



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

EXPANSIÓN DE LAS INTERCONEXIONES INTERNACIONALES CONSIDERANDO
INCENTIVOS ECONÓMICOS CONFLICTIVOS ENTRE PAÍSES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

IVÁN ZIMMERMANN RODRIGUEZ-PEÑA

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO MORENO VIEYRA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FRANCISCO MUÑOZ ESPINOZA
EDUARDO PEREIRA BONVALLET

SANTIAGO DE CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: IVÁN ZIMMERMANN RODRIGUEZ-PEÑA
FECHA: 2019
PROF. GUÍA: RODRIGO MORENO VIEYRA

EXPANSIÓN DE LAS INTERCONEXIONES INTERNACIONALES CONSIDERANDO INCENTIVOS ECONÓMICOS CONFLICTIVOS ENTRE PAÍSES

En Sudamérica existe gran potencial de diversas tecnologías de generación, incluyendo hidroelectricidad, gas natural y tecnologías renovables no convencionales como la solar y la eólica. Una interconexión eléctrica multilateral entre los países Argentina, Bolivia, Chile y Perú resulta atractiva para aprovechar los beneficios económicos que traen estas oportunidades. El potencial de un plan regional de desarrollo e interconexión eléctrica podría generar réditos económicos para los países participantes. Sin embargo, la distribución de estos beneficios puede ser muy dispar que podría crear dificultades para lograr desarrollar interconexiones socialmente óptimas para la región.

En este estudio se analizan los incentivos económicos para una interconexión eléctrica multilateral entre Argentina, Bolivia, Chile y Perú. Para ello, se construyó un modelo que simula la operación económica de los sistemas eléctricos de estos cuatro países y que cuantifica los costos y beneficios de distintas configuraciones de interconexión. Para esto, se propone la construcción de cinco líneas que conectan a dichos países y la evaluación del impacto de ellas en los beneficios económicos de cada país. El estudio considera 32 casos de interconexión (2^5 dado que se ha considerado la construcción de la interconexión como una alternativa binaria de expansión) que presentan un impacto diferente según la operación de los sistemas en su conjunto. De esta manera, se analiza y propone una serie de estrategias para asignar los costos y beneficios generados de la interconexión según los casos de estudio. Así, mediante conceptos de teoría de juegos, se calcularán los incentivos competitivos y cooperativos de los países para lograr una interconexión óptima. Con el fin de obtener un indicador del comportamiento de los agentes, al enfrentarse a un escenario de esta naturaleza y la pérdida de eficiencia que trae, se calcularon los precios de la anarquía para cada equilibrio competitivo.

Finalmente, el estudio revela que el precio de la anarquía es estrictamente mayor que cero, ya que bajo ningún esquema de distribución de costos y beneficios se alcanza el plan de interconexiones socialmente óptimo cuando no hay cooperación entre países. No obstante, sí existen incentivos cooperativos para lograr un plan óptimo de interconexión concluyendo así la necesidad de promover la cooperación entre países. Además, la metodología utilizada podría ser aprovechada para investigar otros elementos de los sistemas de potencia y ayudar en la toma de decisiones al implementar políticas.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo General	1
1.2. Objetivo Específico	1
2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Interconexiones internacionales	3
2.2. Asignaciones de costos y beneficios	4
2.3. Teoría de juegos	5
2.3.1. Teoría de juegos cooperativa	5
2.3.2. Teoría de juegos no cooperativa	6
2.3.3. Precio de la anarquía	7
2.4. Estudios similares	7
3. Metodología	8
3.1. Topología del sistema	8
3.2. Modelo matemático	8
3.3. Datos de entrada	11
3.4. Procesamiento de beneficios	15
3.5. Asignación de costos y beneficios	16
3.5.1. Estrategia 1	17
3.5.2. Estrategia 2	18
3.5.3. Estrategia 3	19
3.5.4. Estrategia 4	20
3.5.5. Estrategia 5	21
3.5.6. Estrategia 6	22
3.5.7. Estrategia 7	23
3.6. Cálculo de incentivos	23
3.6.1. Equilibrios de Nash	23
3.6.2. Precio de la anarquía	25
3.6.3. Juegos cooperativos	26
4. Resultados, análisis y discusión	28
4.1. Resultados y análisis	28
4.1.1. Estrategia 1	31
4.1.2. Estrategia 2	32
4.1.3. Estrategia 3	33

4.1.4. Estrategia 4	33
4.1.5. Estrategia 5	34
4.1.6. Estrategia 6	35
4.1.7. Estrategia 7	35
4.2. Discusión	36
Conclusión	38
Bibliografía	44
A. Costos marginales promedios resultantes del modelo de simulación	45
B. Resultados de las estrategias	46
C. Proceso para calcular equilibrio cooperativo	53

Capítulo 1

Introducción

El potencial de energías renovables de Argentina, Bolivia, Chile y Perú genera expectativa para lograr, en la región, un futuro marcado por sistemas eléctricos bajos en generación térmica y abastecidos principalmente de tecnologías renovables no convencionales. En miras de esto, se avizoran una serie de desafíos de distinta índole: en primer lugar, el potencial renovable de cada país excede su demanda interna, e incluso sus proyecciones; por otro lado, la intermitencia en su generación obliga a explorar diferentes alternativas para abordar los desafíos ligados a la flexibilidad del sistema.

Frente a esto, resulta atractivo evaluar y analizar una propuesta de expansión de la transmisión a nivel regional para aprovechar las oportunidades económicas ligadas a un mejor aprovechamiento del potencial renovable [1][2]. Un análisis enfocado en los incentivos que existen para implementar las distintas posibilidades de interconexión permitiría evaluar el uso de distintas estrategias de asignación de costos y beneficios desde el punto de vista de su eficiencia.

1.1. Objetivo General

Analizar los incentivos económicos para una interconexión eléctrica multilateral entre Argentina, Bolivia, Chile y Perú, evaluando su eficiencia.

1.2. Objetivo Específico

- Crear un modelo para la operación de los sistemas eléctricos de los 4 países y que permita simular los efectos de las interconexiones propuestas.
- Establecer estrategias de locación de costos y beneficios que doten de resultados para analizar los incentivos de los países.
- Calcular los equilibrios competitivos y cooperativos de los planes, en miras de estudiar la eficiencia de estos.

Del análisis se espera evaluar la eficiencia de las distintas estrategias en cuanto a sus equilibrios competitivos y, asimismo, definir la existencia de incentivos cooperativos estables para la concreción de la interconexión multilateral. Para lograr esto se hará uso de conceptos y métodos de teoría de juegos tales como equilibrios de Nash y juegos cooperativos. Además, se utilizará el concepto de precio de la anarquía el cual entrega indicadores de costos por ineficiencia al competir. Los datos para el análisis mencionado se obtienen a partir de un modelo de despacho que entrega los beneficios económicos de cada uno de los países según los 32 casos de interconexión estudiados. Las estrategias de asignación de costos y beneficios se hacen en función de los costos y beneficios de transmisión, manteniendo sin repartir los beneficios de consumidor y productor.

El trabajo se divide en ocho secciones. En la primera, se establece el marco teórico y el estado del arte producto de una revisión bibliográfica. En la segunda, se explica el modelo de simulación, su construcción y los supuestos utilizados. La cuarta sección explica y especifica las estrategias de asignaciones de costos y beneficios que se utilizarán con los resultados del modelo. En la quinta, se expone la forma en que se calcularán los distintos equilibrios competitivos y cooperativos, mencionando el criterio que determinará la eficiencia de cada estrategia. La sexta sección se centra en mostrar los resultados y los análisis, con una posterior discusión e interpretación de estos. Finalmente, en la octava sección, se da paso a las conclusiones del estudio comparándolas con otras investigaciones anteriores y mencionando posibles trabajos futuros en torno a la temática abordada.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1. Interconexiones internacionales

El aumento sustantivo en la capacidad instalada de generación renovable en los sistemas eléctricos ha generado una cantidad no menor de beneficios que se han visto aumentados por metas gubernamentales en la reducción de precios y emisiones [2][3]. Estas tecnologías están llamadas a ser componentes claves en los futuros sistemas energéticos [4]; las cuales, no obstante, traen consigo una serie de desafíos para su incorporación al sistema de manera segura y confiable. Dos fuentes renovables que han ingresado agresivamente en el mercado energético son las de generación intermitente, tales como la solar y la eólica. Las fluctuaciones en la generación eléctrica de estas tecnologías, muchas veces provocadas por eventos climáticos, presentan un problema de flexibilidad producto de las complicaciones de coincidir demanda con producción [4]. La producción de energía renovable genera una baja en el precio de la energía, sin embargo, esto ocasiona un estrés extra a la red, provocando que opere en sus límites de operación [5].

Una alternativa importante ante estas problemáticas son las interconexiones internacionales. Así, los distintos ciclos de producción y consumo que existen entre los países pueden aprovecharse de mejor manera con un intercambio energético internacional. Todo esto permite disminuir los precios en el largo plazo y reducir la emisión de gases de efecto invernadero debido al mejor uso de los recursos de cada país [6][7].

El caso de estudio involucra a los países sudamericanos Chile, Bolivia, Argentina y Perú quienes tienen metas gubernamentales para aumentar su producción energética mediante tecnologías de generación renovable [8][9][10][11]. En [2] se explica cómo una planificación de la transmisión proactiva y eficiente puede acelerar y ayudar a lograr estas metas. En [1] van más allá y explican cómo una interconexión regional puede reducir los costos de alcanzar los objetivos. A diferencia de Europa, o Estados Unidos, actualmente en la región no existen instituciones supranacionales que podrían allanar el camino a un plan de expansión de transmisión regional [12][13].

Respecto a la interconexión eléctrica en la región, [6] presenta un estudio donde se ex-

plicitan los beneficios en sus diversas dimensiones y en [14] se evalúan los resultados de dos interconexiones en la región Andina ya implementadas (Ecuador-Colombia y Colombia-Venezuela). En este último análisis, se valora la reducción de precios, beneficios ambientales y de incentivos de instalación de energías renovables en el sector. A pesar de estas apreciaciones, no es clara la forma de implementar y ejecutar una expansión de la transmisión internacional ya que, aunque los beneficios globales netos entre todos los integrantes de la expansión sean positivos, es muy probable que estén asimétricamente distribuidos entre los países o incluso, existan beneficios netos negativos para alguno de los participantes [15][16][17][5].

En lo que respecta a inversión y planificación de la transmisión, debe considerarse factores en los cuales la eficiencia de implementación de los planes jueguen un rol fundamental ya que, de lo contrario, se corre el riesgo de un análisis impreciso y de obviar costos al incluir distintos escenarios [13]. En los casos de expansiones de transmisión regionales, donde los intereses son divergentes, resulta problemático (y en algunas ocasiones incompatible) implementar una inversión de transmisión eficiente en relación a la inversión total del plan [18]. La diferencia entre el valor presente neto esperado del total de beneficios y los costos de realizar dicha inversión se puede maximizar mediante un plan que permita ejecutar la expansión de transmisión integrando los intereses divergentes que podrían aparecer.

2.2. Asignaciones de costos y beneficios

Una forma de abordar la expansión con intereses divergentes es mediante mecanismos de asignación de costos y beneficios [18]. Una inadecuada estrategia de asignación de costos puede bloquear un proyecto o generar incentivos perversos arriesgando la implementación de la expansión [12]; en segundo lugar, puede ocasionar una significativa distorsión de las ganancias globales [19], y también, puede generar la oposición de participantes ante los proyectos llevando a la sub-instalación de infraestructura necesaria para el sistema [20]. Debido a estos riesgos, resulta imperativo encontrar estrategias focalizadas en el análisis de los incentivos de cada país para ejecutar el plan de transmisión óptimo [15].

Para esto, es necesario comprender de manera más profunda el concepto de asignación de costos y sus implicancias. La *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) define que “el costo de la infraestructura de transmisión debe ser localizado a aquellos participantes del plan de transmisión que se beneficien de este, de manera que se puedan al menos estimar estos beneficios” [21]. A su vez, resulta importante compensar a aquellos actores que se vieran perjudicados con la implementación del plan y que pudiesen bloquear y/o perjudicar la eficiencia del plan de expansión [19][15]. La forma en que se computan los beneficios toma un rol fundamental, ya que depende de lo evaluado (beneficios económicos, de seguridad, ambiental, etc.) [12] y el criterio utilizado en la asignación de costos y beneficios [22]. En este contexto, el criterio de análisis costo-beneficio evalúa los beneficios de un plan determinado desde un enfoque monetario. Este es utilizado principalmente en proyectos de infraestructura y en políticas públicas, sin embargo, el criterio no es apropiado cuando se consideran impactos intangibles. Esencialmente se comparan trade-offs donde el total de beneficios debe exceder el total de costos para definir si un proyecto es factible o no [22].

Si bien anteriormente se identificaban los beneficiarios según el uso físico que se diera a la red [23], actualmente los estudios utilizan otros criterios donde se identifican según los beneficios económicos que reciben de los proyectos de expansión de transmisión [24]. Este cambio de paradigma se produjo ya que, identificar beneficiarios según uso, era fácilmente reducido a la socialización de asignación de costos de transmisión, bajo el pretexto de que la red era utilizada por todos los participantes. Esto obliga a explorar distintas alternativas de asignación de costos capaces de superar métodos que pierden eficiencia y ecuanimidad [22]. Los mecanismos para el cálculo de beneficios deben identificar las diferentes externalidades que se generan en los proyectos de expansión dado que pueden elevar los beneficios en un largo plazo [2] [12]. Sin embargo, métodos como TOOT o PINT [24], e incluso otros más modernos, fallan en identificar y considerar externalidades llevando a una asignación de costos y beneficios imprecisa e ineficiente.

2.3. Teoría de juegos

La teoría de juegos presenta la característica de ser un mecanismo eficiente, justo y estable [25] para evaluar una asignación de costos en la cual cada país vele por sus intereses y beneficios. Durante muchos años el lado cooperativo de la teoría de juegos estuvo dominado por el lado no cooperativo [26]. Mientras que el primer lado permite la negociación y acuerdos entre los participantes [27] y, por tanto, su estudio permite entender cómo se comportan estas coaliciones [26], los juegos no cooperativos no permiten negociaciones ni acuerdos entre las partes, quedando sujetos a las decisiones individuales de los participantes para maximizar sus beneficios y reducir sus costos [19].

2.3.1. Teoría de juegos cooperativa

Los métodos presentes en las referencias [25][26][23][27] utilizan los conceptos básicos de teoría de juegos cooperativa. Esta se compone de: un conjunto de N jugadores y una función $v: 2^N \rightarrow R$, de modo que $v(\emptyset)=0$, donde un subconjunto S de N es lo que se denomina coalición y $v(S)$ es el valor de la coalición S . En términos simples, $v(S)$ es lo máximo que puede ganar una determinada coalición sin la ayuda de otros jugadores por fuera de esta [29]. En un juego de coaliciones se deben cumplir las siguientes tres condiciones: $x(i) \leq v(i)$, donde i es el i -ésimo participante del juego y x corresponde al costo localizado para dicho agente; $x(S) \leq v(S)$, siendo S una determinada coalición; y finalmente $x(N) = v(N)$. Cualquier vector de pagos (los beneficios localizados a cada participante) que cumpla estas tres condiciones se denomina imputaciones y, por lo tanto, se dice que este juego tiene una base no vacía (*non-empty core*) [23]. Dentro de este concepto, existen distintos métodos para resolver un juego cooperativo y obtener un vector de imputaciones que permita implementar una solución eficiente de expansión de transmisión. Algunos métodos reconocidos de juegos cooperativos son el *Shapley Value* [25][13][28][29][30] y el índice Gately [31], donde identifican a los actores que más se ven beneficiados con la expansión y los que más contribuyen a los beneficios de la coalición, definiendo así la asignación de costos y compensaciones que se deben para cumplir con eficiencia, justicia y estabilidad.

Un aspecto para tomar en cuenta son las limitaciones que supone entender que la gran coalición (el caso en el que todos los participantes del juego aceptan cooperar) siempre se va a formar, ya que pueden existir externalidades positivas que generen incentivos a algunos actores que les impulsen a no formar parte de ninguna coalición por concepto de *free riders* [26]. A priori, al no existir previamente una interconexión significativa entre ninguno de los participantes (solo Argentina y Chile presentan una línea pequeña de exportación de Chile a Argentina), no debieran existir externalidades positivas para aquellos países que no formen parte de una coalición.

