

# **Indicadores de Seguridad Energética: Aplicación al Sector Energético de Chile**

**J. Molina, V. Martínez, H. Rudnick**  
**Pontificia Universidad Católica de Chile**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica**  
**Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile**  
**Phone 56-2-3544289 hrudnick@puc.cl**

**Keywords:** *Energy security, energy diversity, energy matrix.*

**Abstract:** Securing energy supply is a complex subject with a great diversity of political, economic and environmental variables. The purpose of methodologies that seek to evaluate the security of energy supply focus on the analysis of energy demand and supply trends, either globally or in the electric power sector. In this paper, indicators for energy security, used globally, are analyzed considering implementation in Chile. The literature describes various indicators, which generally have two options. The first option is to deliver qualitative assessments, where the main idea is the weighting or use of checklists to establish a relation between supply and demand. The second option seeks indicators with quantitative information that allow to measure changes or the evolution of the energy system key variables, such as energy diversity, robustness, firm energy, power and economic aspects. Consistent with the above description, indicators were implemented for diversity, robustness, and over-installation, with public data of the National Energy Commission of the Chilean energy sector, determining their evolution to 2007. Scenarios for the evolution of the energy matrix to 2020 were analyzed, according to energy policies and discussions inside the country, considering the expansion of the system, renewable energy, nuclear and liquefied natural gas, in order to determine the behavior of the indicators mentioned. The indicators allow an evaluation of the various strategies for expansion of the energy matrix of a country, considering a variety of aspects that influence the development of a strategy of secure and robust diversification, implying that its components and expansion decisions are of increasing degree of adaptability to possible changes in the environment. The importance of evaluating the energy security is established, not only in relation to the over installation of power generation capacity, but also to the diversity of energy sources and their dependence on resources from other regions.

**Resumen:** Garantizar el abastecimiento de energía es una materia compleja con una gran diversidad de variables de carácter político, económico y ambiental. El propósito de las metodologías que buscan evaluar la seguridad del suministro energético se centran en el análisis de la evolución de la demanda y suministro de la energía, ya sea a nivel global o en el sector de la energía eléctrica. En este trabajo se dan a conocer indicadores de seguridad energética utilizados a nivel mundial y su implementación al sistema energético de Chile. En la literatura se describen diversos indicadores, los cuales en general presentan dos alternativas. La primera, entregar evaluaciones cualitativas, en donde el eje central es la ponderación o utilización de listas de chequeo que permiten establecer una relación entre el suministro y la demanda y la segunda, entregar indicadores con información cuantitativa que permiten establecer el grado ó evolución del sistema energético en variables principales, tales como diversidad de energía, robustez, energía firme, potencia y aspectos económicos. De acuerdo a los indicadores descritos se implementaron los de diversidad, robustez y sobre instalación, con datos de uso público de la Comisión Nacional de Energía (CNE) del sector energético Chileno para determinar su evolución a 2007. A su vez, de acuerdo con las políticas energéticas y los debates al interior del país, se analizaron escenarios de evolución de la matriz energética al 2020 considerando la expansión del sistema, energías renovables, nuclear y gas natural licuado, con el fin de determinar el comportamiento de los indicadores mencionados. Los indicadores permiten realizar una evaluación de las diversas estrategias de expansión de la matriz energética de un país considerando una multiplicidad de aspectos que condicionan el desarrollo de una estrategia de diversificación segura y robusta, que implica que sus componentes y decisiones de expansión presenten un creciente grado de adaptabilidad ante posibles variaciones del entorno. Se establece la importancia de evaluar la seguridad energética, no sólo en el aspecto de sobre instalación de la capacidad de generación de energía, sino también en la diversidad de las fuentes energéticas y su dependencia con los recursos de otras regiones.

## **1.- Introducción**

En la actualidad, la seguridad de suministro energético se ha convertido en un tema esencial de evaluación para la sostenibilidad de los países, y en como éstos pueden satisfacer sus necesidades básicas; donde es indispensable garantizar la existencia de las fuentes primarias que permitan el desarrollo de estas. Son diversos los análisis que se han desarrollado en esta temática, así como en implementar indicadores que permitan establecer un nivel de seguridad energética de un determinado país según las características propias, tales como políticas, económicas, ambientales y sociales.

Dentro de la literatura, "la seguridad del suministro energético" es una frase que se acuñó para expresar una preocupación por la escasez de energía emergente, independientemente de la fuente o motivo de tal escasez. Surge con fuerza, junto con otros dos grandes temas como los son la globalización y el cambio climático. El garantizar el abastecimiento de energía es un hecho complejo, con una gran diversidad de variables y que actualmente no está resuelto [1]. Todas estas variables vienen como resultado de coyunturas de carácter político, económico y ambiental, las que en definitiva plantean la necesidad de brindar soporte jurídico a cada una de los escenarios de evaluación de la seguridad de suministro energético.

La generación de normas, el establecimiento de nuevos reglamentos, la reestructuración de la leyes que norman y regulan el mercado eléctrico son fruto de estos procesos que apuntan a generar los mecanismos que permitan el desarrollo de proyectos sostenibles, que en el largo plazo, garanticen la seguridad de suministro energético de una región determinada.

La diversificación de las fuentes de energía es una pieza clave para establecer altos niveles de seguridad y en definitiva se constituye como uno de los pilares con los que se puede establecer el grado de seguridad energética. La diversidad se puede analizar desde un enfoque de diversidad económica [2], la cual puede incluir variables tales como el precio, la cantidad y la tecnología.

En este artículo se dan a conocer algunos de los más importantes estudios que se han desarrollado en torno a los indicadores de suministro eléctrico, aplicándose al caso chileno, con información de libre acceso. Se establecen cuales son los que mejor permiten estimar los niveles de seguridad energética del sistema, teniendo en cuenta variables como energía firme, diversificación de la matriz energética, concentración del mercado. Por último, se realiza un análisis de los indicadores seleccionados en diversos escenarios y supuestos del mercado chileno.

## **2.- Metodologías de evaluación de seguridad energética**

La creación de metodologías que permitan establecer indicadores de seguridad de suministro ha sido la tarea de diversos investigadores que, a partir de la heurística como herramienta de análisis, han desarrollado indicadores de naturaleza económica. La diversificación de las fuentes de energía es una pieza clave para establecer altos niveles de seguridad y en definitiva se constituye como uno de los pilares con los que se puede establecer el grado de seguridad energética.

Ahora bien, para evaluar cuál es la realidad y definir las variables que debemos entrar a manejar, debemos hacernos algunas preguntas: ¿Tenemos suficientes incentivos en el

país que permitan generar un portafolio de contratos de suministro de combustible, con suficientes subestaciones de energía y potencia, refinerías y plantas asociadas construidas?, ¿Las redes de gas, eléctricas, de petróleo están construidas con suficiente capacidad? ¿Existe suficiente diversidad de combustible? En el desarrollo de un mercado competitivo es necesario, al igual que contar con una condición política que apalanque el mercado, minimizar el riesgo de la volatilidad del precio, tanto en el mercado spot como vía contratos [3].

El propósito de las metodologías que buscan evaluar la seguridad del suministro energético se centra en el análisis de la evolución de la demanda y suministro de la energía, ya sea a nivel global o en el sector de la energía eléctrica. En la literatura se encuentran diversos indicadores, que en general presentan dos alternativas. La primera, evaluaciones cualitativas, en donde el eje central es la ponderación o utilización de listas de chequeo que permiten establecer una relación entre el suministro y la demanda. La segunda evalúa indicadores con información cuantitativa que permiten establecer el grado ó evolución del sistema energético en variables principales, tales como diversidad de energía, energía firme y potencia [2]-[6]-[7]-[8]-[9]-[10]-[11]. A continuación se presentan algunos de éstos indicadores y sus principales características.

## 2.1. Índice de Seguridad de Suministro-SoS.

El índice de seguridad de suministro de la Unión Europea, establece una relación entre el suministro y la demanda del sistema, a partir de ello genera un sistema de pesos a cada uno de los criterios que presenta el modelo. Por ejemplo, la demanda se caracteriza en sectores tales como industrial, residencial y comercial. Para el suministro se consideran fuentes de energía primarias y centros de transformación, dentro de este último se considera la electricidad, el gas, procesos de calefacción y transporte de combustibles, entre otros. Este indicador se define para una política de seguridad en general, que se compone de las medidas adoptadas para reducir los riesgos de perturbaciones en el suministro por debajo de un cierto nivel tolerable [4], los pesos establecidos son los adoptados por el Reino Unido. En la aplicación del modelo se presentan diversos retos desde el punto de vista energético dentro de los cuales se pueden mencionar los elevados y volátiles precios del petróleo y el gas, la creciente demanda de energía, la inestabilidad política en los países productores, el aumento de la dependencia de las importaciones en muchos países de la OCDE, las enormes necesidades de inversión a lo largo de toda la cadena energética, la vulnerabilidad de la infraestructura crítica de energía y las reservas de combustible fósil (y uranio), inversión tecnológica inercial en el sistema, una liberalización del mercado y la competencia.

