING ha existido la posibilidad de fusión de algunas de las compañías que operan este sistema, ya sea por la compra de empresas externas controladoras, o por ofertas de compra de algunas de ellas. Es así, como en el último tiempo ha existido la oferta concreta de fusión entre las firmas Edelnor y Electroandina o Edelnor y Gener. Por lo tanto, toma relevancia hacer algún tipo de análisis con el modelo de Cournot implementado, para dimensionar de alguna forma cual es la desviación que sufre el precio de mercado ante cualquiera de estas fusiones.

La fusión Edelnor-Gener se considera como la fusión Edelnor-Norgener para efectos de este estudio, dado los supuestos antes mencionados sobre considerar Gener y Norgener como una única firma.

Los resultados obtenidos sobre el precio de despeje de mercado son los presentados a continuación, tomando en cuenta los análisis hechos sobre elasticidades de demanda de $-0,4$ y $-0,7$.

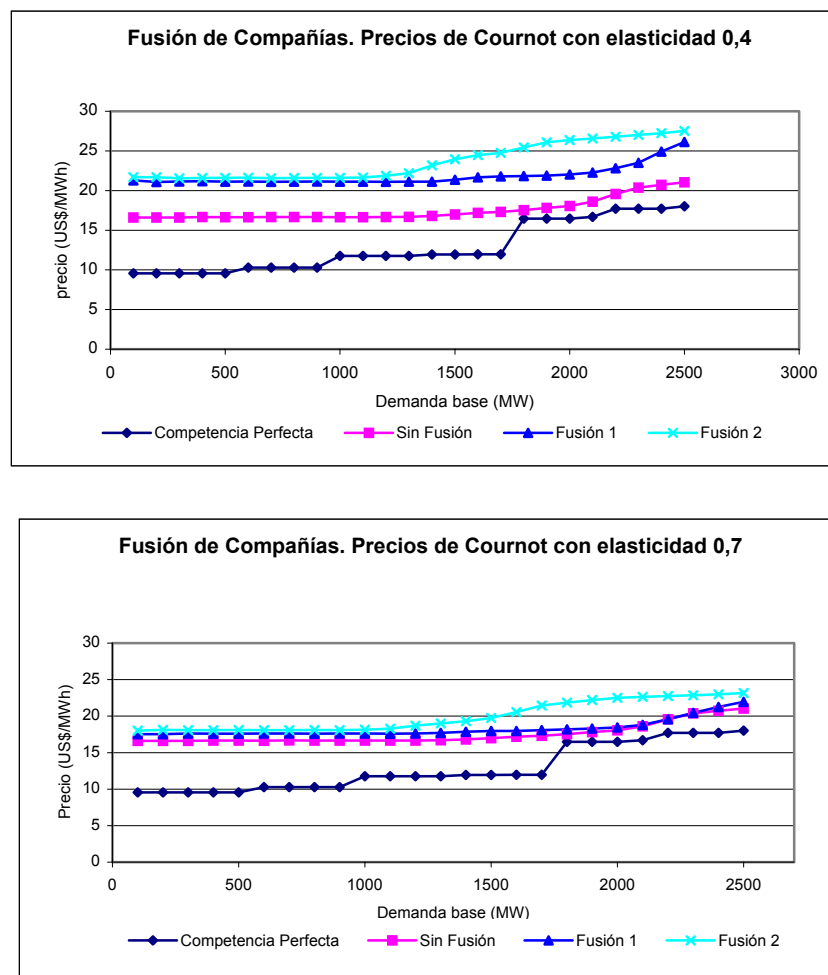


Figura 4.25: Precio de Cournot con fusión de firmas

4.4 Supuestos del modelo

El modelo de Cournot como se presenta en la teoría, presenta varios supuestos como los ya mencionados con respecto a establecer una curva de demanda con un precio de referencia y una demanda base del sistema. Pero dentro de lo que atañe en particular al modelo implementado, aparecen los siguientes supuestos.

- Las generaciones mínimas técnicas de cada una de las unidades no se toman en cuenta, porque aportarían una importante complicación al modelo que no es necesaria en este tipo de análisis, que pretenden ser más bien comparativos que proveedores de resultados de despeje real de mercado.
- Los costos variables asignados a cada una de las unidades generadoras en el SING, son los costos variables en el rango de plena carga, originándose una pequeña distorsión cuando las unidades generan a niveles medios o bajos. De todas formas, las diferencias de costos variables que se producirían son mínimas.
- Los cálculos dentro del modelo poseen una precisión de una unidad de magnitud en lo que se refiere a la oferta de MW's.
- Se utiliza la regla de decisión expuesta en el capítulo 4.2.5 para resolver temas de indeterminación de precio en el cálculo del margen de las firmas en el proceso iterativo.
- El precio de referencia fue tomado en base al promedio de doce meses de operación del SING, pretendiendo que tuviera la mejor coherencia con los costos variables expuestos por las firmas para cada una de sus centrales. Es importante destacar esto, porque con una errónea elección del precio de referencia, los resultados pueden diferir en forma importante o llevar a errores conceptuales en la aplicación del modelo de Cournot-Nash.

4.5 **Discusión**

Para realizar un análisis de un sistema eléctrico en cuanto a encontrar comportamientos estratégicos de cada uno de los agentes, existen varias herramientas y metodologías con la cual abordar el problema. Una de estas herramientas es la Teoría de Juegos, y dentro de ella los modelos de comportamiento estratégico de Cournot-Nash.

La modelación que se realizó aplica el concepto de Cournot-Nash en el SING de manera de visualizar la actuación de sólo los agentes encargados de la producción y oferta de energía. De este punto se puede realizar una primera discusión, ya que en teoría se podrían analizar tanto los agentes encargados de la oferta, como los consumidores, y pasando por los participantes en el sistema encargados del transporte. Tal ejercicio no se realiza porque equivale a una simulación dinámica del sistema que en esta ocasión quedaba fuera del alcance de este trabajo, y por otra parte el incluir la transmisión en el cálculo requiere del uso de Teoría de Juegos cooperativos. Por otra parte, si se puede analizar el tema de la transmisión desde el punto de vista de desacople de sistemas, producto de decisiones estratégicas de los generadores que influyan en la saturación del sistema de transporte con el objetivo de sacar una ventaja económica en la operación. La mayoría de estos estudios se hacen en forma simple mediante el análisis de varios escenarios y sólo identificando aquellas líneas en donde se tenga sospecha que se produzca saturación en el flujo eléctrico. En el caso del SING, tal situación no ocurre, ya que existe un sistema troncal de transmisión con bastante holgura producto del gran desarrollo de centros de alto consumo eléctrico de tipo minero.

Con relación a la validez de los resultados, aparte de los supuestos antes mencionados en relación al precio de referencia para construir la curva de demanda, no se realizan supuestos menores o de mayor particularidad en el cálculo de las iteraciones. Y de esta forma el modelo de Cournot-Nash simulado presenta claridad y simpleza de acuerdo a los parámetros teóricos [Bore97], dando la seguridad de no introducir algún tipo de sesgo en los resultados. También cabe mencionar que el método de programación del algoritmo, no va acumulando error a medida que avanza en las iteraciones, ya que en cada una de estas se hace una nueva inspección

de todas las alternativas posibles, y que sólo se toma el resultado anterior como un punto de referencia o partida para la siguiente.

A opinión del autor, la mayor deficiencia del modelo está en la determinación del precio de mercado, y en la imposibilidad de las firmas de aplicar una estrategia extra de indisponibilidad de unidades, de tal forma de conseguir un beneficio al restringir la oferta de energía barata por una más cara según sea la reacción de las otras firmas. En este sentido, el modelo de indisponibilidad de unidades que se desarrolla en el capítulo VI, pretende resolver este problema.

Por último, y ya mencionado anteriormente, la aplicación del modelo de Cournot en el SING ha entregado una clara idea del tipo de poder de mercado que se podría establecer bajo un régimen de bolsa de energía para el total o gran parte de las transacciones, el cual no tiene las mismas características que en otros sistemas eléctricos del mundo. En este sentido, las medidas que se deben aplicar para aplacar el poder de mercado van de acuerdo al nivel de incentivos que se deben generar para disminuir la sobrecapacidad en el sistema, tomando gran relevancia proyectos de interconexiones del SING con otros sistemas eléctricos.

4.6 Conclusiones

El modelo de Cournot, como se menciona en la literatura, se utiliza para detectar la presencia de poderes de mercado, dimensionando la desviación que alcanzan los precios producto de decisiones estratégicas de los costos reales del sistema. En esta ocasión, el modelo implementado ha detectado la presencia de poder de mercado en niveles bajos de demanda producto de la presencia de unidades de ciclo combinado en varias de las firmas, con lo cual quedan sin posibilidad algunas otras firmas de ejercer una posición estratégica, como es el caso de Celta. Una importante conclusión en este sentido, es que el comportamiento de Celta en el sistema operando en forma normal, corresponde a una firma tomadora de precio sin poseer un peso estratégico importante dentro de un amplio rango de demanda, en el cual se incluye la demanda de punta y no-punta actual del sistema. Entonces para efectos de un nuevo análisis, perfectamente se podría marginar esta firma del cálculo del juego de Cournot.

Desde el punto de vista de la elasticidad de demanda, esta influye bastante dentro del precio resultante del juego, sobretodo con niveles de elasticidad bajos - cercanos a -0.1 -, donde los precios en promedio están 3 o 4 veces por sobre el costo marginal del sistema. Cabe destacar que el SING posee un alto porcentaje de consumo tipo industrial, que entrega una característica de mayor elasticidad a la demanda del sistema, generando menores precios. También debido a la alta sobrecapacidad del sistema, los precios en horas de punta mediante un sistema de oferta libre en bolsa no deberían ser mucho mayores a los precios de no-punta.

En el caso de no existir restricciones en la operación de las unidades por parte de las firmas, algunas de estas como el caso de Norgener, logran extraer un beneficio mayor que otras por poseer la posibilidad de generar grandes volúmenes a costos más bajos que otras centrales de ciclo combinado.

