

# TARIFICACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA: APROXIMACIÓN MEDIANTE JUEGOS COOPERATIVOS

Juan Zolezzi y Hugh Rudnick  
Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile Email h.rudnick@ieee.org

## Resumen

El problema de la asignación de costos de transmisión entre los usuarios de la red en ambientes competitivos sigue sin una solución de consenso.

Una solución de interés surge con la teoría de juegos, especialmente los juegos cooperativos, que han sido aplicados a problemas de asignación de costos. Las múltiples soluciones propuestas para tales juegos, pueden ser interpretadas como soluciones alternativas a las soluciones tradicionales de asignación de costos de transmisión.

Esta publicación, de carácter tutorial, efectúa una revisión del estado del arte en relación con la aplicación de teoría de juegos cooperativos al problema de asignación de costos de los servicios de transmisión entre los usuarios de la misma. Junto con plantearse el problema de asignación de costos de transmisión en forma teórica de juegos cooperativos, se establece una metodología para un ambiente descentralizado de múltiples agentes que interactúan entre sí y con el sistema de transmisión

## INTRODUCCIÓN

### Nuevo esquema competitivo de la Industria Eléctrica

En los últimos veinte años la industria eléctrica a nivel mundial, ha sufrido profundas transformaciones [1] que han permitido cambiar el estilo del negocio eléctrico, derivando desde una concepción centralizada, con una industria integrada verticalmente, a una industria con decisiones descentralizadas y estructurada como un mercado eléctrico, en el cual la competencia es la base

de las decisiones. Chile ha sido pionero en este proceso de cambios.

El nuevo esquema coloca al sistema de transmisión en el centro de dicho negocio [2], en el sentido de ser el facilitador de la competencia en el ámbito de generación al permitir que los generadores puedan colocar su producción en los centros de consumo y los consumidores puedan acceder a los centros de generación en un ambiente de competencia.

La implementación de los nuevos esquemas de competencia en generación y rerregulación en transmisión y distribución en Chile, no ha estado exenta de dificultades, muchas de las cuales han derivado a los tribunales, ya sean públicos o arbitrales, con soluciones que fundamentalmente resuelven controversias puntuales entre agentes, sin plantear soluciones al problema de fondo.

### Tarificación de la transmisión

La tarificación de la transmisión, incluyendo la asignación de los costos de ésta, debe preservar la correcta asignación de recursos para los agentes del mercado. Es importante que los precios y pagos de la transmisión no distorsionen las decisiones de inversión en nueva generación, las decisiones de operación de los generadores y las decisiones de demanda por parte de los consumidores. No existen estándares analíticos reconocidos internacionalmente para medir si un determinado esquema de tarificación de la transmisión es adecuado económica y técnicamente, un esbozo se plantea en [3]. Cada país ha diseñado su solución en concordancia con la realidad de su sistema de transmisión.

Existen diversas aproximaciones al tema, destacando el concepto de acceso abierto, que considera el uso multilateral del sistema de transmisión con todos los agentes contribuyendo al financiamiento de la red común, basado en un uso físico y económico de ésta, independiente de los acuerdos comerciales. Otras aproximaciones corresponden a aquellas de tipo bilateral o "wheeling", en las cuales se busca determinar el costo incurrido por una transacción específica entre dos barras de la red. Algunos métodos tales como el "Postage Stamp", "Contract Path", "MW-mile" e incluso métodos incrementales, se usan para este fin.

En un esquema de tarificación de la transmisión de acceso abierto o uso multilateral, se requiere una adecuada identificación de las instalaciones del sistema de transmisión a ser remuneradas, de los costos que deben cubrirse o recuperarse y la forma de distribuir dichos costos. La tarificación puede ser de tipo marginal (la que es insuficiente y requiere la asignación de cargos complementarios entre los usuarios) ó buscar la asignación entre los usuarios de los costos totales de la transmisión con independencia de la señal marginal. Para efecto de la presente publicación ambas situaciones son equivalentes, ya que el objetivo es la asignación de costos de transmisión, sean costos totales o cargos complementarios entre los usuarios del sistema de transmisión.

### **Determinación de cargos**

Un esquema de asignación que no introduce distorsiones en relación con las decisiones de inversión en nueva generación, de operación de los generadores y de consumo de los consumidores, es aquel que distribuye los costos en base al concepto de "uso natural económico" [4] del sistema de transmisión, es decir, en función del grado de afectación que sobre el sistema de transmisión tienen tanto generadores como consumidores, por el simple hecho de estar conectados a él, y no sobre la base de los usos comerciales que derivan de la ubicación relativa de los agentes que suscriben un contrato. En algunos países estos conceptos dan origen al área de influencia.