Este modelo establece que la seguridad de suministro está dada por la siguiente expresión:

$$SoS_{Index} = \frac{2}{3}S/D_{Index} + \frac{1}{3}CC_{Index} \quad (1)$$

donde la relación entre la demanda y el suministro  $S/D_{Index}$ , y el índice de capacidad de crisis  $CC_{Index}$  se encuentran dados por lo siguiente:

$$S/D_{Index} = 0,3 V \cdot demanda + 0,7V \cdot Suministro \quad (2)$$

$$CC_{Index} = \frac{MA}{RA} * 100, si RA \leq MA \quad CC_{Index} = 100 \quad (3)$$

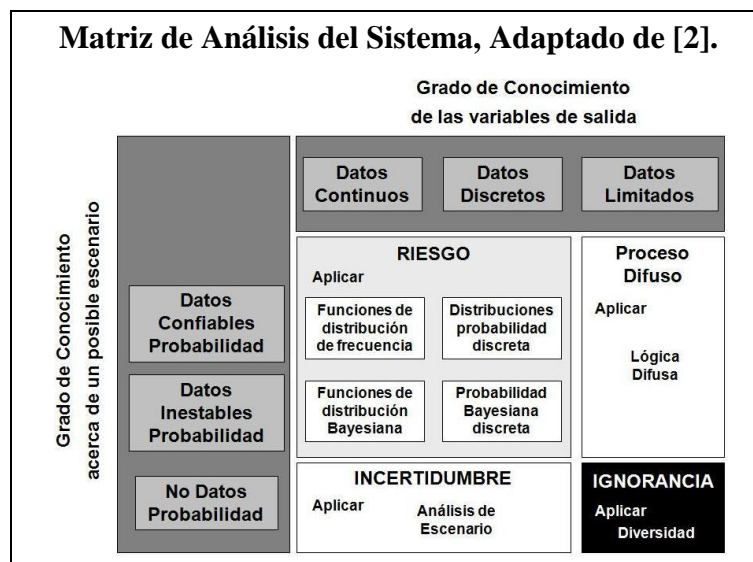
En donde RA es la evaluación del riesgo (Risk Assessment) y MA es la Evaluación de la Mitigación (Mitigation Assessment) del mismo, los cuales a través de una lista de chequeo determinan la disponibilidad de las fuentes primarias de energía de suministrar la demanda requerida en un tiempo dado.

El índice  $CC_{Index}$ , establece una relación entre la evaluación del riesgo y la posibilidad de minimización del mismo a partir de una lista de chequeo de los diversos elementos establecidos para la evaluación del riesgo del sistema. En los Países Bajos se han desarrollado varios estudios aplicando este modelo, y se han diseñado documentos en donde se evalúa el modelo SoS y los desafíos del mismo, los cuales presentan una fuerte componente política [12], caracterizados por aspectos como la gestión de la demanda, la diversificación de fuentes europeas, una racionalización del mercado interior de la energía y el control externo del suministro.

## 2.2. Indicador de Stirling- Análisis de Diversidad Económica

El modelo propuesto por Stirling [2], el más referenciado en la literatura con respecto a los análisis de diversidad, ha desarrollado un modelo heurístico que busca mostrar cual es el valor agregado que ofrece un análisis económico de diversidad frente a otros modelos, estableciendo de una manera más realista los riesgos a los que se enfrenta.

Figura 1



En la Figura 1 se muestra la matriz modelo de análisis del sistema en donde por una parte se tiene un conocimiento acerca de la probabilidad de ocurrencia de un proceso, y por otra parte los conocimientos acerca de los resultados. A partir de estos se concluye que según sea la naturaleza de la información, de la misma forma será el modelo de evaluación a seguir, es decir, en función del nivel de conocimiento o datos de información. También se aprecia que ante la incertidumbre se aplica el criterio de

análisis de escenarios, el cual es ampliamente utilizado en el modelación del sistema de generación de energía eléctrica, así como también indica que ante la ignorancia, diversificar las fuentes es la mejor opción. El análisis de riesgos se realiza en función de los datos históricos de los cuales se genera un análisis probabilístico del sistema. En el caso de que el sistema no permita o arroje como resultados información discreta, se hace necesaria la creación de un sistema difuso en donde a partir de uno o varios conjuntos se puedan obtener valores con un grado de pertenencia, el cual puede ser normalizado y permite estimar un resultado.

En la actualidad es claro que la diversificación de las fuentes de energía es una pieza clave para establecer altos niveles de seguridad y en definitiva se constituye como uno de los pilares con los que se puede establecer el grado de seguridad energética. Éste propone tres elementos característicos, variedad, balance y disparidad. La diversidad es ampliamente vista en la economía como una "reserva de recursos", que limita la incertidumbre [13]-[14] y trasciende en aspectos de innovación, competencia y crecimiento económico [2]. Los elementos se definen como:

**Variedad:** Hace referencia al número de categorías en las que la cantidad se puede segmentar. Todo lo demás en igualdad de condiciones, cuanto mayor sea la variedad de un sistema, mayor es la diversidad.

**Balance:** Hace referencia a la pauta en el prorrateo de la cantidad de las categorías establecidas (por ejemplo: las cuotas de mercado de cada una de las opciones tecnológicas). Para un sistema, entre más iguales sean las fracciones, mayor es el equilibrio, lo que implica una mayor diversidad [2]<sup>1</sup>.

**Disparidad:** Hace referencia a la naturaleza y el grado en que las categorías son diferentes las unas de las otras. Esto se refiere a la forma en que las categorías se definen (es decir: ¿cómo las diferentes opciones tecnológicas varían en términos de lo que se considera sus características operativas?). El sistema que contiene las opciones más dispares será considerado como el más diverso.<sup>2</sup>

Ahora bien, cuando se realiza una evaluación de la diversidad económica en el contexto de la inversión, la tecnología o la política de evaluación, se requiere una estrategia que tenga en cuenta múltiples criterios, es allí en donde se indexa el concepto de *Índice de diversidad de múltiples criterios*:

$$M = \sum_{ij} d_{ij} p_i p_j \quad (4)$$

En donde  $p_i$  es la representación proporcional de opción  $i$  y  $d_{ij}$  es la distancia euclidiana entre opciones  $i$  y la  $j$ .

En este índice se argumenta que se cumplen todas las condiciones establecidas para un conveniente índice general cuantitativo de la diversidad, para su utilización en la economía.

---

<sup>1</sup> Sinónimo de equilibrio: Hace referencia a la armonía general de las partes que componen cualquier cosa.

<sup>2</sup> La terminología de este concepto de la "disparidad" es tomada de la paleontología (Runnegar, 1987; Gould, 1989). En la economía de la biodiversidad, esencialmente el mismo concepto que se denomina 'diversidad' (Weitzman, 1992; Solow, Polasky y Broadus, 1993). Oxford (Cebollas et al, 1973), "La diferencia de calidad o de ser diferente".

Stirling [2], destaca que el índice es *completo*, en el sentido de que se ocupa directamente de la variedad, el equilibrio y la disparidad de los componentes de la diversidad. Es relativamente *transparente*, al tratar elementos no paramétricos y la utilización de la distancia euclidiana para la disparidad, la cual es menos restrictiva. Es *parsimoniosa*, al considerar las propiedades de las opciones (disparidad de los criterios de rendimiento y los atributos). Por último, es relativamente *sólida*, al no depender de una elección de valores de los parámetros esencialmente arbitrarios, como bases, potencias o logaritmos exponenciales. Se menciona que la medida de la distancia euclidiana es menos ambigua que la que se emplea en la *función de Weitzman*. El índice integral de diversidad multicriterio está regido por la siguiente ecuación:

$$\Delta_a = \sum_i (p_i^a)^{1/(1-a)} \quad (5)$$

Donde  $\Delta$  especifica un índice del concepto dual de diversidad. Para un  $\Delta$  de diversidad,  $p_i$  representa (en términos económicos) la proporción de la opción  $i$  (por ejemplo el porcentaje de las fuentes de una matriz energética) y  $a$  es un parámetro que en la práctica rige la ponderación relativa a la variedad y el equilibrio. Si  $\Delta_0 = p_{i_0}$  (variedad: equivale al número de opciones).