El análisis de incentivos cooperativos se obtiene haciendo uso de las restricciones de racionalidad, las cuales son una serie de desigualdades que en caso de cumplirse la regla de asignación de costos y beneficios estudiada estaría dentro del núcleo del juego [32]. Así, todos los participantes tendrían intereses de participar del plan propuesto o lo que se denomina formar la gran coalición. Existen tres tipos de restricciones de racionalidad que deben cumplirse: las de racionalidad individual, las de racionalidad coalicional y la restricción de racionalidad colectiva. Cada participante del juego cooperativo buscará mejorar su posición, en el primer tipo de restricciones de racionalidad, se da una manera individual, sin embargo, en el segundo, se refiere a que, las distintas subcoaliciones posibles, si tuvieran incentivos para desviarse de la gran coalición, se reunirán entre sí para percibir mayores ganancias. Por último, la restricción de racionalidad colectiva, consiste en que los participantes de la gran coalición deben recibir los beneficios totales de esta. En casos que existan *free riders* recibiendo beneficios por fuera, complica el cumplimiento de dicha restricción, ya que existiría una fuga de beneficios que los participantes del juego no recibirían [15].

2.3.2. Teoría de juegos no cooperativa

Con respecto a la teoría de juegos tradicional que se particulariza por ser no cooperativa, cada jugador elige de forma simultánea una estrategia y, la combinación de las estrategias elegidas, determina la ganancia de cada uno. La representación en forma normal de un juego se define según: los jugadores en el juego, las estrategias que dispone cada jugador y la ganancia de cada jugador en cada combinación posible de estrategias [33]. Lo que define a un juego no cooperativo es que cada parte elija una acción a seguir sin conocer las decisiones de los demás [33].

Dentro de la teoría de juegos no cooperativa suele utilizarse el concepto de equilibrio de Nash. Una manera de fundamentar su definición es el argumento de si la teoría de juegos ofrece una solución única a un determinado problema, esta solución debe ser un equilibrio de Nash. Para que esto ocurra, cada jugador debe estar dispuesto a elegir la estrategia que lleve a dicha solución, para lograr la mejor respuesta de cada jugador a las estrategias escogidas por los otros jugadores. En otros términos, si un conjunto de estrategias no constituye un equilibrio de Nash, significa que al menos un jugador tendrá un incentivo para desviarse de la solución planteada [33]. Un juego puede tener múltiples equilibrios de Nash ya que existe la posibilidad donde la teoría de juegos no ofrezca una solución única, existiendo algunos, donde un equilibrio sobresale como la solución más atractiva. Por tanto, la existencia de múltiples equilibrios de Nash no es un problema en sí mismo, sino que este se genera cuando existen equilibrios igualmente atractivos generando que la teoría de juegos no brinde una solución

única ni pueda llegarse a ningún acuerdo [33].

2.3.3. Precio de la anarquía

El estudio del concepto de precio de la anarquía permite el cálculo de los costos de ineficiencia por falta de coordinación [34]. Dicho concepto, mide el grado en que la no coordinación se aproxima a la cooperación y está motivado por el hecho de que los equilibrios no cooperativos pueden ser ineficientes, dado que no existe la necesidad natural de optimizar funciones objetivos [35]. Gran parte de las investigaciones anteriores han buscado analizar la ineficiencia desde el punto de vista del mejor caso de equilibrio competitivo, tratando de aproximarse al óptimo social. Esto ha conllevado actos implícitos de coordinación y no contempla la pérdida para el sistema de una deliberada falta de coordinación [36]. Matemáticamente el precio de la anarquía se define como la razón entre un equilibrio competitivo y el óptimo social, dando así un porcentaje de la eficiencia de dicho equilibrio. En tanto este se acerque al valor uno, mayor eficiencia tendrá [35].

2.4. Estudios similares

Dentro de los casos estudiados en la literatura, [17] compara para un caso real en los países nórdicos varias técnicas de asignación de costos y beneficios concluyendo que la técnica proporcional termina siendo la mejor opción para el juego propuesto. En [16] se compara la asignación proporcional y la de 50/50 para países de Europa occidental, concluyendo que la primera asegurará la ejecución del plan. Sin embargo, en [15] se muestran las complicaciones de esta última cuando existe el riesgo de perjudicar a terceros que no están necesariamente involucrados en el plan de expansión, concluyendo finalmente que la mejor alternativa para estos casos es utilizar el valor Shapley. En [31] se presenta una variante del valor Shapley para medir, mediante un indicador, la predisposición de cada parte para sumarse a un plan de interconexión. Hay otros casos en el que no se perciben pagos económicos, sino beneficios en la operación del sistema. Por ejemplo, en [7] se comparan distintos mecanismos para asignar los costos según los beneficios en seguridad que proporciona la interconexión; o en [13] se define con el valor Shapley la asignación de potencia y energía para reducir el déficit energético. En [30] se presentan, a través de juegos cooperativos, mecanismos de compensación según respuestas de la demanda. Una versión combinada entre el valor Shapley y el algoritmo de Aumann para identificar beneficiarios y calcular su beneficio puede encontrarse en [19], mientras que en [25], [27] y [20] se utilizan conceptos de “core” para resolver distintos problemas de transmisión y locación de costos. Finalmente, en [28] y [29] se presentan casos especiales de utilización del valor Shapley.

Capítulo 3

Metodología

El presente estudio considera 32 casos de interconexión entre Argentina, Bolivia, Chile y Perú. Para calcular los beneficios económicos que estos planes de interconexión entregan se construyó un modelo matemático que simula la operación económica del sistema de estos cuatro países. Con el modelo se obtendrán los valores de costos marginales y la generación horaria de cada país que permitirán el cálculo de los beneficios sociales y los beneficios de transmisión por cada caso, donde serán estos últimos los que se repartirán mediante distintas estrategias de asignación de costos y beneficios. Con la utilización de la teoría de juegos cooperativos, no cooperativos y el concepto de precio de la anarquía, se pueden extraer conclusiones sobre la eficiencia de los incentivos en cada estrategia. Finalmente las conclusiones se obtienen de la comparación entre los incentivos no cooperativos y cooperativos, según los beneficios económicos que se perciben en cada uno.

3.1. Topología del sistema

El sistema planteado corresponde a cuatro nodos que representan a cada uno de los países y cinco posibilidades de construcción de líneas como se ve en la figura 3.1. Además existe una línea de 200 MW de capacidad previamente construida entre Argentina y Chile que está siendo considerada en todos los casos de interconexión.

3.2. Modelo matemático

El modelo se construyó para simular un año calendario de forma horaria, es decir, se simulan 8760 horas de operación. Cada nodo cumple una demanda horaria y comprende, además, un parque de generación que consiste en veintiún tecnologías¹:

¹Estas tecnologías son genéricas, por lo tanto, existen algunos países que por la naturaleza de su parque no tienen instaladas algún tipo de central. Por ejemplo, Argentina es el único país que tiene centrales nucleares dentro de su parque generador.

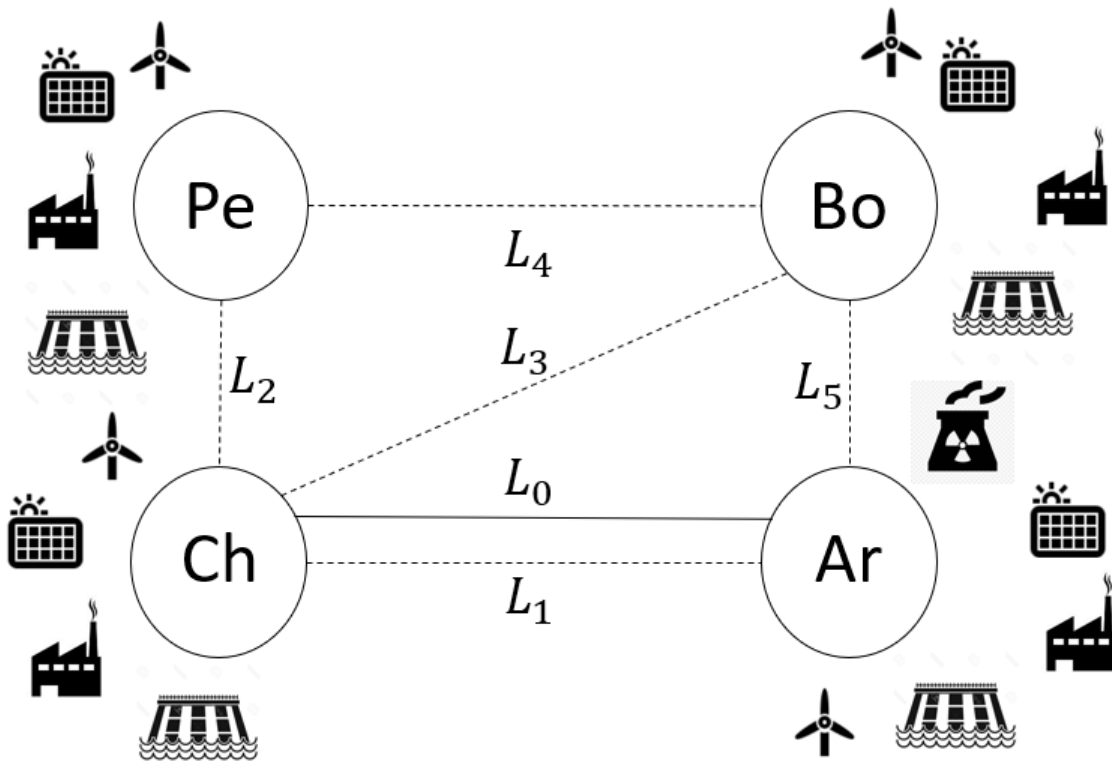


Figura 3.1: Topología del sistema para modelo

- Solar
- Eólica
- 3 tipos de unidades de carbón
- 7 tipos de unidades de gas natural
- 3 tipos de unidades de diésel
- Central de pasada
- Biomasa
- Geotermia
- Concentración solar
- Nuclear
- Embalse

La división que se realizó de las centrales térmicas es para que la curva de oferta sea más refinada, y así poder estudiar mejor los cambios en los costos marginales entre los distintos casos de interconexión.

Se establecieron perfiles de generación para las centrales de generación intermitente como la solar, de concentración solar y la eólica; y factores de planta para el resto de las tecnologías a excepción del embalse que se modeló con un factor de capacidad por estación del año, estableciendo un volumen de generación predeterminado en función de su capacidad máxima de generación. Un punto importante para destacar es que, para el caso de Argentina y Bolivia, el perfil de generación solar está adelantado una hora, producto de la diferencia de horas solares que existen en estos países en comparación con Chile y Perú.

Las transferencias entre un país y otro están incorporadas en las ecuaciones de balance (ver ecuación 3.2) y quedan acotadas por la capacidad máxima de línea a construir que se determina anteriormente como dato de entrada.

El modelo, entonces, queda descrito por las siguientes ecuaciones:

$$\underset{G_{i,t,h}, Pf_{i,h}}{\text{Min}} \sum_{i,t,h} G_{i,t,h} CV_{i,t} + \sum_{i,h} Pf_{i,h} VoLL + \sigma \sum_{l,h} \beta_{l,h} \quad (3.1)$$

s.a

$$\sum_t G_{i,t,h} - \sum_{l \in P_i} \gamma_{l,i} F_{l,h} + Pf_{i,h} = D_{i,h} \quad (3.2)$$

$$F_{l,h} \leq FMax_l \quad (3.3)$$

$$F_{l,h} \geq -FMax_l \quad (3.4)$$

$$F_{l,h} \leq \beta_{l,h} \quad (3.5)$$

$$-F_{l,h} \leq \beta_{l,h} \quad (3.6)$$

$$G_{i,t,h} \leq GMax_{i,t} \alpha_{t,h} \quad t \in \{2, 3, \dots, 20\} \quad i \in \{2, 4\} \quad (3.7)$$

$$G_{i,1,h} \leq GMax_{i,1} \alpha_{21,h} \quad i \in \{2, 4\} \quad (3.8)$$

$$G_{3,t,h} \leq GMax_{3,t} (\alpha_{t,h} + \varepsilon) \quad t \in \{6, \dots, 12\} \quad (3.9)$$

$$G_{i,t,h} \leq GMax_{i,t} \alpha_{t,h} \quad [i, t] \notin \{[3, 6], [3, 7], \dots, [3, 12]\} \quad i \in \{1, 3\} \quad t \in \{1, \dots, 20\} \quad (3.10)$$

$$\sum_{i,h_j} G_{i,21,h_j} \leq GMax_{i,21} (\delta_{h_j} + \phi) \sum_{h_j} 1 \quad i \in \{2, 3\} \quad j \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (3.11)$$

$$\sum_{i,h_j} G_{i,21,h_j} \leq GMax_{i,21} \delta_{h_j} \sum_{h_j} 1 \quad i \in \{1, 4\} \quad j \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (3.12)$$

En las ecuaciones 3.1, 3.5 y 3.6 la variable $\beta_{l,h}$ se utiliza para evitar flujos circulares dentro del sistema, producto de que no se están modelando pérdidas por las líneas (principalmente para simplificar la computación). Así, la variable $\beta_{l,h}$ incorpora los flujos como costo dentro de la función objetivo, siendo multiplicada por un factor muy bajo σ (se utiliza el valor 0,1 en este trabajo) que le permite al modelo calcular el flujo óptimo por línea. Por otro lado, en la ecuación 3.2, correspondiente a los balances energéticos nodales, el conjunto P_i agrupa a las líneas que llegan al nodo i y que pertenecen al plan de interconexión que se está computando. $\gamma_{i,l}$ representa el valor positivo o negativo del flujo dependiendo del nodo en el que se encuentre. Por último $D_{i,h}$ corresponde a la demanda horaria del nodo en cuestión, y VoLL al valor del costo de falla que es de 698 US\$/MW.

α y δ , en las ecuaciones desde la 3.7 hasta la 3.12, conciernen a los perfiles de generación y al factor de capacidad por embalse respectivamente. Se tomó el supuesto de que ambos elementos sean iguales para todos los países a excepción de algunos casos que se detallan a continuación. La especificación para los nodos i y las tecnologías t en las ecuaciones 3.7 y 3.8 están destinadas principalmente para Argentina y Bolivia puesto que sus horas de sol son distintas a las de Chile y Perú, adelantando una hora el perfil de generación solar. Por lo

mismo se hace la distinción entre el perfil de la tecnología “1” del modelo, correspondiente al perfil solar para Chile y Perú con el perfil “21” para Argentina y Bolivia.

Por el lado de la ecuación 3.9, el conjunto específico de las tecnologías t se debe a que el factor de planta de las tecnologías correspondientes al gas natural para Perú (nodo tres) se calibra sumándole una constante ε respecto al resto de los países (se le da el valor 0,25 en el modelo). Esto se debe a que los resultados iniciales en el despacho de esta tecnología escapaban de los valores reales de precio y generación en Perú. La ecuación 3.10 completa las restricciones de generación por tecnología de los países sumando las demás tecnologías para Chile y Perú (excluyendo las de gas natural en el caso peruano ya incluidas en la ecuación 3.9).

Las ecuaciones 3.11 y 3.12 incluyen las restricciones de embalse de cada país modelado por bloque, donde se calcula un volumen límite de energía a generar según la estación del año y el número de horas de dicha estación. La notación h_j es utilizada para considerar el espacio temporal del bloque en estudio, donde j representa la estación y, en consecuencia, h_j corresponde al bloque horario temporal que comprenden cada una de las estaciones. En este caso se calibra el factor de planta estacional del embalse para los nodos i con una constante ϕ (0,25 para este estudio), dado que un factor de capacidad bajo como el que se usa para Chile y Bolivia se aleja de la realidad del caso de Argentina y Perú, en donde no existe una sequía de las dimensiones que tiene, por ejemplo, Chile que afecta la generación de la tecnología de embalse.

Por último, vale destacar que este modelo no presenta *unit commitment*, mínimos técnicos o rampas. Este supuesto está dado principalmente por dos motivos: el primero es la innecesaria complejización de los procesos computacionales que ralentizaría la entrega de resultados más importantes del estudio; el segundo es la escasa variación de las variables fundamentales para el estudio, por lo que se optó despreciar estos elementos dentro del modelo.

3.3. Datos de entrada

Los datos de entrada del modelo son para un año calendario y son los siguientes:

- costos de producción
- costos de construcción de línea
- demandas horarias por país
- capacidades instaladas por país
- perfiles de generación
- factores de planta
- factores de capacidad por embalse.