Métodos que pretenden identificar el impacto de un generador o consumo en el flujo en una línea de transmisión de una red de transmisión, como también, cuánto de la generación de un determinado generador corresponde a una determinada carga y viceversa, han sido estudiados [5,6] basándose en estudios de topología, principios de proporcionalidad y ecuaciones de flujos de redes. En la medida que la dependencia de un determinado flujo es atribuible a una determinada generación o consumo, es posible establecer la relación entre el flujo de una determinada línea y el causante de dicho flujo, ya sea éste generador o consumidor. Con ello se determinan factores de características muy similares a los determinados en [7], que son usados para

determinar la asignación de cargos complementarios o tarificación del sistema sobre la base del uso que los distintos usuarios hacen del sistema de transmisión [8,9]. Por otro lado, las transacciones bilaterales o wheeling han sido estudiadas profusamente, fundamentalmente en lo que dice relación con la asignación de costos totales a las transacciones que se realizan entre un punto y otro de una red de transmisión. Destacan los trabajos de comparación de diversas metodologías [10] y aquellos que tratan de incorporar diferentes componentes en el uso por el sistema de transmisión [11,12].

### **Aplicaciones de teoría de juegos**

Existe en los últimos años un esfuerzo notable por incorporar metodologías de teoría de juegos a la problemática del mercado eléctrico. En este sentido, se identifican una serie de publicaciones que usando metodología y modelos de teoría de juegos, se aplican al mercado eléctrico en forma integrada y permiten dar interpretaciones a los principales conflictos generados en este mercado integrado. Fundamentalmente se relacionan con el ejercicio del poder de mercado, el manejo de la congestión, distintos modelos de competencia oligopolística, etc.

Una referencia reciente, en la que se observa la variedad de temas que pueden ser enfrentados en el mercado eléctrico en base a teoría de juegos lo constituye el curso tutorial de la IEEE, "Game Theory Applications in Electric Power Markets" [13].

En relación con la asignación de costos de transmisión entre los usuarios de dicho sistema, especialmente la asignación de costos fijos o los denominados cargos complementarios, el tratamiento debe consistir básicamente en aplicaciones de teoría de juegos cooperativos, dado que es la metodología que más se adapta al tema de asignación de costos conjuntos y costos comunes. Una buena referencia teórica sobre asignación de costos en teoría de juegos se encuentra en [14]. Tradicionalmente los textos de teoría de juegos han centrado la mayor parte de sus esfuerzos en la teoría de juegos no cooperativos. Inicialmente el tema de asignación de costos ha sido abordado en otras disciplinas [15,16], los cuales sirven de base para el nuevo planteamiento de teoría de juegos cooperativos al problema de la asignación de los costos de transmisión.

### **TEORIA DE JUEGOS**

La teoría de juegos se ha transformado en los últimos años en la forma de análisis más usada de interacciones estratégicas entre dos o más agentes que participan de un mercado, constituyéndose en la disciplina del ámbito económico donde más publicaciones han surgido en los últimos 15 años. Es así como en los años 1994 con Nash, Harsanyi y Selten, y 1996 con Mirrless y Vickrey,

eminentes investigadores relacionados con teoría de juegos, han obtenido premios Nobel de Economía.

La teoría de juegos provee de herramientas conceptuales, metodológicas y de modelación interesantes en el ámbito de la interacción de agentes en mercados competitivos y en la resolución de conflictos generados por la interacción de dichos agentes en estos mismos ambientes. Adicionalmente es conveniente señalar que la teoría de juegos no cooperativos es la más indicada para enfrentar situaciones derivadas de la competencia. De la misma forma, la teoría de juegos cooperativos es la más indicada para resolver problemas de asignación de costos.

### **Juegos no cooperativos**

La teoría de juegos no cooperativos ha sido aplicada en forma más extensa a la resolución de situaciones planteadas en mercados competitivos donde los distintos agentes además de no cooperar, hacen un manejo estratégico de las situaciones a las que se ven enfrentados en la competencia, con el objeto de maximizar sus beneficios individuales. La modelación consiste en simular el problema en base a un conjunto de jugadores, un conjunto de reglas, un conjunto de estrategias disponibles para los jugadores y un conjunto de pagos correspondientes a dichas estrategias. Los pagos para un determinado jugador dependen no solo de la estrategia escogida por dicho jugador, sino también de las estrategias escogidas por los otros jugadores participantes. Adicionalmente, se asume que las reglas del juego, las estrategias disponibles para los jugadores y los pagos son de conocimiento común. Se asume que cada jugador es inteligente y racional, es decir maximiza su beneficio individual. Una solución tradicionalmente buscada en este tipo de juegos es denominada equilibrio del juego, surge entonces el concepto de equilibrio de Nash como uno de los elementos principales en la resolución de este tipo de juegos no cooperativos.