Para demostrar más claramente el nivel de poder de mercado, y como y cuando este es aplicado, fueron utilizados los índices de Lerner y HHI, los cuales demostraron la existencia de poderes de mercado para niveles medios y bajos de demanda aplicados en promedio por todas las firmas que poseen ciclos combinados,

pero principalmente dieron cuenta de la existencia de una baja concentración de mercado en promedio para cada caso de demanda.

Con respecto a la aplicación de restricciones en la generación máxima de las unidades del SING. Esta produce efectos tales como: un aumento en los precios de equilibrio de Cournot-Nash proporcionalmente para todos los escenarios de elasticidad; también un aumento considerable en los costos reales de generación del sistema que crecen en mayor medida que los precios de Cournot, provocando en la mayoría de los casos, menores márgenes a las firmas generadoras. En el análisis particular, firmas como Nopel se ven favorecidas por la aplicación de esta restricción dada su estructura de centrales generadoras. También provoca que Celta tenga una participación más influyente en el precio, por lo tanto, se podría decir que ahora si se podría tratar como un participante en el juego de Cournot. En resumen, la aplicación de restricción e generación por temas de seguridad de suministro, logra por una parte mayores precios, pero también genera mayor competencia y menor concentración de mercado.

Los resultados indican que bajo una aplicación de esquema de bolsa de energía, existiría un importante ejercicio de poder de mercado a pesar de la alta sobrecapacidad que exhibe el sistema. Sin embargo, la aplicación de un esquema de bolsa requiere de grandes cambios regulatorios en relación a la calidad y seguridad de suministro, y de alguna forma eliminar restricciones de generación y disminuir la sobrecapacidad del sistema logrando una mayor eficiencia de las plantas generadoras.

V. **MODELO DE OFERTA EN BOLSA CON INDISPONIBILIDAD DE UNIDADES: APLICACIÓN AL SING**

En el ejercicio de Cournot realizado anteriormente, cada una de las firmas participantes tiene como estrategia a jugar, el nivel de generación a ofertar. De esta forma, se obtiene una oferta óptima de cada una de las firmas que logra maximizar su beneficio, dependiendo del nivel de demanda, elasticidad de demanda y la estrategia tomada por los demás participantes en el juego. El juego de estrategias de Cournot entrega un precio de despeje de mercado producto de la energía ofrecida al sistema y de la curva inversa de demanda, por lo tanto, el precio obtenido no es una variable estratégica directa como se veía en anteriores capítulos.

En la mayor parte de la literatura, el ejercicio de Cournot presenta ventajas con respecto a detectar poderes de mercado ejercidos por algunas firmas presentes en el sistema, es así como es usado el índice Lerner y el HHI para cuantificar este efecto, o por la simple inspección del precio de despeje. La implementación del modelo de Cournot en esta ocasión, permitió detectar poderes de mercado ejercidos por algunas firmas en el SING, las cuales restringían su generación para elevar los precios de la energía en el sistema. Tales efectos se presentaban de distinta magnitud en relación a la elasticidad y nivel de demanda en cada caso.

Las principales críticas o deficiencias que se tiene al modelo de Cournot, es que no permite predecir cual será aproximadamente el nivel de precio real que tendrá el mercado dada las estrategias con que cuenta cada agente, esto debido principalmente a la determinación en forma indirecta del precio, donde cada agente no visualiza en forma clara el riesgo de despacho de sus unidades. Tampoco refleja en buena forma un sistema de oferta en bolsa, donde el agente controlador despacha a cada unidad por medio de lista de mérito, dada las ofertas de los generadores para cada una de sus unidades.

En un sistema de bolsa de energía, las firmas hacen sus ofertas mediante el análisis de estrategias de precio y cantidad que le permitan maximizar sus beneficios cumpliendo con ciertas restricciones propias y del sistema. De esta forma,

ahora aparece el concepto de indisponibilidad de unidades, que significa que la firma puede declarar unidades sin capacidad de generar para obtener alguna ventaja en la operación del resto de su mix de generadores. Tal situación no es posible de visualizar en un esquema de Cournot en donde la estrategia de oferta es solo la cantidad, dado que la estructura de la curva de costos marginales permanecía constante.

El autor propone modelar un esquema en el cual cada firma pueda ofrecer precio y cantidad, incluyendo modificar su estructura de curva de oferta para ejercer indisponibilidades de unidades. En la literatura aparece un esquema de estrategia por medio de curvas de ofertas, donde el controlador extrae la cantidad generada de cada una de las curvas presentadas hasta completar la demanda del sistema. En esta propuesta, al igual que en la modelación del juego de Cournot, el autor trabaja con curvas de ofertas discretas, representando las diferentes unidades disponibles por firma y sin hacer una linealización dentro de un rango de operación. Esta aproximación es muy utilizada en modelos de oferta de curvas de producción, pero sobre la base que cada unidad representa una pequeña parte del total de energía demandada, por lo tanto, aproximar las curvas de oferta por alguna función dentro de cierto rango no implica mayor distorsión a la solución. No es así en el caso del sistema del SING, donde algunas unidades representan casi un tercio de la demanda de punta del sistema, por lo tanto, una simplificación de este tipo generaría gran distorsión de los resultados.

5.1 Descripción del modelo

El sistema del SING posee la particularidad de poseer una capacidad instalada tres veces mayor que la demanda del sistema, unido también al bajo monto que presenta la demanda comparado con otros sistemas eléctricos (1200 MW de punta aprox.). Se observa que una unidad de ciclo combinado de 370 MW representa un tercio del sistema, habiendo seis en este caso. Es por esto, que de existir una estructura de bolsa de energía, los precios de equilibrio podrían presentar una importante desviación con respecto al costo marginal del sistema, a medida que exista una importante diferencia entre los costos reales de estos ciclos combinados. Por lo tanto, es destacable estudiar cual es el comportamiento de las distintas firmas en ejercer poder de mercado en relación a la participación en la generación total que poseen.

Como se había mencionado anteriormente, el modelo de Cournot implementado, tiene la desventaja de no considerar que las firmas puedan declarar no disponible alguna de sus unidades desde el punto de vista estratégico de oferta. Este factor estratégico permite a las firmas maximizar sus beneficios ofreciendo ahora un precio por cada unidad, y en el caso de querer dejar fuera una de ellas, le otorga un precio de oferta máximo (1000 veces el costo marginal real de la unidad).

El modelo de Cournot utilizado en la etapa anterior, se hizo sobre la base de curvas de ofertas discretas, por lo cual, los resultados están suscritos dentro de un área en torno al punto óptimo, y no precisamente es el óptimo real. En esta ocasión también se optó por trabajar con curvas de oferta discreta y por ende con la construcción de un modelo iterativo que permita encontrar una solución cercana al óptimo.

Dentro de la literatura encontramos ejercicios de oferta de curvas de generación continuas, que permiten construir un problema de maximización lineal, el cual entrega una estrategia óptima a tomar por cada una de los agentes. También encontramos que varios esquemas en donde las curvas de generación son discretas, se linealizan por medio de una recta en torno a un rango de operación del sistema y posteriormente se aplica un sistema de optimización lineal, no aplicable al caso del SING por lo mencionado anteriormente. Por esto, que el autor ha optado por

construir un proceso iterativo el cual permita aplicar independientemente ofertas sobre cada una de las unidades de cada firma hasta encontrar una solución que converja dentro de un punto de operación.

5.2 Implementación del modelo

El modelo aquí planteado, trata de reflejar una oferta de precio y cantidad, determinando la cantidad por medio de la oferta de generación de cada una de las unidades disponibles por la firma en forma de plena carga. Entonces, la firma tiene que establecer un precio fijo para la oferta de cada una de sus unidades disponibles, en cada una de las iteraciones. Entonces para introducir el tema de la indisponibilidad de unidades, la firma asigna un precio muy alto para tales unidades.

El algoritmo es similar al modelo de Cournot, es más, usa el principio de equilibrio de Nash para encontrar el equilibrio en cada caso estudiado. En este sentido, se construye una iteración cíclica como se observa en la figura 5.1, para poder llegar a una solución, y que asegure una independencia del orden de realización de las ofertas. El punto de partida del algoritmo se ha establecido con la oferta a costo marginal de cada una de las unidades de la firma.

Principio básico de este método, al igual que el de Cournot, es considerar en el proceso de realización de la oferta óptima por parte de la firma, que las ofertas del resto de los participantes ya se han establecido y son fijas. La oferta de cada firma consiste en adjudicarle un precio o costo a la generación de cada una de las unidades, este valor se ha establecido en la modelación como la aplicación de un factor por sobre el costo real variable de la unidad¹¹. De alguna forma hay que acotar las alternativas posibles de oferta de precio ya que pueden ser infinitas, por lo tanto, se ha adoptado por elegir un conjunto de factores fijos que puedan ser aplicados. Estos factores van desde un factor 1.0 a 1.5, incrementándose en 0.02. Este conjunto de valores fue establecido de tal forma que el extremo superior nunca sea utilizado,

¹¹ El costo variable de cada unidad se determina como el costo variable en el mayor rango de generación que es declarado al CDEC-SING.

siendo establecido después de varios ejercicios empíricos. Al igual el de no usar factores bajo 1.0 ya que solo podían generar soluciones de maximización de beneficios menores o iguales a las alcanzadas con factores de 1.0. También dentro de este mismo conjunto de factores de establece un factor aplicable al costo variable de la unidad que representa la situación de indisponibilidad, siendo este valor de 1000.

Aplicando el principio de Cournot-Nash, la iteración termina cuando ninguna de las firmas puede generar una nueva oferta que logre aumentar sus beneficios teniendo en cuenta que las demás ofertas están fijas. De esta forma se establece un juego estático de información completa en cada una de las iteraciones.

