

REPARTICIÓN DE COSTOS DE TRANSMISIÓN A TRAVÉS DE JUEGOS COOPERATIVOS: APLICACIÓN PARA EL SNT ECUATORIANO

Gabriel Salazar
Investigación y Desarrollo

Sara Cangui
EPN

RESUMEN

La asignación de costos de red es la forma de calcular los cargos de transporte a pagar por cada uno de los agentes que operan en un determinado sistema. La elección de una metodología adecuada debe considerar las implicaciones que tienen las tarifas de transmisión en el funcionamiento del sistema y que los Agentes estarán dispuestos a financiar las líneas y refuerzos por los que tengan que pagar un cargo menor que el beneficio que esperen obtener de los mismos.

En el presente artículo se propone la aplicación de un método alternativo para la repartición de los costos de transmisión en mercados de energía eléctrica. El método de repartición de costos de transmisión en mención, se basa en el método de Aumann–Shapley.

En el estudio se verifica la validez y efectividad de la aplicación del método, planteándolo como una alternativa al método de estampilla postal que actualmente se aplica en el mercado eléctrico ecuatoriano. En tal sentido, se realiza un análisis comparativo del método propuesto y el método actualmente utilizado en el mercado eléctrico ecuatoriano.

PALABRAS CLAVE: Aumann - Shapley, Tarifación de la Transmisión, Teoría de Juegos.

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto importante en la etapa de transmisión, es la tarifación de los servicios, varios métodos han sido estudiados detallándose virtudes y defectos de cada uno, sin llegar aún a una solución consensuada sobre este tema.

La tarifación marginalista en sistemas eléctricos, ocasiona directamente una remuneración variable para el transmisor que se deriva de la diferencia espacial de los precios nodales debido a las pérdidas marginales de transmisión o a las restricciones de capacidad de transporte, ésta es insuficiente para cubrir los costos totales de transmisión y el **cargo complementario** debe ser repartido a través de un método alternativo perdiendo así la fortaleza de las

señales óptimas enviadas a través de los precios marginales de corto plazo.

El cálculo de los cargos complementarios puede realizarse de dos formas: según la responsabilidad que haya tenido cada agente en el desarrollo de la red (una nueva línea sería pagada por los agentes para los que ha sido construida), o asignando los cargos según los beneficios que cada agente obtenga de cada línea. Los beneficios que los obtienen de las líneas son de tres tipos:

- **Beneficios económicos:** Al permitir sustituir el despacho de generadores poco eficientes.
- **Beneficios en confiabilidad:** Disminuyendo los cortes de suministro y las fallas en el sistema.
- **Beneficios competitivos:** Al haber mayor competencia entre generadores.

En la mayoría de los casos, resulta muy difícil calcular el beneficio que un Agente obtiene de una red. Por ello, puede utilizarse una medida del uso eléctrico que este Agente hace de la red como aproximación del beneficio que obtiene de ella, resultando este uso eléctrico más fácil de calcular.

La responsabilidad de un Agente en los costos de red depende también de su localización y de su perfil de producción o consumo, es así que las tarifas deben estar diferenciadas espacial y temporalmente:

- **Espacialmente:** El beneficio que obtienen los agentes de las líneas depende en gran medida de su localización. Por ejemplo, una nueva línea normalmente beneficiará a generadores situados en zonas exportadoras, mientras que a un generador situado en una zona importadora podría incluso perjudicarlo.
- **Temporalmente:** El uso de las líneas varía a lo largo del día y a lo largo del año. Al variar este uso varía también el beneficio que obtienen los agentes de ellas.

2. MARCO TEÓRICO DE REFERENCIA

2.1. Métodos de Asignación de Costos de Red

Existen varios métodos de repartición de los costos de transmisión, generalmente el precio a pagar por la simplicidad de un método es la transparencia y exactitud, siendo complejo transmitir a todos los usuarios las señales económicas adecuadas.

Los métodos de tarifación de la transmisión pueden clasificarse de varias maneras, una de ellas se presenta en la Figura 1:

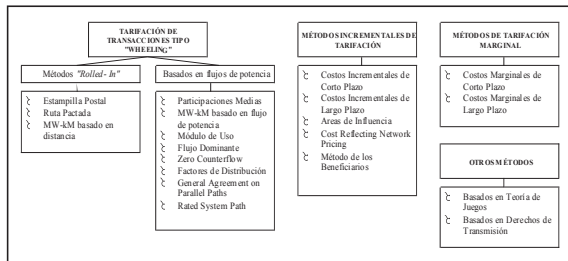


FIGURA 1: Métodos de Tarifación de la Transmisión

A. Tarifación de Transacciones Tipo “Wheeling”

Se denomina “wheeling” a una transacción bilateral de transporte de energía, desde un punto de entrega hasta uno de demanda utilizando instalaciones pertenecientes a un tercero. Existen dos tipos de métodos en este grupo:

Rolled-in: reparten los costos del sistema de transmisión existente en función de una medida global de utilización de la red. Para ello se realizan simplificaciones como considerar solamente escenarios representativos del sistema, suponer rutas fijas por donde fluye la potencia desde un punto de partida a uno de llegada, considerar una sola cantidad representativa del estado de operación del sistema (potencia o energía), etc. Se pueden enumerar algunos de estos métodos:

- Método de estampilla de correo.
- Método de ruta pactada.
- Método de MW-Km basado en distancia.

Basados en Flujos de Potencia: para la repartición de los costos de transmisión se realizan flujos de potencia de tal manera de considerar las condiciones de operación del sistema. A través del teorema de superposición se trata de encontrar la participación porcentual que cada agente realiza al flujo de potencia total por una línea, esto supone la linealidad de los flujos de potencia. Bajo este grupo están los métodos:

- Método de Participaciones Medias.
- Método de MW-Km basado en flujos de potencia.
- Factores de Distribución GGDF y GLDF.

