



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL

## **DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA E INTERCONEXIÓN SING-SIC**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN ECONOMÍA APLICADA

RODRIGO IGNACIO PÉREZ TOBAR

PROFESOR GUÍA:  
RONALD FISCHER BARKAN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
RODRIGO PALMA BEHNKE  
RODRIGO MORENO VIEYRA

SANTIAGO DE CHILE  
2015

## **DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA E INTERCONEXION SING-SIC**

El ingreso de la energía solar en Chile ha ido en aumento durante el último año, debido a la cantidad de energía solar fotovoltaica presente en los sistemas SING y SIC. Además, en el corto plazo se realizará la interconexión de dichos sistemas. Por tanto, es de interés evaluar el beneficio económico de la interconexión desde un punto de vista de operación económica, considerando el potencial de energía solar fotovoltaica y la complementariedad de ambos sistemas. Este trabajo evalúa distintos casos en los cuales la expansión de los sistemas se realiza de manera aislada e interconectada, considerando una obligación anual de generación de energía solar fotovoltaica.

Estos casos se definen en base a un modelo de mercado eléctrico competitivo presente en Chile en el cual los generadores invierten en unidades generadoras que sean rentables durante su vida útil. Además, un software de despacho económico para sistema hidrotérmico, multinodal y multiembalse es usado para simular la operación económica de las unidades.

Entre todos los resultados analizados, los más interesantes muestran que la interconexión favorece el precio spot de energía de inyección de las unidades fotovoltaicas del SING, al contrario del SIC donde sus unidades fotovoltaicas se ven perjudicadas. El despacho de unidades de base se ve favorecido por la interconexión, desplazando unidades de alto costo operativo como motores diésel y fuel oil. Este despacho de base disminuye a medida que aumenta el nivel de energía solar fotovoltaica. Además, las centrales hidráulicas con capacidad de regulación reacomodan su despacho desde los bloques solares a los no solares. También existe un incentivo para las centrales de pasada para instalar estanques de regulación, debido al diferencial de precios entre bloques solares y no solares. Este incentivo se acentúa ante un escenario de interconexión y con alto nivel de penetración fotovoltaico. Lo anterior implica una disminución del costo de inversión en generación y operación, debido a la interconexión y al aumento de la energía solar.

Integrar al modelo propuesto las restricciones técnicas propias de los sistemas, una mejor solución técnica respecto a la expansión de la transmisión, sensibilizar los casos respecto a niveles de demanda y precios de combustibles e integrar al equilibrio de largo plazo unidades generadoras de bajo costo variable que tengan capacidad de regulación, permitirían evaluar los niveles de penetración de energía intermitente óptimos, además de una mejor estimación de los costos de operación de la expansión para los casos analizados.

## **Agradecimientos**

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, en especial a mi madre y mi padre por su dedicación, apoyo constante y por haber creído siempre en mí.

Además quiero agradecer al profesor Ronald Fischer por sus consejos y sobre todo por su paciencia. Al profesor Richard Green por aceptarme como investigador visitante. También a los profesores integrantes de la Comisión por su interés y buena disposición para evaluar este trabajo.

Quisiera también dar mis agradecimientos a Synex Ingenieros Consultores por su apoyo constante y recomendaciones en este proceso.

Agradezco a la Universidad de Chile por mi formación de pre y postgrado. A su Departamento de Postgrado y Postítulo de la Vicerrectoría de Asuntos Académicos por apoyar este trabajo. Finalmente, agradezco a CONICYT por financiar parcialmente mis estudios de postgrado.

## TABLA DE CONTENIDO

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>INTRODUCCIÓN</b> .....                                | <b>7</b>  |
| <b>2.</b> | <b>MERCADO ELÉCTRICO CHILENO</b> .....                   | <b>9</b>  |
| 2.1.      | BREVE DESCRIPCIÓN DEL MERCADO ELÉCTRICO CHILENO .....    | 9         |
| 2.2.      | TEORÍA MARGINALISTA EN EL MERCADO ELÉCTRICO CHILENO..... | 9         |
| 2.3.      | SISTEMAS ELÉCTRICOS EIN CHILE .....                      | 10        |
| <b>3.</b> | <b>MODELO PROPUESTO</b> .....                            | <b>11</b> |
| 3.1.      | ESTRUCTURA DEL MODELO .....                              | 11        |
| 3.2.      | BASES DE ESTUDIO .....                                   | 14        |
| <b>4.</b> | <b>CASOS DE ESTUDIO</b> .....                            | <b>15</b> |
| 4.1.      | GENERAL .....  | 15        |
| 4.2.      | DEFINICIÓN DE CASOS .....                                | 15        |
| <b>5.</b> | <b>RESULTADOS</b> .....                                  | <b>19</b> |
| 5.1.      | COSTOS DE INVERSIÓN EN UNIDADES FV .....                 | 19        |
| 5.2.      | PRECIO SPOT DE ENERGÍA.....                              | 20        |
| 5.3.      | DESPACHO POR TIPO DE TECNOLOGÍA .....                    | 25        |
| 5.4.      | CENTRALES DE PASADA Y CAPACIDAD DE REGULACIÓN.....       | 36        |
| 5.5.      | COSTOS OPERATIVOS Y DE FALLA .....                       | 40        |
| 5.6.      | EVALUACIÓN ECONÓMICA.....                                | 42        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSIONES</b> .....                                | <b>44</b> |
| 6.1.      | RESPECTO AL TRABAJO DE TESIS .....                       | 44        |
| 6.2.      | TRABAJO FUTURO.....                                      | 45        |
| <b>7.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....                                | <b>46</b> |
| <b>8.</b> | <b>ANEXOS</b> .....                                      | <b>49</b> |
| 8.1.      | OPERACIÓN ECONÓMICA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS .....         | 49        |
| 8.2.      | INSTALACIONES EN EL SING Y SIC .....                     | 62        |
| 8.3.      | CARACTERÍSTICAS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS .....           | 87        |
| 8.4.      | CURVAS DE DURACIÓN DE DEMANDA .....                      | 87        |
| 8.5.      | PROYECCIÓN DE PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES .....          | 97        |
| 8.6.      | PARÁMETROS ECONÓMICOS .....                              | 98        |