Los indicadores mencionados anteriormente se aplican utilizando escalas cualitativas de evaluación (Alto (H), medio (M), o bajo (L)) y criterios de evaluación tales como costo financiero del operador, impacto ambiental, estrategia de seguridad de suministro, contribución al desarrollo económico, desarrollo industrial, escala industrial de la planta de generación eléctrica en términos de capacidad de producción en MW, características físicas del recurso primario, características tecnológicas de las diversas opciones, impacto socio-político de la opciones seleccionadas, consideraciones de la ubicación, interrelación y limitaciones de las opciones.

Un buen ejemplo de los resultados que se pueden obtener al implementar la metodología descrita anteriormente se pueden representar mediante la caracterización de la matriz energética y su respectiva variación según las opciones seleccionadas, en donde por un lado se observe el máximo desempeño de cada combustible y por el otro la máxima diversidad del sistema, y como se realiza un equilibrio (compensación) entre la diversidad y el desempeño de cada fuente primaria de suministro eléctrico.

### 2.3. Indicador de Sustentabilidad Energética

Este indicador es utilizado para establecer el grado de sustentabilidad energética basado en autonomía energética, robustez ante cambios externos, productividad energética, cobertura eléctrica y de necesidades básicas energéticas, impacto ambiental del energético, uso de fuentes renovables y estimación de la utilización de las fuentes de energía [6]. Las variables mencionadas anteriormente establecen una alta sustentabilidad de la autarquía con una baja participación de las importaciones de la oferta energética y la robustez con una baja contribución al PIB de las exportaciones energética. Adicionalmente, en [8] implementan el indicador de diversidad de Simpson [2]-[7] conocido como el índice Herfindahl-Hirschman -HHI-, para establecer el grado de concentración de los mercados utilizando la siguiente ecuación:

$$HHI = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{MW_i * 100}{MW_{Total}} \right\}^2 \quad (6)$$

De donde  $MW_i$  es la potencia instalada de la empresa  $i$ ,  $MW_{Total}$  es la potencia total del sistema y se clasifican de la siguiente manera: mercados no concentrados para valores menores a 1000, mercados moderadamente concentrados para valores entre 1000 y 1800 y para mercados altamente concentrados valores superiores a 1800. Países como Brasil presentan mercados altamente concentrados [6]; así mismo, los análisis desarrollados al caso chileno muestran que éste presenta la misma tendencia (véase Figura 5).

#### 2.4. Indicador Robustez del sistema eléctrico- Rosa de Robustez

La Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear de Uruguay [11] elaboró un ejercicio metodológico en el que agrupó un conjunto de indicadores para establecer la robustez del sistema eléctrico a través de un análisis gráfico. Este modelo incorpora variables económicas y técnicas que se refieren a la seguridad del suministro. Los parámetros que pretende evaluar son esencialmente la diversificación de la matriz energética, la instalación de fuentes autóctonas, el incremento de energía firme y la generación de mayor valor agregado al país. Para la implementación de la metodología se consideraron escenarios de demanda, precios y disponibilidad. A continuación, se presentan los indicadores propuestos para la elaboración de la rosa de robustez del sistema eléctrico.

Diversidad de Fuentes - *IDF*:

$$IDF_{estrategia} = \frac{DF_{estrategia}}{\text{Maximo}(DF_{estrategia})} \quad (7)$$

$$DF = \frac{\sum_i^T \left( 1 - \frac{\sigma_i}{\text{Max}(\sigma)} \right)}{T - T_0 + 1} \quad (8)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{i=Fte\ Primaria} \left( \frac{E\ Firme\ Anual}{E\ Firme\ Total} - \frac{1}{N^\circ\ Ftes\ Primarias} \right)^2} \quad (9)$$

De donde *IDF* es la diversidad de fuentes de la estrategia y  $\sigma_i$  es la desviación estándar de las fuentes de suministro eléctrico. Se suponen 8 fuentes primarias de energía por lo que se evalúa la dispersión de las energía firmes relativas a cada fuente respecto de 1/8 y se estandariza el resultado para obtener siempre un valor entre 0% (sólo una fuente primaria) y 100% (las 8 fuentes primarias y con igual peso). Destacan que los resultados no varían significativamente al utilizar 6 ó 7 fuentes.

Fuentes Autóctonas - *IFA*:

$$IFA_{estrategia} = \frac{FA_{estrategia}}{\text{Maximo}(FA_{estrategia})} \quad (10)$$

$$FA = \frac{\sum_i^T \left( \frac{E\ Firme\ Ftes\ Autoctonas\ i}{Energia\ Firme\ Total\ i} \right)}{T - T_0 + 1} \quad (11)$$



Describen que a una mayor proporción de energía firme local, se obtendrá una mayor contribución a la robustez del sistema.

Energía Firme del Territorio Nacional - IEFTN:

$$IEFTN_{estrategia} = \frac{EFTN_{estrategia}}{\text{Maximo}(EFTN_{estrategia})} \quad (12)$$

$$EFTN = \frac{\sum_i^T \left( \frac{E_{Firme} T \dot{e}r_i + E_{Firme} Hid_i + E_{Firme} ERNC_i}{Consumo_{Energia\ Electrica\ Anual}_i} \right)}{T - T_0 + 1} \quad (13)$$

Establecen que la energía firme, es aquella que se puede obtener en un período de un año de acuerdo al tipo de fuente.

Valor presente de los costos – IVPC:

$$IVPC_{estrategia} = \frac{\text{Minimo}(VPC_{estrategia})}{VPC_{estrategia}} \quad (14)$$

$$VPC_{estrategia} = + \sum_{i=T_0}^T \frac{CO_t + CI_t}{(1,1)^{i-(T_0-1)}} \quad (15)$$

Se asume una tasa de descuento del 10% y establecen que a un menor costo total de suministro mayor será la contribución a la robustez del sistema.

Generación de valor agregado nacional:

$$IGVA_{estrategia} = \frac{GVA_{estrategia}}{\text{Maximo}(GVA_{estrategia})} \quad (16)$$

$$VPC_{estrategia} = + \sum_{i=T_0}^T \frac{I_t + VA_t}{(1,1)^{i-(T_0-1)}} \quad (17)$$

En donde  $I_t$  es el valor del componente nacional incluido en la inversión y  $VA_t$  es el valor de los componentes nacionales generados anualmente por la utilización de la inversión.

Adicionalmente, se describen otros indicadores, tales como, energía y potencia de falla, situaciones  $n-1$ , e inversiones totales de la generación de acuerdo al tipo de estrategia seleccionada. Sin embargo, para efecto del análisis propuesto establecieron que no variaban entre las diversas estrategias implementadas, razón por la cual no se incluyeron.

A partir de los análisis desarrollados en [11] concluyen que la utilización de la metodología permite identificar escenarios y tecnologías que suministren robustez al sistema eléctrico.

## **2.5. Indicador Pérdida esperada de carga – LOLE.**

En [10] se propone evaluar la seguridad del suministro con base en valores esperados de pérdida de carga, es decir cuántas horas anuales en energía no se podrán suministrar al sistema. Dicha metodología se conoce como *Loss of Load Expectation – LOLE* [17], [18]. En general, el máximo valor encontrado de LOLE se utiliza para configurar el sistema eléctrico, tal que el riesgo de no poder satisfacer la demanda sea aceptable. De la misma manera, el valor encontrado puede traducirse como la mínima capacidad requerida por el sistema. El resultado principal del indicador es evaluar si existe el suministro suficiente para atender la demanda en un tiempo establecido, ya sea en el mediano o largo plazo, teniendo en cuenta la dependencia de energéticos, el incremento de la capacidad y su respectiva reserva. El indicador descrito, es utilizado como un criterio de confiabilidad de la capacidad y limitación de los sistemas de generación de energía eléctrica. Usualmente se basa en los costos macroeconómicos que acarrea la pérdida de suministro al área financiera y a la sociedad en general vs los costos de inversión de nueva capacidad. Establece valores de escasez de capacidad firme y producción equivalente, este último considerando las probabilidades de no suministro o de falla.