En el caso de los datos de capacidad instalada, costos de producción y demanda energética la recolección se hizo para cada país por separado considerando el año 2017. En Chile, los datos de costos de producción y capacidad instalada fueron obtenidos desde la página web de su coordinador eléctrico [37], mientras que los valores de demanda energética se obtuvieron

desde el Proceso de Planificación Energética a Largo Plazo (PELP) que realiza el ministerio de energía chileno [38]. En el caso peruano, todos estos datos fueron extraídos desde la página web del Comité de Operaciones del Sistema Interconectado Nacional de Perú [39]. Bolivia, por su parte, guarda sus datos de capacidad instalada en la base de datos de su Comité Nacional de Despacho de Carga [40] y los otros en una base de datos de un estudio confeccionado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) para evaluar los impactos de una interconexión masiva entre todos los países de Latinoamérica. Es importante destacar que los costos de producción de Bolivia de esta base de datos ya consideran el efecto de los subsidios al gas natural que se aplica en dicho país. Por último, los datos para Argentina fueron obtenidos desde la compañía administradora del mercado mayorista eléctrico argentino [41].

Las tablas 3.1 y 3.2 indican los valores de demanda punta (en GW) y el total de energía consumida (en TWh) para el año de estudio respectivamente. Las tablas 3.3 y 3.4 corresponden a los datos de capacidad instalada y los costos de producción de cada país.

Demanda punta [GW]			
Chile	Argentina	Perú	Bolivia
10	24	7	2

Tabla 3.1: Demanda punta (GW) en cada país en el año 2017

Demanda total [TWh]			
Chile	Argentina	Perú	Bolivia
76	132	49	9

Tabla 3.2: Demanda de energía acumulada anual (TWh) para cada país en el año 2017

Tecnología	Chile	Argentina	Perú	Bolivia
Solar	2.043	78	96	2
Eólico	1.420	3.324	243	27
Carbón 1	3.750	167	-	-
Carbón 2	644	167	150	-
Carbón 3	835	167	-	-
GNL 1	808	2.365	692	205
GNL 2	808	2.365	692	205
GNL 3	808	2.365	692	205
GNL 4	606	2.365	692	205
GNL 5	606	3.543	692	205
GNL 6	606	3.543	692	205
GNL 7	606	3.543	692	205
Diesel 1	142	390	98	-
Diesel 2	1.414	390	2.698	28
Diesel 3	1.414	390	26	-
Hidráulica de pasada	3.264	2.276	-	-
Biomasa	383	12	69	39
Geotermia	28	-	-	-
CSP	110	-	-	-
Nuclear	-	1.784	-	-
Embalse	3.427	10.473	4.822	603
Total	23.721	39.705	13.046	2.135

Tabla 3.3: Capacidad instalada (MW) por tecnología para cada país

Tecnología	Chile	Argentina	Perú	Bolivia
Solar	0	0	0	0
Eólico	0	0	0	0
Carbón 1	40	79	-	-
Carbón 2	53	96	77,2	-
Carbón 3	65	97	-	-
GNL 1	44	3	2	2,8
GNL 2	51	37	5,9	3,1
GNL 3	61	65	7,6	3,4
GNL 4	74	92	9,8	3,6
GNL 5	92	120	13,4	4
GNL 6	111	190	22,6	9,9
GNL 7	262	300	32,6	20,8
Diesel 1	95	30	124,2	-
Diesel 2	150	120	205,5	80
Diesel 3	350	200	313,9	-
Hidráulica de pasada	0	0	-	-
Biomasa	20	20	20	20
Geotermia	0	-	-	-
CSP	0	-	-	-
Nuclear	-	32	-	-

Tabla 3.4: Costos de producción (US\$/MWh) por tecnología en cada país.

Con respecto a los datos en común (perfiles de generación, factores de planta, factores de capacidad de embalse, costos de construcción de línea), estos son de diferentes fuentes, pero utilizando a Chile como referencia principal. Este último elemento viene dado por la facilidad de acceder a dicha información desde el coordinador eléctrico y el conocimiento previo que se tiene de este sistema. Los perfiles de generación se obtuvieron de la misma base de datos del BID utilizada anteriormente. Los factores de planta de las centrales térmicas (véase tabla 3.5) fueron obtenidos del PELP; se utilizaron datos del escenario B de dicho proceso. Además, los factores de capacidad de embalses (véase tabla 3.6) se hicieron con los informes mensuales de generación del coordinador eléctrico chileno y fueron calibrados para los casos de Argentina y Perú, ya que en estos países no hubo sequía en el año de estudio.

Tecnología	Factor de planta
Carbon	70 %
Gas	67 %
Biomasa	70 %
Geotermia	70 %
Diesel	100 %
Nuclear	90 %

Tabla 3.5: Factores de planta utilizados para las centrales térmicas de los cuatro países. Algunos de estos factores fueron calibrados para algunos países con el fin de obtener valores más cercanos a la realidad.

Estación	Factor de capacidad de embalse
Verano	39 %
Otoño	38 %
Invierno	45 %
Primavera	40 %

Tabla 3.6: Factores de planta estacional para el embalse. En las ecuaciones 3.11 y 3.12 está denotada por δ_{h_j} . Este factor se calibra para algunos países con el objetivo de obtener valores más cercanos a la realidad.

El costo de construcción de línea se fijó en 500 US\$/MW/Km y se consideró construir líneas de 100 km para concretar la interconexión. Por lo tanto, el valor de construcción de cada línea se fija en 50.000 US\$/MW. Finalmente, los valores de capacidad de cada plan de construcción de línea se obtienen al calcular el óptimo social incluyendo la inversión de líneas dentro de la función objetivo. Estos valores son los siguientes:

- L_1 : 700 MW
- L_2 : 2000 MW
- L_3 : 10 MW
- L_4 : 50 MW
- L_5 : 250 MW

El óptimo social indicaba que la capacidad óptima a invertir para L_3 es de 0 MW, es decir, no era conveniente construirla, ya que dadas las condiciones del problema y de sus parámetros, esta línea sería redundante incurriendo en más costos. No obstante, con el objetivo de estudiar los incentivos de los países a interconectarse, se considerará dicha línea con una capacidad de 10 MW.

3.4. Procesamiento de beneficios

El modelo entregará, para cada uno de los casos de interconexión lo siguiente: valores de los costos marginales, por hora y por nodo; la generación por tecnología, también por hora y por nodo; y los flujos horarios de energía por cada línea. Todo esto permite obtener los insumos para el cálculo de los beneficios económicos de los países.

$$\text{Beneficio productor}_i : \sum_{h,t} G_{i,t,h}(\mu_{i,h} - CV_{i,t}) \quad i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (3.13)$$

$$\text{Beneficio consumidor}_i : \sum_h D_{i,h}(VoLL - \mu_{i,h}) \quad i \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (3.14)$$

$$\text{Rentaporcongestion}_l : \sum_{h,t} \|F_{l,h}\|(\|\mu_{i,h}^l - \mu_{j,h}^j\|) - \text{Costo}L_l \quad l \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \quad i, j \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (3.15)$$

Las ecuaciones 3.13 y 3.14 representan el beneficio económico y social que perciben los generadores y los consumidores en el nodo i , mientras que la renta por congestión resulta de la diferencia entre el ingreso tarifario de la línea l y el costo de esta. El ingreso tarifario es el producto del flujo por la línea y la diferencia entre los costos marginales de los nodos i y j . Por último, l superíndice ubicado sobre los costos marginales en la ecuación 3.15 es utilizado para demostrar que los nodos i y j comprenden los extremos de la línea construida.

3.5. Asignación de costos y beneficios

A partir de los cálculos de beneficios presentados, se desarrollan estrategias de asignación de costos y beneficios para cada escenario de interconexión. Una posible estrategia que podría entregar buenos resultados es la asignación tanto de los beneficios sociales (productor y consumidor) y las rentas por congestión. Sin embargo, conflictos políticos entre los países dificultan la posibilidad de que puedan distribuirse beneficios internos entre sí. De este modo, en este estudio las estrategias de asignación utilizadas estarán caracterizadas por la distribución de costos y beneficios de transmisión entre los diferentes países (ver figura 3.2).

Se utilizarán siete estrategias distintas para la asignación de costos y beneficios de transmisión, las cuales tratarán de abarcar distintos paradigmas en la forma de distribuir las ganancias. Con esto se busca verificar la existencia de alguna estrategia que genere en todos los participantes incentivos cooperativos y no cooperativos para concretar el plan de expansión óptimo.

Por último, es importante destacar que en los casos en que exista un país que se vea perjudicado por la interconexión de una línea en la que no participa, existe un mecanismo de compensación por parte de los países participantes hacia el país perjudicado. Esto se realiza porque en la región existen intercambios económicos que exceden al ámbito eléctrico, los cuales se podrían ver perjudicados en caso de no establecer estos mecanismos.

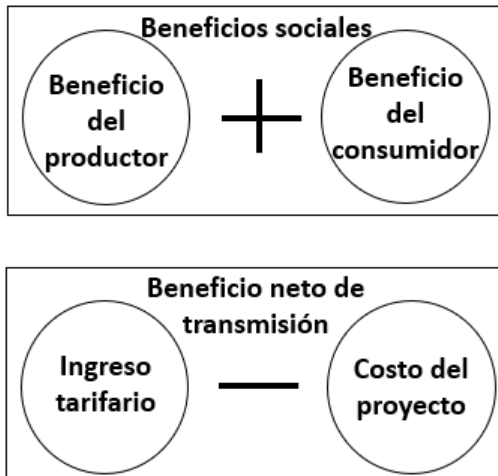


Figura 3.2: Separación entre beneficios sociales y beneficios netos de transmisión. Las estrategias de asignación de costos y beneficios solo distribuirán los beneficios netos de transmisión, dejando sin cambios los beneficios sociales.

3.5.1. Estrategia 1

La primera estrategia de asignación de costos y beneficios distribuye con distintos factores los costos de los planes y los ingresos tarifarios. Para cada caso, la asignación se establece de forma directamente proporcional a los beneficios sociales de cada país para los costos e indirectamente proporcional para los ingresos. La figura 3.3 es una representación gráfica de dicha estrategia donde aquel país que presente un mayor beneficio social (respecto al caso sin interconexión), tendrá que pagar una mayor parte del costo del plan; y aquellos países que menos beneficios sociales reciban, percibirán una mayor parte de los ingresos de transmisión. Cabe destacar que esta estrategia socializa las asignaciones, dado que se distribuye la totalidad de los costos e ingresos entre todos los países beneficiados sin importar dónde se construya la línea.

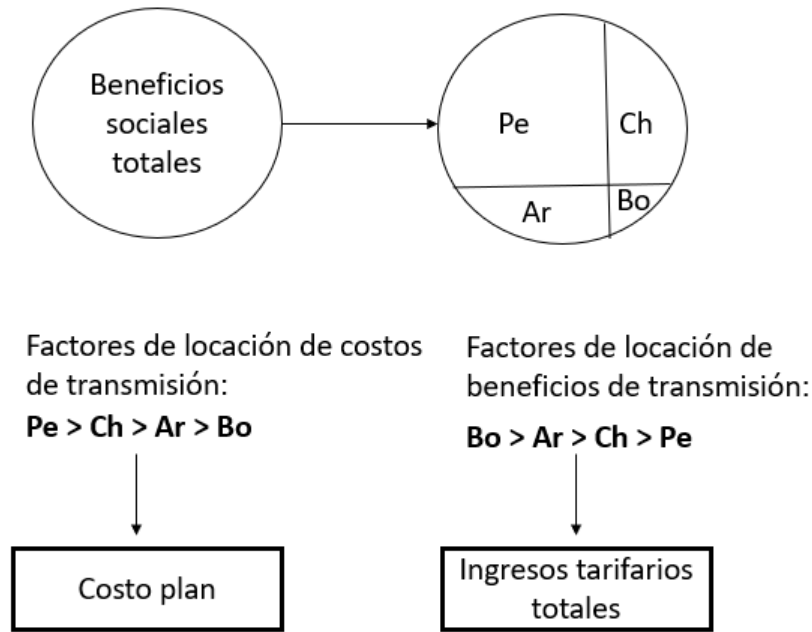


Figura 3.3: Estrategia 1: Los costos y beneficios de transmisión se reparten según la proporción de beneficios sociales de cada país respecto al total de beneficio social que el plan entrega. Así, los costos de los planes se asignan directamente proporcional a los beneficios sociales de cada país, mientras que los ingresos tarifarios totales se asignan inversamente.

3.5.2. Estrategia 2

La diferencia de esta estrategia con la anterior radica en que, en lugar de distribuir los costos e ingresos de los planes por separado, se asigna el beneficio neto de transmisión. Como se puede ver en la figura 3.2, los beneficios netos de transmisión corresponden a la diferencia entre el ingreso tarifario y el costo del plan. La proporción se define según los beneficios sociales por país y se reparten de forma directa o inversamente proporcional de acuerdo a si los beneficios netos son negativos o positivos respectivamente. Esta estrategia se denomina *Positive Net Benefit Differential* y es utilizado para apoyar interconexiones eléctricas en Europa [32]. La figura 3.4 grafica esta estrategia.

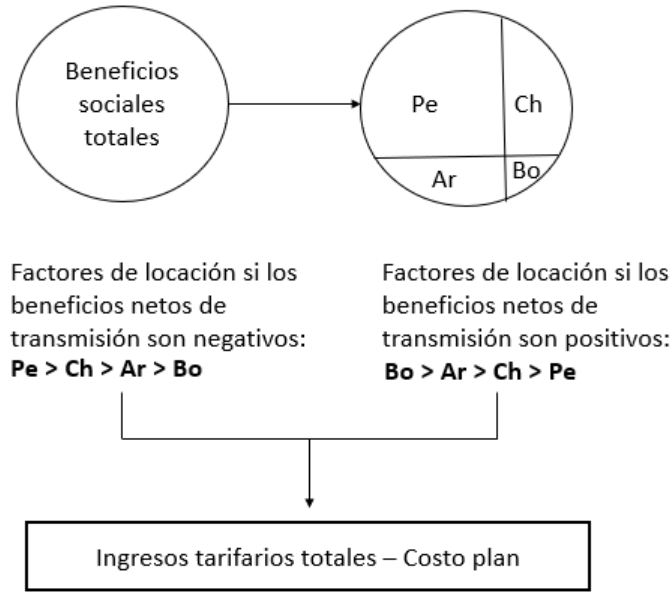


Figura 3.4: Estrategia 2: Los beneficios netos de transmisión se asignan de forma directamente proporcional a los beneficios sociales por país en caso de ser negativos. En el caso que el beneficio neto de transmisión total sea positivo, la asignación es inversamente proporcional

3.5.3. Estrategia 3

En el caso de la tercera estrategia los costos y beneficios de transmisión por línea, se asignan solo entre los países que la comparten y en proporción a los beneficios sociales entre ellos. Como muestra la figura 3.5, cada línea en cada plan tiene una proporción diferente para repartir sus costos y beneficios. Tanto aquí, como en la estrategia uno, los costos de línea se dividen directamente proporcional a los beneficios sociales y el ingreso tarifario se distribuye inversamente proporcional a estos últimos.

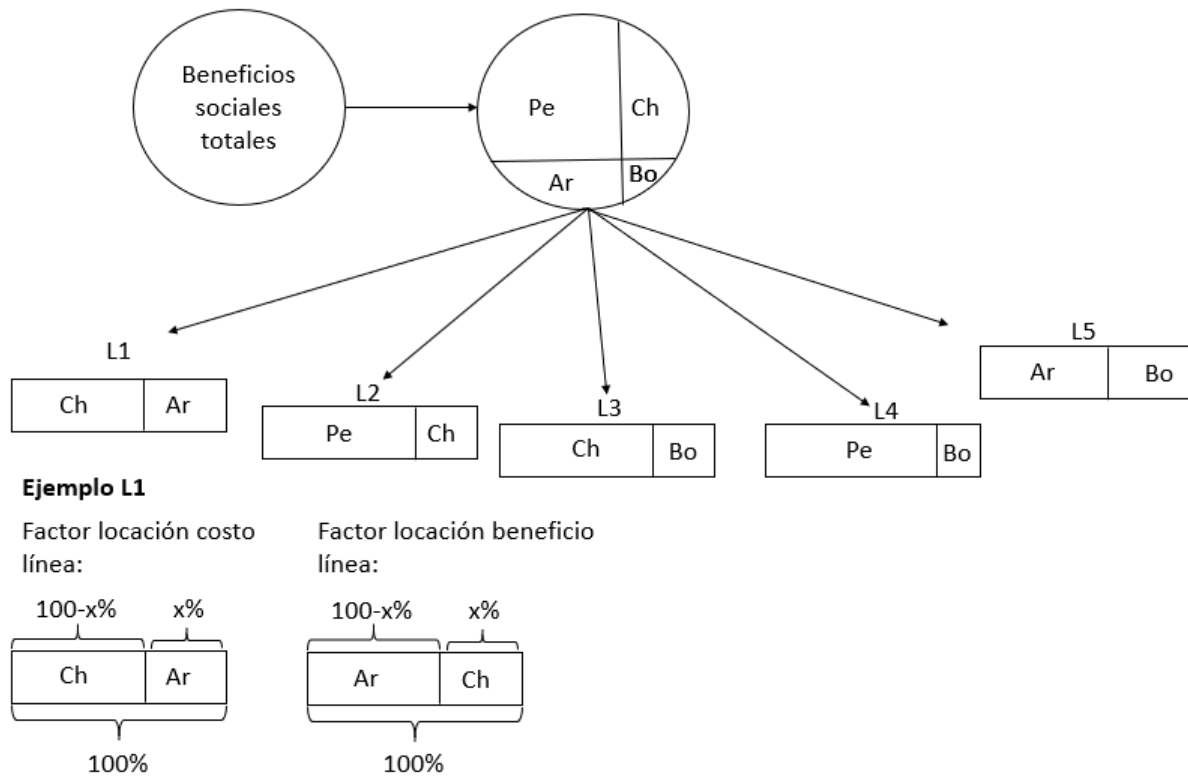


Figura 3.5: Estrategia 3: Los costos y beneficios de línea se asignan solo entre los países que la comparten. Se toma el ejemplo de la línea entre Argentina y Chile donde el costo de línea se asigna directamente proporcional al beneficio social entre ellos y el beneficio de manera inversa a este.