## INDICE DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1. Estructura del Modelo.....  | 11 |
| Ilustración 2. Precio Spot Energía de Inyección – Unidades FV SING.....                      | 20 |
| Ilustración 3. Precio Spot Energía de Inyección – Unidades FV SIC.....                       | 21 |
| Ilustración 4. Precio Spot Energía Bloque Solar – Crucero 220 SING.....                      | 22 |
| Ilustración 5. Precio Spot Energía Bloque No Solar – Crucero 220 SING.....                   | 22 |
| Ilustración 6. Precio Spot Energía Bloque Solar – Quillota 220.....                          | 23 |
| Ilustración 7. Precio Spot Energía Bloque No Solar – Quillota 220.....                       | 24 |
| Ilustración 8. Factor de Planta – Unidades Carbón SING .....                                 | 25 |
| Ilustración 9. Factor de Planta – U16 SING .....   | 26 |
| Ilustración 10. Factor de Planta – Unidades Diesel SING .....                                | 27 |
| Ilustración 11. Factor de Planta – Unidades Fuel Oil SING .....                              | 28 |
| Ilustración 12. Factor de Planta – Unidades Carbón SIC.....                                  | 29 |
| Ilustración 13. Factor de Planta – CC Campesino SIC .....                                    | 30 |
| Ilustración 14. Factor de Planta – Unidades Diesel SIC .....                                 | 31 |
| Ilustración 15. Factor de Planta – Unidades Fuel Oil SIC .....                               | 32 |
| Ilustración 16. Factor de Planta – Central Colbún Bloque Solar .....                         | 33 |
| Ilustración 17. Factor de Planta – Central Colbún Bloque No Solar .....                      | 33 |
| Ilustración 18. Factor de Planta – Central Ralco Bloque Solar.....                           | 34 |
| Ilustración 19. Factor de Planta – Central Ralco Bloque No Solar.....                        | 34 |
| Ilustración 20. Ingresos Esperados Extras – Central Zona Centro.....                         | 37 |
| Ilustración 21. Ingresos Esperados Extras – Central Zona Sur.....                            | 37 |
| Ilustración 22. Aumento % del Precio de Inyección de Energía – Central Zona Centro.....      | 38 |
| Ilustración 23. Aumento % del Precio de Inyección de Energía – Central Zona Sur .....        | 38 |
| Ilustración 24. Costo Operativo Térmico y de Falla – SING y SIC aislados.....                | 40 |
| Ilustración 25. Costo Operativo Térmico y de Falla – SING y SIC interconectados.....         | 40 |
| Ilustración 26. Ahorro en Costo Operativo Térmico y de Falla debido a la interconexión ..... | 41 |
| Ilustración 27. Curva duración de demanda anual SING y SIC [MW vs hora].....                 | 58 |
| Ilustración 28. Diagrama Unilineal del SING Modelado.....                                    | 69 |
| Ilustración 29. Diagrama Unilineal del SIC .....   | 84 |
| Ilustración 30. Curva de duración de demanda diaria SING año 2013 [MW vs hora] .....         | 88 |
| Ilustración 31. Definición de bloques – SING (MW vs horas).....                              | 89 |
| Ilustración 32. Curva de duración de demanda diaria SIC año 2013 [MW vs hora] .....          | 91 |
| Ilustración 33. Definición de bloques – SIC (MW vs horas).....                               | 92 |
| Ilustración 34. Curva de duración de demanda diaria SING-SIC año 2013 [MW vs hora].....      | 94 |
| Ilustración 35. Definición de bloques – SING-SIC (MW vs horas) .....                         | 96 |

## INDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Casos de Estudio .....  | 16 |
| Tabla 2. Supuestos respecto al Costo Medio de Desarrollo de Unidades FV .....    | 17 |
| Tabla 3. Supuestos respecto al <i>LCOE</i> de Unidades FV .....                  | 18 |
| Tabla 4. Costo de Desarrollo de Unidades FV de 1 [MW] – Caso Base .....          | 18 |
| Tabla 5. Costo Inversión necesario para Desarrollo de Unidades FV .....          | 19 |
| Tabla 6. Parámetros de Central de Pasada .....                                   | 36 |
| Tabla 7. Tasa Interna de Retorno de la Inversión en Estanque de Regulación ..... | 39 |
| Tabla 8. Comparación de valor presente (MUS\$) .....                             | 42 |
| Tabla 9. Comparación de valor presente (MUS\$) .....                             | 43 |
| Tabla 10. Representación del problema en SDDP .....                              | 51 |
| Tabla 11. Representación de centrales térmicas en SDDP .....                     | 52 |
| Tabla 12. Representación de centrales hidroeléctricas en SDDP.....               | 54 |
| Tabla 13. Descripción de la Demanda en SDDP .....                                | 57 |
| Tabla 14. Perfil de Generación de Energía Promedio Mensual [0/1] .....           | 59 |
| Tabla 15. Clasificación horas de días típicos mensuales .....                    | 60 |
| Tabla 16. Clasificación de horas solares por mes .....                           | 60 |
| Tabla 17. Definición de bloques .....  | 61 |
| Tabla 18. Centrales Térmicas de Generación del SING .....                        | 62 |
| Tabla 19. Barras del SING .....  | 64 |
| Tabla 20. Proyección de Demanda SING .....                                       | 65 |
| Tabla 21. Características de líneas de transmisión del SING .....                | 66 |
| Tabla 22. Centrales Térmicas de Generación del SIC .....                         | 70 |
| Tabla 23. Centrales Hidroeléctricas de Embalse del SIC .....                     | 75 |
| Tabla 24. Centrales Hidroeléctricas de Pasada del SIC .....                      | 76 |
| Tabla 25. Barras del SIC .....   | 78 |
| Tabla 26. Proyección de Demanda SIC .....  | 79 |
| Tabla 27. Características de líneas de transmisión del SIC .....                 | 80 |
| Tabla 28. Cotas de los embalses .....  | 87 |
| Tabla 29. Proyección de Precios de Combustibles SING y SIC (US\$ 2015) .....     | 97 |