B. Tarifación Incremental de Transmisión

Los costos incrementales pueden ser definidos como los sobrecostos de transmisión necesarios para acomodar a nuevos agentes o nuevas transacciones.

La utilización de métodos incrementales requiere definir una situación base a la cual se irán adicionando las nuevas transacciones. Los métodos de tipo incremental basan su cálculo en la diferencia de costos necesarios con y sin un agente o transacción, mientras que los métodos de tipo marginal determinan, para un punto de operación dado, el aumento en los costos debido a un aumento unitario de una variable.

Los métodos incrementales mejoran las señales económicas enviadas a los agentes, esto lo hacen al precio de ser más complejos y de requerir mayores análisis y cálculos.

Costos Incrementales de Corto Plazo: Se trata de evaluar y repartir los costos de operación, explotación y mantenimiento para cada nueva transacción o agente.

La dificultad del método radica en la necesidad de prever los costos de operación y mantenimiento para el horizonte de estudio. Otra dificultad del método se presenta cuando existen varias transacciones o agentes responsables de una adecuación del sistema. Los ingresos obtenidos a través de este método apenas sirven para recuperar y repartir los costos de corto plazo.

Costos Incrementales de Largo Plazo: Permiten evaluar y repartir los costos de inversión necesarios para acondicionar el sistema de transmisión para dar cabida a nuevos agentes o transacciones, así como, estimar los costos de operación y mantenimiento en el largo plazo.

La dificultad del método radica en la necesidad de esquemas de planificación de expansión de la red de largo plazo, para lo cual, son necesarios varios escenarios significativos de operación del sistema, lo cual introduce incertidumbres que restan exactitud al método.

Áreas de Influencia: Se procura realizar una repartición de costos de instalaciones de transmisión en función del uso incremental de cada agente. Para la determinación del uso se calcula primero un flujo de potencia base, luego para un nodo determinado

se hace una variación en la inyección de potencia de 1 MW y se determinan cuales instalaciones de transmisión sufren cambios con respecto del flujo base, este grupo de instalaciones forma parte del área de influencia de dicho nodo.

La repartición de los costos se la hace en función del factor de participación de cada agente definido como la relación entre el incremento del flujo debido a ese agente y el sumatorio de los incrementos de flujo debido a todos los agentes.

Método de los Beneficiarios: Este método es aplicable para la repartición del cargo complementario y se lo hace en función de los factores de beneficio de cada agente.

El beneficio es determinado para cada Agente para un período anual a partir de simulaciones de muchos escenarios representativos de la operación del sistema.

Desde el punto de vista de un generador, el beneficio corresponde al incremento en sus utilidades netas debido al aumento en la venta de energía debido a la mayor capacidad de transporte por las instalaciones en estudio, el incremento se lo calcula como la diferencia de las ventas de energía con y sin esas instalaciones.

Desde el punto de vista de los consumidores, el beneficio refleja la disminución en los costos por tener acceso a energía más barata debido a mayor capacidad de transmisión, el beneficio se lo determina comparando los pagos que tienen que realizar por energía con y sin las instalaciones de transmisión en estudio.

C. Tarifación Marginal de Transmisión

Se fundamenta que en ambientes regulados, los precios marginales de energía envían las señales más fuertes de eficiencia para construir estructuras tarifarias. Los precios spot se determinan para cada lugar y para cada instante de tiempo en el punto de equilibrio entre la oferta y la demanda de energía y corresponden al costo de consumir o producir una cantidad adicional de energía en un punto dado del sistema en un instante determinado.

Cuando en el modelo de optimización no se consideran los costos de inversión estamos hablando de precios spot que incentivan una eficiencia económica de corto plazo.

Los precios spot son definidos para un determinado nivel de carga, para un determinado conjunto de instalaciones de transmisión disponibles y para

una determinada topología de la red. Esto significa que si alguno de estos parámetros cambia existirá una alteración en los precios marginales nodales. Los agentes del mercado son susceptibles a estos cambios en los precios de tal forma de modificar sus inyecciones de potencia para maximizar el bienestar.

2.2. Teoría de Juegos Aplicada a Tarifación de la Transmisión

2.2.1. Teoría de Juegos

En varias de las referencias se utiliza la Teoría de Juegos para simular situaciones de los mercados eléctricos competitivos. Temas como: la simulación del mercado, la planificación de la expansión, análisis de las transacciones de transmisión, la repartición de cargos complementarios, la repartición de costos totales de transmisión y la formación de coaliciones entre los agentes del mercado han sido estudiados en varios trabajos técnicos.

En forma general, para modelar un mercado eléctrico, se puede decir que la estrategia que se sigue a través de la teoría de juegos es la siguiente:

- Identificar a los jugadores y sus posibles estrategias.
- Identificar posibles coaliciones entre los jugadores.
- Calcular las transacciones y beneficios económicos relacionados con cada coalición.
- Identificar de esas coaliciones, cuales son posibles de ser formadas.
- Establecer esas coaliciones que maximicen el beneficio del mercado.

Se reconocen dos tipos de juegos:

1. Juegos No Cooperativos: En este tipo de juegos cada participante o agente hace un manejo estratégico de las situaciones a las que se ven enfrentados en la competencia, con el objeto de maximizar sus objetivos individuales. En este tipo de juegos los participantes no realizan acuerdos entre ellos para coordinar las estrategias.
2. Juegos Cooperativos: En este tipo de juegos las estrategias son coordinadas entre los participantes del juego o de una coalición para lograr el beneficio máximo del grupo y de sí mismos.