### **Juegos Cooperativos**

La teoría de juegos cooperativos ha sido aplicada a problemas de asignación y las variadas soluciones propuestas para tales juegos se pueden interpretar como soluciones alternativas a un problema de asignación de costos. Las dos mayores clases de problemas de asignación de costos dicen relación con los costos conjuntos y los costos comunes, los primeros corresponden a aquellas situaciones donde los costos de producción no corresponden a una función separable del conjunto de productos. La no separabilidad de la función de costos y la producción conjunta produce ahorros que se caracterizan a menudo como economías de ámbito. Los costos comunes se aplican a situaciones donde el costo de producción se define sobre un solo producto que es usado por múltiples usuarios. En este caso se producen ahorros que se caracterizan como economías

de escala. Estas dos situaciones descritas están presentes en el problema de la transmisión eléctrica.

El planteamiento teórico básico consiste en poder modelar una red de transmisión con todos los agentes que interactúan con dicha red, es decir, generadores, consumidores, líneas de transmisión, empresas de generación, grandes consumidores, empresas de distribución, el operador de la red, entre otros, los que en el fondo son usuarios de la red de transmisión. Ellos corresponden a agentes o jugadores en un juego y esencialmente son inteligentes y racionales y, por tanto, están interesados en agruparse formando coaliciones en la medida que tengan un mayor pago al final del juego. Estas coaliciones se establecen sobre la base de determinadas reglas definidas para el juego que se desea modelar.

Cada coalición tiene una función característica en los términos definidos por Von Neumann y Morgenstern (1944) que es el mayor valor que los miembros de una coalición están seguros de recibir si actúan coalicionados sin la ayuda de externos a la coalición. Esta función característica cumple propiedades de superaditividad o subaditividad dependiendo de si se trata de ganancias o costos, y de anularse para una coalición vacía. Como resultado del juego se define una función de pago que es el resultado final del juego, representada por un vector de pagos y que debe cumplir criterios de racionalidad individual, de coalición y colectiva, obteniéndose el núcleo como primera solución del juego. De ahí en adelante es posible obtener soluciones como conjunto estable, conjunto negociable, Kernel, preKernel y Nucleolos, estos últimos basados en la teoría del exceso. Posteriormente es posible establecer soluciones tipo Valor Shapley o precios Aumann-Shapley, entre otras.

Un tema importante de analizar considerando la conformación de coaliciones en el mercado eléctrico, es el concepto de estabilidad de la coalición, en el sentido de asegurar que dichas coaliciones formadas permanezcan en el tiempo, evitando que aparezcan incentivos para que las destruyan los agentes en las distintas etapas de formación.

### **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La forma de enfrentar el problema de asignación de costos de transmisión mediante juegos cooperativos consiste en suponer la existencia de un número  $N$  de agentes usuarios del sistema de transmisión, o jugadores del juego de asignación de costos de transmisión. Estos agentes  $N=\{1,2,\dots,n\}$  pueden representar distintos tipos de usuarios del sistema de transmisión: generadores, consumidores, dueños de instalaciones de transmisión o conjuntos de ellos [17,18], contratos de transacciones wheeling [19] o transacciones wheeling [20].

Cada agente representa una unidad capacitada para tomar decisiones, acciones y tener metas en forma autónoma, derivada de intereses que motivan sus decisiones lo que significa que posee preferencias sobre las posibles eventualidades resultantes del desarrollo del juego. Estas preferencias están basadas en el principio de racionalidad económica de maximización de sus beneficios o minimización de sus costos.

Los agentes o jugadores pueden unirse formando coaliciones  $S, S \subseteq N$  en base a compromisos de acuerdos o coordinación de decisiones que comprometen a los miembros de  $S$ , de tal forma que la coalición puede a su vez actuar como un agente autónomo. Estas coaliciones no son otra cosa que formas de agrupación de agentes en configuraciones de coaliciones (apéndice A).

Los costos se especifican en base a una función de costos común  $C(S)$  que se define para todo  $S \subseteq N$ , que corresponde a la función característica del juego en términos definidos por Von Neumann y Morgenstern (1944).

Una alternativa de representación de esta función característica para los juegos de asignación de costos es definirla como ahorros de costos producto de la cooperación versus la acción individual, así tenemos.

$$v(S) = \sum_{i \in S} C(i) - C(S)$$

En el marco de la definición de un juego de asignación de costos de transmisión,  $C(S)$  representa el menor costo para la coalición  $S$  para satisfacer sus necesidades definidas en la modelación del juego, también se interpreta como el costo alternativo o "stand alone cost" de la coalición  $S$  frente a otras posibles coaliciones en los que  $S$  pudiera estar interesado en participar.