## **1. INTRODUCCIÓN**

El Sector Eléctrico en Chile ha sufrido grandes cambios. El ingreso de distintas Energías Renovables No Convencionales (ERNC) se produjo en primera instancia por cambios regulatorios (como la obligación anual de generación con fuentes ERNC para suministrar contratos de energía). También ha favorecido a las ERNC el nuevo diseño de licitación de contrato de energía para suministro de clientes regulados (el cual define bloques de energía según una clasificación horaria para ser suministrados por distintos tipos de tecnología). Lo anterior ha traído como consecuencia un ingreso importante de energía solar fotovoltaica y eólica, produciendo una baja en los precios ofrecidos en los procesos de licitación. Estos esfuerzos regulatorios recientes han favorecido el desarrollo de estas tecnologías en un contexto de mercado competitivo.

Además, con el objeto de mejorar las condiciones de seguridad del sistema y su operación económica, se decidió la interconexión del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC) en el corto plazo.

En Chile, distintos trabajos han evaluado la conveniencia de la interconexión del SING y SIC desde un punto de vista económico [1], de emisiones de carbono [2] y técnico [3] [4]. Además, se ha determinado la factibilidad económica para el desarrollo de energía solar en sistemas térmicos usando un modelo de planificación basado en programación lineal con el objetivo de determinar un parque económicamente óptimo de generación, además de estudiar la capacidad que tiene la energía solar para reducir la volatilidad del precio de la energía (que depende de los precios internacionales de los combustibles) y el costo por obtener este menor riesgo producto de la energía solar [5]. También, los operadores de los sistemas SING y SIC han determinado límites técnicos para el ingreso de energías intermitentes para distintos escenarios en el contexto de un desarrollo aislado de ambos sistemas [6] [7] [8].

En el ámbito internacional, se ha estudiado el efecto de los subsidios para el incremento de energías renovables intermitentes (eólica y solar fotovoltaica) y la conveniencia de los mismos considerando los tipos de tecnologías subsidiadas según su tipo, ubicación y producción [9]. También, se ha determinado el efecto que tienen las energías renovables intermitentes en los mercados spot y la conveniencia de implementar mecanismos que permitan su integración sin alterar un esquema de mercados competitivos con incentivos adecuados [10]. Finalmente, distintos estudios han establecido los problemas técnicos derivados de la penetración en gran escala de la tecnología solar fotovoltaica [11] [12].

El presente trabajo de tesis tiene por objetivo evaluar distintos niveles de penetración de energía solar fotovoltaica (FV) en el mercado eléctrico chileno, en un contexto de desarrollo del SING y el SIC de manera aislada e interconectada y analizar los efectos sobre distintas variables en el modelo a plantear.

El trabajo se desarrolla a través de seis capítulos (incluyendo la presente introducción):

- El segundo capítulo entrega una breve descripción del Mercado Eléctrico Chileno.
- El tercer capítulo presenta el modelo utilizado y las bases del trabajo.
- El cuarto capítulo muestra la construcción de casos, los que serán simulados según el modelo presentado y las bases utilizadas.
- El quinto capítulo corresponde a los resultados de los casos de estudio.
- El sexto capítulo presenta las conclusiones y trabajo futuro.



## **2. MERCADO ELÉCTRICO CHILENO**

### **2.1. Breve Descripción del Mercado Eléctrico Chileno**

El mercado eléctrico chileno se divide en 3 segmentos principales: Generación, Transmisión y Distribución.

El segmento de generación es intensivo en capital con inversiones de largo plazo. Si bien dentro de cada tecnología existen economías de escala, estas no pueden ser explotadas en un mercado real por distintos motivos (propios de la tecnología o por las características del sistema eléctrico al cual se interconectan). Además, la existencia de restricciones de almacenamiento de electricidad implica una dependencia entre las decisiones económicas y técnicas. Por esto, es un segmento apto para la existencia de competencia.

El segmento de transmisión es intensivo en capital con inversiones de largo plazo. Además, la interconexión de sistemas implica ventajas técnicas y económicas. También existe necesidad de redundancia de ciertas instalaciones con el objetivo de entregar mayor seguridad. Por tanto, existen economías de escala significativas que convierten a este segmento en un monopolio natural que debe ser regulado.

El segmento de distribución presenta economías de densidad dado que actúan como un monopolio geográfico para abastecer al consumidor final. Además, la demanda es esencialmente inelástica. Por tanto, este segmento requiere ser regulado.

En resumen, las decisiones de inversiones en el sector generación son tomadas por agentes privados. En cambio, la expansión de redes de transmisión y distribución son definidos a través de procesos definidos por el regulador.

### **2.2. Teoría Marginalista en el Mercado Eléctrico Chileno**

El mercado eléctrico chileno está basado en la teoría marginalista, tal como describen distintos autores [13] [14].

En el segmento de generación, un parque generador competitivo recibe remuneración por potencia y energía<sup>1</sup>. Si este parque generador está integrado de manera óptima por distintas tecnologías que abastecen una demanda inelástica en un sistema uninodal, los ingresos del parque generador cubren su costo de inversión y operación [15] [16].