3.5.4. Estrategia 4

En lugar de repartir los costos y los beneficios por separado, se reparten los beneficios netos de transmisión y se distingue en caso de ser positivo y negativo. Frente a los casos que tengan beneficios netos de transmisión negativos, los países con mayores beneficios sociales incurrirán con la mayor parte de las pérdidas, mientras que los países con menores beneficios sociales recibirán un mayor monto de los beneficios netos positivos (ver figura 3.6).

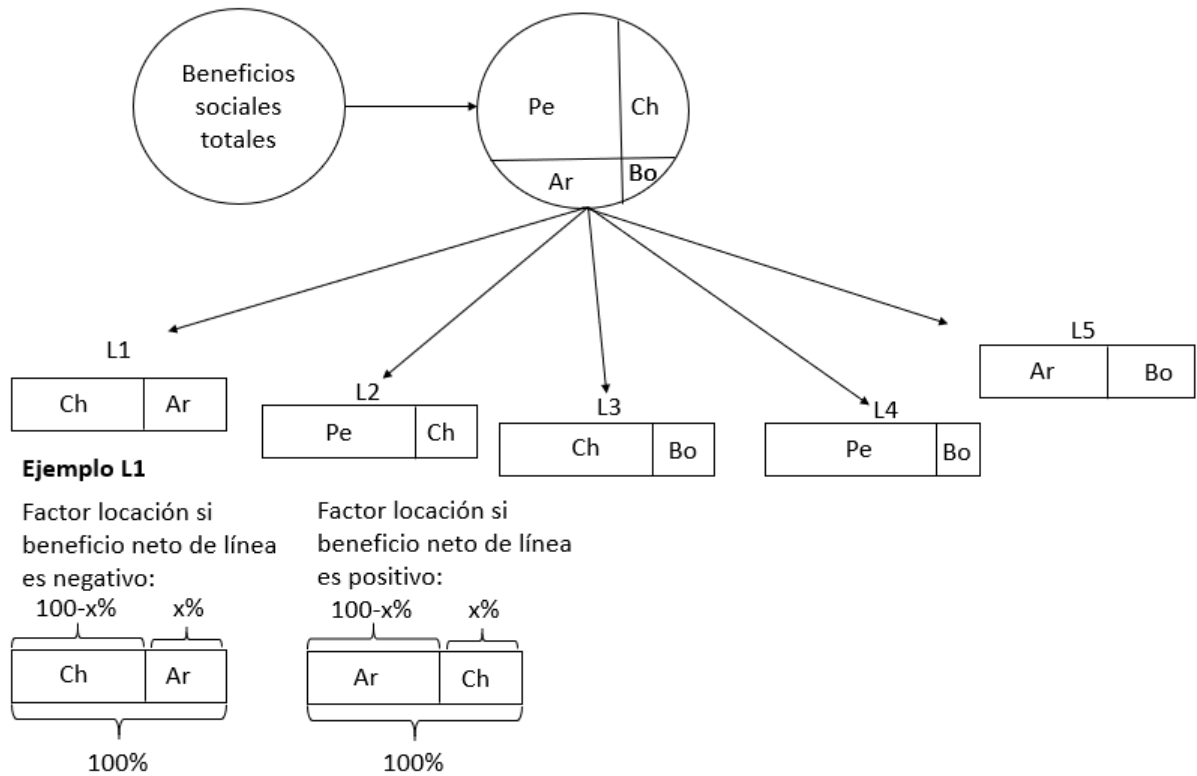


Figura 3.6: Estrategia 4: Se reparte el beneficio neto de línea y la proporción dependerá si estos son negativos o positivos. Si son negativos, el país con mayor beneficio social entre los dos que comparten la línea absorberá una mayor cantidad de las pérdidas. Si son positivos, el país que menos perciba en materia de beneficios sociales será el que reciba más del beneficio neto de línea.

3.5.5. Estrategia 5

En esta estrategia la asignación de costos e ingresos se realiza según los beneficios sociales que perciben dos países por la instalación de una línea sin que las demás hayan sido construidas. Con este resultado se obtienen las proporciones con la que los países se distribuirán los costos e ingresos de dicha línea en todos los demás planes. La figura 3.7 muestra el caso cuando solo se construye la línea entre dos nodos genéricos i y j . Como en las estrategias anteriores, los costos se reparten directamente proporcional a los beneficios sociales y el ingreso tarifario de manera inversa.

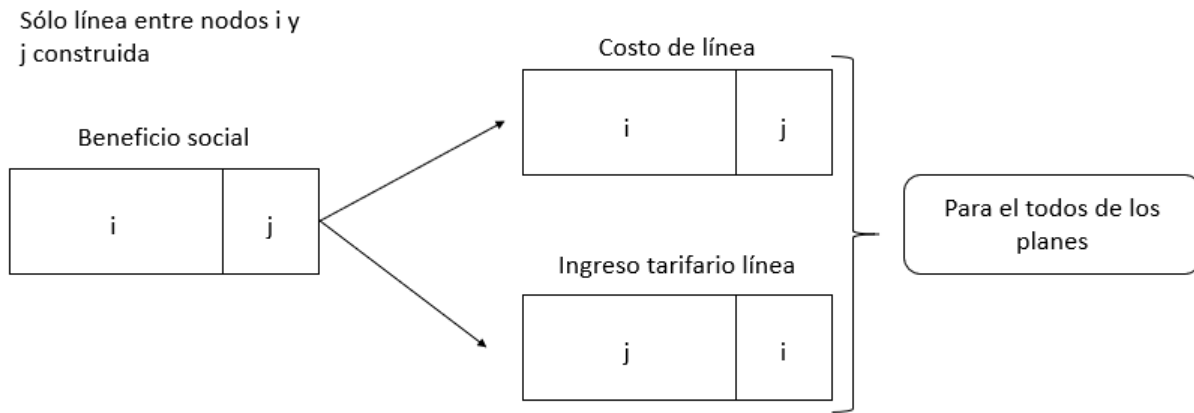


Figura 3.7: Estrategia 5: Se calcula el beneficio social para el caso en que sólo se construye la línea entre los nodos genéricos i y j. La proporción resultante entre sus beneficios sociales será utilizada para todos los planes en que esta línea esté construida. Los costos de la línea en cada plan que la involucre se asignan entre los países i y j directamente proporcional a los beneficios sociales, mientras que el ingreso tarifario se asigna de forma inversa.

3.5.6. Estrategia 6

Esta estrategia cumple el mismo principio que la estrategia 5: obtiene los factores de proporción de dos países en el caso en que solo se construye la línea que los conecta. Estos factores de proporción son los que se utilizan para los beneficios de esta línea en todos los demás planes. En este caso se reparten los beneficios netos de transmisión de la línea. De igual modo, los casos en que el beneficio neto de línea es negativo, se reparte directamente proporcional a los beneficios sociales y en los casos que resulte positivo se divide inversamente proporcional a estos (ver figura 3.8).

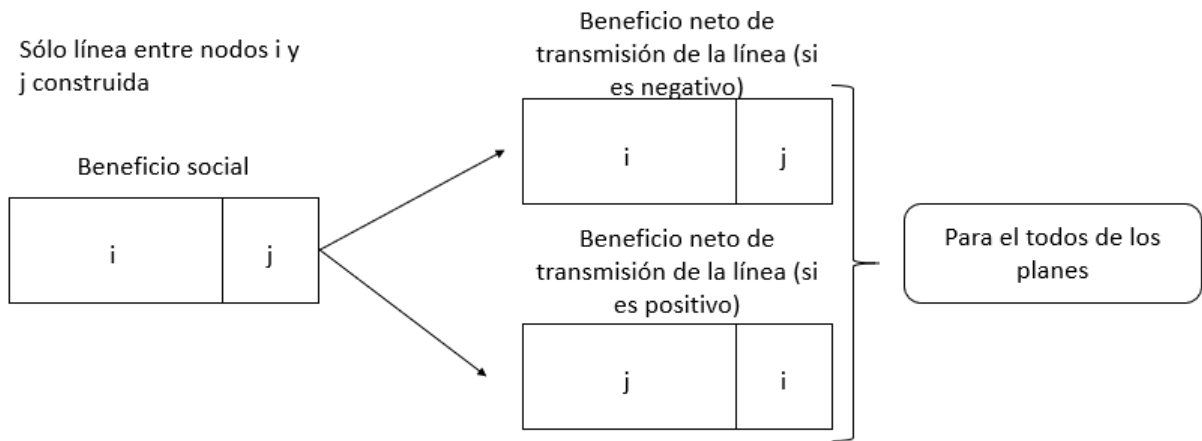


Figura 3.8: Estrategia 6: Similar a la estrategia 5 se obtienen los factores de proporción para los nodos i y j en función de los beneficios sociales que se obtienen para el caso que sólo se construye la línea que los une. Estos factores se utilizan para todos los planes en que esta se construya y se asignan los beneficios netos de la línea entre los países como sigue: si este es negativo se distribuye directamente proporcional; si es positivo se asigna inversamente proporcional.

3.5.7. Estrategia 7

Esta estrategia se caracteriza por repartir los beneficios netos de transmisión en proporciones iguales entre los países que comparten líneas, independiente de la proporción de beneficios sociales que reciba cada uno por la implementación del plan. Este paradigma de asignación de costos y beneficios es utilizado en Estados Unidos [32] y ha sido implementado entre los países escandinavos [17].

3.6. Cálculo de incentivos

3.6.1. Equilibrios de Nash

Para analizar los incentivos económicos de cada estrategia se calculan los equilibrios de Nash, donde se identifican los casos en el que los países tendrán incentivos para mantenerse. Sin embargo, se modifica la definición de los equilibrios para adaptarse al contexto estudiado, dado que la construcción de una línea requiere de un acuerdo bilateral entre los países que la compartirán. En consecuencia, se calculan solo para aquellas situaciones en que ningún país tenga incentivos de desconectarse.

La metodología para el cálculo de los equilibrios de Nash es la siguiente:

- Se calculan los beneficios totales de cada país para cada uno de los casos de interconexión de las estrategias.

- Para cada caso, se compara el beneficio de cada país con el beneficio que percibiría al desconectar una línea entre sus límites.
- Si algún país al desconectarse recauda mejores ganancias, el caso no es un equilibrio de Nash. Al contrario, si ningún país se ve beneficiado al desconectar alguna de sus líneas, el caso sí corresponde a un equilibrio de Nash.

La figura 3.9 y la tabla 3.7 permite explicar a través de un ejemplo numérico la definición de equilibrio de Nash utilizada en este estudio. El modelo consiste en tres países y tres líneas candidatas para interconectar estos últimos, resultando en ocho casos posibles de interconexión (2^3 , ya que se considera la interconexión como una alternativa binaria de expansión). Cada caso de interconexión generara beneficios en cada nodo involucrado, los que se muestran en la tabla 3.7.

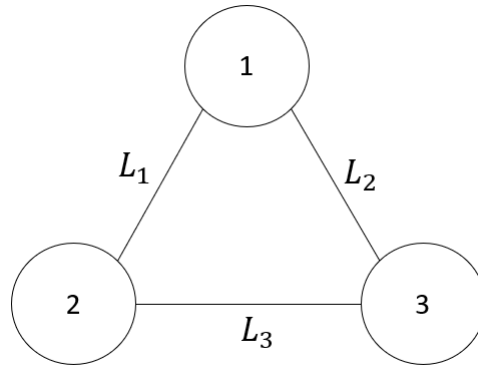


Figura 3.9: Modelo ejemplo de tres países con tres líneas candidatas. Los distintos portafolios de la tabla 3.3 se leen de la forma (L_1, L_2, L_3) .

Portafolio	Beneficios país 1	Beneficios país 2	Beneficios país 3
(0,0,0)	0	0	0
(0,0,1)	0	-5	15
(0,1,0)	20	0	30
(1,0,0)	10	10	0
(0,1,1)	30	-2	40
(1,0,1)	15	1	18
(1,1,0)	44	8	48
(1,1,1)	35	20	30

Tabla 3.7: Tabla de beneficios para el modelo de ejemplo de la figura 3.9. En celeste están marcados los casos que corresponden a un equilibrio de Nash, según la definición que se le dio para este juego.

La tabla 3.7 muestra los beneficios que obtiene cada nodo en cada uno de los portafolios de interconexión. Además, aquellos casos de interconexión que cumplen con la definición de equilibrio de Nash propuesta están resaltados en color celeste. El portafolio (0,0,0) es un equilibrio de Nash directo dada la definición utilizada, ya que no hay líneas para desconectar y ningún país tendrá incentivos para desviarse de ese estado. Sin embargo, (0,0,1) no lo es, puesto que la interconexión le incurre en un costo al país 2 y, por consiguiente, tendrá incentivos para desviarse nuevamente al portafolio sin interconexión. (0,1,0) y (1,0,0)

sí corresponden a equilibrios de Nash dado que en los dos casos ambos países involucrados perciben mayores beneficios al construir la línea.

Con la definición tradicional utilizada para el cálculo de equilibrios de Nash los portafolios mencionados anteriormente no corresponderían a un equilibrio de Nash. Por ejemplo, en el caso (0,1,0) el construir L_1 le genera mayores beneficios a todos los países por lo que tendrían incentivos para construir dicha línea y desviarse hacia ese portafolio. Sin embargo, como la construcción de la línea involucra un acuerdo bilateral y, por lo tanto, cierto grado de cooperación, no se consideran estos casos para la definición de equilibrio propuesta.

El portafolio (1,1,0) también corresponde a un equilibrio de Nash, aun cuando (1,0,0) mejora la situación del país 2. Esto se debe a que dicho país no tiene la opción de desconectar L_2 por no encontrarse entre sus fronteras y como los países 1 y 3 obtienen el mayor beneficio en este portafolio, se concluye que ningún país tendría incentivos propios para desviarse del plan.

3.6.2. Precio de la anarquía

El concepto de precio de la anarquía entrega un indicador de la pérdida de eficiencia por no cooperar. Se calcula con la ecuación 3.16 para cada caso que corresponda a un equilibrio de Nash, lo cual permitirá obtener el valor esperado de eficiencia de cada una de las estrategias.

$$PoA = \frac{Beneficio_i}{Beneficio_{optimo}} \quad i \in Equilibrio \text{ de Nash} \quad (3.16)$$

La tabla 3.8 muestra los precios de la anarquía del ejemplo de la figura 3.9. En este caso particular, el portafolio con mayores beneficios resultó también ser un equilibrio de Nash, por lo que el costo de ineficiencia por no cooperar en este ejemplo es cero. Sin embargo, esto no siempre ocurre y existen juegos en los que no cooperar provoca un costo de ineficiencia mayor a cero.

Portafolio	Precio de la anarquía
(0,0,0)	0 %
(0,0,1)	-
(0,1,0)	20 %
(1,0,0)	20 %
(0,1,1)	-
(1,0,1)	-
(1,1,0)	100 %
(1,1,1)	-

Tabla 3.8: Tabla de los precios de la anarquía para el juego de ejemplo de la figura 3.9. Se explicitan también los portafolios que no corresponden a un equilibrio de Nash, denotándolos con un guión. En este caso, el caso que mayores beneficios entrega también corresponde un equilibrio de Nash teniendo una eficiencia del 100 %

3.6.3. Juegos cooperativos

El proceso para determinar una solución estable para el juego cooperativo consiste en que la asignación de beneficios cumpla las tres restricciones de racionalidad. Para determinar estas restricciones se utilizan los resultados obtenidos a través de la simulación, donde estas se evalúan con el caso que mayor beneficio económico total entrega, lo cual prosigue de la siguiente forma:

- Restricción de racionalidad individual: se determina según el beneficio que cada país obtiene al no participar de ningún plan.
- Restricción de racionalidad coalicional: para cada subcoalición, se examina cada uno de los casos donde esta se forme acotando después la restricción por el caso que entregue un mayor beneficio.
- Restricción de racionalidad colectiva: queda acotada por el beneficio mayor que corresponda a los casos que agrupen a la gran coalición.