La teoría de juegos no cooperativos es la más recomendada para situaciones de interacciones competitivas. En cambio la teoría de juegos cooperativos es la más indicada para situaciones en las que el acuerdo y la coordinación entre los agentes del mercado son necesarios. Esta última es la más utilizada para el problema de asignación de costos de transmisión.

2.2.2. Teoría de Juegos Cooperativos

La teoría de juegos cooperativos se utiliza tanto para problemas de asignación de costos entre participantes que usan un mismo servicio (como por ejemplo costos de transmisión), como para problemas de repartición de beneficios.

La teoría de juegos cooperativos ha sido utilizada para resolver distintos problemas dentro de los mercados eléctricos cooperativos en donde distintos agentes actúan estratégicamente, frente a los desafíos del mercado, con el objetivo de obtener los mayores beneficios posibles.

Esta teoría de juegos cooperativos ha sido aplicada, principalmente, para asignación de costos de transmisión ya que es una etapa en la cual es más eficiente actuar y recibir el servicio en conjunto que por separado. Distintos métodos de teoría de juegos han sido aplicados para este problema (puntos de equilibrio) como son: Valor de Shapley, Núcleo, Aumann - Shapley.

Como ejemplo, se presenta la formulación de la repartición de los costos de transacciones bilaterales tipo wheeling utilizando teoría de juegos cooperativos:

Suponiendo que existen n participantes en el juego de repartición de los costos de las transacciones de transmisión que se dan en una coalición. El juego queda determinado por:

$$(N, C, X) \quad (1)$$

Donde:

$N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ = Es el conjunto de jugadores.

$C(S)$ = Es la función de costos de transmisión para la coalición S .

X = Es el set de vectores con los costos para cada coalición, $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Los agentes pueden unirse formando coaliciones $S, S \subset N$, sobre la base de compromisos, de tal forma que cada coalición puede actuar como un agente autónomo. El vector de costos \bar{x} , debe satisfacer las condiciones de racionalidad:

Racionalidad Global:

$$\sum_{i \in N} x_i = C(N) \quad (2)$$

Racionalidad Individual:

$$x_i \leq C(i), \quad \forall i, i \in N \quad (3)$$

Las dos expresiones anteriores indican que ningún agente o coalición de agentes, debe tener un costo mayor que su costo alternativo de participar sólo o *stand alone cost*, y la asignación de los costos resultante del juego para todos los jugadores debe ser idéntica a los costos totales del sistema de transmisión. Esto último se conoce como "break-even condition" u "optimalidad de pareto".

La característica de economías de escala propia de la transmisión, se modela a través de la siguiente propiedad estrictamente convexa:

$$C(S \cup \{i\}) - C(S) \geq C(T \cup \{i\}) - C(T), \quad (4) \\ i \in N, S \subset T \subset N - \{i\}$$

La función de costos también tiene la característica de ser monótona y subaditiva, lo cual se modela como sigue:

$$C(S) \leq C(T), \quad \forall S, T \subset N, T \supset S \quad (5)$$

$$C(R \cup S) \leq C(R) + C(S) \quad (6)$$

Generalmente, se formula el problema dual al presentado en(1), definiendo una función característica de beneficio $V(S)$ como ahorros de costos producto de la cooperación versus la acción individual. El problema dual queda formulado entonces:

$$(N, V, Y) \quad (7)$$

Donde:

La función de beneficio se define como:

$$V(S) = \sum_{i \in S} C(i) - C(S) \quad \forall S, S \subset N \quad (8)$$

Y = Es el set de vectores con los beneficios .

$$\bar{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$$

En forma análoga a \bar{x} , el vector de beneficios \bar{y} , debe satisfacer las condiciones de racionalidad:

Racionalidad Global:

$$\sum_{i \in N} y_i = V(N) \quad (9)$$

Racionalidad Individual:

$$y_i \geq 0, \quad \forall i, i \in N \quad (10)$$

El costo correspondiente a cada participante puede ser determinado de la siguiente manera:

$$x_i = C(i) - y_i \quad (11)$$

El resultado del juego es entonces la configuración de pagos que realiza cada agente por los servicios de transmisión. Pero existe una solución o vector de pagos para cada posible configuración δ de las coaliciones. Se define entonces al *Núcleo* del juego como el conjunto de todas las combinaciones entre la configuración de las coaliciones y sus pagos resultantes, tal que:

$$X(T) \leq C(T); \quad \forall T \subset N, \text{ con } X(T) = \sum_{i \in T} x_i \quad (12)$$

Este concepto de solución es el más simple de todos los conceptos de solución de un juego cooperativo. Ya que consiste de un conjunto de pagos 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.

3. MÉTODO DE AUMANN SHAPLEY

La teoría de juegos propone interesantes conceptos, métodos y modelos que pueden ser utilizados en el análisis de la interacción entre los diferentes agentes en mercados competitivos. Así mismo, pueden usarse en la solución de los conflictos que causa esa interacción, como, por ejemplo, los que aparecen en los mercados de electricidad. La teoría de juegos cooperativos es la más conveniente para solucionar problemas de asignación de costos, ya que su objetivo es repartir un recurso entre varios agentes. Los mecanismos basados en la teoría de juegos cooperativos se comportan bien en términos de justicia, eficiencia, y estabilidad, cualidades requeridas para la correcta asignación de los costos de la red de transporte.

El objetivo, de los juegos cooperativos, es repartir un recurso (o costo) entre un conjunto de agentes

que se benefician de él o lo causan. Este es precisamente el caso de las redes de transporte, por lo cual, la teoría de juegos cooperativos es una herramienta apropiada para resolver el problema de la asignación de los costos de red con vistas a determinar los cargos complementarios.