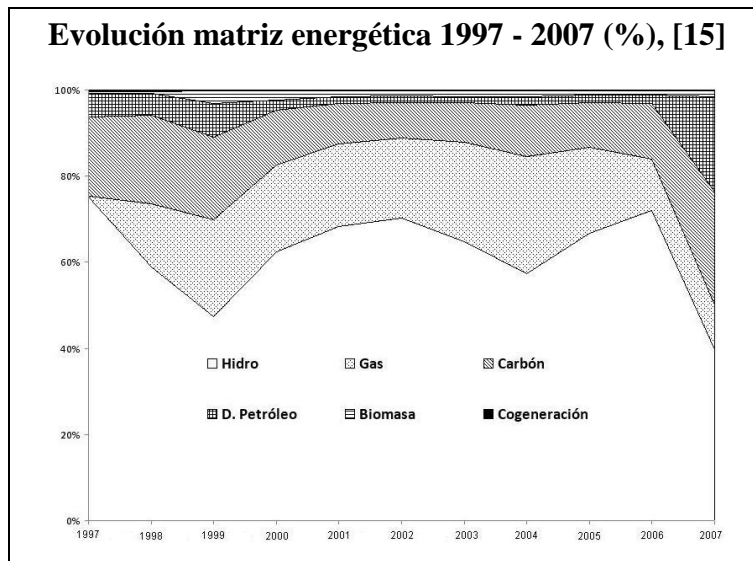
Se destaca que dependiendo de la estrategia seleccionada, es posible pasar de un escenario importador a un escenario exportador y establecer el efecto favorable de la diversificación de los combustibles sobre la seguridad de suministro. Adicionalmente, se identifican variables adicionales para la evaluación del indicador, tales como el porcentaje de indisponibilidad promedio del suministro de las centrales, la reducción en la instalación de nueva capacidad en el largo plazo y la disponibilidad de importación y/o exportación de capacidad por medio de la transmisión de energía eléctrica. Por último establece el factor de reserva como la relación entre la capacidad instalada y la demanda máxima, estableciendo que el máximo valor se presenta en un escenario de 100% de importación de capacidad por transmisión de energía eléctrica y la instalación de un 20% de energía renovable.

## **3. - Seguridad del Sistema Eléctrico en Chile**

De acuerdo a los indicadores descritos y su posible aplicación en el entorno Chileno, se implementaron los indicadores de diversidad [2], [7], los indicadores de robustez [11] y la relación Capacidad Instalada/Demanda (MW). Con base en la información recopilada de la Comisión Nacional de Energía -CNE- ([www.cne.cl](http://www.cne.cl)), se elaboró un resumen del balance energético del año 1997 a 2007. El comportamiento de la matriz de energía en Chile, se observa en la Figura 2.

Los datos consolidados de la matriz energética son utilizados para la implementación de los indicadores descritos en [7], los cuales se calcularon para determinar su evolución a datos del 2006.

Figura 2



### 3.1. Análisis de Diversidad.

Para el cálculo inicial del índice de diversidad, se establecieron seis (6) tipos de fuentes de acuerdo con los datos consolidados en [15]: hidráulica, carbón, gas, petróleo, biomasa, cogeneración, obteniéndose un máximo índice de diversidad de 1,7918. Adicionalmente, con el fin de evaluar el índice de diversidad considerando los porcentajes de importaciones de energéticos, se consolidaron los datos de balances energéticos teniendo en cuenta la generación eléctrica e importaciones [15].

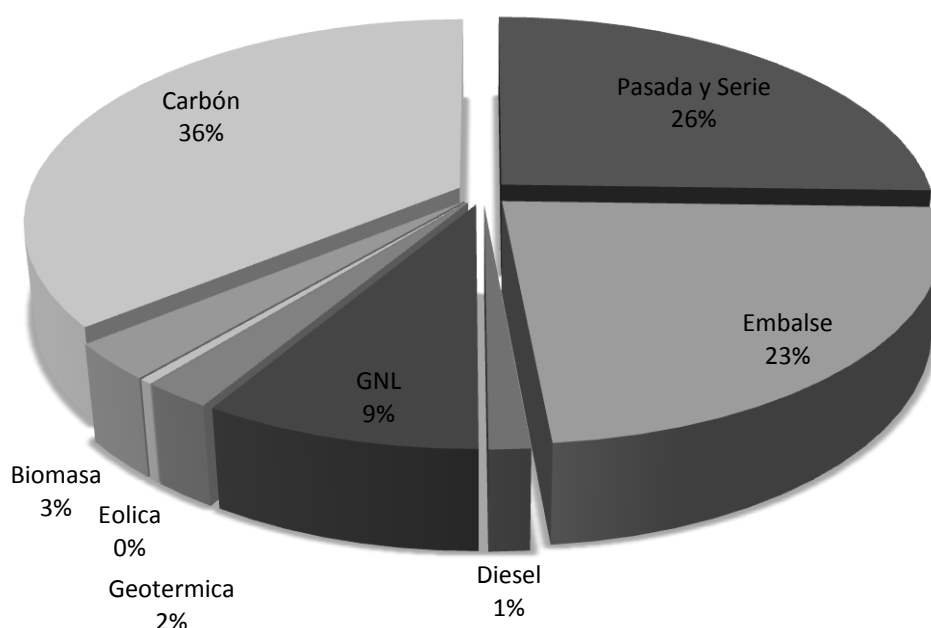
Con base al análisis de políticas energéticas y debates al interior del país sobre la inclusión de energéticos, por ejemplo Energías Renovables No Convencionales-ERNC-, gas natural licuado (GNL) y Nuclear, entre otras, se realizó una prospección del posible comportamiento de la matriz energética del 2008 al 2020. Se implementaron cuatro (4) escenarios, ERNC, Nuclear, Dependencia (continuar con los energéticos utilizados hasta el momento) y GNL, en el que se evaluaba un crecimiento significativo del energético considerado en cada escenario.

La matriz energética para el caso de ERNC, llega a ser un máximo del 5% de la matriz más un aumento adicional en biomasa y cogeneración. Para el caso de energía nuclear, llega a ser un máximo del 10% de la matriz, suponiendo, que en el mejor de los casos, una instalación a partir del año 2015. A su vez, considerando la nueva normatividad en ERNC, se mantuvo el crecimiento de los energéticos de biomasa, cogeneración y ERNC (eólica, geotérmica, solar, entre otras). Para un escenario de dependencia, en el cual se supone una fuerte disminución del gas (1%), el incremento del carbón (> al 20%) y la utilización del petróleo o derivados del petróleo, en un porcentaje promedio del 10%. De manera análoga se obtuvo una matriz energética para el caso GNL, considerando el reemplazo del gas natural por este energético y lo descrito en el plan de obras del Informe Técnico del CNE [15]. Adicionalmente, se consideraron aspectos de crecimientos históricos de los energéticos y su respectivo promedio dentro de la matriz energética: hidráulica (64,33 %), gas natural (17,75 %), carbón (13,22%), petróleo o derivados (3,15 %), biomasa (1,27%) y cogeneración (0,26 %).

Ahora bien si evalúa el actual grado de diversidad de la previsión de generación del sector generación (véase Figura 3) formulada en el estudio de precios de nudo de Abril de 2008 de la CNE [15] se puede observar un crecimiento en el grado de diversidad de la matriz actual del SIC, en función de las decisiones de inversión en tecnologías en base a carbón, así como la entrada de nuevas tecnologías limpias como la geotérmica y una mayor penetración de la energía eólica. De la misma forma, se plantea el uso del GNL como reemplazo del gas natural argentino. En definitiva, se formula una plataforma de opciones de inversión que buscan sustentabilidad energética así como una operación del sistema que conduzca al óptimo social.

Figura 3

### Previsión de despacho del sector generación para el 2007.



### 3.2. Rosa de Robustez

Como se ha mencionado anteriormente este indicador busca realizar una evaluación de las diversas estrategias de expansión de la matriz energética de un país. Que un sistema sea robusto implica que sus “*componentes y decisiones de expansión presenten un creciente grado de adaptabilidad ante posibles variaciones del entorno*”. Además de ello, el modelo incorpora variables adicionales a las de naturaleza económica [11].

Para el desarrollo del indicador, la metodología hace referencia a la seguridad de abastecimiento en función de los siguientes parámetros: diversificación de la matriz energética nacional, incorporación de fuentes autóctonas, incremento de energía firme local y generación de mayor valor agregado nacional. Dentro del alcance de este análisis no se consideran algunas variables asociadas a la viabilidad técnica y operacional de las tecnologías. En este sentido, se parte del supuesto que se cuenta con una adecuada plataforma jurídica lo que implica que ante cualquiera de los escenarios descritos como posibilidades de diversificación de la matriz energética, existen los mecanismos

regulatorios así como las normas técnicas y de calidad de servicio para la puesta en operación de la estrategia en el sistema.