En el ejemplo de la figura 3.9 las restricciones de racionalidad se definen cuantificando el mínimo beneficio que las distintas subcoaliciones estarán dispuestas a recibir. Esto se observa en la tabla 3.9:

Coalición	Beneficio
{1}	0
{2}	0
{3}	0
{1,2}	20
{1,3}	50
{2,3}	10
{1,2,3}	100

Tabla 3.9: Tabla ejemplo cooperativo

Con estos valores las restricciones de racionalidad quedan descritas de la siguiente forma:

- Restricciones de racionalidad individual:

$$v(1) \geq 0 \qquad v(2) \geq 0 \qquad v(3) \geq 0 \qquad (3.17)$$

- Restricciones de racionalidad de coalición:

$$v(1) + v(2) \geq 20 \qquad (3.18)$$

$$v(1) + v(3) \geq 50 \qquad (3.19)$$

$$v(2) + v(3) \geq 10 \qquad (3.20)$$

$$(3.21)$$

- Restricción de racionalidad colectiva:

$$v(1) + v(2) + v(3) \geq 100 \qquad (3.22)$$

Con las restricciones definidas, se procede a verificar el cumplimiento de estas para cada una de las estrategias de asignación de costos² y comprobar la existencia de un núcleo estable para el juego cooperativo. Con todos los resultados determinados se procederá a comparar ambos enfoques de teoría de juegos donde podrían ocurrir las siguientes tres situaciones:

- La estrategia tiene un núcleo estable y además el caso óptimo es un equilibrio de Nash.
- La estrategia tiene un núcleo estable, pero el caso óptimo no es un equilibrio de Nash.
- La estrategia no tiene un núcleo estable y el caso óptimo no es un equilibrio de Nash.

²La aplicación de esta metodología utilizada con los resultados de este estudio se detalla en el apéndice C

Capítulo 4

Resultados, análisis y discusión

4.1. Resultados y análisis

Los resultados del modelo de simulación¹ permitieron calcular los beneficios sociales y de transmisión, los cuales, a su vez, posibilitaron ejecutar las estrategias de asignación de costos². A partir de estos resultados, se presentará una mirada global de los resultados de las estrategias priorizando el análisis detallado de cada una.

La figura 4.1 muestra un gráfico de barras que indica el número de equilibrios de Nash por estrategia, dando un indicador de la estabilidad de cada una. Sin embargo, esto no es un indicador de la eficiencia de estas, lo cual se puede determinar utilizando el concepto de precio de la anarquía.

La figura 4.2, por su parte, presenta el beneficio máximo que se puede obtener en cada estrategia desde un punto de vista competitivo donde no existe coordinación entre las partes. Esto quiere decir que para cada estrategia, se busca entre todos los equilibrios de Nash aquel portafolio que entrega un beneficio total más alto. Para ambas figuras, se destaca los puntos máximos entre todas las estrategias.

¹Los valores obtenidos para el caso sin interconexión son muy similares a los valores reales, particularmente los valores de costo marginal promedio para cada país. Esto último da cuenta de la confiabilidad del modelo y de los resultados posteriores que entrega. Estos valores se muestran en el apéndice A

²El detalle de los resultados de cada estrategia se encuentra en el apéndice B.

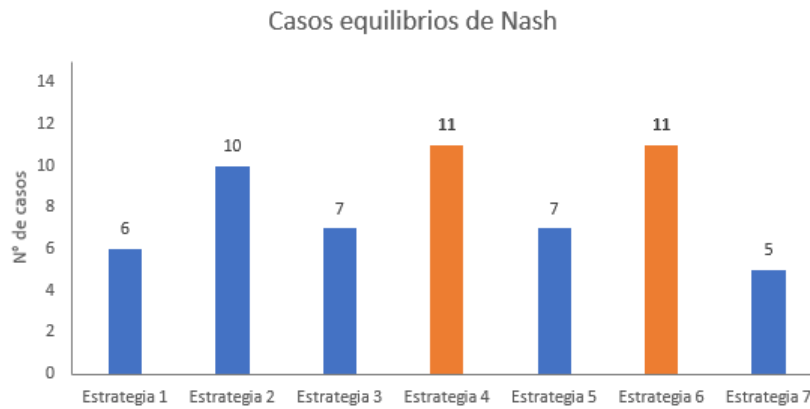


Figura 4.1: Número de casos que resultaron equilibrios de Nash en las distintas estrategias de locación de costos y beneficios utilizadas. Remarcados están los casos de las estrategias 4 y 5 que presentan la mayor cantidad de equilibrios de Nash.

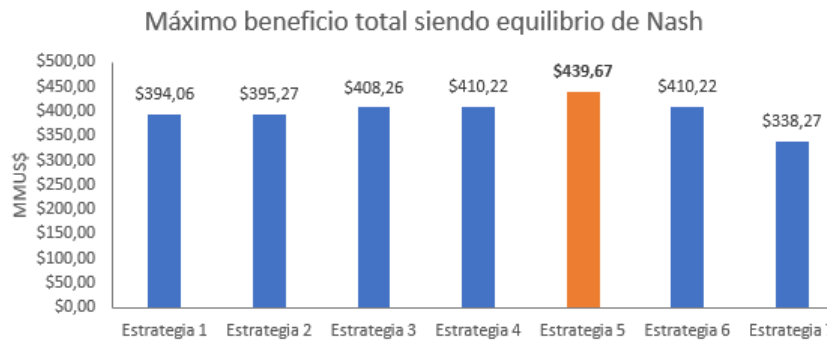


Figura 4.2: Se presentan los máximos beneficios totales correspondientes a una solución de Nash entre los casos de estudio. Se destaca la estrategia 5, ya que corresponde al valor más alto entre las distintas estrategias con un beneficio total de MMUS\$/año 439,67.

Finalmente, la figura 4.3 es un análogo de la figura 4.2 con la excepción de que se muestran los mínimos beneficios totales para cada estrategia. Esto es importante dado que desde un enfoque competitivo no siempre se alcanzará la solución óptima en términos de beneficios totales. Un equilibrio de Nash solo indica que ningún jugador tendrá incentivos de salirse del estado de equilibrio, incluso sabiendo las decisiones que tomaron los demás jugadores. Por lo tanto, no necesariamente se alcanzará el mejor equilibrio dado la falta de coordinación, ya que cualquiera de los equilibrios determinados es igual de factible.

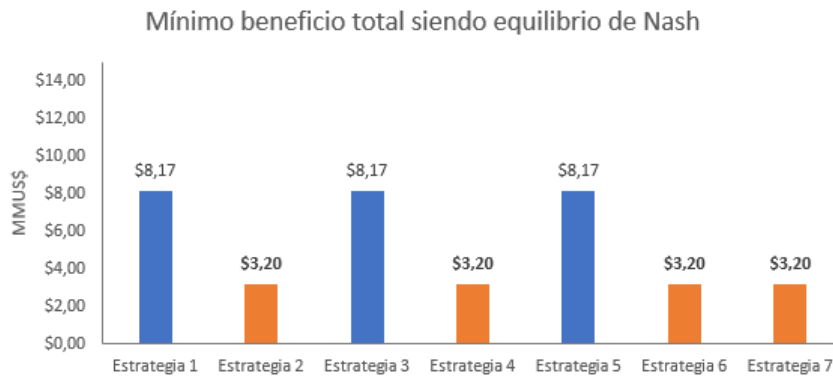


Figura 4.3: Se presentan los mínimos beneficios sociales que son soluciones de Nash entre los distintos casos de interconexión. Desde un punto de vista competitivo y no cooperativo, cualquier solución de Nash es igual de factible a ocurrir dada la falta de coordinación entre los países para alcanzar el valor más alto. Se destacan aquellas estrategias que alcanzan los valores más bajo entre las siete escogidas.

La figura 4.4 es la representación gráfica del plan con el beneficio total más alto, al cual se denominará caso óptimo para los análisis posteriores. Como se puede observar, se demuestra que la línea 3 entre Chile y Bolivia no se construye, porque no genera un beneficio adicional y no es conveniente incluirla en la gran coalición. El beneficio total que se obtiene de este portafolio alcanza un valor de 442,63 MMUS\$/año.

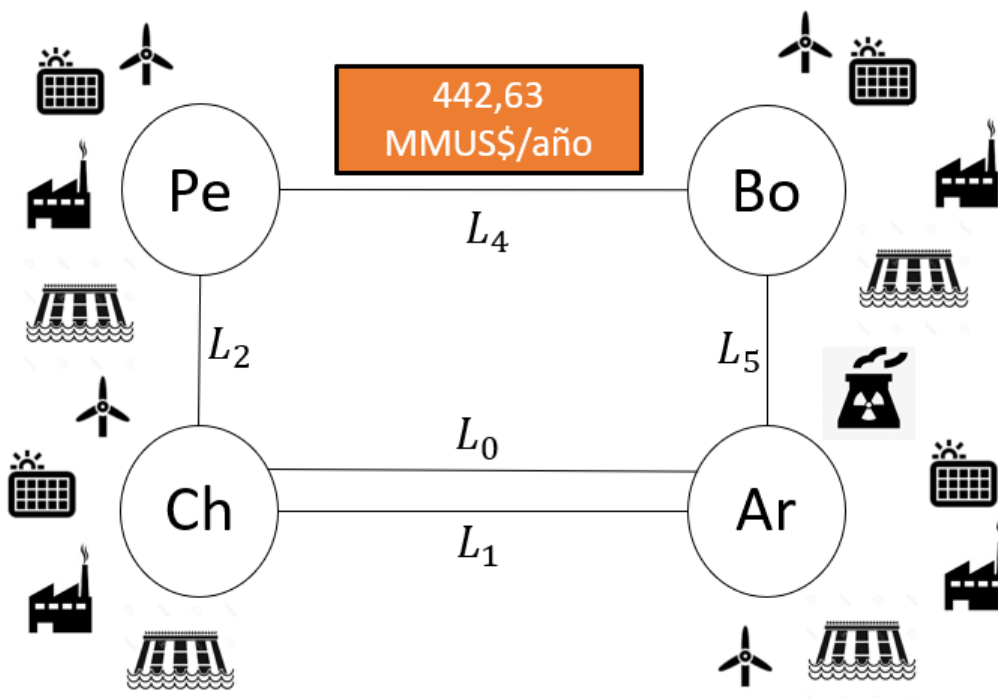


Figura 4.4: Representación gráfica del caso óptimo. No se construye la línea 3, pero de todas maneras involucra a los 4 países. El beneficio alcanzado en este caso es de MMUS\$/año 442,63

4.1.1. Estrategia 1

Si bien la estrategia 1 ofrece un mecanismo solidario para la repartición tanto de los costos como de los beneficios, tiene pocos equilibrios de Nash en relación al resto de las estrategias (véase figura 4.1), porque perjudica en mayor medida a los más beneficiados en términos sociales obligándolos a pagar gran parte los costos totales de los distintos planes de interconexión. Por ejemplo: Perú y Chile obtienen altos beneficios en algunos portafolios de interconexión. Esto provoca que descarten otros casos que involucren líneas que, a pesar de traerles beneficios sociales, los obligue a incurrir en altos costos de transmisión.

Dado el modelo para el caso de estudio, se deja como supuesto que los equilibrios de Nash tienen las mismas probabilidades de suceder. Por lo tanto, existen algunos casos donde el precio de la anarquía adquiere relevancia: el equilibrio de Nash con mayores beneficios, el equilibrio con menores beneficios y el promedio entre las pérdidas de eficiencia. Los dos primeros indicadores permitirán fijar cotas para el costo de ineficiencia, estableciendo un máximo y un mínimo a perder por no coordinarse, mientras que el último análisis entregará un valor esperado para el precio de la anarquía de dicha estrategia. Por último, en el análisis de pérdida de eficiencia para esta y las demás estrategias no se toma en cuenta el equilibrio de Nash de *status quo*, dado que no entrega beneficio alguno y no es relevante para el análisis.

La figura 4.5 muestra una gráfica de la ineficiencia de esta estrategia por no coordinarse. La cota inferior y superior se obtiene a través de las ecuaciones 4.1 y 4.2 respectivamente, mientras que el tercer indicador es el promedio aritmético entre la pérdida de eficiencia de todos los equilibrios de Nash.

$$PoA_{min} = \frac{Beneficio_i^{min}}{Beneficio_{optimo}} \quad i \in Equilibrio \text{ de Nash} \quad (4.1)$$

$$PoA_{max} = \frac{Beneficio_i^{max}}{Beneficio_{optimo}} \quad i \in Equilibrio \text{ de Nash} \quad (4.2)$$

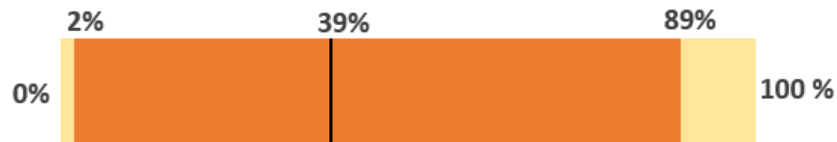


Figura 4.5: Siendo el 100 % el beneficio del caso óptimo, la estrategia 1 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 98 % y puede alcanzar un máximo de 89 % de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 39 %.

En esta estrategia existe un portafolio con un bajo precio de la anarquía resultando como cota superior un 89 % de eficiencia, sin embargo la cota inferior tiene un alto costo por no cooperar, alcanzando un 98 %. El valor promedio conllevó que esta estrategia tenga un 39 % de eficiencia. Considerando la equiprobabilidad mencionada, este valor promedio es también

el valor esperado para el precio de la anarquía, por lo que se espera que esta estrategia pierda el 61 % de los beneficios potenciales por falta de coordinación.

Finalmente, en esta estrategia el caso óptimo (véase figura 4.2) no tiene un núcleo estable y, además, no es un equilibrio de Nash. En consecuencia, no existen incentivos para alcanzarlo.

4.1.2. Estrategia 2

Es la tercera estrategia con más equilibrios de Nash. A diferencia de la primera estrategia, los más beneficiados solo se ven indirectamente perjudicados, ya que no tienen que costear gran parte de los gastos de los proyectos, sino que simplemente reciben menores beneficios de transmisión. Esto provoca que estos países tengan incentivos a participar en otros planes. En contraparte, esta opción genera que aquellos países que en la otra estrategia se veían beneficiados por la repartición separada de costos y beneficios de transmisión, perciben menores ingresos que antes (como ocurre con Bolivia y Argentina).

Para el análisis de la eficiencia de esta estrategia se calcularon las cotas superior e inferior para el precio de anarquía y el valor esperado para el costo de ineficiencia. La figura 4.6 es la representación de la eficiencia de esta estrategia obteniendo valores ligeramente distintos a la anterior. Se mantiene la cota superior y se reduce la cota inferior, lo cual se infiere de las figuras 4.2 y 4.3 donde la primera muestra valores cercanos para el caso del beneficio máximo y la segunda indica una diferencia para el caso del mínimo. Esta dispersión genera también que el costo de ineficiencia aumente a un 67 %.



Figura 4.6: Siendo el 100 % el beneficio del caso óptimo, la estrategia 2 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 99 % y puede alcanzar un máximo de 89 % de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 33 %.

El caso óptimo de esta estrategia no tiene un núcleo estable al no cumplir con todas las restricciones de racionalidad ni tampoco es un equilibrio de Nash como se deduce de las figuras 4.2 y 4.6, por lo tanto, en esta estrategia no existe ningún incentivo para implementar este plan.

4.1.3. Estrategia 3

En el caso de la estrategia 3 se observan 7 equilibrios de Nash. Al acotar la asignación de costos y beneficios de transmisión solo entre países que comparten línea, genera que aquellos que se ven más beneficiados por las interconexiones puedan recibir una mayor parte del beneficio que en la estrategia 1 no percibían y no tengan que costear líneas que no se encuentran entre sus límites. Esto les genera mayores incentivos de mantenerse en planes que les entreguen beneficios altos, pero no le signifiquen un mayor desembolso de recursos para costear los planes.

Como se puede comprobar en la figura 4.7, hay un cambio significativo entre los precios de la anarquía de esta estrategia con respecto a las dos anteriores. La cota superior corresponde a 92 % de eficiencia mientras que la cota inferior a un 2 %. Además, el valor esperado de eficiencia alcanza un 60 %, con lo cual se concluye que esta estrategia es más eficiente que las dos anteriores.