La figura 5.1 esquematiza este proceso, indicando que después que se ha llegado a un equilibrio, se realiza una lista de mérito dadas las últimas ofertas establecidas por cada una de las firmas, con el propósito de despachar el sistema según la demanda. Como resultado del algoritmo, se entrega un precio al cual se despachó el sistema, la cantidad generada por cada firma, y el margen obtenido también por cada una de ellas.

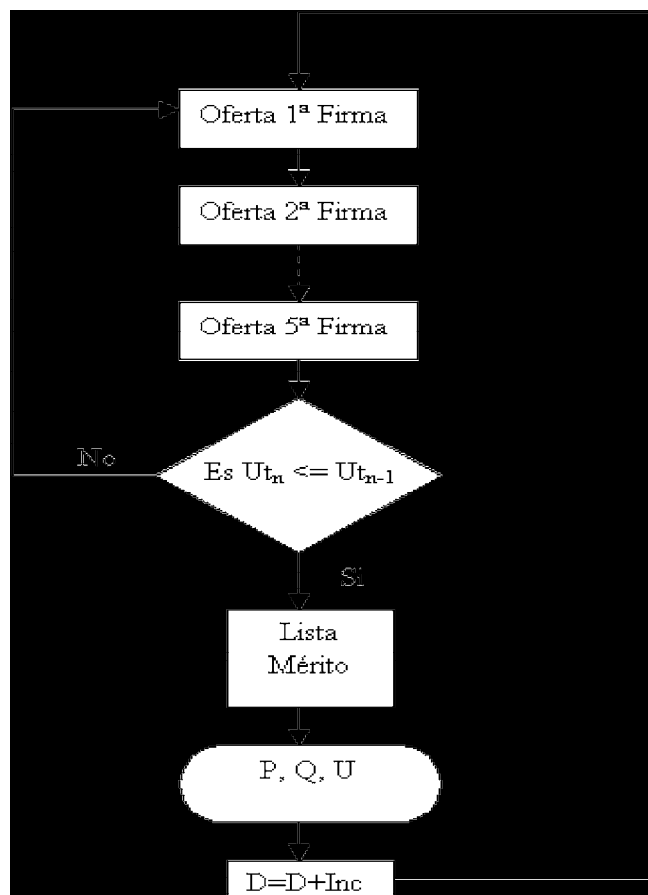


Figura 5.1: Algoritmo modelo de oferta en Bolsa con indisponibilidad de unidades.

En el esquema anterior, U_{t_n} es el vector con los márgenes de cada una de las firmas al terminar la iteración n . P representa el precio de despeje del mercado, Q es el vector de cantidades ofertadas por cada firma, y U el vector de márgenes finales de cada una de ellas en cada uno de los escenarios de demanda estudiados.

5.2.1 Firmas

Al igual que en la modelación de Cournot, se tomaron las mismas cinco firmas, incluyendo la fusión que se hace en cuanto a operación de las firmas Gener y Norgener.

Debido a que este modelo considera el cálculo de un gran número de alternativas de combinación que debe evaluar cada firma, en cada iteración para declarar su mejor respuesta al mercado, es necesario simplificar el sistema en cuanto al número de unidades que puedan ofrecer cada una de las firmas. En este sentido, se hace una reducción al problema, en donde se consideraron las unidades de mayor tamaño, que a su vez representan las centrales de menores costos (ciclos combinados).

Esta simplificación al sistema, no influye en las estrategias de oferta de las firmas, porque el resto de las unidades que no son consideradas en la simulación representan una parte muy pequeña de la capacidad instalada en el general de los casos y con costos bastante más altos. En la tabla 5.1 se muestran las centrales consideradas en la simulación para cada una de las firmas.

Tabla 5.1: Centrales consideradas por el modelo de ofertas de precio y cantidad, en bolsa.

	Indentificador	Potencia (MW)	Costo Variable (US\$/MWh)
EDELNOR	CC-CTM3	244,3	11,94
	CTM2	166,3	17,71
	CTM1	157,7	17,71
ELECTROANDINA	U16	378,3	10,28
	U14	120,6	18,02
	U15	122,2	18,34
CELTA	CTTA	151,5	16,69
	TGTAR	22,6	79,98
NOPEL	CC2	342,0	11,77
	CC1	189,5	11,96
NORGENER	CC	585,0	9,56
	NTO2	134,0	16,47
	NTO1	129,5	16,47

La tabla anterior está compuesta principalmente por todas las unidades de ciclo combinado presentes en el SING que tienen como combustible gas natural, y

las unidades más baratas a carbón o diesel. La capacidad total considerada de esta manera representa el 85% de la capacidad total instalada en el sistema [CNE00].

La potencia aquí considerada, es la potencia nominal de cada una de las unidades menos la proporción que pertenece a su indisponibilidad histórica¹².

Técnicamente, la unidad CC2 de Nopel fue considerada con una configuración 2TG+1TV, representando la configuración de generación entre 300 y 350 MW, y la unidad CC1 toma una configuración de TG1A+0.5TV1C.

La razón por la que se utilizan sólo estas unidades por cada una de las firmas, es por un tema de recurso computacional en el cálculo de las iteraciones, ya que con un mayor número de unidades que tienen que ser ofertadas para construir una curva de oferta, es necesario aplicar un menor número de alternativas posibles. Debido a esto se prefirió disminuir el número de unidades y aumentar el número de alternativas para ofertar, de este modo tener una mayor precisión en el precio de despeje de mercado, y un gasto computacional no excesivo.

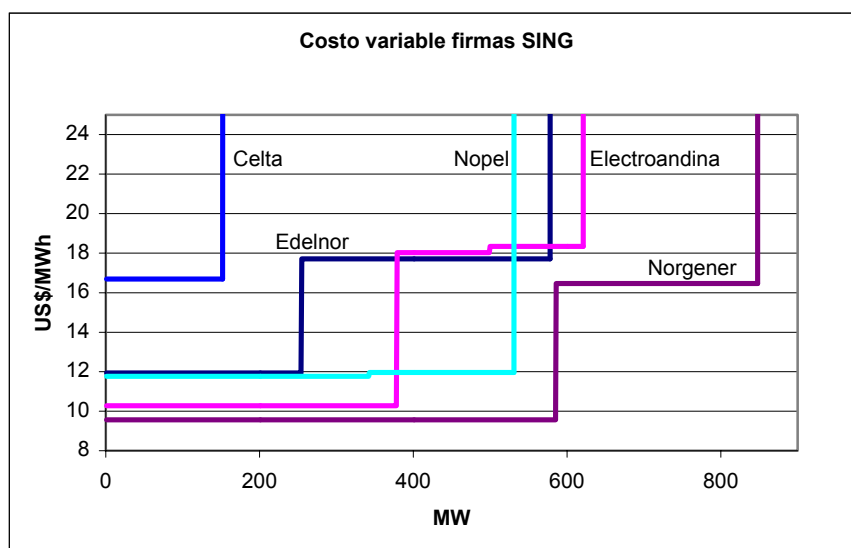


Figura 5.2: Costos variables del SING sin restricción en generación

¹² Ver Anexo A

Como resultado del ejercicio de Cournot antes realizado, la firma Celta se comporta como firma tomadora de precio, en el caso analizado sin presencia de restricciones en la generación. En este caso se vuelve a tomar dentro del juego estratégico, para reafirmar su condición de tomadora de precios según los resultados que entregue el modelo.

5.2.2 Demanda

En el ejercicio de Cournot hecho en la primera parte del trabajo, se consideró una curva de demanda con distintas elasticidades, de este modo se estableció la injerencia en los resultados que pueden tener los distintos niveles de elasticidad de demanda. En el estudio de ofertas de precios con indisponibilidad de unidades, se pretende conocer el nivel de desviación que desarrollan los precios de la energía con respecto al costo marginal real del sistema, en un mercado en donde es libre la oferta de precios por parte de los agentes generadores para cada una de sus unidades por sobre sus costos variables. Por esto, que la demanda en este caso se considera inelástica con el propósito de observar el precio de despeje frente a un nivel de demanda dado, en un sistema de bolsa de energía en el sistema por medio de completar una lista de mérito.

5.2.3 La oferta

Como ya se había adelantado, la oferta consistirá en precio principalmente por cada bloque de energía que pueda entregar cada unidad.

Aplicar la estrategia de indisponibilidad de unidades por parte de las firmas, equivale a realizar un esquema de ofertas de curvas de producción, que es altamente ocupado en otros modelos [Gree92] pero bajo un modelo de optimización lineal ante la presencia de curvas continuas de oferta. En este trabajo se usa el mismo concepto pero mediante un proceso iterativo debido a la discrecionalidad de la oferta producto del supuesto de ofertas en bloques enteros de generación correspondientes a cada una de las unidades disponibles.

Dado este esquema, ahora se introduce el riesgo de ser despachado o no, entonces es una alternativa que las firmas tienen que evaluar al momento de ejercer

la oferta de precio por cada una de sus unidades. Por esto, los resultados esperados podrían indicar un precio de despeje de mercado entre la banda del costo marginal del sistema, y los precios de Cournot antes encontrados, y esto simplemente por la presencia de un riesgo de no despacho. Por tanto, el poder de mercado de cada firma toma un papel relevante en el sentido de abarcar gran parte de la demanda del sistema producto de una ventaja en costos.