Las características de las asignaciones basadas en el valor de Shapley, como la asignación Aumann - Shapley, parecen apropiadas por ser una asignación justa. A continuación se realiza una explicación de la asignación de Shapley en base a la asignación incremental del costo. El conocimiento de estas dos asignaciones constituye una base necesaria para el entendimiento de la asignación de Aumann - Shapley, explicada y propuesta posteriormente.

3.1. La Asignación Incremental

La asignación incremental del costo es una forma sencilla de asignar la totalidad de los costos en un reparto. En esta asignación se irían añadiendo uno a uno todos los agentes del sistema hasta considerar a todos, de forma que cada agente pagaría el incremento del costo que produjera su inclusión en el sistema. A continuación un ejemplo:

Sea una función de costo:

$$T(b) = T(b_1, b_2, b_3) = b_1 + (b_2 + b_3)^3$$

Con unos valores de b tales que $b_1 = 1; b_2 = 2; b_3 = 1$, el costo a asignar será:

$$T(1,2,1) = 1 + (2 + 1)^3 = 28$$

Una asignación incremental del costo asignaría a cada agente el incremento del costo que causará su inclusión. En la Tabla 1 puede verse el costo asignado a cada agente, notado por $T(i)$, donde $i = 1,2,3$.

TABLA 1: Asignación Incremental del Costo

AGENTES	T(b)	T(i) = T(b)
1	1	T(1) = 1
1,2	1+2 ³ = 9	T(2) = 8
1,2,3	1+3 ³ = 28	T(3) = 19

Esta asignación tiene una limitación fundamental: el costo asignado a cada agente depende intrínsecamente del orden de entrada en el sistema. Puede verse en la Tabla 2 lo que pasaría si se cambia el orden de entrada por 1 - 3 - 2.

TABLA 2: Asignación Incremental del Costo con Distinto Orden

AGENTES	T(b)	T(i) = T(b)
1	1	T(1) = 1
1,3	$1+1^3 = 2$	T(2) = 1
1,3,2	$1+3^3 = 28$	T(3) = 26

Se aprecia que el agente 3 disminuye su pago de 19 unidades a 1 unidad por cambiar su posición de entrada con el agente 2. El agente 2, en cambio, pasaría de pagar 8 a pagar 26 unidades, por este mismo motivo. El costo total recuperado sería en ambos casos el mismo e igual al costo total a recuperar, 28 unidades.

3.2. La Asignación de Shapley

La asignación de Shapley trata de eliminar las limitaciones de la asignación incremental calculando los costos incrementales para todas las permutaciones de entrada de los agentes, como se aprecia en la Tabla 3. La asignación a cada agente sería la media de los incrementos de costo que produjera su inclusión en cada posible permutación.

TABLA 3: Asignación de Shapley

SECUENCIA	T(1)	T(2)	T(3)
1,2,3	1	8	19
1,3,2	1	26	1
2,1,3	1	8	19
2,3,1	1	8	19
3,1,2	1	26	1
3,2,1	1	26	1
PROMEDIO	1	17	10

Esta asignación es intuitivamente justa, al permitir a todos los agentes ser primero, segundo, etc. Su mayor problema es el esfuerzo computacional, al aumentar las posibles combinaciones exponencialmente con el número de agentes.

Además, no es del todo justa. En el ejemplo, el costo asignado al agente 2 debería ser el doble del asignado a 3, al ser el doble y estar ambos en la misma posición en la función de costo.

Para corregir esta última limitación de la asignación de Shapley, se permite a los agentes más pequeños entrar al sistema tras la inclusión de sólo una fracción del agente mayor. De esta forma, se divide en el ejemplo al agente 2 en dos subagentes, 2a y 2b, de tamaño = 1. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4: Asignación de Shapley con Partición de Agentes

SECUENCIA	T(2a)	T(2b)	T(3)
2a,2b,3	1	7	19
2a,3,2b	1	19	7
3,2a,2b	7	19	1
3,2b,2a	19	7	1
2b,2a,3	7	1	19
2b,3,2a	19	1	7
PROMEDIO	9	9	9

Ahora, el cargo unitario correspondiente a cada uno es el mismo. Esto es lo deseado, como puede observarse en la función de costo (b_1 y b_2 están sumados y elevados a la misma potencia). El resultado es más justo pero el número de permutaciones a considerar sería mayor aún. En la Figura 2 pueden observarse algunas de las posibles trayectorias para un sistema donde dos agentes se han dividido en varios sub-agentes.

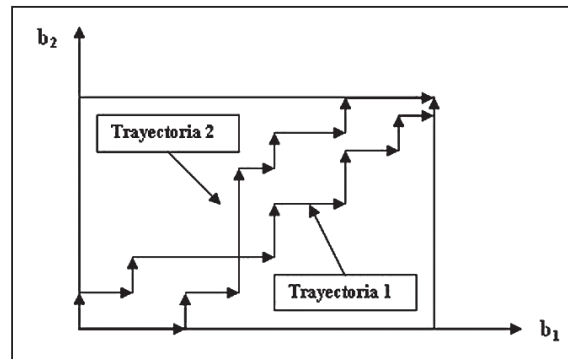


FIGURA 2: Trayectorias Alternativas en la Asignación de Shapley Modificada

3.3. La Asignación Aumann - Shapley

La idea de la asignación Aumann - Shapley es dividir todos los agentes en partes infinitesimales, todas ellas de tamaño igual, como se aprecia en la Figura 3. Con esto, se busca aprovechar al máximo las cualidades de justicia de la asignación de Shapley modificada.