Se plantea un crecimiento de la capacidad instalada a través de una mezcla de tecnologías en donde prima una tendencia de maximizar en función de la realidad propia del sistema del cual hace parte. Dado que lo que se espera es una disminución de los niveles de dependencia de suministro de combustible, se plantearon escenarios donde se busque una incorporación de tecnologías propias, o donde se garantice el suministro de combustible en el largo plazo, es por ello que las estrategias a evaluar son nuclear, hidráulica (primordialmente presenta la entrada en operación de los módulos hidroeléctricos de Aysén y la central hidroeléctrica Neltume), biomasa y el actual modelo desarrollado por la CNE<sup>3</sup>. De igual forma se realiza una validación del modelo a través de la evaluación del periodo comprendido entre 1997 y 2008. Es importante destacar que el modelo *“representa estimaciones las cuales han sido diseñadas bajo información técnica”*. Un análisis con mejores grados de precisión y exactitud puede darse a través de un análisis estocástico que modele un mayor número de variables, lo cual está fuera del alcance de este trabajo. Cada estrategia es cuantificada a través de los índices descritos y representados a través de una ponderación porcentual indicando una medida de contribución a la robustez del sistema, *“la mejor opción será aquella que presente más cercanía al perímetro de la rosa”* [11].

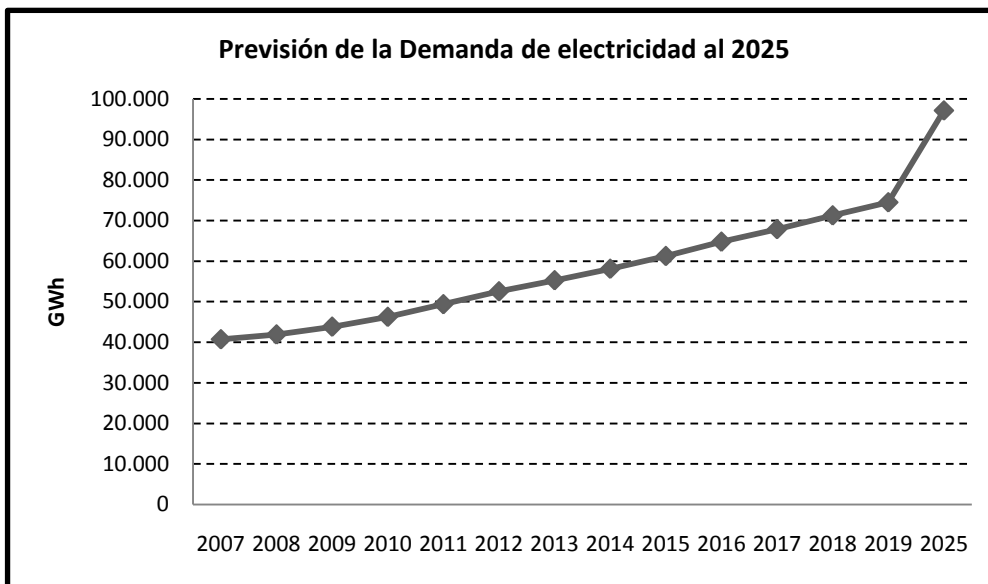
El primer paso a realizar es la selección de las estrategias, en las cuales se determina cuales van a ser las opciones del sistema. Para efectos prácticos se decidió tomar como patrón de referencia el actual modelo de expansión recomendado por la CNE en el estudio de precios de nudo de Abril de 2008. De esta manera se evalúa que tan robusta es la expansión en términos de seguridad de suministro energético al mínimo costo posible. También se implementó el indicador con los datos reales de los últimos 10 años de operación del sistema para establecer el valor del indicador con respecto a las políticas implementadas de expansión.

Para el caso nuclear se asume que para el año 2015 entraría en operación una central de 1000MW con el fin de compararla con un caso hidroeléctrico, el que se asume la entrada de la primera central de los 2750MW del proyecto Aysén. Para los casos de biomasa y co-generación se asume la entrada de centrales de 350MW y 200MW para obtener un porcentaje de energía firme equivalente a la proyección y penetración en la matriz de esta tecnología con al menos un 7%. Los datos de demanda se obtuvieron de [15] y los precios de generación por tecnología en [16]. En la Figura 4 se describe la proyección de la demanda del sistema según los datos suministrados en [15]. De esta forma se van indexando cada uno de los requerimientos, en función de los informes técnicos, los reportes anuales de cada una de las compañías generadoras, las previsiones de demanda, las ventas al sistema, y sus respectivos costos de operación y mantenimiento. En el caso de la matriz asociada al valor agregado nacional, para efectos prácticos y dada la no precedencia del uso del modelo se usaron los planteados en [11], en la cual se recogen la mayoría de las tecnologías a excepción de la nuclear la cual fue ponderada con un 60%.

---

<sup>3</sup> Se hace referencia a la fuente principal que se busca maximizar, la cual se complementa con otras para cumplir con los requerimientos de demanda y la diversificación de fuentes.

Figura 4



#### 4. -Evaluación de los Indicadores en el Caso Chileno

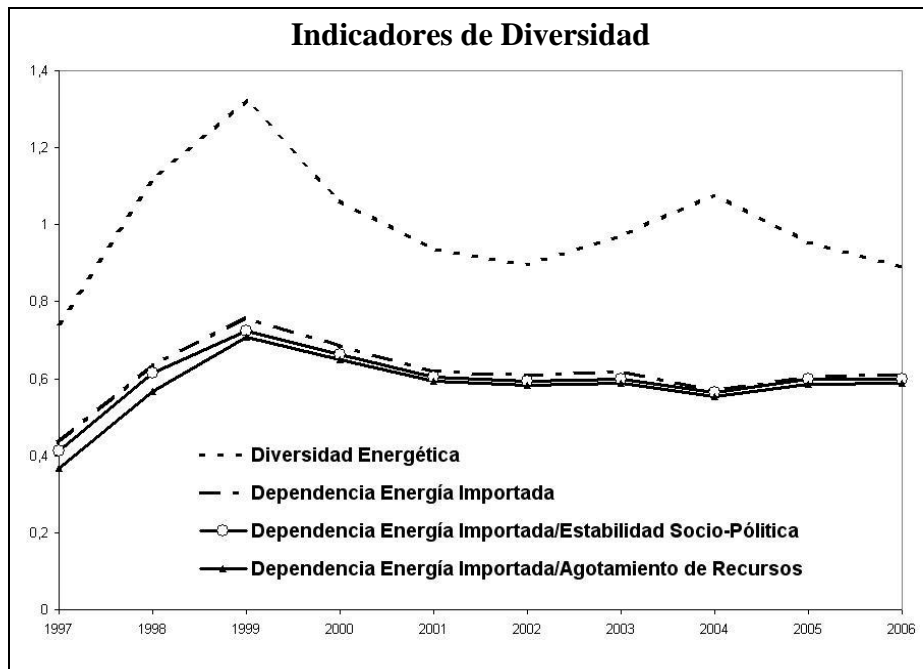
Una vez determinados cuales son los indicadores seleccionados, se realizó una validación de los indicadores con base en los escenarios mencionados anteriormente y observando cual ha sido el comportamiento de la matriz energética y cuál es su grado de robustez así como cuál sería su comportamiento en el mediano y largo plazo.

##### 4.1. Seguridad Energética - Diversidad

La evolución de los indicadores de diversidad, muestran que el sistema chileno presenta poca diversidad en recursos energéticos, agravándose los indicadores al considerar aspectos de porcentajes de energéticos importados, estabilidad socio-política de los países importadores y agotamiento de recursos. En la Figura 5, se observa la evolución de los indicadores de diversidad desde el año 1997 a 2007. Es importante destacar, que de acuerdo a los indicadores implementados, el numero de fuentes en promedio son de ocho (8), sin embargo para el caso Chile se cuentan con datos consolidados de seis (6) ([www.cne.cl](http://www.cne.cl)), ó siete (7) al considerar de manera desagregada el coque ([www.olade.org](http://www.olade.org)).