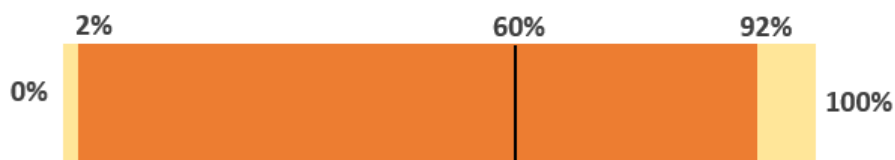


Figura 4.7: Siendo el 100 % el beneficio del caso óptimo, la estrategia 3 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 98 % y puede alcanzar un máximo de 92 % de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 60 %.

En esta estrategia, no existe un núcleo estable para el juego cooperativo ni tampoco el caso óptimo es un equilibrio de Nash. Por lo tanto, nuevamente no existen incentivos para alcanzar este plan.

4.1.4. Estrategia 4

Esta estrategia es la que tiene mayor cantidad de equilibrios de Nash: 11 en total. Como en la estrategia 2, la actual estrategia evita que los países más beneficiados incurran en la mayor parte del costo de las líneas y solo perciban una menor parte de los beneficios netos de transmisión. Al eliminar el castigo de costear la mayor parte de la línea, los incentivos aumentan e incrementa el número de planes donde los países tiendan a mantenerse.

La figura 4.8 muestra un incremento en una unidad porcentual de la cota superior respecto a la estrategia 3 y es la mayor entre todas las estrategias estudiadas hasta el momento, pero al mismo tiempo aumenta la brecha con la cota inferior obteniendo un valor mínimo de precio de anarquía de un 1 %. El valor esperado disminuye en comparación a la estrategia anterior resultando en un precio de anarquía del 55 %, provocado principalmente por el incremento del número de equilibrios y el aumento de la cota inferior mencionado anteriormente.

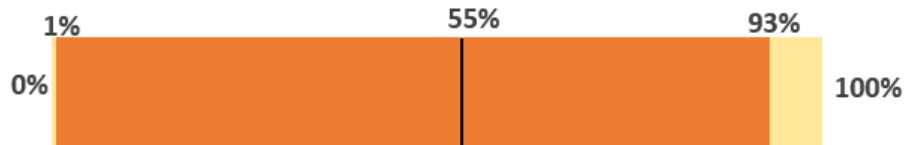


Figura 4.8: Siendo el 100 % el beneficio del caso óptimo, la estrategia 4 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 99 % y puede alcanzar un máximo de 93 % de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 55 %.

La estrategia 4 no ofrece un núcleo estable en términos cooperativos, por lo tanto no existen incentivos desde este punto de vista para conformar la gran coalición. Además, como el caso óptimo tampoco es un equilibrio de Nash esta estrategia no genera incentivos de ningún tipo para lograr una interconexión que incluya a los 4 países.

4.1.5. Estrategia 5

En primer lugar, la estrategia 5 cuenta con 7 casos que resultan en equilibrios de Nash. En segundo lugar, cuenta con el máximo beneficio entre los equilibrios de Nash de todas las estrategias y también cuenta con el valor más alto entre los mínimos beneficios expresados en la figura 4.3.

Por un lado, como se observa en la figura 4.9, los resultados de esta estrategia elevan la cota superior hasta casi el 100 % generando que el comportamiento competitivo por parte de los países pueda resultar en una eficiencia de 99 %. Por otro lado, el valor esperado para el precio de anarquía alcanza un 62 %.



Figura 4.9: Siendo el 100 % el beneficio del caso óptimo, la estrategia 5 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 98 % y puede alcanzar un máximo de 99 % de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 62 %.

En esta estrategia no existe un núcleo estable y el caso óptimo no corresponde a un equilibrio de Nash, por lo tanto, no hay incentivos para alcanzar el plan óptimo.

4.1.6. Estrategia 6

La estrategia 6 presenta 11 equilibrios de Nash, compartiendo con la estrategia 4 el máximo entre las 7 en estudio. Por los mismos motivos que en las estrategias que asignan los beneficios netos, el incremento de los equilibrios de Nash radica en que no se castiga a aquellos más beneficiados con las construcciones de línea obligándolos a pagar una mayor parte de su costo, sino que solamente reciben menor beneficio neto por la congestión de dicha línea.

La figura 4.10 indica que se reduce la cota superior en comparación a la estrategia 5 y que también baja la eficiencia del peor caso a un 1%. Además, se observa un valor esperado del precio de anarquía de 46%.

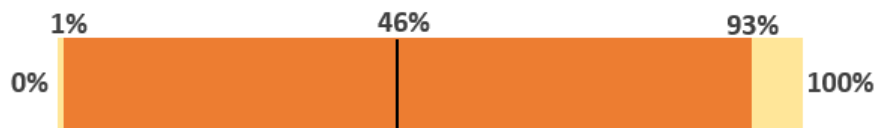


Figura 4.10: Siendo el 100% el beneficio del caso óptimo, la estrategia 6 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 99% y puede alcanzar un máximo de 93% de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 46%.

Finalmente, además de no existir incentivos desde el punto de vista competitivo para el caso óptimo, tampoco existe un núcleo estable desde el enfoque cooperativo. Por lo tanto, en la estrategia 6 no hay incentivos de alcanzar el plan óptimo de interconexión.

4.1.7. Estrategia 7

Esta estrategia es la que presenta la menor cantidad de equilibrios de Nash entre todas las estrategias estudiadas: sólo cinco equilibrios incluyendo el portafolio de *status quo*. La naturaleza de la asignación de costos y beneficios de esta, reduce los incentivos de los países para mantenerse en los distintos planes de interconexión. Además, como se aprecia en la figura 4.2, esta estrategia presenta el menor de los máximos beneficios y la figura 4.3 muestra que comparte el menor de los mínimos beneficios.

En primer lugar, de la figura 4.11 se desprende que lo máximo que puede aspirar esta estrategia es una eficiencia del 76%, siendo 13 puntos porcentuales más bajo que la menor cota superior entre las demás estrategias. En segundo lugar, la estrategia cuenta con una cota inferior de 1%, por lo que además comparte el valor más bajo de eficiencia en el peor caso. En último lugar, a pesar de lo anterior, el valor esperado para el precio de la anarquía en esta estrategia no es el peor entre las seis anteriores. El promedio corresponde a un 43% de eficiencia ubicándose por encima de las estrategias 1 y 2.

Esta es la única estrategia, entre las estudiadas, en la que existe un núcleo estable desde el punto de vista cooperativo, presentando incentivos para conformar la gran coalición. Por lo tanto, en el caso de que exista una coordinación y negociación entre los distintos países,

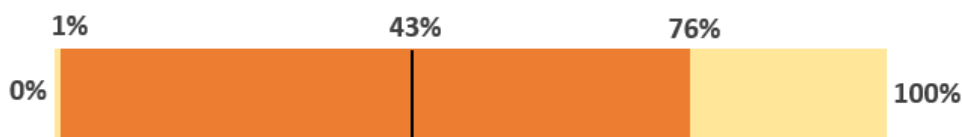


Figura 4.11: Siendo el 100 % el beneficio del caso óptimo, la estrategia 7 tiene una pérdida de eficiencia máxima de 99 % y puede alcanzar un máximo de 76 % de eficiencia respecto al óptimo. El promedio de eficiencia para esta estrategia corresponde al 43 %.

si se utiliza esta estrategia es posible alcanzar un acuerdo para implementar el plan donde se forma la gran coalición para obtener así el portafolio de interconexión óptimo entre todos los planes. En contraparte, el caso óptimo no es un equilibrio de Nash, por lo que deja de manifiesto una diferencia entre los incentivos cooperativos y competitivos.

4.2. Discusión

Uno de los puntos a destacar del estudio, y que impacta posteriormente en los resultados finales, es el tamaño de las líneas a construir. Existen algunas líneas que por su tamaño generan un gran impacto en los beneficios sociales y, por lo tanto, en la eficiencia de las estrategias escogidas. En la sección 3.3 se mencionó que el tamaño de las líneas se define calculando el óptimo de inversión y definiendo capacidades cercanas a este óptimo para los proyectos a estudiar. Así, se obtienen líneas de poca capacidad donde su construcción no genera mayores transferencias entre países, repercutiendo esto en que no exista variación de sus costos marginales y, en consecuencia, en sus beneficios sociales. Situaciones como esta ocurren para las líneas Chile-Bolivia y Bolivia-Perú, donde la similitud del parque generador de Bolivia con Perú, y la diferencia de tamaño entre los sistemas de estos dos países, provoca que se prefiera conectar a Chile y Perú para aprovechar de mejor manera la complementariedad de ambos. Por el contrario, en aquellas líneas donde el valor óptimo representa una alta capacidad, los planes de construcción genera grandes cambios en los costos marginales de los países involucrados y, por consiguiente, una variación significativa en sus beneficios sociales.

Respecto a los beneficios dados por la interconexión, hay una tendencia clara donde Chile y Perú son los grandes ganadores de este proyecto y, en menor medida, Argentina pero, aun así recibiendo grandes beneficios. Perú es el principal exportador percibiendo aumentos en los beneficios de los generadores (en desmedro de los consumidores), mientras que Chile y Argentina importan energía a un menor precio mejorando los beneficios de sus consumidores (en desmedro de las generadoras de estos países). De todas formas, el balance entre los beneficios de dichos agentes es positivo, existiendo un beneficio social producto de la interconexión.

El caso de Bolivia presenta otras características, dado que percibe beneficios sociales considerablemente menores al de sus vecinos. Esto se da principalmente por lo reducido de su sistema eléctrico, tanto en generación como en demanda, teniendo menos recursos para ofrecer a la interconexión. Por ejemplo, la demanda punta del sistema de Argentina es más de diez veces superior que la demanda punta del sistema de Bolivia. Por último, en términos de

oferta energética, Bolivia compite directamente con Perú, donde este sextuplica la capacidad instalada del primero generando una ventaja comparativa para Perú que afecta de forma negativa las posibilidades de Bolivia en esta interconexión multilateral.

Los bajos beneficios que percibe Bolivia trae como consecuencia una distorsión en la asignación de costos y beneficios en aquellas estrategias que lo socializan, afectando de forma negativa los incentivos de todos los países. Sin embargo, Bolivia sí tiene una oportunidad interconectándose con Argentina puesto que, al no existir una frontera directa entre este último y Perú, la competencia mencionada dependería exclusivamente de la decisión de interconectar Chile y Perú y una consiguiente construcción de la línea entre Chile y Argentina. Por lo tanto, Argentina, al interconectarse con Bolivia, tiene la posibilidad de recibir directamente los beneficios de la energía flexible del gas a bajos precios sin depender de terceros.

Si bien en Bolivia existe un fuerte subsidio a los precios del gas y esta tecnología representa dos tercios de la matriz energética de dicho país, no es suficiente para ejercer un poder de mercado suficiente para que los demás países se sientan atraídos a realizar una inversión de interconexión para aprovechar estos precios. Incluso asumiendo que Bolivia accede a vender la generación de gas subsidiado, las demás naciones optan por otros planes de interconexión. Es importante destacar que Perú cuenta con una alta capacidad instalada de embalse que complementa las oportunidades del gas, tecnología que equipara las posibilidades de competencia a pesar de los precios subsidiados del gas de Bolivia.

Los incentivos de los distintos países cambian y se ven afectados según la estrategia utilizada. En la tabla 4.1 se muestra un resumen de los resultados más importantes del estudio en cuanto a incentivos y eficiencia. Así, en aquellas donde los costos y beneficios de transmisión son socializados, las naciones que perciben menores beneficios sociales son los que obtienen mayores incentivos a participar de los planes. Sin embargo, dada la naturaleza de este tipo de asignación, la distribución provoca que algunos países tengan incentivos a desviarse a un caso donde reciben pocos beneficios sociales y, así, recibir la mayor parte de los beneficios que generan los planes de transmisión. Esto genera la creación de incentivos perversos en algunos países que a la larga perjudican la eficiencia de este tipo de estrategias como indican las figuras 4.5 y 4.6.

Estrategia	Incentivos		Eficiencia		
	Eq. de Nash	Núcleo	Cota sup.	Cota inf.	Valor esperado
1	6	Inestable	89 %	2 %	39 %
2	10	Inestable	89 %	1 %	33 %
3	7	Inestable	92 %	2 %	60 %
4	11	Inestable	93 %	1 %	55 %
5	7	Inestable	99 %	2 %	62 %
6	11	Inestable	93 %	1 %	46 %
7	5	Estable	76 %	2 %	43 %

Tabla 4.1: Tabla resumen con los resultados más importantes del estudio.

Las estrategias que asignan los costos y beneficios entre los países que comparten línea resultaron ser más eficientes, aumentando los incentivos de mantenerse en los planes y aumentando beneficios totales esperados. Asimismo, en dichas estrategias la asignación busca

beneficiar en mayor medida a aquel que se ve menos beneficiado en términos sociales equiparando las ganancias y generando incentivos a dicho país a mantenerse en el plan, sin castigar al más beneficiado. Las estrategias 3, 4, 5 y 6 son las que contemplan este tipo de asignación, las cuales resultaron ser las más eficientes en términos competitivos (véase figuras 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10).

Aquellas estrategias que reparten los beneficios netos de transmisión presentan mayor cantidad de equilibrios de Nash, pero una eficiencia menor. En contraste, con una menor cantidad de equilibrios, las estrategias que reparten beneficios y costos por separado entregan un valor esperado y una cota superior en el precio de la anarquía más elevada. Existe un punto importante, entonces, en esta comparación: un mayor número de equilibrios de Nash afecta directamente en la eficiencia, dado que aumenta la dispersión de los valores en el precio de la anarquía. Como se asumió equiprobabilidad en alcanzar los distintos equilibrios, tener un mayor número de estos perjudica en términos de costos de ineficiencia. El resultado cambiaría en el caso que se le dé mayor peso probabilístico a aquellos planes que siendo equilibrio de Nash perciben mayores beneficios totales. En el caso de las estrategias 3 y 5 que reparten los costos y beneficios por separado, se da otra situación además de contar con menor dispersión entre los equilibrios: estos últimos se agrupan en los casos de altos beneficios sociales. Por lo tanto, si ya la dispersión era baja, los altos beneficios solo generan que se incremente la eficiencia de las estrategias. Se puede determinar, entonces, que el número de equilibrios no es un factor determinante a la hora de evaluar eficiencia e incluso puede disminuir esta última si existen valores bajos que reduzcan el valor esperado.

Alcanzar equilibrios en términos cooperativos o competitivos guardan una distancia significativa, ocasionado por el comportamiento de los involucrados y las decisiones que pueden tomar. La estrategia 7 resultó ser la que menos réditos en equilibrios competitivos guarda, teniendo la menor cantidad de equilibrios, la cota superior más baja y un bajo nivel de eficiencia. Aún así, esta es la única que cumple con las restricciones de racionalidad para alcanzar un núcleo estable reforzando la distinción entre incentivos cooperativos y competitivos. El punto crucial en el enfoque cooperativo es el hecho de que cada uno de los países conoce la existencia de situaciones en las que puede recibir mayores beneficios individuales, pero entienden que alcanzar esos estados puede ser inconveniente para los demás, ocasionando que no sea factible alcanzar dicho estado al negociar. Esta situación no se contempla en el caso competitivo, dado que, producto de los incentivos egoístas, ocurre que, aun con la existencia de un núcleo estable, algunos países no verían satisfechas sus pretensiones desde este enfoque.

Conclusión

A través de un modelo de simulación de la operación eléctrica de Argentina, Bolivia, Chile y Perú se estudiaron los incentivos económicos que existen para varias configuraciones de interconexión multilateral entre estos 4 países. Se establecieron 5 líneas candidatas que daban un total de 32 planes de interconexión. Estos permitieron evaluar diferentes formas de asignar los costos y beneficios estudiando los incentivos económicos, tanto competitivos como cooperativos, y la eficiencia de estas estrategias en el enfoque competitivo. Se contrastó las diferencias entre el enfoque competitivo con el cooperativo, donde la estrategia con menor eficiencia en términos competitivos resultó ser la única que contemplaba incentivos cooperativos para concretar el plan óptimo.

En primer lugar, aquellas estrategias que tendían a socializar la asignación de costos y beneficios eran poco eficientes demostrando no ser un mecanismo confiable para la implementación de políticas. En segundo lugar, la eficiencia de una estrategia no está garantizada por la cantidad de equilibrios, sino por la dispersión de estos y su concentración en planes con beneficios altos.