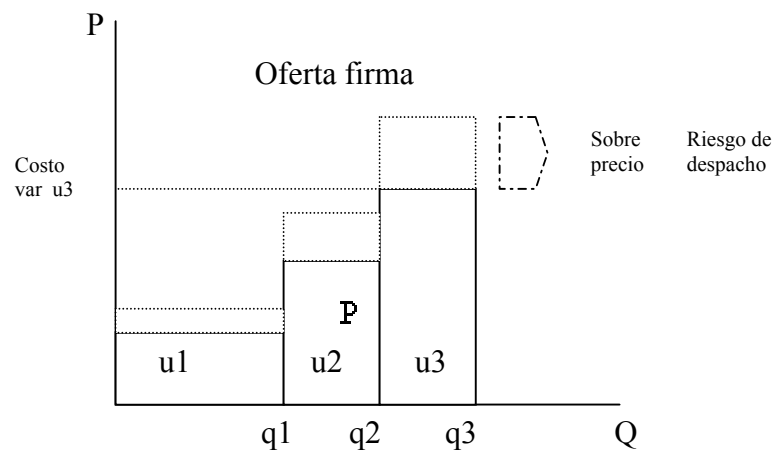


Figura 5.3: Proceso oferta firma

La figura 5.3 presenta un esquema en el cual la firma toma la decisión de oferta de precio para cada una de sus unidades, representada por la línea punteada sobre cada uno de los bloques de energía (q_1 , q_2 , q_3). Este ejemplo indica la presencia del riesgo de despacho que se genera en la oferta de precio para cada una de las unidades de una firma, sobre todo para aquellas unidades competitivas en precio en cada escenario, por ejemplo, para la unidad u_3 mostrada en la figura 5.3 la decisión final de oferta para esta unidad podría ser simplemente el costo marginal de ella o un precio superior dependiendo de las unidades más cercanas de las otras firmas en relación a los costos. Después de realizadas las ofertas por cada una de las firmas, un ente centralizador deberá realizar el despacho por lista de mérito, indicando un precio y cantidad a generar por cada firma, como se muestra en la figura 5.4.

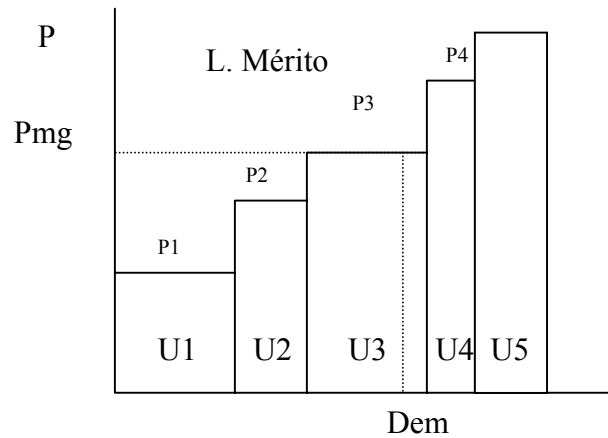


Figura 5.4: Lista de mérito del sistema

En este caso, el precio de despacho es P_{mg} y la demanda Dem , y las unidades despachadas son $U1$, $U2$ y $U3$, dadas las curvas de ofertas discretas entregadas por las firmas. En este sentido, aparece un punto relevante de discutir en relación a la forma de asignación de costos de cada una de las firmas a su generación. En rigor, los modelos que utilizan como estrategias de juego curvas de ofertas, usan funciones continuas de precio dependiendo de la cantidad ofertada, y de esta forma establecen un problema de optimización que hay que resolver para encontrar el despacho óptimo. Entonces esto quiere decir, que cada unidad debe ser atomizada y asignar distintos costos variables dependiendo del nivel de generación. Por lo tanto, se podría realizar una mayor aproximación al modelo planteado en este capítulo, con el hecho de segmentar la generación de cada una de las unidades, pero generando con esto un efecto contrario al buscado con la eliminación del cálculo de centrales más caras, y aumentando exponencialmente los tiempos de ejecución del algoritmo.

5.3 Resultados de la simulación de oferta en Bolsa

El modelo se corrió sobre un perfil de demanda del sistema que abarcó escenarios desde una demanda de 400 MW hasta 1800 MW, incluyendo de esta manera la demanda de punta y no-punta del SING dentro de este rango.

El costo marginal del sistema dadas las simplificaciones de reducción de unidades del SING queda determinado por la siguiente curva.

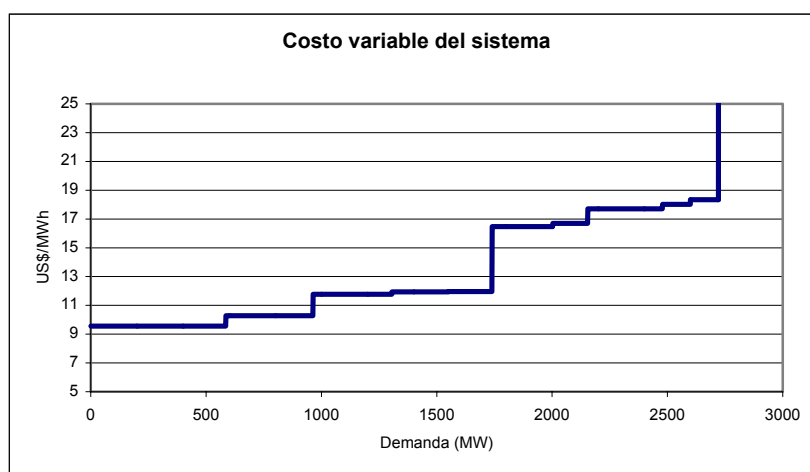


Figura 5.5: Costos variables del sistema reducido sin restricción en generación

Prácticamente es la misma curva que la original, observando un amplio rango en la demanda donde el costo del sistema es bastante bajo, producto de las centrales de ciclo combinado. Esta situación se puede observar en la realidad, en los precios promedio a los que se ha llegado el año 2001 que han sido alrededor de 15US\$/h o menos.

5.3.1 Precio de despeje de mercado

El modelo de bolsa implementado entregó resultados en la misma línea que los entregados por el modelo de Cournot, en cuanto a reflejar un ejercicio de poder de mercado en niveles bajos de demanda, como así lo demuestra la figura 5.6.

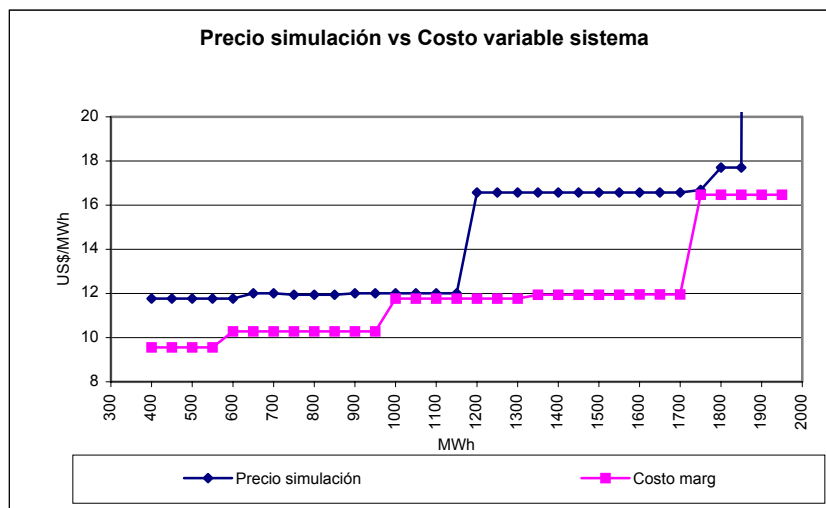


Figura 5.6: Precio de despeje de mercado versus costo variable del sistema

Tabla 5.2: Costos y precios de despeje de mercado

Demanda (MWh)	Precio simulación (US\$/MWh)	Precio Cournot (US\$/MWh)	Costo variable (US\$/MWh)
400	11,77	16,66	9,56
500	11,77	16,65	9,56
600	11,77	16,64	10,28
700	12,01	16,67	10,28
800	11,94	16,66	10,28
900	12,01	16,66	10,28
1000	12,01	16,65	11,77
1100	12,01	16,65	11,77
1200	16,57	16,66	11,77
1300	16,57	16,69	11,77
1400	16,57	16,8	11,94
1500	16,57	16,98	11,94
1600	16,57	17,19	11,96
1700	16,57	17,32	11,96
1800	17,7	17,53	16,47

Si se analiza el gráfico y los datos anteriores, se observa que el precio de despeje de mercado que arrojó el modelo de oferta de precio y cantidad en bolsa, se situó siempre dentro de una banda formada por el costo variable del sistema, y el

precio de equilibrio de Cournot¹³. Este resultado era esperado, porque al introducir dentro de la modelación el riesgo de no ser despachado, las firmas hacen una oferta más conservadora para aminorar este riesgo, teniendo como información pública los costos variables de generación de todas las unidades del sistema. La aplicación de este último punto, no difiere mucho de la realidad, ya que dado el conocimiento que tienen los agentes del mercado, la información es fácil de obtener o calcular con gran exactitud.

También entre los 1200 y 1700 MW de demanda, se ejerce una importante alza en los precios, producto de la entrada de unidades generadoras de Norgener más caras para completar la demanda y restringiendo otras más baratas, y además, ejerciendo un mayor precio que el costo variable de esta última. Este efecto se puede visualizar mejor, analizando las figuras 5.7 y 5.8.

El sistema alrededor de los 1900 MW de demanda, tiende a elevar considerablemente los precios, a pesar que aún los costos variables del sistema a esa altura no son demasiado altos. Esto indica una constante aplicación de poder de mercado mediante la restricción estratégica de unidades de mediano a bajo costo.

Hay que destacar que en el proceso de análisis de datos que entregaba el modelo en etapas iniciales de prueba, se fue ajustando los valores de los factores que las firmas aplican para ejercer sus ofertas, evitando el uso de los valores extremos del conjunto, que originaría una sobre o sub-valoración de los resultados. Para corroborar este punto, fácilmente se puede hacer el ejercicio de dividir el valor del precio que resulta de la simulación por el costo variable del sistema en cada caso que aparece en la tabla 5.2, y no se encontrará un resultado de la operación que de por sobre 1.5, que es el factor superior en el conjunto de posibles de ofertas.

¹³ El precio de equilibrio de Cournot, fue el encontrado para un escenario sin restricción en generación, y con una elasticidad de demanda de 0.7.

5.3.2 Resultado de márgenes y generaciones

El análisis de la evolución de los márgenes de operación y generaciones que resultan de la simulación, permite entregar una mejor idea del comportamiento individual en el mercado, e identificar ejercicios de poder de mercado.