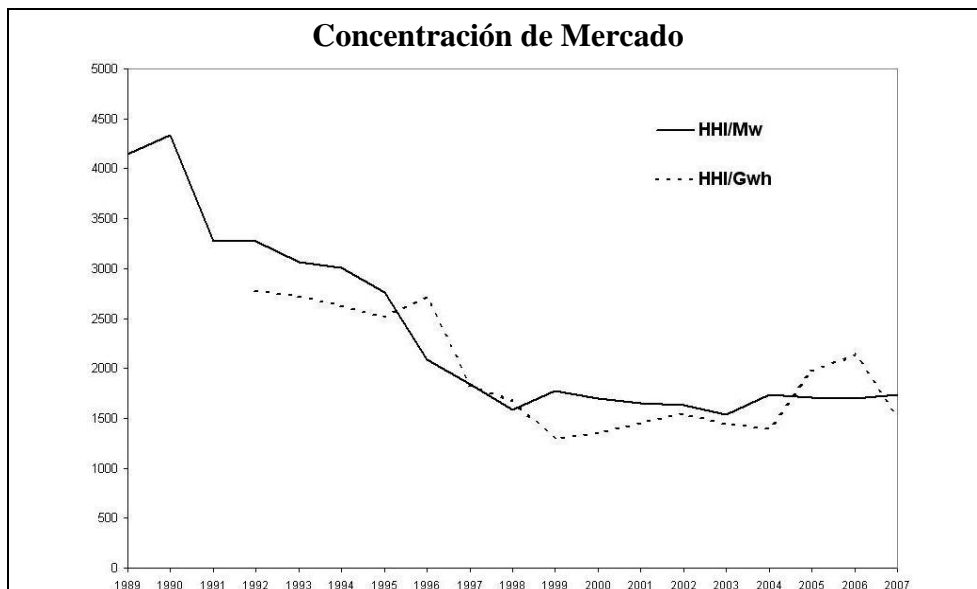
Se destaca, que aumenta la diversidad en tiempo de crisis, es decir, para los años secos se hace necesaria la inclusión de energéticos y los sobrecostos que estos conllevan.

Figura 5



En la Figura 6, se observa el comportamiento del índice de concentración de mercado, tanto en función de la capacidad instalada como de la energía generada por empresa para cada caso. El sistema chileno presenta alta concentración de mercado, sin embargo se observa como la entrada de nuevas empresas generadores han influido en la disminución del indicador desde 1994.

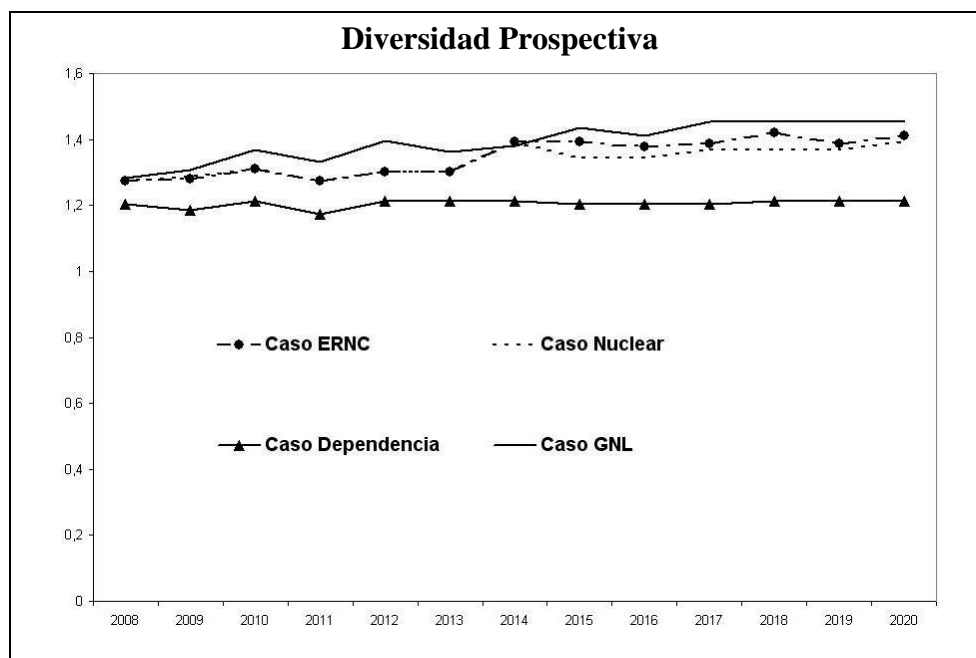
Figura 6



Adicionalmente, se observa que a partir del 2005, se incrementa el nivel de concentración de mercado (GWh), principalmente por la falta de gas.

En la Figura 7, se observa la evolución del indicador de diversidad en prospectiva a 2020, utilizando las matrices escenarios. Se concluye que el caso dependencia es el que menos le aporta a la seguridad del sistema y los casos de energías renovables le aportarían a la seguridad del sistema, siempre y cuando se contara con políticas energéticas y reglamentos de operación que estimulen la entrada en porcentajes significativos al sistema eléctrico en Chile. El caso GNL, se presenta como el más diverso debido a la sustitución sobre el gas, considerando que el suministro de dicho energético proviene de fuentes mucho más diversas.

Figura 7



El indicador de capacidad instalada (suministro) sobre la demanda, no ofrece una realidad sobre la seguridad del mismo, lo que hace necesaria la utilización de los indicadores de diversidad. En la Figura 8, se observa la relación existente entre el indicador S/D (Capacidad Instalada/Demanda) y el indicador de Diversidad, aplicados para los países de América latina y el Caribe. Se identifica, que países tales como Granada, Trinidad y Tobago, Cuba y Surinam, presentan sistemas con el doble de la capacidad instalada sobre su consumo, pero sin diversidad en sus energéticos. Caso atípico es Paraguay que presenta un sistema sobreinstalado (> 8, generación hidráulica Itaipu/Brasil) pero sin diversidad en sus fuentes de energía.

En general, los países mantienen una sobreinstalación de su capacidad instalada como un índice de seguridad energética, pero muy poco diversos en el suministro de la energía requerida. Para el caso de Chile de un máximo del 100% se ubica aproximadamente en el 70%. Dentro de los países que se destacan por una mayor diversidad se identifican: México, Brasil y Argentina. Otros países, tales como los centroamericanos ó Haití, más que contar con una gran diversidad, cuentan con fuentes mínimas (dos o tres) pero equilibradas, que hacen que el indicador muestre una mayor diversidad. De ahí, que se realizó una análisis de referencia con respecto a la inclusión de 8 tipos de energéticos base, destacándose México como la más diversa.



En la Figura 9, se observan los valores de diversidad de países referentes a nivel mundial con seis (6) tipos de energéticos base. España como la más diversa dado el gran aporte de las energías renovables y Francia la menos diversa, debido a su fuerte componente nuclear.

Figura 8

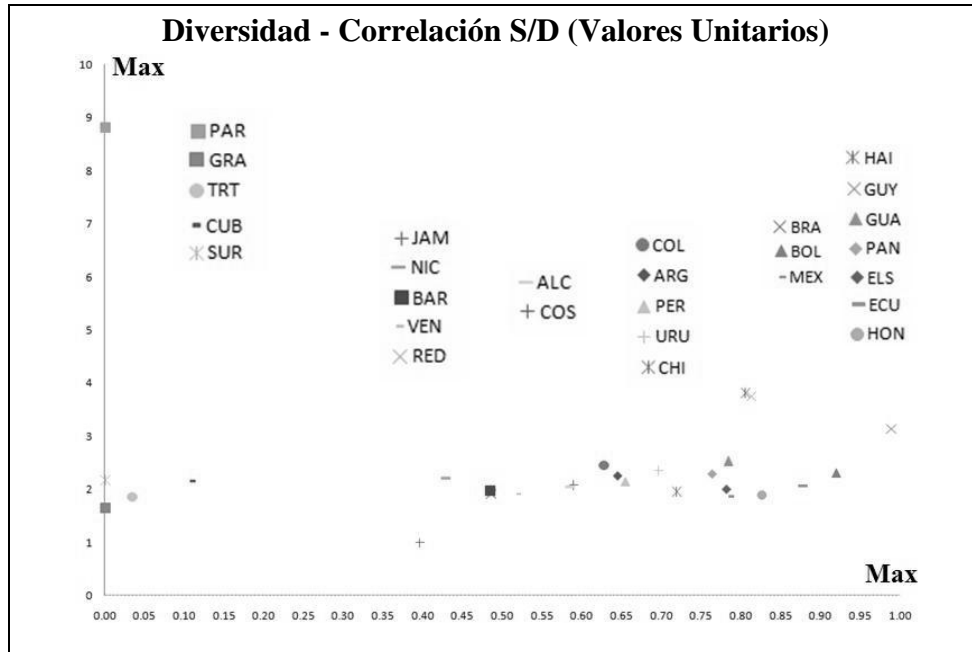
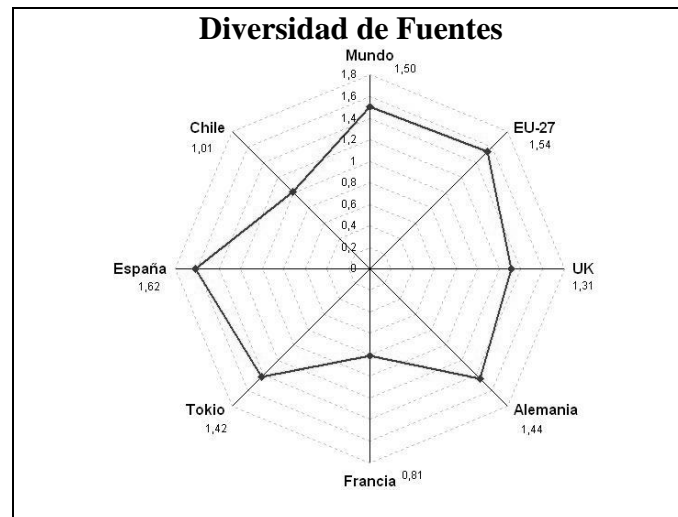