Sin embargo, la conclusión más importante a la que se llega es que el precio de la anarquía para el contexto estudiado es estrictamente mayor a cero, generando así la necesidad de promover la cooperación entre países para alcanzar beneficios sociales más altos. Una manera de facilitarlos podría mediante la creación de un organismo supranacional en la región dedicado a impulsar la coordinación de proyectos energéticos entre países. Con esto se podría disminuir el riesgo de incurrir en ineficiencias económicas al no cooperar. Es importante mencionar también que, en este contexto de cooperación, se demostró que es posible establecer mecanismos de peajes (que reflejen los costos de inversión de transmisión menos las respectivas rentas de congestión para una línea específica) de muy sencilla implementación, donde cada línea se remunere solamente mediante pagos provenientes de los dos países de sus extremos. Este mecanismo sencillo permitiría disminuir los esfuerzos de la coordinación e incentivar la participación de todos los países miembros en el plan de expansión común (i.e. núcleo estable).

Dado el contexto específico de esta investigación, se modificó el cálculo de equilibrio de Nash, donde la implicación de acuerdos bilaterales para la construcción de una nueva línea bloquea esta posibilidad en la determinación de equilibrios y solo se consideran aquellas decisiones unilaterales por cada país. Se trata de una modificación novedosa que no aparece en investigaciones anteriores. Lo que sí tratan otras investigaciones es la teoría de juegos enfocada en sistemas eléctricos como se puede ver en [15] y [19]. Sin embargo, a diferencia de

estas, en este estudio se abordó una comparación utilizando paralelamente los dos enfoques de teoría de juegos existentes, relacionándolos de modo de destacar las diferencias que existen entre la cooperación y la competencia.

Además, se incluyó el concepto de precio de anarquía para el estudio de eficiencia de las distintas estrategias, concepto que si bien fue utilizado en otras investigaciones como se menciona en [34] este estaba restringido a mercados desregulados que utilizan las subastas de energía como método de fijación de precios. En este trabajo se abordaron mercados de costos auditados, cuyos países conservan intereses políticos y económicos conflictivos entre ellos, obligando a buscar alternativas en las asignaciones y complejizando el estudio de los incentivos. Por lo mismo, se combinaron distintos conceptos que en estudios anteriores se hacían separadamente (véase [36] y [35]) para calcular el mejor y peor caso del precio de la anarquía en conjunto, facilitando el análisis de eficiencia. Luego se agregó el concepto de valor esperado de eficiencia que no se había realizado anteriormente.

Trabajo futuro

Si bien en este estudio se abordó la temática de conexiones internacionales y se analizaron los incentivos de los países como un conjunto, los conceptos abarcados pueden ser fácilmente extendidos a otros ámbitos. Por ejemplo, se pueden analizar los incentivos de los distintos agentes privados de un solo mercado energético, y así definir la locación de proyectos de generación o la instalación de proyectos de una cierta tecnología. Otra aplicación es el estudio de la eventual interacción entre generadores con otros agentes del mercado (consumidores, transmisores, autoridad, etc.), pudiendo esta provocar la aparición de intereses divergentes que hacen necesario implementar un análisis similar al utilizado en esta investigación. Por lo tanto, en el estudio de la implementación de ciertas políticas y su efecto en el mercado y en sus participantes, esta metodología puede ayudar a mejorar la toma de decisiones o la anticipación de ciertos escenarios dados por el comportamiento de los integrantes del mercado.

Por último, hay ciertos elementos que se pueden incorporar al estudio:

- Extenderlo a una inversión privada para los proyectos de transmisión aproxima el problema a la realidad (la inversión pública es escasa en la región), por lo que la asignación de los beneficios y costos de transmisión deben ser estudiados incorporando este nuevo agente a la investigación.
- Es deseable estudiar distintos tipos de tarificación de forma de no perjudicar a los distintos agentes de los países; por ejemplo, en un país exportador, los consumidores de este ven un incremento en los precios de la energía que, si bien se ven compensados por un aumento en los beneficios de los generadores, puede traer problemas en conceptos de incentivos internos.
- No es factible que Bolivia exporte su energía a precios subsidiados, por lo que incorporar algún tipo de sensibilidad al modelo donde los precios del gas boliviano sean distintos para el consumo interno y para la exportación, puede aportar más elementos modificando los resultados del presente estudio.
- Se podría incluir en el análisis los posibles beneficios ambientales tanto a nivel regional como local e integrarlos en la evaluación de incentivos.
- Incorporar una expansión multianual de la oferta de generación podría medir la inter-

dependencia que existe entre la inversión de transmisión y generación en los sistemas eléctricos, evaluando aquellos portafolios que promueven la instalación de nuevos proyectos de generación.

- En orden de estudiar los efectos dentro del equilibrio cooperativo del sistema, se podrían agregar las interconexiones ya existentes con otros países de la región, como el caso de Argentina con Brasil, Paraguay y Uruguay o el caso de Perú con Ecuador; sin embargo, habría que tomar en cuenta las grandes distancias que existen entre dichas interconexiones y las que se proponen en este estudio, ya que es probable que dicha distancia no afecte en mayor medida los resultados obtenidos en la presente investigación.

Bibliografía

- [1] M. Saguan and L. Meeus “Modelling the cost of achieving a renewable energy target: Does it pay to cooperate across borders?” *RSCAS Working Papers*, vol. 46, Jan. 2011
- [2] F.D Muñoz, B.F Hobbs and S. Kasina “Efficient Proactive Transmission Planning to Accommodate Renewables” presented at the *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, USA, Jul. 2012.
- [3] Y. Li, Z. Lukszo and M. Weijnen “The impact of inter-regional transmission grid expansion on China’s power sector decarbonization” *Applied Energy*, vol. 183, no. 1, pp. 853-873, Dec. 2016.
- [4] J. Z. Thellufsen and H. Lund “Cross-border versus cross-sector interconnectivity in Renewable Energy Systems”. *Energy*, vol. 124, no. 1 pp. 492-501, Apr. 2017
- [5] P. Buijs and R. Belmans “Transmission Investments in a multilateral context”. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, pp. 475-483, Feb. 2012.
- [6] E. Sauma et al. “Electric systems integration in the Andes Community: Opportunities and threats”. *Energy Policy*, vol. 39, no. 2, pp. 936-949, Feb. 2011
- [7] S. Hagspiel “Reliable Electricity: The Effects of System Integration and Cooperative Measures to Make it Work” *EWI Working Paper*, vol. 13, Dec. 2017.
- [8] Energía 2050 Chile. Principales metas 2035-2050. Disponible: <http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2016/08/2035-y-2050.pdf>
- [9] Plan Energético Nacional 2014-2025. Ministerio de energía y minas Perú. Disponible: <http://deltavolt.pe/documentos/Resumen2014-2025Vf.pdf>
- [10] Compromisos hechos por Bolivia ante la CMNUCC. Disponible: <https://www.evwind.com/2016/10/31/bolivia-apunta-a-usar-79-por-ciento-de-energias-renovables-en-2030/>
- [11] Plan de energías renovables Argentina 2016-2025. Ministerio de energía y minería. Disponible: https://www.minem.gob.ar/servicios/archivos/6548/AS_14695676441.pdf
- [12] L. Olmos, M. Rivier and I. Pérez-Arriaga “Transmission Expansion Benefits: The Key to Redesigning the Regulation of Electricity Transmission in a Regional Context” *Eco-*

nomics of Energy and Enviromental Policy, vol. 7, no. 1, 2018.

- [13] B. P. Esther, K. S. Kumar, G. G. Krishnan and S. Venkatesh “Fair Allocation of Energy and Power using Shapley Value to Reduce Deficit in Regions of Indian Grid” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 10, no. 30, pp. 1-5, Aug. 2017
- [14] C. F. Romero Roa and S. Dow “Power interconnections in the Andean Community: what are the lessons in terms of price differences between Colombia–Ecuador and Colombia–Venezuela cross-border trading?” *Journal of World Energy Lay and Business*, vol. 10, no. 2 pp. 91-102, Apr. 2017.
- [15] T. Kristiansen “Cross-border transmission capacity allocation mechanisms in South East Europe”. *Energy Policy*, vol. 35, no. 9, pp. 4611-4622, Sep. 2007
- [16] H. Nylund and J. Egerer “Regional versus Bilateral Cost Sharing in Electricity Transmission Expansion”. presented at the *Annual Trans-Atlantic INFRADAY on Energy*, Washington DC, USA, Nov. 2013
- [17] H. Nylund “Regional cost sharing in expansions of electricity transmission grids” *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 8, no. 3, pp. 283-300, 2014.
- [18] W. W. Hogan “Transmission Benefits and Cost Allocation” *Mossavar-Rahmani Center for Business and Government*, May 2011.
- [19] D. Huppmann and J. Egerer “National-strategic investment in European power transmission capacity”. *European Journal of Operational Research*, vol. 247, no. 1, pp. 191-203, Nov 2015.
- [20] P. A. Ruiz and J. Contreras “An Effective Transmission Network Expansion Cost Allocation Based on Game Theory” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 136-144, Feb. 2007.
- [21] M. Rouastei, M.K Sheik-El-Eslami and H. Seifi “Transmission cost allocation based on the users’ benefits” *Electrical Power and Energy System*, vol. 61, pp. 547-552, Oct. 2014.
- [22] P. Beria, I. Maltese and I. Mariotti “Multicriteria versus Cost Benefit Analysis: a comparative perspective in the assessment of sustainable mobility” *European Transport Research Review*, vol. 4, no. 3, pp. 137-152, Sep. 2012.
- [23] R. Bhakar, V. S. Sriram, N. P. Padhy and H. O. Gupta “Transmission Embedded Cost Allocation in Restructured Environment: A Game-theoretic Approach” *Electric Power Components and Systems*, vol. 37, no. 9, pp. 970-981, Aug. 2009.
- [24] F. Banez-Chicharro, L. Olmos, A. Ramos and J. M. Latorre “Beneficiaries of transmission expansion projects of an expansion plan: An Aumann-Shapley approach” *Applied Energy*, vol. 195, no.1, pp. 382-401, Jun. 2017
- [25] J. M. Zolezzi and H. Rudnick “Transmission Cost Allocation by Cooperative Games and Coalition Formation” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, pp. 1008-1015,

Nov. 2002.

- [26] E. Maskin *Bargaining, coalitions and externalities*, New Jersey, Princeton University Press, 2003.
- [27] W. Shang and O. Volij “Transmission Investment Cost Allocation within the Cooperative Game Framework”, presented at the *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, GA, USA, Oct. 2006. IEEE, 2006.
- [28] S. C. Littlechild and G. Owen “A Simple Expression for the Shapely Value in a Special Case” *Management Science*, vol. 20, no. 3, pp. 370-372, Nov. 1973
- [29] S. Li and Q. Zhang “A simplified expression of the Shapley function for fuzzy game” *European Journal of Operational Research*, vol. 196, no. 1, pp. 234-245, Jul. 2009
- [30] G. O’Brien, A. El Gamal and R. Rajagopal “Shapley Value Estimation for Compensation of Participants in Demand Response Programs” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 2837-2844 Nov. 2015
- [31] D. Gately “Sharing the Gains from Regional Cooperation: A Game Theoretic Application to Planning Investment in Electric Power”. *International Economic Review*, vol. 15, no. 1, pp. 195-208, Feb. 1974
- [32] M. Kristiansen, F. D. Muñoz, S. Oren and M. Korpas “A Mechanism for Allocating Benefits and Costs from Transmission Interconnections under Cooperation: A Case Study of the North Sea Offshore Grid” *The Energy Journal* vol. 39, no. 6, pp. 209-234, 2008.
- [33] R. Gibbons *A Primer in Game Theory*, New Jersey, Prentice Hall, 1992.
- [34] Sara Robinson “The Price of Anarchy” *SIAM News*, vol. 37, no. 5, pp. 1-4, Jun. 2004.
- [35] T. Roughgarden *Selfish Routing and the Price of Anarchy*, Boston, The MIT Press, 2005.
- [36] E. Koutsoupias and C. Papadimitrou “Worst-case Equilibria” *Computer Science Review*, vol. 3, no. 2, pp. 65-69, May, 2009
- [37] Coordinador eléctrico nacional chileno. Disponible: <https://www.coordinador.cl/>
- [38] Proceso de Planificación Energética a Largo Plazo del Ministerio de Energía de Chile. Disponible: <http://pelp.minenergia.cl/>
- [39] Comité de Operaciones del Sistema Interconectado Nacional de Perú. Disponible: <http://www.coes.org.pe/portal/>
- [40] Comité Nacional de Despacho de Carga de Bolivia. Disponible: <https://www.cndc.bo/home/index.php>
- [41] Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico Argentino. Disponible: <http://portalweb.cammesa.com/default.aspx>

Apéndice A

Costos marginales promedios resultantes del modelo de simulación

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	\$ 56,1	\$ 68,2	\$ 9,8	\$ 12,8
2	0	0	0	0	1	\$ 55,6	\$ 61,1	\$ 9,8	\$ 60,2
3	0	0	0	1	0	\$ 56,1	\$ 68,2	\$ 9,8	\$ 12,2
4	0	0	0	1	1	\$ 55,6	\$ 61,1	\$ 10,6	\$ 37,3
5	0	0	1	0	0	\$ 56,1	\$ 68,2	\$ 9,8	\$ 15,1
6	0	0	1	0	1	\$ 55,6	\$ 61,1	\$ 9,8	\$ 60,2
7	0	0	1	1	0	\$ 56,1	\$ 68,2	\$ 9,8	\$ 12,4
8	0	0	1	1	1	\$ 55,6	\$ 61,1	\$ 10,6	\$ 52,7
9	0	1	0	0	0	\$ 40,0	\$ 65,4	\$ 34,2	\$ 12,8
10	0	1	0	0	1	\$ 40,0	\$ 58,4	\$ 34,2	\$ 57,5
11	0	1	0	1	0	\$ 40,0	\$ 65,4	\$ 32,6	\$ 20,0
12	0	1	0	1	1	\$ 40,0	\$ 58,4	\$ 34,2	\$ 44,6
13	0	1	1	0	0	\$ 40,0	\$ 65,4	\$ 34,2	\$ 15,1
14	0	1	1	0	1	\$ 40,0	\$ 58,4	\$ 34,2	\$ 57,4
15	0	1	1	1	0	\$ 40,0	\$ 65,4	\$ 32,6	\$ 20,1
16	0	1	1	1	1	\$ 40,0	\$ 58,4	\$ 34,2	\$ 46,3
17	1	0	0	0	0	\$ 58,3	\$ 59,3	\$ 9,8	\$ 12,8
18	1	0	0	0	1	\$ 56,8	\$ 57,8	\$ 9,8	\$ 57,1
19	1	0	0	1	0	\$ 58,3	\$ 59,3	\$ 9,8	\$ 12,2
20	1	0	0	1	1	\$ 56,8	\$ 57,8	\$ 10,6	\$ 39,8
21	1	0	1	0	0	\$ 58,3	\$ 59,3	\$ 9,8	\$ 15,1
22	1	0	1	0	1	\$ 56,8	\$ 57,8	\$ 9,8	\$ 57,2
23	1	0	1	1	0	\$ 58,3	\$ 59,3	\$ 9,8	\$ 12,4
24	1	0	1	1	1	\$ 56,8	\$ 57,8	\$ 10,6	\$ 56,0
25	1	1	0	0	0	\$ 41,9	\$ 48,0	\$ 34,2	\$ 12,8
26	1	1	0	0	1	\$ 41,9	\$ 48,0	\$ 34,2	\$ 47,4
27	1	1	0	1	0	\$ 41,9	\$ 48,0	\$ 32,6	\$ 20,0
28	1	1	0	1	1	\$ 42,0	\$ 48,0	\$ 35,0	\$ 41,3
29	1	1	1	0	0	\$ 41,9	\$ 48,0	\$ 34,2	\$ 15,1
30	1	1	1	0	1	\$ 41,9	\$ 48,0	\$ 34,2	\$ 47,5
31	1	1	1	1	0	\$ 41,9	\$ 48,0	\$ 32,6	\$ 20,1
32	1	1	1	1	1	\$ 42,0	\$ 48,0	\$ 35,0	\$ 43,1

Figura A.1: Resultados de los costos marginales promedios anuales en MWh/US\$ para cada uno de los planes de interconexión en cada uno de los países.