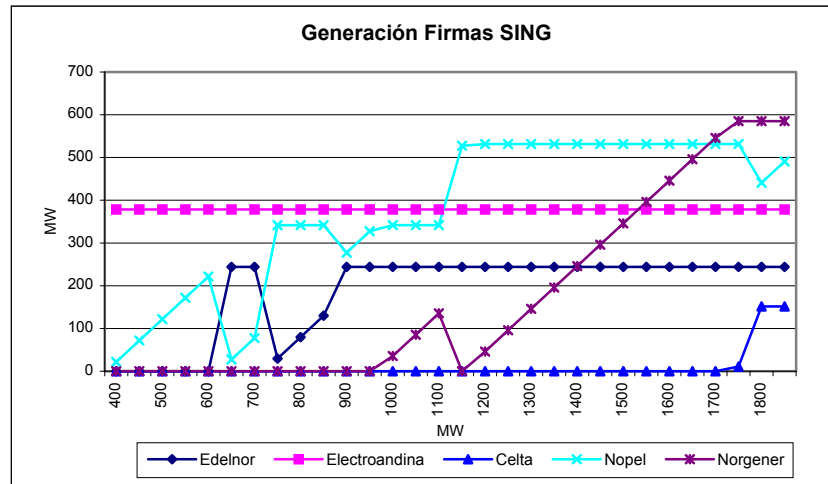


Figura 5.7: Generación por firma en modelo de simulación de bolsa

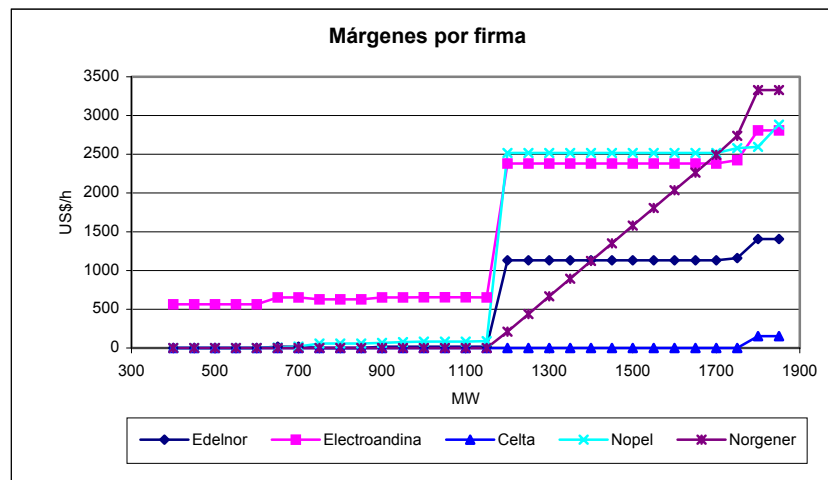


Figura 5.8: Margen por firma en modelo de simulación de bolsa

Como se había visto en la figura 5.6, se ejerce una oferta superior al costo variable del sistema para niveles de demanda bajos y medios, justificando también los resultados del modelo de Cournot, el cual indicaba ejercicio de poder de mercado a causa de la presencia de centrales de ciclo combinado que aportan grandes volúmenes de energía. En este caso, la firma Electroandina por medio de su central de ciclo combinado ejerce una generación base pero no siendo marginal, por lo tanto, logra generar márgenes sobre cero.

Cabe destacar un aspecto o supuesto de la simulación en este caso, y es que en la situación en que las únicas dos mejores alternativas para una unidad es generar a costo marginal o no generar, que en ambos casos se obtiene margen cero, la decisión es no generar de acuerdo con la lógica de evitar costos que están fuera del alcance de la simulación.

En la figura 5.6 aparecen varios quiebres, indicando el apagado y encendido de unidades debido a las estrategias que se van modificando a través del monto de la demanda del sistema, a partir de esto surgirían nuevos costos a considerar como los de encendido y apagado de unidades, que podrían modificar la estrategia de la firma. Si bien es cierto que se tendrían que modificar los costos asociados a la operación, este estudio pretende analizar en forma estática distintos escenarios de demanda, no siendo así un perfil de demanda del sistema que se debe programar.

Sería bueno comparar la evolución del nivel total de margen que se obtiene con la aplicación de este modelo de oferta de bolsa, con el modelo de Cournot antes aplicado.

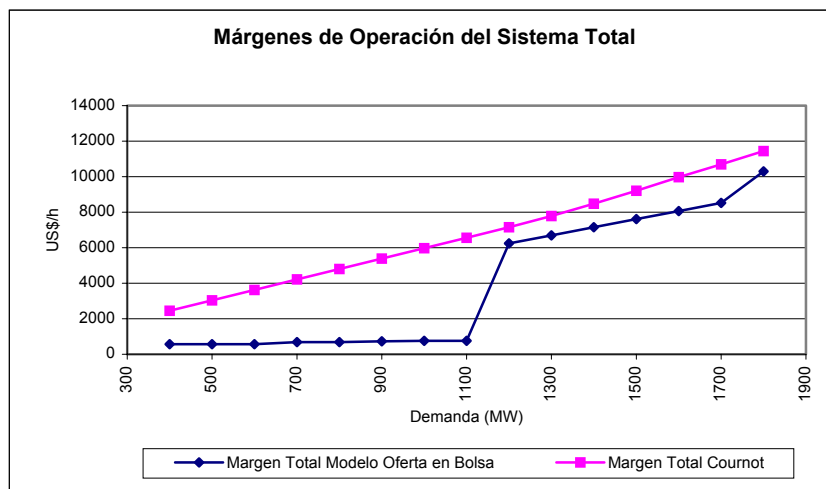


Figura 5.9: Comparación de márgenes entre el modelo de Cournot y el modelo de oferta

La figura 5.9 indica claramente el hecho de que ahora existe el riesgo de no ser despachado, por lo menos dentro del rango entre 400 y 1000 MW de demanda, que es justo aquí en donde este riesgo es mayor producto de la alta competencia de generación de bajo costo. También por otro lado, está el factor que implica usar distintas metodologías de cálculo de precio, en donde en el modelo de Cournot este se generaba indirectamente por medio de la curva de demanda supuesta.

5.3.3 Medición de Poder de mercado

Al observar los resultados de generación y márgenes del sistema, la aplicación de poder de mercado en concordante con las características del mercado y con los resultados anticipados en este sentido por el modelo de Cournot. La clave para las firmas en este sentido es poseer unidades de bajo costos pero de tamaños más reducidos para ejercer en forma más controlada una presión constante para elevar los precios del sistema. Y para dimensionar de que forma se aplica el poder de mercado bajo este modelo de ofertas, se construye el índice Lerner y el índice HHI del sistema.

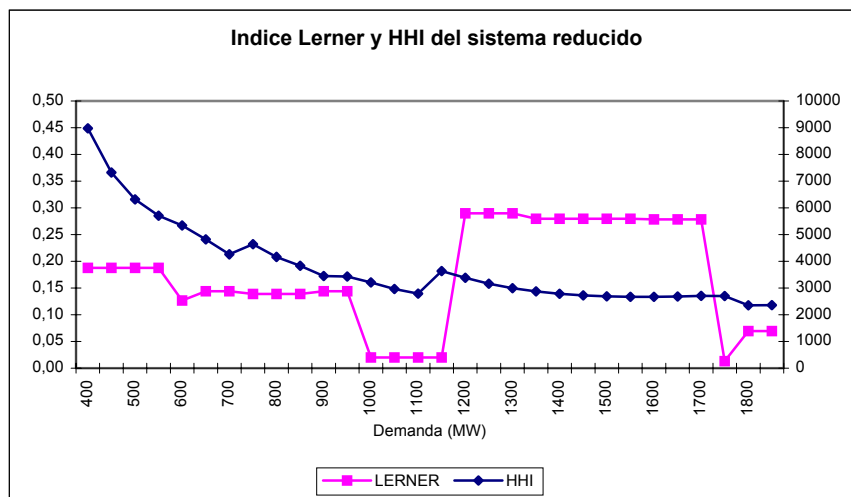


Figura 5.10: Índice Lerner y HHI del sistema reducido

Ambos índices evidencian la existencia de poder de mercado en la operación de las ofertas en bolsa en niveles bajos y medios de demanda. En este sentido el índice HHI muestra una alta concentración de mercado en este rango de operación, producto principalmente de la opción de la mayoría de las firmas de no generar ante la alta posibilidad de ser marginal y no generar margen, ante la carencia de unidades de menor tamaño que puedan ser ofrecidas a menores costos que el precio del sistema. Según el autor, esta es la mayor deficiencia del modelo, ya que impide segmentar la generación de las unidades para suavizar la curva de oferta que se entrega. Con la posibilidad de hacer esto, se podría entregar mayor competencia al mercado y a su vez menor concentración con menores precios de la electricidad. El índice Lerner por su parte solo refleja la desviación que presenta el precio del costo variable del sistema, pero mezclando ambos índices, también se puede concluir que para demandas sobre 1200 MW, el ejercicio de poder de mercado es producto de una menor oferta disponible con mayores costos. De esta forma se puede concluir, que si bien existe una alta sobrecapacidad en el sistema, las firmas son capaces de actuar de tal forma que logran extraer elevados márgenes a partir de la operación en el sistema, producto de una alta concentración de unidades de gran tamaño que en forma práctica es más eficiente tratar de generar grandes volúmenes de energía con

unidades baratas y de altos rendimientos, pero por otro lado implicando una mayor concentración de mercado.

En la aplicación de un esquema de Bolsa de energía real, existirán otros factores o restricciones del sistema que provoquen una mayor o menor aplicación de poder de mercado y que escapen al análisis aquí realizado, pero lo que el modelo intenta transmitir, es una idea de cómo o en qué medida cada una de las firmas tiene la capacidad para ejercer un poder de mercado. Ahora, en el SING se están haciendo restricciones de generación máxima por cada una de las centrales, con el objetivo de tener una mayor seguridad del sistema ante fallas repentinas. Es por esto, y que igual que en el análisis de Cournot, acá de nuevo se hace el mismo estudio de restricción máxima de 180 MW por unidad.