$C(\Phi) = 0$ ; costo de coalición vacía o sin agentes  
 $C(N)$ ; costo de la gran coalición en la cual participan todos los agentes involucrados en el juego.

En el caso de los costos de las instalaciones de transmisión la función  $C(S)$  puede representar el costo total de transmisión o bien el cargo complementario si se desea conservar las bondades de la tarificación marginalista en la asignación.

Un requerimiento tradicionalmente impuesto a la función de costos es de ser esta subaditiva, es decir:

$$C(S \cup T) \leq C(S) + C(T); \forall S, T \subseteq N, \exists S \cap T = \Phi$$

es decir los costos de transmisión para un grupo de agentes deben ser inferiores a sus costos individuales.

La formulación formal de un juego de asignación de costos estará dada por el par  $(N; C)$  donde  $N$  es el número de agentes y  $C$  su función de costo.

Un método o juego de asignación de costos entregará un resultado en términos de asignarle un costo o pago a cada agente que participa en el juego. El conjunto de costos asignados a cada agente como solución del juego se expresa como un vector de asignaciones o pagos  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , donde  $x_i$  es la asignación o pago al agente  $i$ . El resultado de un juego queda expresado entonces por lo que se denomina configuración de pago o PC.

$$PC = \{X; \delta\} = (x_1, x_2, \dots, x_n; S_1, S_2, \dots, S_m)$$

Cualquiera sea la solución del juego esta debe cumplir con los supuestos de racionalidad y estabilidad de la solución. La asignación resultante debe ser eficiente, equitativa y entregar los incentivos necesarios para que los agentes tomen sus decisiones descentralizadamente.

Las condiciones de racionalidad y estabilidad tanto individual, de coalición y de grupo se encuentran planteadas en apéndice B.

Las asignaciones de costos que son Pareto óptimas e individualmente racionales se denominan tradicionalmente imputaciones. Si se adiciona al conjunto de imputaciones la racionalidad colectiva o de coalición, se obtiene el núcleo del juego.

El núcleo del juego de asignación de costos  $(N, C)$  es el conjunto de todas las PC  $(X; \delta)$  tal que:

$$X(T) \leq C(T); \forall T \subset N, \text{ con } X(T) = \sum_{i \in T} x_i$$

El núcleo es, por lo tanto, un subconjunto del conjunto de imputaciones. Este concepto de solución de un juego es el más simple y sugerente de todos los conceptos de solución de juegos cooperativos, ya que consiste de un conjunto de imputaciones que no deja a alguna coalición en condiciones de mejorar la asignación de cada uno de sus miembros y no permite la existencia de subsidios entre coaliciones. Lamentablemente existen muchos juegos con núcleo muy grandes (gran conjunto de soluciones) o sin núcleo o con núcleo vacío debido al no cumplimiento de la racionalidad colectiva para alguna coalición la que estará en condición de mejorar la asignación a sus miembros.

A partir del núcleo es posible establecer diferentes teorías que plantean soluciones a este tipo de juegos como ser: extensiones del núcleo que consisten básicamente en reducir el tamaño del núcleo o aumentarlo cuando este es vacío por medio un parámetro  $\epsilon > 0$  que se suma o resta a las inecuaciones derivadas

de aplicar la racionalidad, otros conceptos como Conjunto Estable basado en el concepto de dominancia de imputaciones, Conjunto de Negociación basado en objeciones y contraobjeciones de configuraciones de asignación por parte de agentes de una misma coalición. Otras líneas de solución son basadas en la teoría del exceso, definido éste como la diferencia entre el costo de la coalición y la asignación para esa coalición como resultado del juego.

Para un juego  $(N, C)$  con una PC  $(X; \delta)$  el exceso de una coalición R se define como:

$$e(R, X) = C(R) - X(R)$$

y representa la cantidad total que los posibles miembros de la coalición R colectivamente ganarían o perderían si ellos se retiran de  $(X; \delta)$ .

Soluciones que se apoyan en este concepto son el Kernel basado en los conceptos de excedente máximo y equilibrio entre jugadores de una misma coalición, el Nucleolo que explota el concepto de exceso entre coaliciones buscando en primer lugar el máximo exceso de toda posible coalición frente a una asignación y posteriormente minimizando este máximo exceso entre múltiples asignaciones. La ventaja del Nucleolo es que éste es no vacío y existe para cada configuración de pago. Según se ha demostrado bajo ciertas condiciones, el Nucleolo es único.