---

<sup>1</sup> Mejor conocido como “*peak load pricing*”.

En el segmento de transmisión, los ingresos de los propietarios de líneas de transmisión son regulados, dado que se tratan de monopolios naturales. La valorización de dichas instalaciones se realiza periódicamente<sup>2</sup> [17]. La aplicación de la teoría marginalista al sector transmisión para un sistema multinodal (el cual representa las pérdidas de energía que se producen a nivel de transmisión) trae consigo la aplicación de peajes de transmisión según una metodología y reglas de asignación a generadores y consumidores [18]<sup>3</sup>.

En resumen, la aplicación de la teoría marginalista a un parque generador que abastece a una demanda con la representación del sistema de transmisión y sus pérdidas definen el mercado spot de energía y potencia, en el que son remunerados los generadores en cada nodo y en el que se puede definir un costo de suministro para la demanda en cada nodo.

En el caso chileno este mercado es cerrado a los generadores, cuyas unidades y costos de generación son operados y auditados por un Operador Independiente del Sistema quien se encarga de realizar la operación óptima del sistema a mínimo costo. Al ser cerrado a los generadores, los clientes de energía deben establecer contratos financieros con los generadores para poder recibir suministro.

### **2.3. Sistemas Eléctricos en Chile**

Desde el punto de vista del suministro eléctrico<sup>4</sup>, cuatro sistemas eléctricos aislados operan en Chile actualmente. El Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) abastece la zona norte del país y su capacidad instalada fue 4324 MW (casi el 100% de la capacidad instalada en el SING corresponde a centrales termoeléctricas). El Sistema Interconectado Central (SIC), abastece la zona centro del país y su capacidad instalada alcanzó 15450 MW (41% corresponde a centrales hidroeléctricas, 51% corresponde a centrales termoeléctricas y 8% entre solares y eólicas). La zona de Aysén es abastecida por un sistema eléctrico y tres pequeños sistemas aislados, con 52 MW de capacidad instalada. Finalmente, las ciudades ubicadas en la zona de Magallanes (Punta Arenas, Puerto Natales y Puerto Porvenir) son abastecidas por centrales termoeléctricas en base a gas natural, que alcanzaron una capacidad instalada de 102 MW.

---

<sup>2</sup> Cada 4 años en el Estudio de Transmisión Troncal.

<sup>3</sup> En un nuevo contexto regulatorio los cargos destinados a cubrir la valorización de las instalaciones de transmisión serán de cargo de los consumidores.[19]

<sup>4</sup> Capacidad Instalada a Noviembre de 2015. Fuente: CNE.

### 3. MODELO PROPUESTO

Este capítulo describe el modelo de mercado utilizado para analizar decisiones de inversión de largo plazo en el contexto chileno, diseñado para encontrar un nivel de capacidad instalada de equilibrio para el período 2015 a 2030.

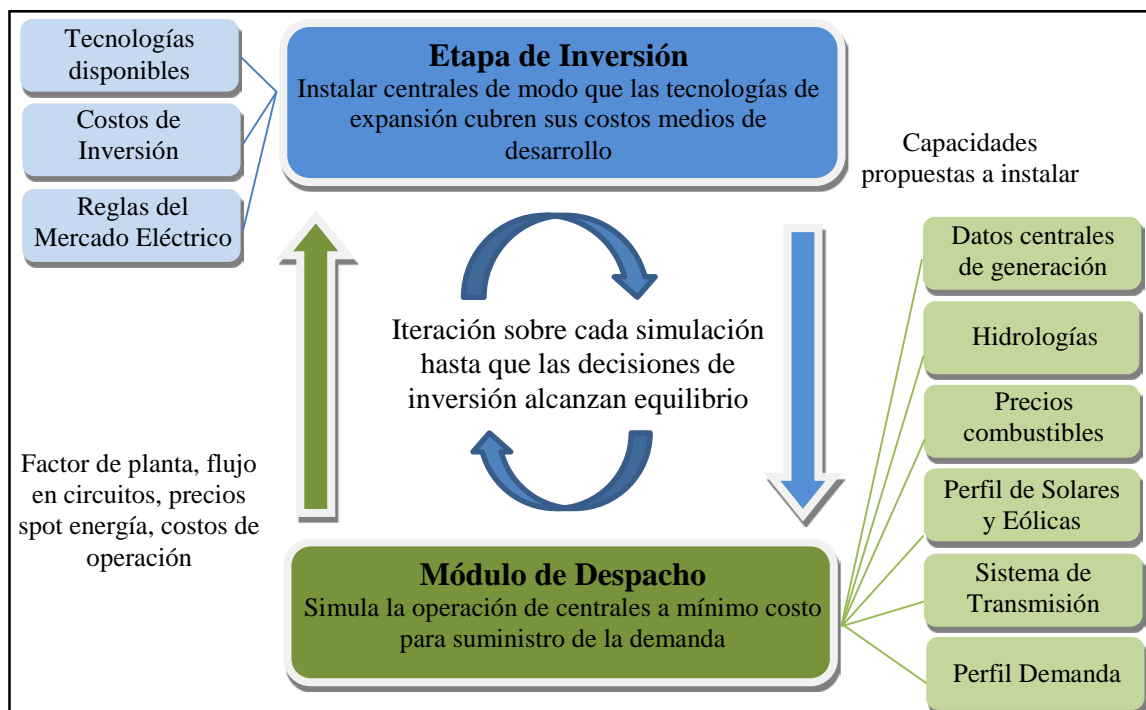
#### 3.1. Estructura del Modelo

El modelo consiste en dos módulos:

- Una etapa de inversión que establece un mix de decisiones de inversión rentable para los agentes del sector generación, inversión en líneas de transmisión con el objetivo de no producir congestiones relevantes y considera el nivel de penetración de energía solar fotovoltaica.
- Un módulo de despacho económico que simula la operación en el largo plazo de las inversiones realizadas en la etapa anterior.