Apéndice B

Resultados de las estrategias

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	3,54	3,23	0,00	54,02
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	0,00	-1,32
4	0	0	0	1	1	5,21	5,78	55,43	12,50
5	0	0	1	0	0	3,58	0,00	0,00	-0,37
6	0	0	1	0	1	3,96	3,76	0,00	53,66
7	0	0	1	1	0	4,91	0,00	0,00	-2,90
8	0	0	1	1	1	4,49	4,54	32,85	37,51
9	0	1	0	0	0	140,65	0,00	195,84	0,00
10	0	1	0	0	1	74,82	96,41	173,84	48,99
11	0	1	0	1	0	67,44	0,00	140,98	132,92
12	0	1	0	1	1	73,35	122,08	168,50	36,99
13	0	1	1	0	0	68,44	0,00	165,80	104,04
14	0	1	1	0	1	74,75	98,09	173,54	48,90
15	0	1	1	1	0	67,39	0,00	140,70	134,51
16	0	1	1	1	1	73,41	120,83	168,75	38,20
17	1	0	0	0	0	5,18	2,99	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	8,37	18,31	0,00	28,91
19	1	0	0	1	0	0,03	-0,23	0,00	7,05
20	1	0	0	1	1	3,49	8,41	54,86	6,37
21	1	0	1	0	0	0,51	1,26	0,00	9,80
22	1	0	1	0	1	8,23	18,16	0,00	28,82
23	1	0	1	1	0	-0,17	-0,72	0,00	11,26
24	1	0	1	1	1	3,49	16,18	28,45	25,08
25	1	1	0	0	0	114,33	121,17	172,76	0,00
26	1	1	0	0	1	87,69	88,43	166,37	97,18
27	1	1	0	1	0	47,91	41,10	128,88	195,25
28	1	1	0	1	1	82,90	82,72	173,36	103,65
29	1	1	1	0	0	45,99	37,79	151,92	174,52
30	1	1	1	0	1	87,75	88,54	166,14	97,28
31	1	1	1	1	0	47,98	41,22	128,64	196,69
32	1	1	1	1	1	84,03	84,05	174,04	100,21

Figura B.1: Resultados para la estrategia 1. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	2,76	2,21	0,00	55,82
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	0,00	-1,32
4	0	0	0	1	1	5,99	6,03	42,55	24,37
5	0	0	1	0	0	3,08	0,00	0,00	0,12
6	0	0	1	0	1	2,79	2,23	0,00	56,37
7	0	0	1	1	0	1,95	0,00	0,00	0,06
8	0	0	1	1	1	4,49	4,15	19,43	51,31
9	0	1	0	0	0	99,02	0,00	237,46	0,00
10	0	1	0	0	1	97,18	3,37	234,24	59,27
11	0	1	0	1	0	98,10	0,00	209,73	33,52
12	0	1	0	1	1	99,97	22,41	239,63	38,91
13	0	1	1	0	0	97,64	0,00	236,90	3,74
14	0	1	1	0	1	97,52	3,38	235,05	59,31
15	0	1	1	1	0	98,14	0,00	209,74	34,71
16	0	1	1	1	1	99,89	20,10	239,60	41,62
17	1	0	0	0	0	1,93	6,24	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	2,85	20,09	0,00	32,65
19	1	0	0	1	0	1,61	5,21	0,00	0,03
20	1	0	0	1	1	5,24	34,70	7,72	25,46
21	1	0	1	0	0	2,72	8,81	0,00	0,04
22	1	0	1	0	1	2,83	19,89	0,00	32,49
23	1	0	1	1	0	2,44	7,92	0,00	0,01
24	1	0	1	1	1	3,84	27,03	0,16	42,16
25	1	1	0	0	0	87,05	77,34	243,87	0,00
26	1	1	0	0	1	78,36	66,72	241,25	53,35
27	1	1	0	1	0	73,58	60,90	212,35	66,29
28	1	1	0	1	1	77,09	65,61	255,96	43,98
29	1	1	1	0	0	72,13	59,11	239,38	39,60
30	1	1	1	0	1	78,34	66,71	241,25	53,41
31	1	1	1	1	0	73,67	60,99	212,38	67,51
32	1	1	1	1	1	76,56	64,97	255,81	45,00

Figura B.2: Resultados para la estrategia 2. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	3,24	4,04	0,00	53,51
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	0,00	-2,36
4	0	0	0	1	1	3,24	48,47	11,79	15,43
5	0	0	1	0	0	3,58	0,00	0,00	-0,37
6	0	0	1	0	1	4,25	3,97	0,00	53,16
7	0	0	1	1	0	3,80	0,00	1,14	-2,93
8	0	0	1	1	1	3,79	19,65	18,56	37,38
9	0	1	0	0	0	140,65	0,00	195,84	0,00
10	0	1	0	0	1	142,04	4,61	198,58	48,84
11	0	1	0	1	0	154,22	0,00	180,00	7,13
12	0	1	0	1	1	142,03	29,93	197,03	31,93
13	0	1	1	0	0	140,15	0,00	195,84	2,29
14	0	1	1	0	1	142,37	4,77	198,58	49,55
15	0	1	1	1	0	153,76	0,00	180,00	8,83
16	0	1	1	1	1	141,89	26,76	197,20	35,35
17	1	0	0	0	0	5,18	2,99	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	5,69	0,82	0,00	49,08
19	1	0	0	1	0	5,18	2,99	1,04	-2,36
20	1	0	0	1	1	5,68	14,14	12,90	40,42
21	1	0	1	0	0	4,75	2,98	0,00	3,84
22	1	0	1	0	1	5,75	0,68	0,00	48,79
23	1	0	1	1	0	4,72	2,98	1,14	1,54
24	1	0	1	1	1	5,83	2,24	20,01	45,12
25	1	1	0	0	0	150,58	63,86	193,81	0,00
26	1	1	0	0	1	150,56	57,09	193,82	38,19
27	1	1	0	1	0	165,96	63,86	176,16	7,15
28	1	1	0	1	1	141,66	60,65	201,11	39,22
29	1	1	1	0	0	150,08	63,87	193,81	2,46
30	1	1	1	0	1	150,46	57,05	193,82	38,37
31	1	1	1	1	0	165,51	63,87	176,16	9,00
32	1	1	1	1	1	141,38	59,78	201,25	39,93

Figura B.3: Resultados para la estrategia 3. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	3,24	2,19	0,00	55,36
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	0,00	-1,32
4	0	0	0	1	1	3,24	38,41	9,34	27,95
5	0	0	1	0	0	3,08	0,00	0,00	0,12
6	0	0	1	0	1	3,79	2,19	0,00	55,40
7	0	0	1	1	0	3,30	0,00	0,00	-1,29
8	0	0	1	1	1	3,35	8,36	16,08	51,60
9	0	1	0	0	0	99,02	0,00	237,46	0,00
10	0	1	0	0	1	100,69	2,88	239,93	50,57
11	0	1	0	1	0	117,77	0,00	218,91	4,67
12	0	1	0	1	1	100,68	19,55	240,21	40,47
13	0	1	1	0	0	99,02	0,00	237,46	1,79
14	0	1	1	0	1	101,14	2,89	239,93	51,32
15	0	1	1	1	0	117,79	0,00	218,91	5,89
16	0	1	1	1	1	100,75	16,23	240,34	43,89
17	1	0	0	0	0	1,93	6,24	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	1,29	4,88	0,00	49,42
19	1	0	0	1	0	1,93	6,24	0,00	-1,32
20	1	0	0	1	1	1,29	20,45	10,44	40,95
21	1	0	1	0	0	1,97	6,25	0,00	3,35
22	1	0	1	0	1	1,27	4,79	0,00	49,16
23	1	0	1	1	0	1,94	6,25	0,00	2,18
24	1	0	1	1	1	1,27	5,76	17,53	48,64
25	1	1	0	0	0	100,33	60,39	247,54	0,00
26	1	1	0	0	1	100,33	53,80	247,54	38,00
27	1	1	0	1	0	120,20	60,39	227,85	4,69
28	1	1	0	1	1	89,01	61,01	259,08	33,54
29	1	1	1	0	0	100,34	60,39	247,53	1,96
30	1	1	1	0	1	100,34	53,75	247,54	38,08
31	1	1	1	1	0	120,23	60,39	227,85	6,07
32	1	1	1	1	1	88,78	59,15	259,18	35,23

Figura B.4: Resultados para la estrategia 4. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	3,24	4,04	0,00	53,51
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	1,05	-2,36
4	0	0	0	1	1	3,24	52,31	11,92	11,46
5	0	0	1	0	0	3,58	0,00	0,00	-0,37
6	0	0	1	0	1	4,32	3,97	0,00	53,09
7	0	0	1	1	0	3,81	0,00	1,14	-2,94
8	0	0	1	1	1	3,85	19,96	18,64	36,92
9	0	1	0	0	0	140,65	0,00	195,84	0,00
10	0	1	0	0	1	142,32	4,83	198,30	48,62
11	0	1	0	1	0	160,17	0,00	182,00	-0,81
12	0	1	0	1	1	142,31	31,92	202,91	23,77
13	0	1	1	0	0	142,82	0,00	195,84	-0,38
14	0	1	1	0	1	144,01	5,00	198,30	47,96
15	0	1	1	1	0	161,90	0,00	181,95	-1,26
16	0	1	1	1	1	143,04	28,34	203,64	26,17
17	1	0	0	0	0	5,18	2,99	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	1,12	10,15	0,00	44,32
19	1	0	0	1	0	5,18	2,99	1,04	-2,36
20	1	0	0	1	1	1,10	46,63	13,02	12,37
21	1	0	1	0	0	8,94	3,00	0,00	-0,37
22	1	0	1	0	1	1,24	9,90	0,00	44,08
23	1	0	1	1	0	9,18	3,00	1,14	-2,94
24	1	0	1	1	1	1,33	12,59	20,10	39,19
25	1	1	0	0	0	159,05	41,16	208,05	0,00
26	1	1	0	0	1	159,03	41,81	208,05	30,78
27	1	1	0	1	0	178,66	41,16	194,11	-0,79
28	1	1	0	1	1	148,24	54,79	221,70	17,90
29	1	1	1	0	0	161,39	41,16	208,04	-0,38
30	1	1	1	0	1	159,56	41,72	208,05	30,37
31	1	1	1	1	0	180,56	41,16	194,06	-1,24
32	1	1	1	1	1	148,40	51,00	222,47	20,46

Figura B.5: Resultados para la estrategia 5. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	3,24	2,19	0,00	55,36
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	0,00	-1,32
4	0	0	0	1	1	3,24	40,77	9,42	25,51
5	0	0	1	0	0	3,08	0,00	0,00	0,12
6	0	0	1	0	1	3,82	2,19	0,00	55,37
7	0	0	1	1	0	3,31	0,00	0,00	-1,31
8	0	0	1	1	1	3,36	8,42	16,14	51,47
9	0	1	0	0	0	99,02	0,00	237,46	0,00
10	0	1	0	0	1	100,69	3,04	239,93	50,41
11	0	1	0	1	0	118,54	0,00	221,12	1,69
12	0	1	0	1	1	100,68	20,37	242,04	37,82
13	0	1	1	0	0	100,69	0,00	237,46	0,12
14	0	1	1	0	1	101,88	3,05	239,93	50,41
15	0	1	1	1	0	119,78	0,00	221,08	1,74
16	0	1	1	1	1	100,91	16,80	242,77	40,72
17	1	0	0	0	0	1,93	6,24	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	-1,97	11,95	0,00	45,61
19	1	0	0	1	0	1,93	6,24	0,00	-1,32
20	1	0	0	1	1	-1,97	38,16	10,52	26,42
21	1	0	1	0	0	5,18	6,26	0,00	0,12
22	1	0	1	0	1	-1,96	11,93	0,00	45,24
23	1	0	1	1	0	5,42	6,26	0,00	-1,31
24	1	0	1	1	1	-1,97	12,05	17,60	45,52
25	1	1	0	0	0	98,97	59,61	249,67	0,00
26	1	1	0	0	1	98,94	59,19	249,67	31,86
27	1	1	0	1	0	118,57	59,61	233,23	1,71
28	1	1	0	1	1	88,16	61,70	260,83	31,94
29	1	1	1	0	0	100,81	59,62	249,67	0,12
30	1	1	1	0	1	98,98	59,18	249,68	31,87
31	1	1	1	1	0	119,98	59,62	233,18	1,76
32	1	1	1	1	1	88,16	59,51	261,60	33,07

Figura B.6: Resultados para la estrategia 6. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Caso	CL-AR	CL-PE	CL-BO	PE-BO	BO-AR	CL	AR	PE	BO
1	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0	0	0	1	3,24	-2,65	0,00	60,21
3	0	0	0	1	0	0,00	0,00	-0,73	-0,59
4	0	0	0	1	1	3,24	22,44	4,81	48,44
5	0	0	1	0	0	1,54	0,00	0,00	1,66
6	0	0	1	0	1	3,53	-2,69	0,00	60,54
7	0	0	1	1	0	1,66	0,00	-0,68	1,03
8	0	0	1	1	1	3,30	5,62	8,18	62,29
9	0	1	0	0	0	98,61	0,00	237,87	0,00
10	0	1	0	0	1	100,28	-1,84	240,33	55,28
11	0	1	0	1	0	112,37	0,00	225,79	3,19
12	0	1	0	1	1	100,28	12,25	241,39	47,01
13	0	1	1	0	0	99,45	0,00	237,87	0,95
14	0	1	1	0	1	100,88	-1,75	240,33	55,80
15	0	1	1	1	0	112,99	0,00	225,77	3,84
16	0	1	1	1	1	100,39	10,39	241,75	48,67
17	1	0	0	0	0	-5,68	13,84	0,00	0,00
18	1	0	0	0	1	-9,66	14,51	0,00	50,74
19	1	0	0	1	0	-5,68	13,84	-0,73	-0,59
20	1	0	0	1	1	-9,66	33,47	5,37	43,95
21	1	0	1	0	0	-4,05	13,86	0,00	1,76
22	1	0	1	0	1	-9,84	14,37	0,00	50,68
23	1	0	1	1	0	-3,93	13,86	-0,68	1,12
24	1	0	1	1	1	-9,80	15,77	8,90	58,32
25	1	1	0	0	0	90,96	60,26	257,03	0,00
26	1	1	0	0	1	90,95	54,59	257,03	37,09
27	1	1	0	1	0	104,80	60,26	244,85	3,21
28	1	1	0	1	1	83,24	61,23	265,06	33,10
29	1	1	1	0	0	91,89	60,27	257,02	1,04
30	1	1	1	0	1	90,97	54,54	257,04	37,16
31	1	1	1	1	0	105,51	60,27	244,82	3,94
32	1	1	1	1	1	83,07	59,26	265,44	34,56

Figura B.7: Resultados para la estrategia 7. Equilibrios de Nash destacados en verde y el caso óptimo en azul

Apéndice C

Proceso para calcular equilibrio cooperativo

A continuación se detalla la aplicación con los resultados del modelo de la metodología explicada en el punto 3.6.2.

La tabla C.1 muestra los valores que acotan las restricciones para cada coalición.

Coalición	Ganancia (MMUS\$)
{CL}	0
{AR}	0
{PE}	0
{BO}	0
{AR, CL}	8,17
{AR, BO}	60,79
{BO, CL}	3,2
{BO, PE}	-3,32
{CL, PE}	336,48
{AR, CL, PE}	408,26
{AR, BO, PE}	78,93
{AR, BO, CL}	61,38
{BO, CL, PE}	342,6
{AR, BO, CL, PE}	442,63

Tabla C.1: Ganancia máxima por coalición

Con estos valores, las restricciones de racionalidad son las siguientes:

- Restricciones de racionalidad individual:

$$v(AR) \geq 0 \quad v(BO) \geq 0 \quad v(CL) \geq 0 \quad v(PE) \geq 0 \quad (C.1)$$

- Restricciones de racionalidad de coalición:

$$v(AR) + v(CL) \geq 8, 17 \quad (C.2)$$

$$v(AR) + v(BO) \geq 60, 79 \quad (C.3)$$

$$v(BO) + v(CL) \geq 3, 20 \quad (C.4)$$

$$v(BO) + v(PE) \geq -1, 32 \quad (C.5)$$

$$v(CL) + v(PE) \geq 336, 48 \quad (C.6)$$

$$v(AR) + v(CL) + v(PE) \geq 408, 26 \quad (C.7)$$

$$v(AR) + v(BO) + v(PE) \geq 78, 93 \quad (C.8)$$

$$v(AR) + v(BO) + v(CL) \geq 61, 38 \quad (C.9)$$

$$v(BO) + v(CL) + v(PE) \geq 342, 60 \quad (C.10)$$

$$(C.11)$$

- Restricción de racionalidad colectiva:

$$v(AR) + v(BO) + v(CL) + v(PE) \geq 442, 63 \quad (C.12)$$

Se evalúan los resultados de asignación de costos y beneficios para cada una de las restricciones, en caso de cumplirse, dicha asignación presentaría un núcleo estable.