5.3.4 Aplicación de la restricción de generación al modelo de oferta en Bolsa

En este caso, los costos variables de las firmas se modifican a causa de la restricción de generación máxima de 180 MW para las unidades del sistema, por lo tanto, de base habrá una menor sobrecapacidad efectiva lo que puede producir por un lado un mayor precio a causa de la entrada de unidades más caras, pero a su vez una menor concentración de mercado. En la figura 5.11 se observa el resultado de las simulaciones, y se indica una mayor desviación en los precios frente a demandas bajas, pero también un mayor ajuste en niveles de demanda por sobre los 900 MW hasta los 1400 MW, y de aquí adelante el modelo indica una subida abrupta de los precios, pero a causa del sistema reducido que se utiliza, y al manejo estratégico de los agentes, que optan por determinar costo de falla. Estos efectos pueden ser mejor entendidos al observar la evolución de los márgenes y generación por firma en la figura 5.12 y 5.13.

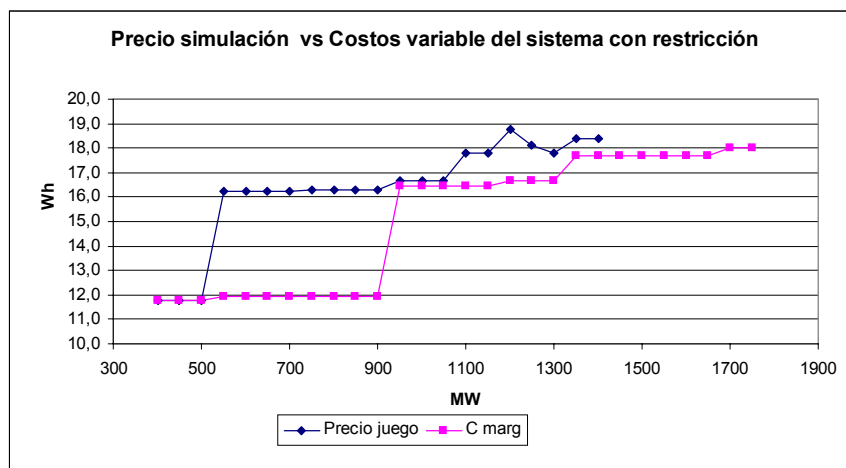


Figura 5.11: Precio de despeje de mercado versus costo variable del sistema con restricción en generación.

Como también lo demuestran los resultados de Cournot en forma cualitativa, donde el ajuste que se produce para demandas altas, es consecuencia principalmente de un costo variable mayor del sistema que de un impacto a la baja del precio de despeje del mercado de bolsa, el cual sufre también un alza pero menor.

Tabla 5.3: Costos y Precios de despeje del sistema

Demanda (MW)	Precio simulación s/r (US\$/MWh)	Precio simulación c/r (US\$/MWh)	C marg c/r (US\$/MWh)	C marg s/r (US\$/MWh)
400	11,77	11,77	11,77	9,56
500	11,77	11,77	11,77	9,56
600	11,77	16,24	11,94	10,28
700	12,01	16,24	11,94	10,28
800	11,94	16,27	11,96	10,28
900	12,01	16,27	11,96	10,28
1000	12,01	16,69	16,47	11,77
1100	12,01	17,79	16,47	11,77
1200	16,57	18,77	16,69	11,77
1300	16,57	17,79	16,69	11,77
1400	16,57	18,38	17,71	11,94
1500	16,57	-	17,71	11,94
1600	16,57	-	17,71	11,96
1700	16,57	-	18,02	11,96

Con la restricción de 180 MW en la generación máxima por unidad, se generan distorsiones en relación al comportamiento económico del sistema, disminuyendo su eficiencia y dando una ventaja temporal a aquellas firmas que en un esquema en Bolsa de libre oferta no son competitivas, como es el caso de Celta, la cual ahora si logra tener una mejor posición en la generación del sistema, obteniendo mejores márgenes.

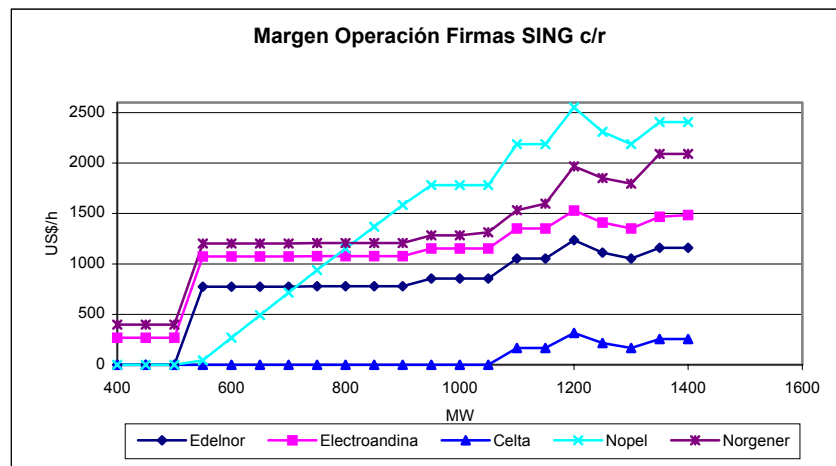


Figura 5.12: Margen de operación firmas en el SING con restricción en generación

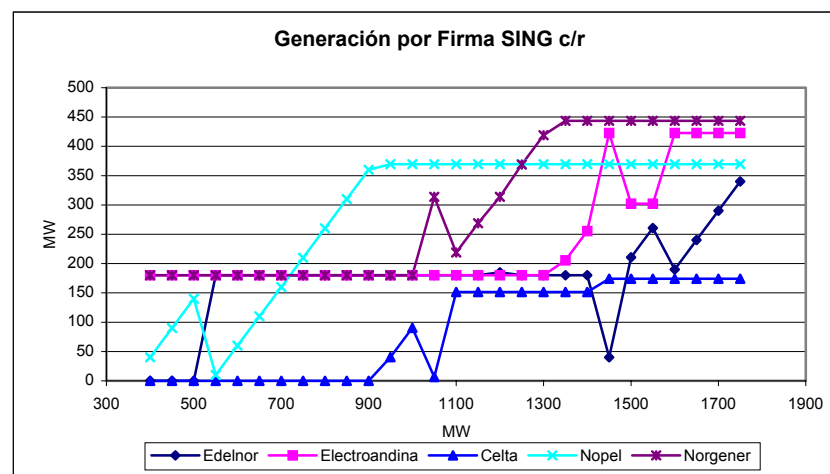


Figura 5.13: Generación de firmas en el SING con restricción en generación

Viendo los gráficos anteriores, sin duda esta restricción genera una mayor participación en el número de agentes para niveles bajos y medios de demanda. Consecuencia de esto, aparece una menor concentración pero un mayor ejercicio de poder de mercado para subir los precios, ya que el riesgo de no despacho se aminora producto de una menor oferta disponible, y las firmas disminuyen su factor de indisponibilidad pero ejercen ofertas en la mayoría de los casos superiores a su costo variable por unidad. Comparando los márgenes en el cálculo sin y con restricción, vemos que ahora, Nopel toma una mayor ventaja relativa frente a los demás agentes, situación que antes era para la firma Electroandina. De esta forma, se reafirma los resultados de Cournot en este sentido, pero este tipo de análisis no pretende otorgarle demasiada importancia a ventajas en particular que puedan tomar los distintos agentes del mercado. También cabe destacar que la firma Celta en este caso ya no podría ser considerada como una firma tomadora de precio ya que ejerce ciertas ofertas a tender a captar mayor margen al no entrar al sistema como marginal.

La mayoría de las veces cuando se implementan este tipo de restricciones al sistema, se cae en situaciones sub-óptimas que en total generan una pérdida social del sistema completo, demostrando esta situación en la figura 5.14 que entrega una comparación del nivel de margen operacional que se extrae del sistema con y sin presencia de la restricción de los 180 MW.

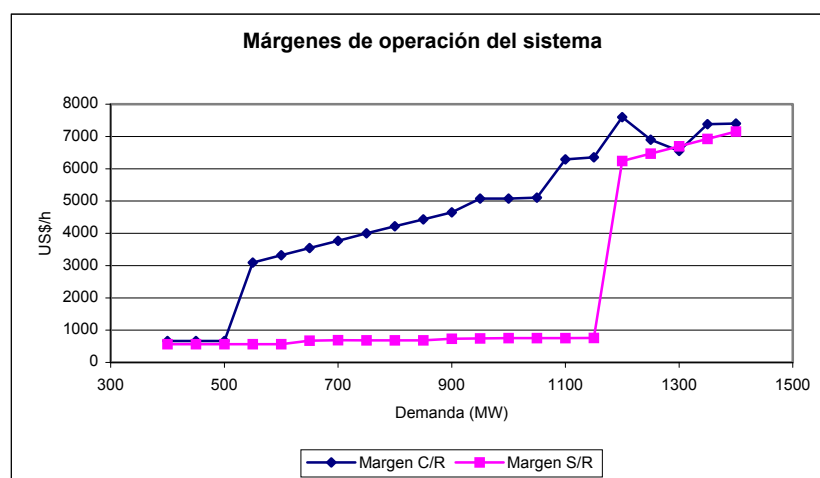


Figura 5.14: Comparación márgenes del sistema con y sin restricción en la generación

Claramente se genera una mayor pérdida social en este caso, por un mayor ejercicio de poder de mercado de los agentes, y también producto de la menor eficiencia operativa de las máquinas generadoras, en especial las de ciclo combinado, ante una restricción en su generación máxima que pueden entregar al sistema.

Y a modo de reafirmar todo lo antes dicho, se muestra la evolución del índice Lerner y HHI del sistema en estas condiciones.