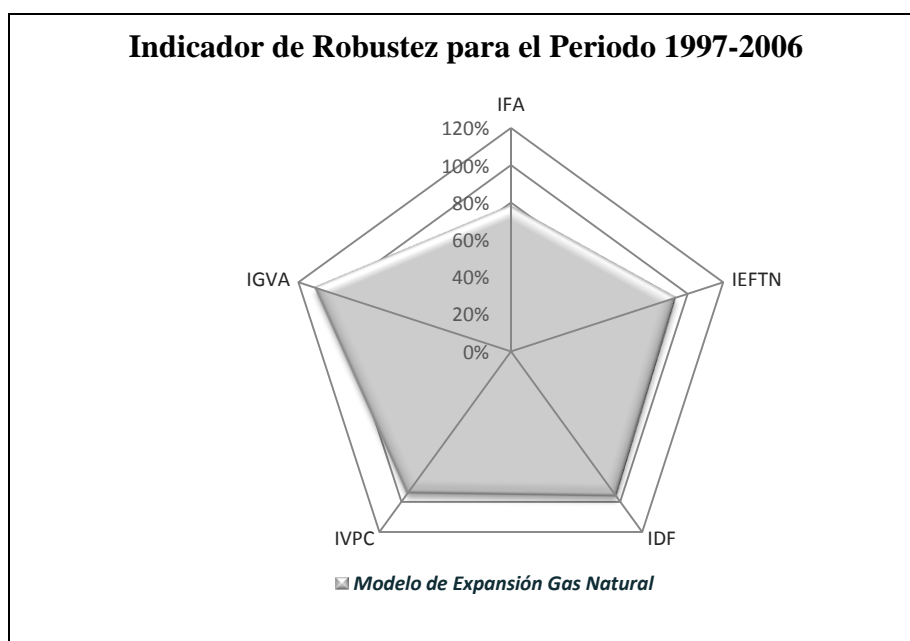
Figura 9



#### 4.2. Seguridad Energética-Rosa de Robustez.

Como primera medida se realizó la validación del indicador mediante la evaluación del modelo bajo la tecnología de expansión del gas natural, el resultado se puede observar en la Figura 10.

Figura 10



Este modelo de operación evidencia la realidad del sistema, el cual presenta una alta inversión en la tecnología a gas natural, una volatilidad de precio que lleva a un sobrecosto de la operación del sistema, y a una sobre inversión en términos de capacidad instalada, una dependencia significativa de fuentes no autóctonas y una poca diversificación de las fuentes. Sin embargo, el indicador también presenta que el sistema era robusto por que garantizaba seguridad de suministro sujeta a la posibilidad de generar energía en el territorio nacional, a un bajo costo y una viabilidad económica en términos de inversión y operación. Esta seguridad se transformó en una alta dependencia de un combustible y una sobre inversión, que al momento del corte de suministro genero una alta volatilidad del precio, elevando los costos de operación lo que se refleja en el IGVA. La validación de la incidencia térmica en los resultados de este periodo se puede ilustrar de forma más sencilla en la Figura 11.

Los resultados entregados por la Rosa de Robustez muestran que el escenario en donde el plan óptimo de expansión incluye el uso de tecnologías limpias disponibles dentro del territorio nacional, como es el caso de la biomasa; escenario para el cual se presenta un mayor grado de robustez del sistema, lo anterior en vista a que se está incluyendo además de las tecnologías de expansión base (carbón e hidráulica), una tecnología que maximiza el uso de recursos presentes en el territorio nacional, que proceden de otra cadena de suministro de la economía, como es el caso de los aserraderos, minimizando de esta forma el costo total de operación del sistema. Por lo anterior, es claro que la biomasa no desplaza tecnologías si no combustibles y, según el grado de penetración de esta estrategia dentro del sistema, será más o menos relevante dentro de la robustez del sistema. Este escenario cuenta con la penetración de 7 fuentes primarias de energía en donde la tecnología hidráulica y el carbón conforman la estrategia óptima de expansión, combinado por un conjunto de tecnologías que desplazan combustibles más costosos como el petróleo. Las tecnologías que desplazan combustibles son esencialmente las ERNC, como la biomasa, eólica, geotérmica así como combustibles fósiles más económicos como el GNL. El diseño de este escenario busca aumentar en forma progresiva la participación de estas tecnologías limpias en la Energía Firme total del

sistema, llevándolas a un 5%. En la Figura 12 se observa la comparación de las estrategias consideradas.

Figura 11

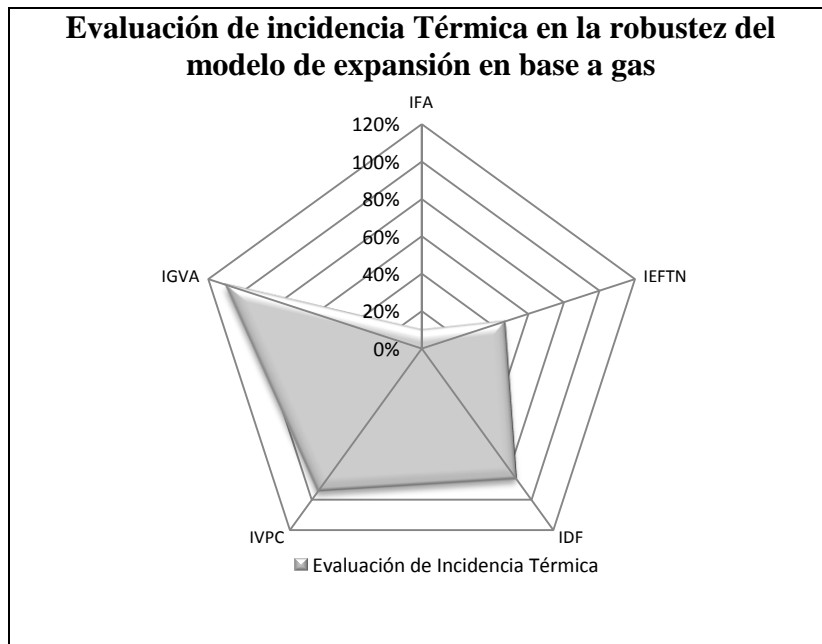
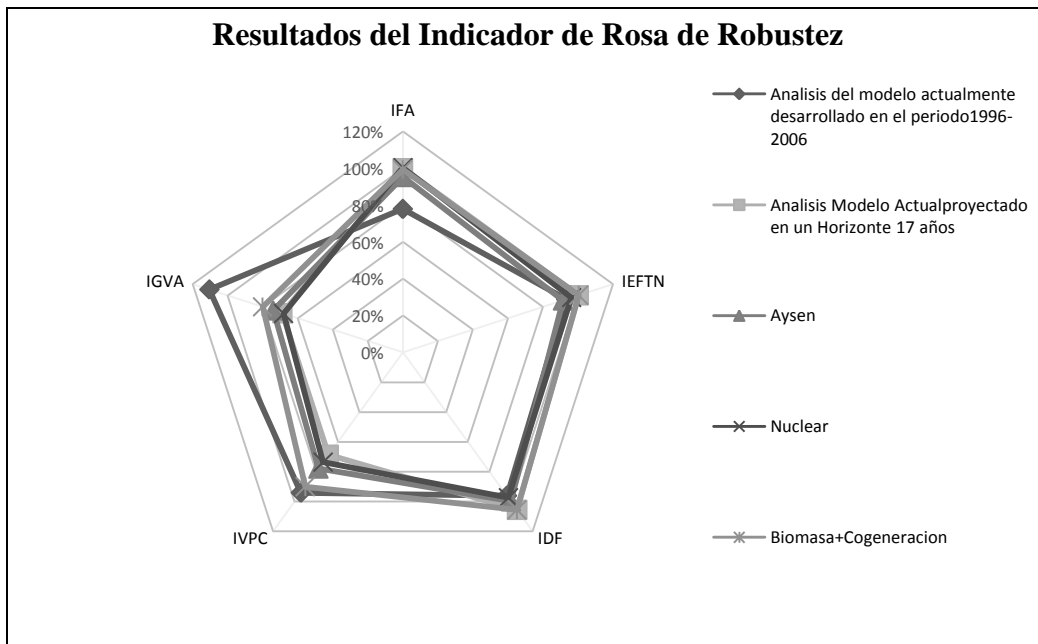


Figura 12



Es claro que la penetración debe hacerse de esta forma, ya que lo que se busca con este modelo es evaluar la puesta en operación de estrategias viables en el mediano y largo plazo, buscando niveles de suficiencia energética y diversificación de la matriz con soluciones que tengan un alto componente de energía firme autóctona, para lo cual la biomasa y la co-generación muestran ser la mejor opción. El costo de operación actualizado de esta estrategia es cercano a los 2.600 millones de dólares americanos.