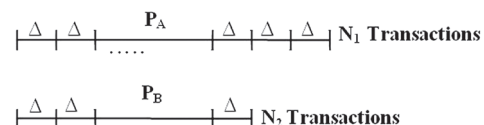


FIGURA 3: Particiones Infinitesimales - Método Aumann - Shapley

Como consecuencia del hecho de que existirían muchas más permutaciones posibles, el costo

computacional de aplicación del método aumentaría enormemente en principio. Sin embargo, el problema computacional desaparece al poder simplificar la asignación de Shapley modificada en dos aspectos:

- a) El costo incremental de la inclusión de un agente infinitesimal puede aproximarse por su costo marginal. Por ejemplo, si se supone que una fracción b^* de todos los agentes ha sido ya incluida en la coalición, y que una partición ϵ_i del agente i es la próxima en entrar, el incremento del costo será:

$$\Delta T(b^*, \epsilon_i) = T(b^*, \epsilon_i) - T(b^*) \approx \left. \frac{\partial T(b)}{\partial b_i} \right|_{b=b^*} \cdot \epsilon_i \quad (13)$$

- b) Al ser los segmentos infinitamente pequeños y considerar infinitas partes, una vez se haya incluido un gran número de partes infinitesimales, en la inmensa mayoría de las ordenaciones posibles las partes incluidas se habrán repartido entre los distintos nodos en proporción al tamaño de los agentes situados en los mismos. Por ejemplo, cuando se haya incluido un cierto porcentaje del total de partes infinitesimales, y un agente sea el doble de grande que otro, el número de partes infinitesimales consideradas del primer agente será aproximadamente el doble del número de partes infinitesimales consideradas del segundo. Esta proporción se guardará para la inmensa mayoría de las combinaciones que se puedan generar aleatoriamente. Al seguirse un crecimiento homotético, puede considerarse que todas las posibles trayectorias de inclusión de partes infinitesimales convergen en una única trayectoria, una en la que se mantienen las proporciones de generación o demanda incluidas en cada nodo. Esta trayectoria corresponde a la "diagonal" del espacio de agentes, mostrada en la Figura 4 para el caso anterior de dos agentes.

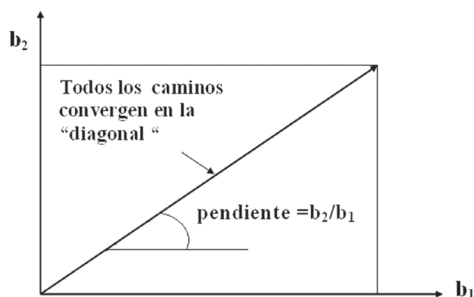


FIGURA 4: Trayectorias en el Espacio de Agentes cuando el Tamaño de los Sub-Agentes tiende a Cero

Así, el cálculo se reduce a la realización de una integral de línea de la función de costo. En esta integral, el número de partes infinitesimales consideradas de

cada agente se va incrementando homotéticamente, según un parámetro de integración λ . La integral tomaría la siguiente fórmula:

$$T(i) = b_i x \int_0^1 \frac{\partial T(\lambda b)}{\partial b_i} d\lambda \quad (14)$$

Donde λ es el parámetro de integración. Esta ecuación representa la asignación de Aumann - Shapley, que cumple con las propiedades deseadas de recuperar el costo total e inducir a la eficiencia económica.

3.4. Modelado

El método desarrollado para este trabajo consiste en repartir los costos de transmisión entre todas las demandas únicamente, por ser el concepto utilizado en el mercado eléctrico ecuatoriano. En tal sentido, el modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Min } Z(\lambda) = \sum_{k=1}^K c_k \times \sum_{i=1}^n |\beta_{ki} (d_i \lambda - \bar{g}_i)| \quad (15)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \lambda d_i = \sum_{i=1}^n \bar{g}_i \quad (16)$$

$$\bar{g}_i \leq g_i \quad (17)$$

Donde:

- c_k = Es el costo por unidad de potencia de la línea k .
- β_{ki} = Es el elemento k -ésimo de la matriz de sensibilidad.
- λ = Es el parámetro de partición de la demanda.
- \bar{g}_i = Es la variable de decisión generación que resulta en cada iteración.
- g_i = Es la generación total en cada nodo.
- d_i = Es la demanda total en cada nodo.

El valor c_k de la función objetivo (15), puede ser determinado de dos maneras:

$$c_k = \frac{\text{costo anual}_k}{F_k}, \text{ cuando se asigna el costo unitario de la línea } k \text{ por completo. } F_k \text{ es el flujo total que circula por la línea.}$$

$$c_k = \frac{\text{costo anual}_k}{\bar{F}_k}, \text{ cuando se asigna el costo unitario de la línea } k \text{ únicamente de la fracción de la capacidad}$$

línea que está siendo utilizada. \bar{F}_k es la capacidad nominal de la línea.

Para este trabajo se modeló la primera alternativa de función objetivo, es decir, se recupera la totalidad de los costos de transmisión, sin necesidad de cargos complementarios.

Cabe mencionar que lo más adecuado sería repartir únicamente la capacidad utilizada por este método y el cargo complementario, que sería pequeño, a través de otro método de reconciliación de ingresos.

3.5. Determinación de los Costos de Transmisión

Para cada iteración, los costos de transmisión asignados a una fracción de la demanda se los determina como el producto del multiplicador de lagrange de la ecuación (16) para cada nodo y la fracción de la demanda en ese nodo λd_i .

Los costos totales de transmisión asignados a cada demanda, se los determina como la suma de los costos asignados a una fracción infinitesimal de esa demanda en cada iteración del modelo.

4. APLICACIÓN EN SISTEMAS DE PRUEBA

El método fue aplicado en sistemas eléctricos de prueba de 6 y 14 nodos, de tal forma de verificar su validez y analizar sus resultados.