Existen adicionalmente otras soluciones derivadas de teoría de juegos, es importante destacar el caso del Valor Shapley que es una determinación a priori de la asignación resultante, que le corresponde a cada agente en un determinado juego de asignación de costos definido en forma de función característica y cuyo único inconveniente es que puede resultar en algunos casos que el Valor Shapley como una asignación de costos no esté en el núcleo del juego, estableciéndose que al menos una coalición está disconforme y la estabilidad de la gran coalición no esta asegurada.

Otra alternativa la constituyen los precios Aumann Shapley, cuyo inconveniente fundamental es que para su aplicación se debe conocer la estructura de la función de costos en función de los agentes involucrados en el juego. A modo de ejemplo, se debe conocer la expresión analítica de la función de costos, en función de los MW transportados por una línea del sistema de transmisión que se desea estudiar o analizar.

## METODOLOGÍA DE APLICACIÓN

Determinado el sistema de transmisión a estudiar y el problema de asignación de costos a resolver, se debe tener en consideración la caracterización del juego de asignación de costos de transmisión, es decir, una buena definición de cual es el tipo de agente o jugadores a tener en cuenta en el juego y cuales serán las condiciones de

autonomía que le serán aplicables para sus decisiones. Se debe determinar el número de agentes o jugadores y la función de costos características del juego. Para ello, bastara con definir (no siempre es tarea fácil) el mínimo costo que cada coalición S esta dispuesta a asumir si sus miembros actúan coalicionados sin la ayuda de otros jugadores o agente no pertenecientes a S. Esto debe realizarse para cada una de las coaliciones posibles (incluidas las coaliciones individuales), para lo cual es conveniente plantearse, como operaría el sistema de transmisión de acuerdo a los objetivos planteados inicialmente para el problema de asignación de costos, si solamente estuviera participando la coalición a la cual se le desea determinar su función o valor característico  $C(S)$ .

A modo de ejemplo, en un juego de asignación de costos de expansión de la transmisión, el número de agentes puede ser el total de nudos de la red que cumplen determinadas condiciones y la condición de costo mínimo de expansión es aquella en que para que una determinada coalición pueda cumplir sus objetivos requiere contar con líneas de expansión que tienen un costo determinado y que es inevitable.

Una vez determinado el número de agentes, su estructura de funcionamiento y la función de costos características de cada una de las coaliciones posibles en el juego de acuerdo a las reglas impuestas, se debe establecer un mecanismo de formación de coaliciones o de negociación el cual requiere de etapas como ser: determinación de un valor de negociación por parte de cada una de las coaliciones, una etapa de comunicación de los valores negociables a las otras coaliciones, etapa de determinación o cálculo por parte de cada coalición de cuales es su asociación más conveniente y una etapa de negociación propiamente tal. Este proceso puede ser efectuado en forma descentralizada lo que requerirá de la participación interactiva de los agentes involucrados o centralizadamente en cuyo caso los cálculos podrán ser efectuados por un regulador independiente. En ambos casos se requiere de una entidad coordinadora y supervisora que vele por la integridad del sistema y sancione sólo las asociaciones de coaliciones posibles en términos de funcionamiento y seguridad del sistema.

Las etapas claves del problema están constituidas por la determinación del valor propio o función característica de cada agente o coalición que dependerá del ambiente en el cual se desarrolla el juego y de la modelación considerada para los diferentes agentes, y el cálculo o determinación de la conveniencia de asociarse de un agente a una determinada coalición, para lo cual, previamente se deberá determinar los valores negociables, los cuales, se podrán determinar mediante algún mecanismo de cálculo de juegos cooperativos como ser Shapley Value, Shapley Value Bilateral, Kernel, C-SOF, propensidad a la disrupción, least core, etc.

Una vez formada las coaliciones y entendiendo que es posible dado las características del juego de asignación de costos de transmisión, llegar a generar la gran coalición, es decir, aquella en que participan todos los agentes considerados en la modelación, se debe determinar la asignación de costos que corresponde a cada uno de los agentes participantes en esta gran coalición como resultante del juego. De no ser posible generar la gran coalición, la asignación de costos se determinará en base a la coalición resultante que agrupe a los interesados. Los mecanismos de cálculo de estos valores corresponden también a múltiples formas de solución planteadas en juegos cooperativos.

Un desafío importante lo constituye la determinación de la estabilidad de las coaliciones formadas y como reaccionaran estas ante eventuales ajustes o modificaciones de las reglas del juego ya sea por la intervención del regulador o de terceros interesados en participar.