El objeto de evaluar el proyecto Aysén y la tecnología nuclear, es determinar que tanto difieren en términos de seguridad energética y que tan probables desde el punto de vista financiero son con respecto a otras tecnologías de expansión. No se evalúa el problema de una posible falla y sus implicaciones durante su operación. El indicador muestra una clara robustez de la estrategia nuclear asociada a una diversidad de fuentes (8 en total). Lo que sería una buena opción de diversificación de la matriz, este escenario incorpora el requerimiento de penetración del 5% de las ERNC, además de evaluar la Biomasa con una penetración del 7%. De la misma forma, el proyecto Aysén presenta características similares de diversidad, obteniéndose una energía firme superior al caso nuclear del 8% al momento de entrar la última unidad del proyecto. Ahora, si bien estas dos estrategias presentan costos de inversión y operación cercanos a los 8.000 millones de USD\$ para el horizonte de estudio (2007-2025), es claro que esta cifra está dada bajo supuestos marginales. Si se desarrollará un análisis más detallado y existiese una coordinación efectiva de las 7 u 8 fuentes según el caso, es probable una reducción significativa de estos costos, de igual forma en la medida que aumentan los costos de combustibles fósiles es más probable y viable una opción de tipo Nuclear.

En el caso del plan de expansión [15], se observa un sistema con un grado de robustez significativo lo que indica que esta estrategia de diversificación de la matriz energética a largo plazo es una opción viable. Sin embargo, el componente de centrales a carbón y GNL y la introducción de tecnología en IGCC enmarcan niveles de dependencia de combustibles fósiles, costos y aspectos ambientales a evaluar. De igual forma su robustez se da por la presencia de grandes centrales hidráulicas en el largo plazo lo que mantiene la tendencia de un alto componente de energía firme, producto del componente hidráulico.

Dentro de las estrategias presentadas, la que presenta un mejor comportamiento en términos de robustez es aquella que tiene como base un aumento significativo de la biomasa y la co-generación, siendo esto esperado dada la aplicación de este modelo en Uruguay y las características del modelo de biomasa y las estrategias de co-generación como forma de optimización de recursos y maximización de los bienes primarios. De cerca a estas se presenta la opción nuclear y la entrada en operación de un mega proyecto hidráulico como el presentado en el proyecto Aysén. Cabe recordar que este análisis únicamente realiza la evaluación del proyecto Aysén como una posible opción de seguridad de suministro energético, es un análisis independiente que no refleja las políticas públicas asociadas a la operación del sistema. El modelo también muestra que el actual diseño de la expansión del sistema presenta un comportamiento con un alto grado de robustez, y con una estrecha dependencia de los precios de combustibles fósiles lo que es reflejado en dos de los índices de la rosa de robustez.

Es claro que cada una de las estrategias presentadas es una mezcla de fuentes primarias de energía y que es posible una disminución de sus costos de operación e inversiones en la medida que se desarrollen estrategias y mecanismos de operación coordinada entre ellos, así como la maximización de cada uno de los usos del sistema.

## **5. -Conclusiones**

El Indicador Rosa de Robustez busca realizar una evaluación de las diversas estrategias de expansión de la matriz energética de un país, considerando una multiplicidad de

aspectos que condicionan el desarrollo de una estrategia de diversificación segura y robusta, con la incorporación de variables adicionales a las de naturaleza económica.

Las estrategias planteadas como posibles fórmulas de expansión de la matriz energética en función de su diversidad y seguridad, presentan un grado de robustez significativo, lo que las hace viables desde el punto de vista operacional.

Los indicadores permiten evaluar el grado de robustez de una estrategia tomando como referencia elementos tanto técnicos y operativos como económicos, siendo útiles para la evaluación de estrategias. La cual puede afinarse y volverse tan compleja como su evaluación la requiera.

Se estableció la importancia de evaluar la seguridad energética, no sólo en el aspecto de sobre instalación de la capacidad instalada, sino también en la diversidad de las fuentes energéticas y su dependencia con los recursos de otras regiones.

## **6.-Agradecimientos**

A la Pontificia Universidad Católica de Chile, quien a través del su programa de becas respalda a los dos primeros autores.

A la Comisión Nacional de Energía, y en particular a Carolina Hernández y al Grupo de Estudios, quienes sugirieron y brindaron la asesoría necesaria para el desarrollo de esta investigación.

## **7.- Referencias**

- [1]. Vesa A. Lappalainen The New Security of Energy Supply Directives. A First Response to Some Big Questions, ERA FORUM 2007, 8:427–434, DOI, 10.1007/s12027-007-0024-5.
- [2]. Stirling, A., On the Economics and Analysis of Diversity, Electronic Working, Papers Series, Paper No. 28, Science Policy Research Unit, Mantell Building, University of Sussex, UK, 2003.
- [3]. Dieter Helm, Energy policy: security of supply, sustainability and competition, New College, Oxford OX1 3BN, UK, Energy Policy 30 (2002), 173–184.
- [4]. Bazilian, M., et al, Security of Supply in Ireland 2006, Sustainable Energy Ireland (SEI), Energy Policy Statistical Support Unit, Dec 2006.
- [5]. Scheepers, M., et al, EU standards for Energy Security Supply, Updates on the Crisis Capability Index and the Supply/Demand Index Quantification for EU-27, Clingenadael International Energy Programme, ECN 2007. ECN-E-07-004/CIEP.

- [6]. CEPAL, Guía para la Formulación de Políticas Energéticas, Primera Edición, Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe, Cuaderno Cepal No 89, Chile, 2003.
- [7]. Jansen, J.C., et al, Designing indicators of long-term energy supply security, Netherlands Environmental Assessment Agency. January 2004, ECN-C--04-007.
- [8]. Maldonado, P., Palma, R., Seguridad y calidad del abastecimiento eléctrico a más de 10 años de la reforma de la industria eléctrica en países de América del Sur, División de Recursos Naturales e Infraestructura, CEPAL, Serie 72, Santiago de Chile, Julio de 2004.
- [9]. Costantinia, V., et al, Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective, Department of Economics, Roma Tre University, Italy ENEA, National Institute for New Technologies, Energy and Environment, Energy Policy 35 (2007) 210–226.
- [10]. TENNET, Report on Monitoring of Security of Supply 2006-2014, MR 07-335, July 2007.
- [11]. DNETN, Robustez del Sistema Eléctrico Nacional: Aporte Metodológico y Ejercicio de Aplicación, Nota Técnica, Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear, Ministerio de Industria, Energía y Minería, Marzo 2007.
- [12]. OEA, Annual Report of Secretary General 2004-2005. Organization of American States, Washington D.C. OEA 2005.
- [13]. Llerena D, *et al*, Diversity and valorization of the electricity-generation technologies in the European Community, Utilities Policy, Volume 3, Issue 3, July 1993, Pages 223-232, doi:10.1016/0957-1787(93)90047-Z.
- [14]. Gernot Grabher, David Stark, "Organizing Diversity: Evolutionary Theory, Network Analysis, and Post socialist Transformations", ISBN 0-19-829020-9, 1997.
- [15]. CNE, Fijación De Precios De Nudo Abril De 2008, Sistema Interconectado Central (SIC) Informe Técnico Definitivo, Comisión Nacional de Energía, Santiago De Chile, Abril de 2008.
- [16]. IEA, International Energy Agency, Energy Technology Policy, IEA, Paris, 2005.
- [17]. Leite da Silva, A.M, et al, Frequency and duration method for reliability evaluation of large-scale hydrothermal generating systems, IEE Proceedings-C, Vol. 138, No. I , January 1991.
- [18]. Brown, S., Marshall, W., Maritimes Area Wind Integration Study, New Brunswick System Operator, IEEE CCECE/CCGEI, Ottawa, May 2006, 1-4244-0038-4 2006.