Este modelo determina un mix de capacidad instalada para el período analizado y el cómo esta capacidad es despachada a mínimo costo para suministrar la demanda de energía. Se dice que este mix de capacidad instalada es un equilibrio de largo plazo si los ingresos de cada tecnología cubren los costos de inversión y operación, sin ganar utilidades excesivas [20]. La interacción de los módulos mencionados se ilustra en la siguiente figura.

Ilustración 1. Estructura del Modelo



La inclusión del sistema de transmisión es relevante para determinar el efecto local que produce la energía solar fotovoltaica en el despacho y las congestiones por excesivo flujo de transmisión en las líneas.

### 3.1.1. **Etapa de Inversión**

#### 3.1.1.1 Centrales de Generación

El criterio para la instalación de aquellas centrales de generación futuras que no se encuentran en construcción se basa en lo descrito en el punto 2.2. Considerando lo anterior, los inversionistas en centrales que expanden el sistema buscan una tasa interna de retorno del 9 % después de impuestos en valor real, cubriendo su costo medio de desarrollo. Este criterio es usado para alcanzar un equilibrio en la capacidad instalada.

Cabe señalar que la competencia para expandir la generación se realizó entre unidades hidroeléctricas, carboneras, eólicas y ciclos combinados. En el caso de los ciclos combinados y dado el contexto de los contratos *take or pay*<sup>5</sup> de gas natural licuado (GNL) en el mercado eléctrico chileno<sup>6</sup>, se asumió que las nuevas unidades de ciclo combinado son despachadas de manera tal que sus ingresos cubren el costo medio de desarrollo para ciclos combinados que operan al menos con un 60 % de factor de planta. Este supuesto se asumió por simplificación y en base a lo que sucede actualmente en Chile, a pesar de que no todas las unidades existentes o en construcción tienen ese nivel de *take or pay*. Estudios como [21] reconocen una incompatibilidad conceptual entre un modelo de declaración de costos variables y la gestión eficiente de combustibles con contratos *take or pay* en el despacho eléctrico (cuando no existe una alternativa de uso para el gas natural licuado), para lo cual propone una nueva metodología en base a esquemas de licitación que permitan determinar el volumen óptimo necesario de GNL para una correcta planificación de la operación del sistema en presencia de contratos con cláusulas *take or pay*.

---

<sup>5</sup> Los contratos con cláusula *take or pay*, son aquellos donde el comprador paga un precio por un volumen de producto, independiente si este es consumido o no. Es decir, el comprador se compromete a adquirir una cantidad mínima del producto y debe pagarla a todo evento.

<sup>6</sup> El mercado eléctrico chileno de generación se basa en una estructura tipo *pool* obligatorio con costos variables declarados y auditables por el operador del sistema, el que a su vez tiene la función de asegurar la operación de mínimo costo esperado del sistema en conjunto, labor que realiza mediante el uso de herramientas de optimización. Dado que no existe consenso entre los agentes del sistema de cómo debiesen considerarse los contratos *take or pay* (si corresponden a un costo fijo o representan un costo variable) y con el objetivo de ser despachados en base, los agentes del sistema que poseen ciclos combinados con contratos *take or pay* de GNL tienen incentivo a declarar costos variables bajos para evitar la acumulación de GNL, cuando no existe una alternativa de uso de este GNL (el cual se acumularía en caso de no ser despachada la unidad).

### 3.1.1.2 Líneas de Transmisión

Respecto a la expansión de la transmisión, ésta enfrenta incertidumbre dadas las decisiones de los agentes participantes (generadores y consumidores). Dada la construcción de casos (con certidumbre en la demanda y en la ubicación de centrales fotovoltaicas que expanden el sistema), la expansión de la transmisión se realiza de modo tal que las líneas de transmisión es justificada al evitar desacoples relevantes de costo marginal entre barras. Sin embargo, nuevas metodologías permiten evaluar mayor cantidad de escenarios al considerar incertidumbre de los agentes [22].

### 3.1.1.3 Centrales Solares Fotovoltaicas

Para los distintos casos a analizar, se establece un objetivo de generación anual de energía proveniente de centrales solares fotovoltaicas. El objetivo será establecer cuál es el efecto que produce un nivel dado de generación solar fotovoltaica sobre otros parámetros del modelo. Como señalan distintos estudios [23] [24], las proyecciones de costo medio de desarrollo de esta tecnología para zonas con alta radiación solar [25] son tendientes a la baja en el largo plazo. Por tanto se justifica la construcción de este tipo de casos, que se hacen viables a medida que baja el costo medio de desarrollo (tal como han demostrado las últimas licitaciones para suministro de energía de clientes regulados).

## 3.1.2. Simulación del Despacho Económico

En esta etapa se utiliza un modelo de despacho económico que simula la operación en el largo plazo de las inversiones realizadas en la etapa anterior usando técnicas de programación dinámica dual estocástica<sup>7</sup>, permitiendo realizar análisis ante incertidumbre hidrológica [26]. El resultado de esta etapa entrega para cada bloque y mes representativo los precios spot de energía por barra e ingresos spot de las centrales generadoras, los costos de operación y despacho de las centrales generadoras, flujos de energía por las líneas de transmisión y el eventual costo de falla por energía no suministrada. Si las centrales que expanden el sistema logran un margen operacional en el mercado spot que les permitan cubrir la inversión y operación para una tasa interna de retorno del 9 % después de impuestos en valor real, se dice que el sistema alcanza el equilibrio de largo plazo en el contexto chileno.

---

<sup>7</sup> Mayores detalles en la sección Anexos.