4.1. Aplicación en Sistemas de Prueba de 6 Nodos

El sistema modelado se presenta en la Figura 5. En este ejemplo se tratan de repartir costos totales de transmisión por US\$ 12 800,00.

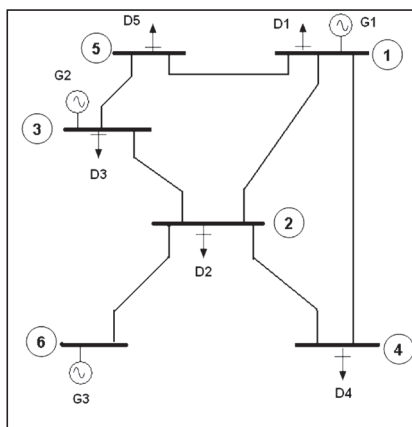


FIGURA 5: Sistema de Prueba de 6 Nodos

Los resultados de la aplicación del método de Aumann - Shapley para repartir los costos de transmisión entre las demandas, se muestra en la Tabla 5.

TABLA 5: Repartición por AS para Sistema de 6 Nodos

Nodo	Generación MW	Demanda MW	Costo Asignado \$	Costo Unitario de Transmisión \$/MW
Nodo 1	150,00	80,00	460,12\$	5,75\$
Nodo 2		240,00	4 312,19\$	17,97\$
Nodo 3	360,00	40,00	23,00\$	0,58\$
Nodo 4		160,00	4 411,29\$	27,57\$
Nodo 5		240,00	3 593,40\$	14,97\$
Nodo 6	250,00	0,00	0\$	0
TOTAL	760,00	760,00	12 800,00\$	

4.2. Aplicación en Sistemas de Prueba de 14 Nodos

El sistema modelado se presenta en la Figura 6. En este ejemplo se tratan de repartir costos totales de transmisión por US\$ 1 800,00.

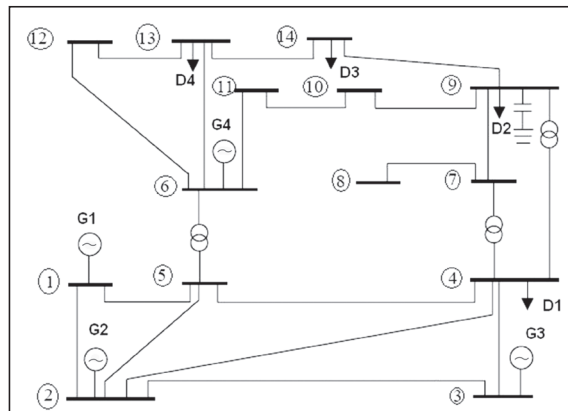


FIGURA 6: Sistema de Prueba de 14 Nodos

Los resultados de la aplicación del método de Aumann - Shapley para repartir los costos de transmisión entre las demandas, se muestra en la Tabla 6.

TABLA 6: Repartición de AS para Sistema de 14 Nodos

Nodo	Generación MW	Demanda MW	Costo Asignado \$	Costo Unitario de Transmisión \$/MW
Nodo 1	200,00	0,00		0,00 \$
Nodo 2	200,00	0,00		0,00 \$
Nodo 3	160,00	140,00	348,20 \$	2,49 \$
Nodo 4	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 5	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 6	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 7	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 8	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 9	0,00	140,00	537,84 \$	3,84 \$
Nodo 10	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 11	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 12	0,00	0,00		0,00 \$
Nodo 13	0,00	140,00	294,05 \$	2,10 \$
Nodo 14	0,00	140,00	618,99 \$	4,42 \$
TOTAL	560,00	560,00	1 799,08 \$	

5. APLICACIÓN PARA EL SNI ECUATORIANO

Para verificar la validez del método en sistemas eléctricos reales, se modeló el anillo de 230 kV del Sistema Nacional Interconectado ecuatoriano. Este sistema se muestra en la Figura 7.

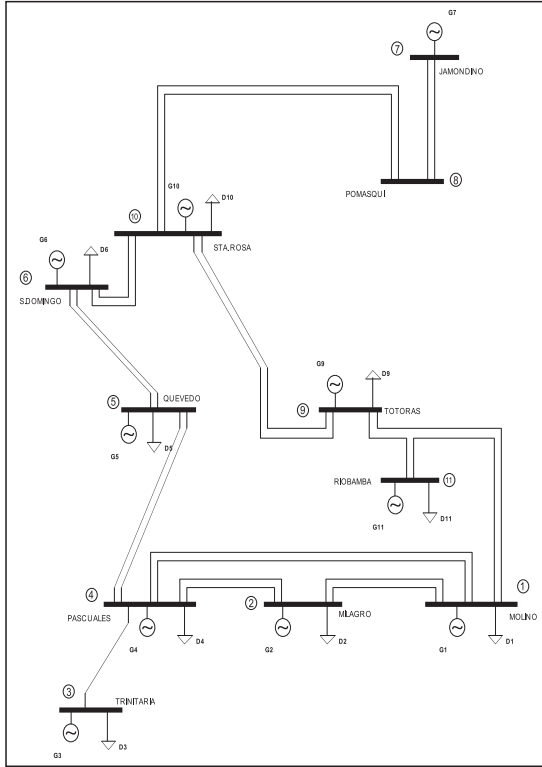


FIGURA 7: Anillo de 230 kV del Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano

En este ejemplo se tratan de repartir costos totales de transmisión por US\$ 729,70.

Los resultados de la aplicación del método de Aumann - Shapley para repartir los costos de transmisión entre las demandas, se muestra en la Tabla 7.