### **AVANCES RECIENTES**

Entre los desarrollos recientes más destacados en el problema de asignación de costos de transmisión mediante teoría de juegos se encuentran los desarrollos de esta área de Tsukamoto e Iyoda [19]. Han planteado la asignación de costos de transmisión entre contratos de transacciones bilaterales o contratos de transacciones wheeling, donde los agentes son los diferentes tipos de contratos de transacciones wheeling, cada una de las cuales, es caracterizada por un perfil de demanda horario en 24 horas. Como solución usa la resolución del Least Core para determinar el Nucleolo del juego, solución que es comparada con los métodos de responsabilidad en la demanda de punta del sistema y el método de la demanda no coincidente mediante el cálculo MW-mile.

La solución del Nucleolo propuesta, es en función de minimizar la máxima disconformidad de las coaliciones con la asignación de costos resultantes del juego. Si bien se plantea en el trabajo una relación descentralizada entre los agentes o distintas transacciones, no queda claro quien finalmente efectúa los cálculos y determina las asignaciones de costos ni cual es el proceso de negociación inherente a este tipo de asignaciones.

Otra línea de trabajo es la planteada por Contreras y Wu [17], para el problema de asignación de costos de expansión del sistema de transmisión, en la cual, los agentes son las distintas barras del sistema, que pueden tener asociados generadores y cargas y líneas de transmisión. Las coaliciones que se formen deben ser autónomas en términos de expansión, deben contar con al menos un generador, una carga y una línea de transmisión, y de acuerdo a las reglas planteadas en el problema de asignación de costos de expansión, deben cumplir con tener generación igual o superior al

consumo, no exceder los límites térmicos de las líneas dentro de la coalición, y la no-existencia de barras aisladas al interior de una coalición.

Determinados los valores característicos de cada agente, se plantea un proceso de formación de coaliciones descentralizado, basado en la determinación de valores Shapley bilateral, con los cuales, cada coalición hace una lista de prioridades de asociación para iniciar un proceso de comunicación y negociación entre agentes autónomos. Una vez formada la gran coalición u otra configuración de coaliciones que permita satisfacer en forma óptima la expansión, se procede a buscar los resultados de la asignación, otra vez basados en el valor Shapley bilateral, en un proceso de inducción hacia atrás, que tiene en consideración la estructura de formación de la coalición final y de esta forma se asignan los costos de transmisión a cada agente participante.

Sin lugar a dudas, la forma de enfrentar el problema de los costos de la expansión es novedosa y contempla las etapas señaladas anteriormente, pero a pesar de indicarse que se trata de un proceso descentralizado, el papel del coordinador es muy fuerte, ya que debe autorizar la formación de cada una de las coaliciones posibles, establecer las comunicaciones y supervisarlas, efectúa los cálculos centralizadamente, administra el proceso de recaudación y pago correspondientes, etc. En un ejemplo planteado por los autores (sistema clásico de 6 barras de Garver) existen 18 formas posibles de obtener una configuración de coaliciones finales del juego. Asumiendo que la indiferencia de un agente es posible entenderla como favorable a formar coalición, existen 12 formas distintas de asignar los costos de la expansión a todos los agentes, lo que deja nuevamente en etapa de negociación la asignación de los costos.

En Yeung y Wu [18], el proceso es similar al anterior, la determinación de los agentes y la modelación de los mismos es diferente, ya que se plantea nudos excluyentes de generadores y cargas unidas por una red y se asume funciones de costos de producción a los generadores y de beneficios en el consumo a los consumidores, la modelación de los agentes son procesos de despacho, que se comportan en forma autónoma, racional y cooperativa en un ambiente multiagente de transacciones multilaterales. Con la modelación planteada, es posible determinar por medio de un proceso de optimización (minimización de costos) el beneficio total de cada coalición, que representa la función característica del juego, a partir de ella y usando el valor Shapley bilateral o el estándar de justicia cooperativa C-SOF, (para el caso de cálculos entre pares de coaliciones, dan los mismos resultados), se inicia el proceso de negociación lográndose la formación de la gran coalición. A partir de ella es posible por medio de un proceso de inducción hacia atrás, ya sea basado en el valor Shapley bilateral o el C-SOF, determinar la asignación de cada agente. Esta última parte, no se

desarrolla en mayor profundidad en el trabajo. Se incluye en el desarrollo, situaciones que consideran el costo de las líneas de transmisión, por medio de una función de costos lineal, que se agrega a la función objetivo de cada coalición. El problema planteado es más bien un problema de despacho óptimo y la asignación de beneficios de los agentes más que un problema de asignación de costos de transmisión. Las etapas de determinación de valores característicos, comunicación, cálculo y negociación, corresponden a una modelación descentralizada de formación de coaliciones de juegos cooperativos con negociaciones bilaterales.