### **3.2. Bases de Estudio**

Las bases del estudio se indican en detalle en la sección Anexos. A modo de resumen, los principales inputs del modelo son los siguientes:

- Horizonte de estudio del 2015 al 2030.
- Centrales térmicas: costo inversión, potencia máxima-mínima, combustible y precio, consumo específico, costo variable no combustible, mantenimiento y tasa de falla.
- Centrales hidroeléctricas: costo inversión, potencia máxima-mínima, coeficiente de producción, cota inicial, capacidad de regulación, embalses y cuenca asociada, hidrologías, mantenimiento y tasa de falla.
- Centrales eólicas y solares: costos de inversión, potencia máxima y perfil de generación.
- Parámetros de la red eléctrica (líneas y barras principales) y valorización.
- Demanda inelástica de energía, perfil (duración de bloques y demanda por barra) y costo de falla.
- Reserva en giro para control de frecuencia.

Para definir las bases, se usan como referencia los Informes de Precio de Nudo emitidos por la Comisión Nacional de Energía (CNE) [27] [28], los Informes Técnicos elaborados por el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC) [29] [30] y los Informes del Banco Mundial [31].

## **4. CASOS DE ESTUDIO**

### **4.1. General**

Los casos propuestos pretenden evaluar el beneficio económico que surge de la interconexión entre los sistemas SING y SIC dados ciertos niveles de penetración de energía solar fotovoltaica. Para dicha evaluación, se aplicó la metodología tradicional de planificación eléctrica, consistente en calcular el costo total actualizado de expandir y operar los sistemas SING y SIC para cada caso propuesto. La expansión y operación de ambos sistemas se realiza mediante el modelo propuesto en el Capítulo 3.

En concreto la metodología aplicada para cada caso consistió en:

- Definir el desarrollo de los sistemas SING y SIC aislados y del sistema integrado SING+SIC sujetos a distintos niveles de penetración de energía solar fotovoltaica.
- Calcular los valores presentes de costos de inversión, operación y falla del desarrollo del SING y SIC aislado e interconectado.

### **4.2. Definición de Casos**

El enfoque general planteado para los distintos casos combinó escenarios posibles de expansión de la generación y de la transmisión y niveles de penetración de energía solar fotovoltaica.

Los siguientes supuestos fueron usados para todos los casos:

- Las unidades generadores existentes, en construcción y con contrato, al igual que el sistema de transmisión existente y en construcción son los mismos para todos los casos.
- La demanda inelástica es la misma para todos los casos.
- Los precios de combustible son los mismos para todos los casos.
- Chequeo de la obligación legal de generación en base a Energías Renovables no Convencionales (ERNC).
- Nivel de penetración de la Energía Solar Fotovoltaica según sea el caso.

#### 4.2.1. Casos

La siguiente tabla muestra los casos definidos para las expansiones del SING y del SIC. Cabe señalar que el nivel de penetración FV corresponde al % de la energía total anual generada en los respectivos sistemas, proveniente de fuentes solares fotovoltaicas.

**Tabla 1. Casos de Estudio**

| Caso                | Interconexión              | Nivel de Penetración FV | Zona de desarrollo FV |
|---------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Base SING SIC (i)   | SING y SIC interconectados | 8 %                     | SING y zona norte SIC |
| 10% FV SING SIC (i) | SING y SIC interconectados | 10 %                    | SING y zona norte SIC |
| 11% FV SING SIC (i) | SING y SIC interconectados | 11 %                    | SING y zona norte SIC |
| 12% FV SING SIC (i) | SING y SIC interconectados | 12 %                    | SING y zona norte SIC |
| 13% FV SING SIC (i) | SING y SIC interconectados | 13 %                    | SING y zona norte SIC |
| 14% FV SING SIC (i) | SING y SIC interconectados | 14 %                    | SING y zona norte SIC |
| 15% FV SING SIC (i) | SING y SIC interconectados | 15 %                    | SING y zona norte SIC |
| 10% FV SING SIC (a) | SING y SIC aislados        | 10 %                    | SING y zona norte SIC |
| 11% FV SING SIC (a) | SING y SIC aislados        | 11 %                    | SING y zona norte SIC |
| 12% FV SING SIC (a) | SING y SIC aislados        | 12 %                    | SING y zona norte SIC |
| 13% FV SING SIC (a) | SING y SIC aislados        | 13 %                    | SING y zona norte SIC |
| 14% FV SING SIC (a) | SING y SIC aislados        | 14 %                    | SING y zona norte SIC |
| 15% FV SING SIC (a) | SING y SIC aislados        | 15 %                    | SING y zona norte SIC |

El caso base corresponde al equilibrio alcanzado en un escenario de interconexión, en el cual el nivel de penetración de FV es el que cubre el costo medio de desarrollo establecido en [27]. En todos los otros casos, se considera que las unidades fotovoltaicas no tienen un costo medio de desarrollo establecido y que será cubierto según los ingresos que logren en el escenario simulado.

El nivel de penetración de unidades FV corresponde al alcanzado en el largo plazo (desde 2025 en adelante). El nivel de penetración se comienza a modificar a partir del año 2020 de manera tal de alcanzar el nivel final de manera escalonada y proporcional.

Asimismo, los niveles de penetración analizados fueron determinados dadas las posibilidades entregadas por el modelo y los supuestos asumidos. Sobre un nivel de 15% de penetración, en los casos aislados (sobre todo en los casos SING aislado) se presentaban problemas de convergencia en el modelo de despacho.



#### 4.2.2. Costo Medio de Desarrollo para Unidades FV

En un mercado competitivo, los agentes son tomadores del precio de equilibrio que se establece en el mercado. Además, en el largo plazo la cantidad producida por un agente es aquella en el que el costo medio de su función de producción es mínimo. En este punto, el costo medio de la función de producción es igual al costo marginal de producir una unidad extra del producto.