TABLA 7: Repartición de AS para SNI 130 kV

Nodo	Generación MW	Demanda MW	Costo Asignado \$	Costo Unitario de Transmisión \$/MW
Nodo 1	676,50	153,50	0,42\$	0,00\$
Nodo 2	130,00	278,00	112,84\$	0,41\$
Nodo 3	131,00	122,10	0,00\$	0,00\$
Nodo 4	266,00	529,20	179,46\$	0,34\$
Nodo 5	200,40	161,50	53,38\$	0,33\$
Nodo 6	10,00	105,30	58,01\$	0,55\$
Nodo 7	220,00	0,00	0,00\$	0,00\$
Nodo 8	0,00	0,00	0,00\$	0,00\$
Nodo 9	228,10	70,00	14,17\$	0,20\$
Nodo 10	162,30	564,40	210,56\$	0,37\$
Nodo 11	9,30	49,60	100,87\$	2,03\$
TOTAL	2 033,60	2 033,60	729,71\$	

6. ANÁLISIS CUALITATIVO DE RESULTADOS

Como se puede notar en la aplicación del método de Aumann - Shapley en los dos sistemas de prueba y en el anillo de 230 kV del SNI ecuatoriano, se logran recuperar la totalidad de los costos de transmisión.

El método considera las condiciones puntuales de operación de los sistemas, es decir, reparte los costos de transmisión a través de una medida de uso que considera la condición de operación. Lo anterior se refleja en una diferenciación espacial de los costos unitarios de transmisión, tal como se muestran en las Figuras 11, 12 y 13.

Es importante notar que las demandas que tienen mayor costo unitario de transmisión son aquellas que mayor uso hacen de la red de transmisión.

Es necesario hacer notar que, debido a la función objetivo modelada, se reparten los costos de toda la capacidad de las líneas aunque en los escenarios no se estén utilizando todas las capacidades. Lo adecuado es repartir con este método únicamente los costos correspondientes a la capacidad utilizada en cada escenario y el resto de los costos repartirlos por otro método más adecuado que reparte capacidad, como el de "estampilla postal".

7. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

En esta sección se realizará un análisis comparativo de los resultados que se obtuvieron de la aplicación del método de Aumann - Shapley para repartir los costos de toda la capacidad de transmisión y los resultados que se obtienen al repartir todos los costos de transmisión por el método de estampilla postal que, actualmente, se utiliza para repartir el cargo complementario en Ecuador.

En la Figura 8 se muestran los costos de transmisión asignados a la demanda de cada nodo en el sistema de prueba de 6 nodos.

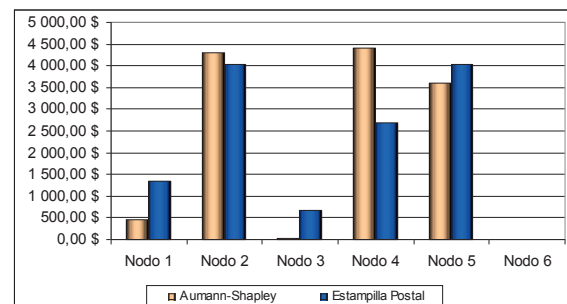


FIGURA 8: Costos de Transmisión para Sistema 6 Nodos

En la Figura 9 se muestran los costos de transmisión asignados a la demanda de cada nodo en el sistema de prueba de 14 nodos.

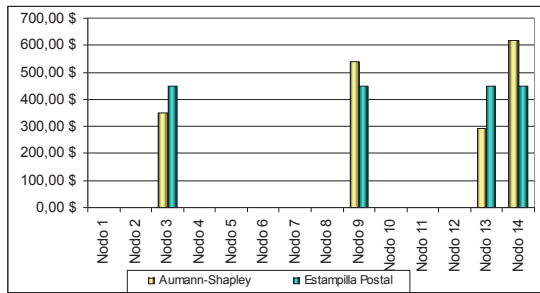


FIGURA 9: Costos de Transmisión para Sistema 14 Nodos

En la Figura 10 se muestran los costos de transmisión asignados a la demanda de cada nodo en el anillo de 230 kV del SNI ecuatoriano.

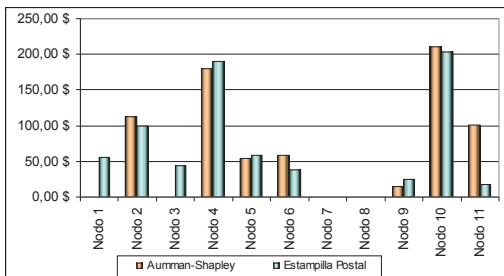


FIGURA 10: Costos de Transmisión para SNI 230 kV

En la Figura 11 se muestran los costos unitarios de transmisión de cada nodo en el sistema de prueba de 6 nodos.

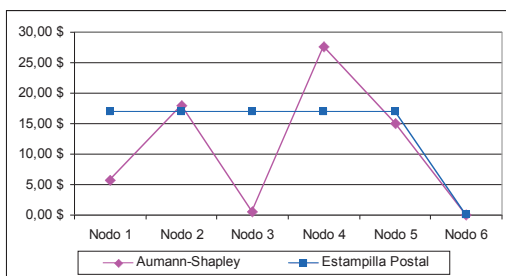


FIGURA 11: Peajes de Transmisión para Sistema de 6 Nodos

En la Figura 12 se muestran los costos unitarios de transmisión de cada nodo en el sistema de prueba de 14 nodos.