En Vieira Filho et al [20], se plantea una modelación de agentes sobre la base de transacciones wheeling que usan un sistema integrado de transmisión y cuyo objetivo es minimizar los costos asociados para obtener sus registros de generación carga impuestos por las transacciones wheeling sin violar las restricciones de operación impuestas por el sistema eléctrico. El trabajo está orientado a resolver el problema de asignación de costos hundidos de las instalaciones ya existentes y es modelado como un flujo óptimo de potencia. La disyuntiva que se presenta es la tradicional entre recuperar adecuadamente los costos de las instalaciones existentes o proveer las señales económicas adecuadas para la expansión del sistema.

En comunicación reciente a los autores, Contreras y Wu han desarrollado un mecanismo de solución alternativa al proceso de formación de coaliciones necesario para resolver el problema de asignación de costos de la expansión del sistema eléctrico entre los agentes usuarios del mismo. Esta metodología desarrolla de un sistema de múltiples agentes basado en el Kernel de tal forma que los agentes forman coaliciones con el sentido de estabilidad del Kernel, es decir, equilibrios entre pares de agentes individuales pertenecientes a la misma coalición. Se establece un proceso de formación de coaliciones con las etapas ya mencionadas de cálculo, comunicación y negociación. Se plantea la imposibilidad de resolver el problema de los costos hundidos del sistema de transmisión y se destaca la unicidad de la solución del método del Kernel frente al Valor Shapley Bilateral para el problema de expansión.

### **Desafíos de Investigación**

Los autores están investigando la asignación de los costos en un sistema de transmisión operando en la modalidad de acceso abierto, considerando el uso multilateral por parte de los agentes, los que deben asumir el financiamiento de la red común. En este sentido, se desea una asignación eficiente, descentralizada y equitativa con señales adecuadas a los agentes participantes. Especial preocupación lo constituye la asignación de los costos del sistema existente entre los usuarios del mismo. Para ello, se

trabaja actualmente en una adecuada modelación y caracterización de los agentes y del juego asociado a este problema.

Exploran un campo de investigación importante en la modelación del juego cooperativo asociado al problema de asignación de costos de transmisión, especialmente la determinación de cuales deben ser los agentes participantes y cuales son las reglas del juego bajo las cuales ellos interactúan. Asimismo, analizan la elección del mecanismo de valoración de coaliciones para la negociación en la formación de las mismas, que es un tema abierto e incipiente en el que solo se han ensayado algunas opciones posibles. Esto condiciona en alguna medida el método posterior de asignación de costos resultantes.

Existe una multiplicidad de métodos de asignación de costos en teoría de juegos cooperativos que no han sido aplicados a los costos de transmisión, y que dada su aplicabilidad en otras disciplinas permitirían alentar esperanzas de buenos resultados en el tema de transmisión.

## **CONCLUSIONES**

Se efectúa una revisión de la aplicación de la teoría de juegos cooperativos al problema de asignación de costos de transmisión entre los agentes usuarios de un sistema de transmisión.

Junto con plantearse el problema de asignación de costos de transmisión en forma teórica de juegos cooperativos se ha establecido una metodología para un ambiente descentralizado de múltiples agentes que interactúan entre si y con el sistema de transmisión. Asimismo se han revisado los avances recientes en estos temas de investigación.

No se observan a la fecha aplicaciones importantes en el ámbito de asignación de los costos existentes o de inversión de un sistema de transmisión desde la perspectiva de teoría de juegos. Si se ha avanzado en el tema de la asignación de los costos de expansión. Sin embargo, sólo se trata de aplicaciones a modelos de redes de pocos nudos y no es posible establecer aplicaciones a sistemas más reales existentes en muchos países. Los desafíos son evidentes y los autores están realizando desarrollos para enfrentarlos, los que se comunicarán en futuras publicaciones.

## **APENDICE A**

Estructura de Coaliciones:

Los agentes se pueden agrupar de muchas maneras diferentes de acuerdo a sus intereses y conveniencia. La forma como los jugadores en  $N$  se agrupan en

coaliciones mutuamente exclusivas y excluyentes se denomina configuración de coaliciones

$$\delta = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$$

$\delta$  es una partición de N que cumple tres condiciones:

$$S_j \neq \Phi \quad ; j=1,2,\dots, m$$

$$S_i \cap S_j = \Phi \quad ; \forall i \neq j$$

$$\bigcup_{S_j \in \delta} S_j = N$$

Lo anterior plantea que cada agente pertenece sólo a una de la m coaliciones no vacías de la configuración de coaliciones y los miembros de una determinada coalición están conectados entre sí pero no con algún otro agente que no pertenezca a su coalición.