Haciendo la analogía con el mercado eléctrico (en el que su principal producto es la energía) las unidades buscarían el precio spot de energía que sea igual al costo medio de dicha tecnología. La siguiente tabla resume los supuestos asumidos para el caso base del presente estudio<sup>8</sup>.

**Tabla 2. Supuestos respecto al Costo Medio de Desarrollo de Unidades FV**

| Tecnología | Costo Inversión [US\$/kW] | Vida útil | Tasa interés real | Factor Recuperación Capital <sup>9</sup> | Anualidad inversión <sup>10</sup> [US\$/kW/año] |
|------------|---------------------------|-----------|-------------------|--|---|
| FV SING    | 2.300                     | 20        | 9%                | 0,11                                     | 252   |
| FV SIC     |                           |           |                   |  |   |

| Tecnología | Factor de planta | Generación anual [GWh/MW] | Costo Fijo [US\$/kW/año] | Costo Variable [US\$/MWh] | Costo Medio [US\$/MWh] |
|------------|------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------|
| FV SING    | 0,36             | 3,15                      | 0                        | 0                         | 79,9                   |
| FV SIC     | 0,33             | 2,89                      | 0                        | 0                         | 87,2                   |

La misma idea es capturada por el concepto de *Costo Nivelado de la Energía* (o sus siglas en inglés LCOE).

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{A_t}{(1+i)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+i)^t}}$$

<sup>8</sup> Los métodos usados en el presente trabajo no permiten estimar el costo de desarrollo eficiente para una tecnología o unidad en particular. En estos casos, modelos financieros son desarrollados y los cuales consideran todos los ingresos y gastos involucrados desde una perspectiva de flujo de caja en cada proyecto.

<sup>9</sup>  $frc = \frac{i}{(1-(1+i)^{-n})}$ . Factor utilizado para encontrar el valor de una serie uniforme de pagos iguales (A) que inician en el período 1 y que se extienden hasta (n) períodos, a partir de un valor presente (P) y dada una tasa de interés real (i).

<sup>10</sup>  $A = frc \cdot P$ , donde P corresponde al Costo de Inversión de la tecnología.

Donde

$I_0$ : Inversión en la tecnología durante el período de construcción (en este caso año 0) en [US\$].

$A_t$ : Costos totales para el año  $t$  en [US\$].

$E_t$ : Energía generada en el año  $t$ .

$i$ : Tasa de interés real

**Tabla 3. Supuestos respecto al LCOE de Unidades FV**

| Tecnología | $I_0$<br>[US\$/kW] | Vida<br>útil | Tasa<br>interés<br>real | Generación<br>anual<br>[GWh/MW] | Costo<br>Fijo<br>[US\$/kW/año] | Costo<br>Variable<br>[US\$/MWh] | LCOE<br>[US\$/MWh] |
|------------|--------------------|--------------|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| FV SING    | 2.300              | 20           | 9%                      | 3,15                            | 0                              | 0                               | 79,9               |
| FV SIC     |                    |              |                         | 2,89                            | 0                              | 0                               | 87,2               |

#### 4.2.3. Contexto del Mercado Eléctrico Chileno

Como se señala en el punto 3.1.2, una unidad FV busca el precio spot de energía y potencia firme<sup>11</sup> necesarios para cubrir la estructura de costos descrita en la siguiente tabla (supuestos del caso base para una unidad de 1 [MW] y sin economías de escala).

**Tabla 4. Costo de Desarrollo de Unidades FV de 1 [MW] – Caso Base**

| Tecnología | Precio Spot<br>Energía<br>[US\$/MWh] | Factor<br>de<br>planta | Generación<br>anual<br>[GWh/MW] | Potencia<br>Firme<br>[MW] | Precio<br>Nudo<br>Potencia<br>[US\$/kW-<br>mes] | Ingresos<br>[kUS\$/año] | Costos<br>[kUS\$/año] | EBITDA<br>[US\$/MWh] |
|------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------|---|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| FV SING    | 86,5                                 | 0,36                   | 3,15                            | 0,14                      | 8,49  | 287,0                   | 0                     | 286,9                |
| FV SIC     | 95,0                                 | 0,33                   | 2,89                            | 0,11                      | 9,79  | 287,5                   | 0                     | 286,8                |

| Tecnología | Costo<br>Inversión<br>[US\$/kW] | Costo<br>Fijo<br>[US\$/kW/año] | Costo<br>Variable<br>[US\$/MWh] | Vida<br>útil | Impuesto<br>a<br>utilidades | Depreciación<br>acelerada | TIR |
|------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------|-----------------------------|---------------------------|-----|
| FV SING    | 2.300                           | 0                              | 0                               | 20           | 27%                         | Si                        | 9%  |
| FV SIC     |                                 |                                |                                 |              |                             |                           |     |

<sup>11</sup> En estricto rigor buscaría solo el precio spot de energía, pero se asume una potencia firme reconocida de parte del Operador del Sistema en un contexto de interconexión. Actualmente el CDEC-SING no reconoce Potencia Firme a las unidades FV, mientras en el CDEC-SIC se les reconoce como Potencia Firme en promedio un 11% de la potencia máxima neta declarada (datos CDEC 2015). Si bien la metodología de cálculo definida en el Decreto Supremo 62 es la que regirá en el largo plazo, para efectos del presente estudio se asume que para los casos aislados las Potencias Firmes reconocidas son las estimadas actualmente. En el caso de la interconexión, se asume que el criterio usado por el CDEC-SIC prevalece y además las unidades CDEC-SING se les reconoce como Potencia Firme un 14% de la potencia máxima neta declarada.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Costos de Inversión en Unidades FV

La siguiente tabla muestra cómo deberían cambiar los costos de inversión para que los niveles de penetración FV simulados se concreten.