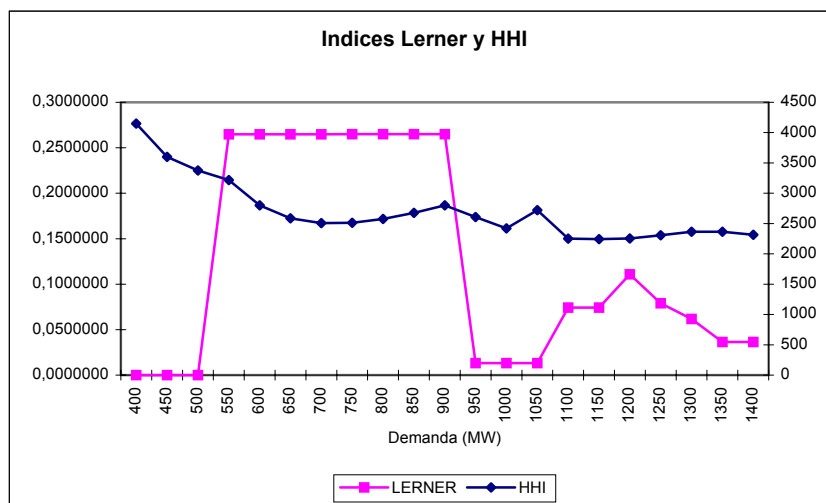


Figura 5.15: Índices Lerner y HHI del sistema con restricción en generación

Estos índices viene a corroborar los resultados antes obtenidos, en cuanto a demostrar dos efectos que genera una restricción en la generación, que son una menor concentración de mercado, quitando con esto la posibilidad de ejercicio de poder de mercado en forma individual, pero el resultado como conjunto si demuestra una posición de mercado proactiva a elevar los precios de la electricidad.

5.4 **Discusión del modelo**

El modelo aquí planteado, tiene como principal objetivo acercarse más en profundidad al real comportamiento que tendrían en forma estática las principales firmas generadoras que operan en el SING ante un escenario de Bolsa de energía para la transacción total de las compras y energías del sistema. Se tiene claro, que en la realidad este tipo de esquemas trabajan con una importante proporción de ventas de energía bajo contratos bilaterales, pero este ejercicio acotaría superiormente la volatilidad en los precios que podrían existir en Bolsa.

A opinión del autor, la mayor debilidad de este modelo se encuentra en la alta discrecionalidad que presentan las curvas de oferta de las firmas, con el impedimento de segmentar en forma más continua la generación de las unidades por motivos de tiempos computacionales que crecen en forma exponencial a medida que aumentan las alternativas de oferta para cada firma. Pero a su vez, el hecho de tratar al SING tomando en cuenta ofertas discretas por unidad, otorga un aporte al estudio de este sistema, porque al aplicar aproximaciones lineales a lo que son las curvas de oferta, para tener una mayor precisión de los resultados, dada las condiciones topológicas de este sistema, se estaría incurriendo en importantes errores.

La construcción de este modelo fue hecha en forma simple, en el sentido de ingresar la menor cantidad de suposiciones particulares en la toma de decisiones de las estrategias de oferta. Pero si se pasó por una etapa de sensibilización de los resultados o parámetros, con el objetivo de no saturar ninguna de las reglas de decisión del algoritmo que pudiera causar soluciones sub-óptimas al problema. Es así como se hizo la calibración de los factores de oferta, ya que una buena elección de ellos provoca una mayor precisión en los resultados y menores tiempos computacionales.

Un hecho importante de destacar en relación a una de las debilidades o simplificaciones del modelo, es el hecho que al hacer ofertas de precio para unidades completas, se origina una distorsión en la solución final de despeje de mercado. Esto es reflejado principalmente en el caso de estudio sin restricciones en generación, donde se observa que el precio de Bolsa se asemeja bastante al costo marginal justo en un rango de demanda que representa la operación actual del sistema. Esto es

resultado del tipo de modelación de ofertas utilizadas y debe interpretarse en ese contexto.

5.5 Conclusiones

El modelo de indisponibilidad aquí desarrollado, logra entregar una mejor aproximación al comportamiento de las firmas ante un esquema de Bolsa de energía con la posibilidad de entregar ofertas de precio y cantidad.

En los resultados de precio de despeje, se aprecia una clara aplicación de poder de mercado en niveles bajos y medios de demanda, hecho relevante sobre todo para niveles bajos, ya que en el modelo anterior de Cournot estos resultados perdían validez a causa del tema de calibración de la curva de demanda por medio del precio de referencia.

Los resultados entregados por el modelo, se ajustan en gran medida a los resultados del ejercicio de Cournot en cuanto al comportamiento del mercado y de las firmas en forma individual. Y en este sentido, los resultados siguieron la lógica esperada en cuanto a que los resultados de Cournot deberían ser una cota superior a los resultados del modelo de ofertas posteriormente planteado, en el cual se introduce la estrategia de indisponibilidad de unidades, y donde también se refleja el riesgo de no despacho, por lo tanto, el poder de mercado que podría generarse tendría que ser menor que en el modelo de Cournot.

En relación a la aplicación de restricciones de generación a las unidades presentes en el sistema, se observa claramente en los resultados que aparece un mayor precio en niveles medios y bajos de demanda producto de la menor capacidad de generación de los ciclos combinados, generando una anticipación de las estrategias de oferta de mayores precios o restricciones de disponibilidad de unidades para que entren unidades más caras al sistema.

VI CONCLUSIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Los objetivos planteados en el inicio de esta investigación han sido cumplidos en el sentido de haber aplicado distintos modelos de estrategias de juegos dentro de un sistema en donde los participantes pertenecen a un sistema real -SING-, y apoyando los estudios hechos sobre la base de la aplicación de esquemas de Bolsa de energía en el SING. Y más en concreto, se logró implementar primero un modelo de oligopolio de Cournot, el cual está altamente difundido en la literatura y siempre es la primera aproximación al estudio de sistemas eléctricos con libertad en las ofertas por parte de los agentes, para identificar poderes de mercado y desviaciones del precio final frente a los costos reales del sistema. Este desarrollo permitió identificar particularidades interesantes en la aplicación de poderes de mercado en el SING bajo un esquema de Bolsa, dando como resultado aplicación de poder de mercado tanto en niveles bajos de demanda como en niveles altos. Con el análisis se encontró que este fenómeno ocurre por fuertes posiciones de ciclos combinados en la mayoría de las firmas pero con un margen importante de desviación entre sus costos reales de operación, que permite ejercer estrategias tendientes a elevar el precio.

Dentro de las conclusiones generales importante que se obtienen, es que ante una operación normal del sistema, o sea, sin restricciones en la generación, la central Celta puede ser considerada como una firma tomadora de precio en el mercado del SING, con la posibilidad de salir de esta situación por medio de la construcción de un ciclo combinado para ir a competir en precios. Esta decisión no pareciera ser muy acertada por cuanto ya existe una alta sobrecapacidad en el sistema, sin esperanzas concretas de aumentar la demanda en forma importante en el mediano plazo, a no ser que se produzca una interconexión con otros sistema eléctricos, y como resultado la sobreoferta de capacidad y energía y posiciones dominantes de algunos ciclos combinados.

El segundo modelo que se construyó para representar ofertas en bolsa en el SING, es el punto de mayor relevancia y aporte de este trabajo, por cuanto es un modelo de ofertas de precio para cada una de las unidades de las firmas que participan, insertando la estrategia de indisponibilidad de unidades. En este sentido, las firmas tienen que jugar con las alternativas posibles, para que mediante un juego

de equilibrio de Nash se llegue a un punto de solución. La principal conclusión que se obtiene de este modelo, es que los resultados se establecen por debajo de los de Cournot por un efecto de internalizar el riesgo de no despacho de centrales. También se observa que persiste el ejercicio de poder de mercado en niveles medios y bajos de demanda producto de la presencia de grandes bloques de generación que representan los ciclos combinados.

En general existe una amplia coherencia entre los resultados del modelo de Cournot con el modelo de ofertas de precios con indisponibilidad de unidades, hecho que avala ambos modelos al ser construidos en forma independiente.

Este trabajo pretende ser un estudio inicial en el tema de la aplicación de una mayor desregulación del sector eléctrico en Chile y principalmente en el SING. Sobre la base de este estudio pueden surgir un sin número de análisis, que dentro de los cuales, a opinión del autor, se encontrarían la modelación del sistema de Bolsa insertando paralelamente contratos bilaterales. Este tipo de ejercicios es necesario abordarlo con herramientas de programación dinámica, ya que si se parte de posibles escenarios de niveles de contratos y Bolsa, se estaría predeterminando la solución final.

En resumen, la aplicación de ofertas de energía en Bolsa en el SING posiblemente generaría un precio mayor al costo variable del sistema, producto de la aplicación de poder de mercado por parte de las firmas, y a la estructura del parque generador que presenta el SING.

BIBLIOGRAFÍA

- [Bore97] Severin Borenstein, James Bushnell, and Christopher Knittel. "A Cournot-Nash Equilibrium, Analysis of the New Jersey Electricity Market". University of California Energy Institute, November 1997.
- [Bore98] Severin Borenstein and James Bushnell. "An Empirical Analysis of the Potential for Market Power in California's Electricity Industry." PWP-044r University of California Energy Institute, December 1998
- [Bore99] Severin Borenstein, James Bushnell, and Christopher R. Knittel. "Market Power in Electricity Markets: Beyond Concentration Measures." University of California Energy Institute, February 1999.
- [Bore00] Severin Borenstein, James Bushnell, and Frank Wolak. "Diagnosing Market Power in California's Deregulated Wholesale Electricity Market." PWP-064 University of California Energy Institute, August 2000.
- [CNE00] Fijación de Precios de Nudo CNE Octubre 2000 Sistema Interconectado del Norte Grande. Informe técnico definitivo. Octubre de 2000, Santiago-Chile.
- [Gibb92] R. Gibbons. "Game Theory for Applied Economist." Princeton University Press, April 1992.
- [Gree92] Richard J. Green and David M. Newbery. "Competition in the British Electricity Spot Market." University of Cambridge. Journal of Political Economy, 1992, vol. 100, no. 5.
- [Hans98] Duane Hanselman and Bruce Littlefield. "Mastering Matlab 5, a comprehensive Tutorial and Reference." Matlab Curriculum Series 1998. Prentice Hall.