### APENDICE B

En términos de racionalidad, se puede definir para un juego de asignación de costos la racionalidad individual, colectiva y grupal en el sentido que:

$$X(i) \leq C(i); \quad \forall i \in N$$

$$X(S) \leq C(S); \quad \forall S \neq \delta$$

$$X(N) = C(N)$$

$$\text{con } X(S) = \sum_{i \in S} x_i$$

Lo anterior significa que ningún agente o coalición de agentes, debe tener un costo mayor que su costo alternativo o stand alone cost, y la asignación de costos resultante del juego para todos los jugadores deber ser idéntica a los costos totales del sistema de transmisión, esto último se conoce como "break-even condition" u "optimalidad de Pareto".

Un principio relacionado con la racionalidad expresada anteriormente, dice relación con el costo marginal de agregar un nuevo agente a una coalición, a la que no se le puede asignar un costo menor que el costo marginal, de esta forma:

$$X(S) \geq C(N) - C(N - S) \quad ; \quad \forall S \subseteq N$$

### REFERENCIAS

1. Rudnick H., "The Electricity Market Restructuring in Southamerica Successes and Failures on Market Design", Plenary Session, Harvard Electricity Policy Group, San Diego, California, Enero 29-30, 1998.
2. Tabors R., "Transmission Systems Management and Pricing, New Paradigms and International Comparisons", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 9, N° 1, Febrero 1994, pp. 206-215.
3. Green R., "Electricity Transmission Pricing: An International Comparison", Utilities Policy, Julio 1997.

4. Rudnick H., Soto M., Palma R., "Use of System Approaches for Transmission Open Access Pricing", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 21, 2, 1999, pp 125-135.
5. Bialek J., "Allocation of Transmission Supplementary Charge to Real and reactive Loads", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, N° 3, Agosto 1998, pp 749-754.
6. Gross G., Tao S., "Estimation of Losses Associated with Individual Transactions in A Multi-Transaction Network", IV Sepope, Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning Proceedings, Brazil, Marzo 1998.
7. Ng W., "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, N° 3, Marzo 1961, pp 1001-1005.
8. Rudnick H., Palma R., Fernandez J. "Marginal Pricing and Supplement Cost Allocation in Transmission Open Access", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 10, N° 2, Mayo 1995, pp. 1125-1142.
9. Strbac G., Kirschen D., "Allocating transmission System usage On the basis of traceable Contributions Of Generators and Loads Flows", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, N° 2, Mayo 1998.
10. Marangon J. "Allocation of Transmission Fixed Charges: An Overview", IEEE Transactions on Power Systems Vol. 11 N° 3 , Agosto 1996, pp. 1409-1418.
11. Shirmohammadi D., Filho X., Gorenstin B., Pereira M., "Some Fundamental Concepts About Cost based Transmission Pricing", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11, N° 2, Mayo 1996, pp. 1002-1008.
12. Silva E., Mesa S., Morozowsky M., "Transmission Access Pricing to Wheeling Transactions: A Reliability Based Approach", IEEE Transactions on Power Systems (aceptado, pendiente publicación), 1998.
13. IEEE Power Engineering Society, "IEEE Tutorial On Game Theory Applications in Electric Power Markets", Winter Meeting, New York, 1999.
14. Young H.P., "Cost Allocation", in Handbook of Game Theory with Economic Applications", Volume 2, Eds. R. Aumann and S. Hart, North Holland, Elsevier, Amsterdam, 1994.
15. Billera L., Heath D., Raanan J., "Internal Telephone Billing Rates- A Novel Application of Non Atomic Game Theory", Operations Research, Vol. 26, N° 6 , Noviembre-Diciembre 1978.
16. Gately D., "Sharing the Gains From Regional Cooperation: A Game Theoretic Application to Planning Investment in Electric Power", International Economic Review, Vol 15, N° 1, Febrero 1974.
17. Contreras J., Wu F. "Coalition Formation in Transmission Planning", IEEE Transactions on Power Systems", Vol. 14 N° 3 , Agosto 1999, pp. 1144-1152.
18. Wu F., Yeung C., Poon A., "Game Theoretical Multi-Agent Modelling of Coalition Formation for Multilateral Trades", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14 N° 3 , Agosto 1999, pp. 929-934.
19. Tsukamoto Y., Iyoda I., "Allocation Of Fixed Transmission Cost to Wheeling Transactions by Cooperative Game Theory", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 11, N° 2, May 1996.
20. Vieira Filho X., Pereira M., Gorenstin B., Mello J., Melo A., Granville S., "Transmission System Cost Allocation Based on Cooperative Game Theory", Brasil , 1997

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de Fondecyt y de la Unidad de Investigación de Endesa en la Universidad Católica de Chile.