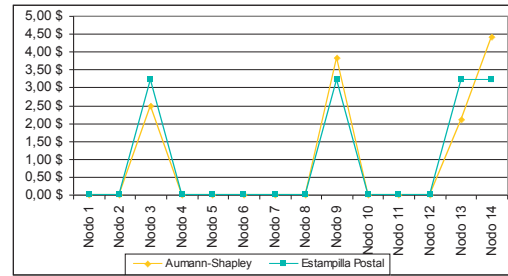


FIGURA 12: Peajes de Transmisión para Sistema de 14 Nodos

En la Figura 13 se muestran los costos unitarios de transmisión de cada nodo en anillo de 230kV del SNI ecuatoriano.

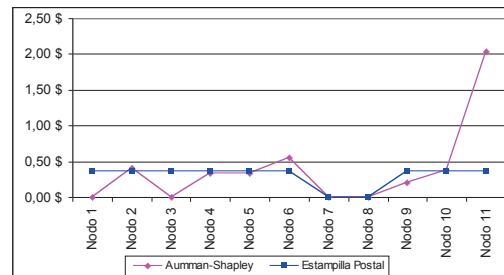


FIGURA 13: Peajes de Transmisión para SNI 230 kV

8. CONCLUSIONES

- Con la aplicación del método de Aumann - Shapley se lograron recuperar todos los costos de transmisión sin la necesidad de utilizar reconciliación de ingresos a través de métodos de repartición del cargo complementario.
- El método de Aumann - Shapley es un método que considera la diferenciación espacial de las tarifas de transmisión, sobre la base del uso de la red para cada escenario de operación de la red. En tal sentido las señales de ubicación que se obtienen son las correctas.
- El método de Aumann - Shapley puede ser considerado como un método adecuado de tarificación de la transmisión por todos los aspectos técnicos y económicos que considera su resolución.
- El método de Aumann - Shapley puede adaptarse a regulaciones que repartan únicamente la "capacidad utilizada" en cada escenario por una medida de uso de la red y el cargo complementario se lo reparta a través de un método que socialice los costos como el de "estampilla postal".

- Los resultados que se obtuvieron en sistemas de prueba como en el anillo de 230 kV del Ecuador, respecto de diferenciación espacial y reconciliación de ingresos, fueron correctos. En tal sentido se puede afirmar que el método aplicado es sólido y coherente.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] RUBIO F. J.; Metodología de Asignación de Costes de la Red de Transporte en un Contexto de Regulación Abierta a la Competencia, Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Comillas de Madrid - España, 1999.
- [2] SALAZAR G.; Tarifación Óptima de Servicios de Transmisión en un Mercado Competitivo de Energía Eléctrica, Tesis Doctoral, IEE - UNSJ, 2005.
- [3] RUDNICK H.; DANITZ F., ZOLEZZI J., WATTS D.; Use Based Allocation Methods for Payment of Electricity Transmission Systems, IEEE Proceedings on Power System Technology, Vol. 2, Octubre 2002.
- [4] DANITZ F. J.; Métodos de Asignación de Peajes de los Sistemas de Transmisión Eléctrica según el Uso de la Red, Memoria para optar el Grado de Ingeniero Civil de Industrias con Mención en Electricidad, Pontificia Universidad Católica de Chile – Santiago de Chile, Chile 2001.
- [5] PÉREZ ARRIAGA J.I., RUBIO Ordéiz F. J., PÉREZ Marín J., PUERTA GUTIÉRREZ J. F.; Tarifación Marginalista de los Servicios de Red: Comparación de Métodos de Asignación de Cargo Complementario, Actas de las 4tas. Jornadas Hispano - Lusitas de Ingeniería Eléctrica. Vol. 2, pp. 571 - 578. Julio 1995. Oporto, Portugal.
- [6] TSUKAMOTO Y., IYODA I.; Allocation of Fixed Transmission Cost to Wheeling Transactions by Cooperative Game Theory, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996, pp. 620 – 629.
- [7] FERRERO R.W., SHAHIDEHPOUR S.M., RAMESH V.C.; Transaction Analysis in Deregulated Power Systems Using Game Theory, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, Aug 1997, pp. 1340 – 1347.
- [8] ZOLEZZI J.; Asignación de Costos de Transmisión Vía Juegos Cooperativos y Formación de

Coaliciones, Tesis Doctoral, Pontificia Universidad Católica de Chile, Mayo 2002.

- [9] RODRIGUES JUNQUEIRA Max; Aplicação Teoría dos Jogos Cooperativos para Alocação Dos Custos de Transmissão em Mercados Eléctricos, Universidad Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, Brazil, Junio 2005.
- [10] MARTÍNEZ SÁNCHEZ Alfonso; Aplicación de la Teoría de Juegos a la Asignación de Costes de Red en el Mercado de Electricidad de la Unión Europea, Universidad Pontificia Comillas Madrid, Junio 2006.
- [11] JUNQUEIRA M., OLIVEIRA G.C., THOMÉ L.M., GRANVILLE S.; Transmission Cost Allocation Schemes for Electricity Markets: a Game - Theoretic Approach, Mercados de Energía/ PSR, Mayo 2006, Brasil.
- [12] Power Systems Research; Allocation of Transmission Service Costs, Brasil, Septiembre 2005.



Gabriel Salazar Yépez.- Nació en Quito, Ecuador. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico de la Escuela Politécnica Nacional en el 2000; y, de Doctor en Ingeniería Eléctrica del Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, en el 2005.

Actualmente, se desempeña como Coordinador del Área de Investigación y Desarrollo del CENACE y como profesor de la Maestría de Ciencias de la Ingeniería Eléctrica de la EPN. Sus Áreas de Investigación: Mercados Disputables de Energía, Transacciones Internacionales de Electricidad, Tarifación del Transporte, Teoría Económica de Regulación, Confiabilidad.



Sara Cangui Guamanzara.- Nació en Quito - Ecuador, es egresada de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional.

Actualmente realiza su tesis de grado en el Área de Investigación y Desarrollo del CENACE.