- [IEEE99] IEEE Power Engineering Society. "Game Theory Applications in Electric Power Market." IEEE Tutorial, 99TP-136,1999. Winter Meeting New York 1999.
- [Kahn99] Edward P. Kahn. "Numerical Techniques for Analyzing Market Power in Electricity." The Electricity Journal, July 1999.
- [Mont01] Juan Pablo Montero y Hugh Rudnick. "Precios Eléctricos Flexibles". Cuaderno de Economía, año 38, nº 113, pp. 91-109 (Abril 2001).
- [Nils93] Nils-Henrik, Morch von der Fehr and David Harbord. "Spot Market Competition in the UK Electricity Industry." The Economic Journal 103 (May) 1993, 531-546, Royal Economic Society 1993. Published by Blackwell Publishers.
- [Oter98] I. Otero-Navas C. Meseguer C. Batlle. "A Simulation Model for a Competitive Generation Market." Instituto de Investigación Tecnológica Universidad Pontificia Comillas. IEEE Transactions on Power Systems PE-380-PWRS-1-09-1998.
- [Sing98] Marcos Singer. "Apuntes de Decisiones Tácticas y Teoría de Juegos." Escuela de Administración Pontificia Universidad Católica de Chile. Diciembre 1998.
- [Sin00] Harry Singh. "Introduction to Game Theory and Its Application in Electric Power Market." IEEE Computer Applications in Power, 2000.
- [Stof00] Steven Stoft. "Power Economics". Chapter 11 Market Power Version 0.30, July 28 2000.
- [Wola00] Frank A. Wolak."An Empirical Analysis of the impact of hedge Contracts on Bidding Behavior in a Competitive Electricity Market." Department of Economics, Stanford University. Stanford. January 2000.

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERÍSTICAS DE UNIDADES GENERADORAS DEL SING

FIRMA	TIPO	POT. NETA MW	TASA INDISP	POTENCIA EF. MW	COSTO COMB. 2001 mills/KWh	COSTO VAR. NO COMB. Mills/KWh	COSTO VAR. TOTAL mills/KWh
EDELNOR	H	10	2.5%	9.75	0	0	0
	CC-CTM3	250	2.3%	244.25	10.94	1	11.94
	CTM2	175	5.0%	166.25	16.91	0.8	17.71
	CTM1	166	5.0%	157.70	16.91	0.8	17.71
	MF6	5.9	7.8%	5.44	33.63	4.7	38.33
	MF6	28	7.0%	26.04	38.59	8.4	46.99
	MF6	5.6	7.1%	5.20	38.63	7.9	46.53
	MF6	12.4	2.9%	12.04	40.22	9.3	49.52
	MD	2.8	2.1%	2.74	64.51	9.9	74.41
	MD	8.4	4.2%	8.05	64.84	9.2	74.04
	MD	2.9	2.8%	2.82	65.94	9.2	75.14
	MD	16.8	7.3%	15.57	66.65	10.4	77.05
	MD	4.1	3.0%	3.98	67.13	9.9	77.03
	MD	2.8	10.8%	2.50	67.6	9.2	76.8
TG	23.6	4.0%	22.66	91.29	1.7	92.99	
ELECTROANDINA	U16	390	3.0%	378.30	10.03	0.25	10.28
	U14	128.3	6.0%	120.60	17.07	0.95	18.02
	U15	130	6.0%	122.20	17.39	0.95	18.34
	TG3	37.2	3.0%	36.08	18.03	0.9	18.93
	U12	85.3	6.0%	80.18	19.28	1.09	20.37
	U13	85.5	6.0%	80.37	19.3	1.09	20.39
	U9	45	7.0%	41.85	35.92	0.8	36.72
	U11	37.5	6.0%	35.25	41.23	1.19	42.42
	U10	37.5	6.0%	35.25	41.23	1.19	42.42
	TG1	21	2.0%	20.58	88.31	1	89.31
TG2	21	2.0%	20.58	88.31	1	89.31	
CELTA	CTTA	158	4.1%	151.52	15.89	0.8	16.69
	TGTAR	23.8	5.0%	22.61	78.98	1	79.98
NOPEL	CC2	350	2.3%	341.95	10.62	1.15	11.77
	CC1	194	2.3%	189.54	10.81	1.15	11.96
NORGENER	CC	600	2.5%	585.00	10.77	1.24	9.56
	NTO2	141	5.0%	133.95	18.74	0.8	16.47
	NTO1	136.3	5.0%	129.49	18.92	0.8	16.47

Nota: Los valores de costos variables son los declarados por cada una de las empresas a la dirección de operación del SING en pesos el día 13 de Septiembre de 2001, y llevados a dólares a través del tipo de cambio vigente a la fecha de \$685,87.

ANEXO B: PRECIOS DE COURNOT Y COMPETENCIA PERFECTA CON Y SIN RESTRICCIÓN DE GENERACIÓN DE 180 MW

SIN RESTRICCIÓN DE GENERACION										
Elasticidad de demanda										
Demanda base (MW)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
100	40,92	26,19	21,83	19,64	18,33	17,46	16,6	15,96	15,64	15,22
200	40,11	26,6	21,83	19,64	18,17	17,32	16,6	16,06	15,64	15,22
300	39,83	26,46	21,83	19,64	18,23	17,37	16,6	16,1	15,58	15,22
400	40,11	26,4	21,83	19,64	18,17	17,32	16,66	16,06	15,6	15,27
500	39,94	26,36	21,83	19,56	18,2	17,3	16,65	16,08	15,61	15,26
600	40,11	26,46	21,92	19,58	18,23	17,32	16,64	16,06	15,61	15,25
700	39,99	26,43	21,83	19,59	18,24	17,31	16,67	16,08	15,62	15,25
800	40,11	26,4	21,89	19,59	18,21	17,32	16,66	16,06	15,62	15,27
900	40,02	26,46	21,89	19,6	18,23	17,31	16,66	16,07	15,62	15,26
1000	39,94	26,36	21,88	19,6	18,2	17,32	16,65	16,08	15,62	15,26
1100	40,33	26,42	21,88	19,57	18,22	17,31	16,65	16,07	15,63	15,25
1200	40,65	26,4	21,87	19,61	18,23	17,32	16,66	16,08	15,61	15,25
1300	40,93	26,44	21,87	19,58	18,23	17,31	16,69	16,1	15,68	15,36
1400	41,16	26,6	21,87	19,64	18,29	17,4	16,8	16,31	15,89	15,55
1500	41,91	26,96	22,01	19,73	18,38	17,55	16,98	16,55	16,14	15,78
1600	42,56	27,27	22,2	19,82	18,56	17,77	17,19	16,74	16,34	16,11
1700	42,95	27,59	22,37	20,05	18,8	17,93	17,32	16,95	16,72	16,49
1800	43,2	28,06	22,92	20,35	18,95	18,07	17,53	17,22	16,97	16,78
1900	43,42	28,65	23,32	20,66	19,11	18,28	17,81	17,46	17,26	17,19
2000	44,04	28,93	23,71	20,93	19,33	18,57	18,05	17,82	17,68	17,57
2100	44,51	29,19	24,04	21,3	19,88	18,98	18,61	18,33	18,11	17,94
2200	45,02	29,43	24,33	21,97	20,85	20,1	19,57	19,17	18,86	18,61
2300	45,34	29,64	24,82	22,86	21,71	20,93	20,37	19,94	19,54	19,22
2400	45,43	29,98	25,62	23,48	22,19	21,33	20,72	20,26	19,9	19,62
2500	45,51	30,81	26,34	24,03	22,64	21,71	21,04	20,54	20,15	19,84

CON RESTRICCIÓN DE GENERACION DE 180 MW										
Elasticidad de demanda										
Demanda base (MW)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
100	40,92	26,19	21,83	19,64	18,33	17,46	16,6	15,96	15,64	15,22
200	40,11	26,6	21,83	19,64	18,17	17,32	16,6	16,06	15,64	15,22
300	39,83	26,46	21,83	19,64	18,23	17,37	16,6	16,1	15,58	15,22
400	40,11	26,4	21,83	19,64	18,17	17,32	16,66	16,06	15,6	15,27
500	39,94	26,36	21,83	19,56	18,2	17,3	16,65	16,08	15,61	15,26
600	40,11	26,46	21,92	19,58	18,23	17,32	16,68	16,17	15,79	15,55
700	39,99	26,43	21,83	19,59	18,29	17,5	17,04	16,66	16,29	16,02
800	40,11	26,4	21,89	19,85	18,7	17,97	17,45	17,14	16,92	16,72
900	40,02	26,56	22,37	20,42	19,24	18,55	18,06	17,67	17,36	17,13
1000	40,43	27,34	23,19	21,16	19,94	19,1	18,52	18,09	17,73	17,47
1100	43,75	29,02	24,11	21,84	20,48	19,57	18,92	18,42	18,04	17,87
1200	44,74	30,35	25,24	22,65	20,98	19,94	19,27	18,93	18,66	18,44
1300	45,08	30,6	25,73	23,11	21,58	20,71	20,11	19,64	19,29	19
1400	45,37	30,69	25,84	23,56	22,29	21,4	20,68	20,14	19,73	19,4
1500	45,51	30,83	26,05	23,82	22,48	21,59	20,95	20,48	20,08	19,75
1600	45,73	30,95	26,33	24,04	22,65	21,74	21,08	20,59	20,21	19,9
1700	45,93	31,34	26,61	24,24	22,82	21,87	21,2	20,69	20,3	19,98
1800	46,29	31,69	26,83	24,42	22,95	21,99	21,29	20,78	20,37	20,05
1900	46,96	32,09	27,11	24,6	23,07	22,09	21,39	20,86	20,44	20,11
2000	47,47	32,37	27,31	24,78	23,28	22,21	21,47	20,92	20,51	20,19