**Tabla 5. Costo Inversión necesario para Desarrollo de Unidades FV**

| Caso              | FV SING                        |                                  |                           | FV SIC                         |                    |                           |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|---------------------------|
|                   | Precio Spot Energía [US\$/MWh] | Potencia Firme <sup>12</sup> [%] | Costo Inversión [US\$/kW] | Precio Spot Energía [US\$/MWh] | Potencia Firme [%] | Costo Inversión [US\$/kW] |
| Base 8%           | 86,50                          | 14%                              | 2.300                     | 95,00                          | 11%                | 2.300                     |
| Aislado 10%       | 52,18                          | 0%                               | 1.318                     | 82,77                          | 11%                | 2.010                     |
| Aislado 11%       | 51,76                          | 0%                               | 1.305                     | 81,69                          | 11%                | 1.990                     |
| Aislado 12%       | 50,25                          | 0%                               | 1.270                     | 75,27                          | 11%                | 1.840                     |
| Aislado 13%       | 49,22                          | 0%                               | 1.240                     | 70,90                          | 11%                | 1.740                     |
| Aislado 14%       | 47,14                          | 0%                               | 1.190                     | 69,41                          | 11%                | 1.710                     |
| Aislado 15%       | 43,55                          | 0%                               | 1.100                     | 63,41                          | 11%                | 1.570                     |
| Interconexión 10% | 78,57                          | 14%                              | 2.100                     | 80,43                          | 11%                | 1.960                     |
| Interconexión 11% | 75,48                          | 14%                              | 2.010                     | 77,57                          | 11%                | 1.900                     |
| Interconexión 12% | 68,19                          | 14%                              | 1.830                     | 70,54                          | 11%                | 1.730                     |
| Interconexión 13% | 63,86                          | 14%                              | 1.720                     | 66,52                          | 11%                | 1.640                     |
| Interconexión 14% | 60,51                          | 14%                              | 1.640                     | 65,36                          | 11%                | 1.610                     |
| Interconexión 15% | 57,97                          | 14%                              | 1.580                     | 59,58                          | 11%                | 1.480                     |

La tabla anterior muestra que a mayor penetración de unidades FV, el precio spot de energía cae. Por tanto, para mantener los niveles de rentabilidad exigidos en el mercado eléctrico chileno, necesariamente el costo de inversión para este tipo de unidades debe caer (ya sea para unidades FV del SING y SIC, en los casos aislados e interconectados).

Para las unidades del SING, la interconexión permite que los costos de inversión exigidos no sean tan bajos en comparación al caso aislado. Además, para el caso aislado en el SING se requiere que los costos de inversión caigan a la mitad o más respecto al costo de inversión del caso base (2.300 [US\$/kW]).

<sup>12</sup> Potencia reconocida como Potencia Firme respecto de la Potencia Neta instalada.

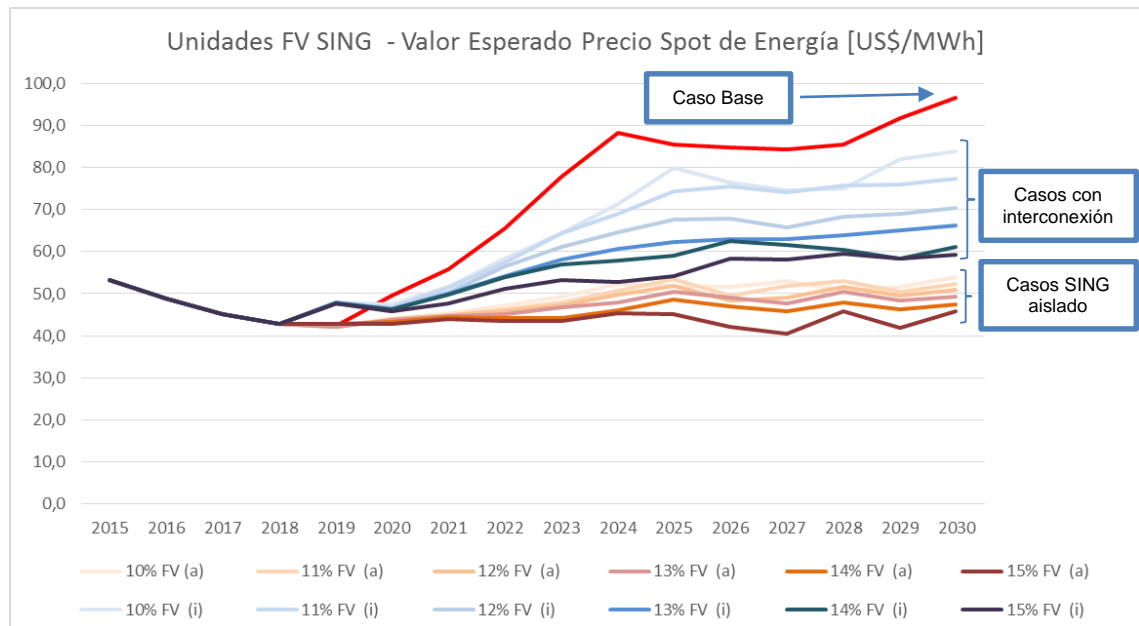
Para las unidades del SIC, el caso aislado permite costos de inversión más altos en comparación al caso interconectado. En este sentido, la interconexión desfavorece su posición respecto a las unidades del SING.

## 5.2. Precio Spot de Energía

### 5.2.1. Unidades Fotovoltaicas del SING

La siguiente ilustración muestra el valor esperado anual del precio de spot de energía de inyección para el promedio de las unidades fotovoltaicas del SING para cada caso analizado.

**Ilustración 2. Precio Spot Energía de Inyección – Unidades FV SING**

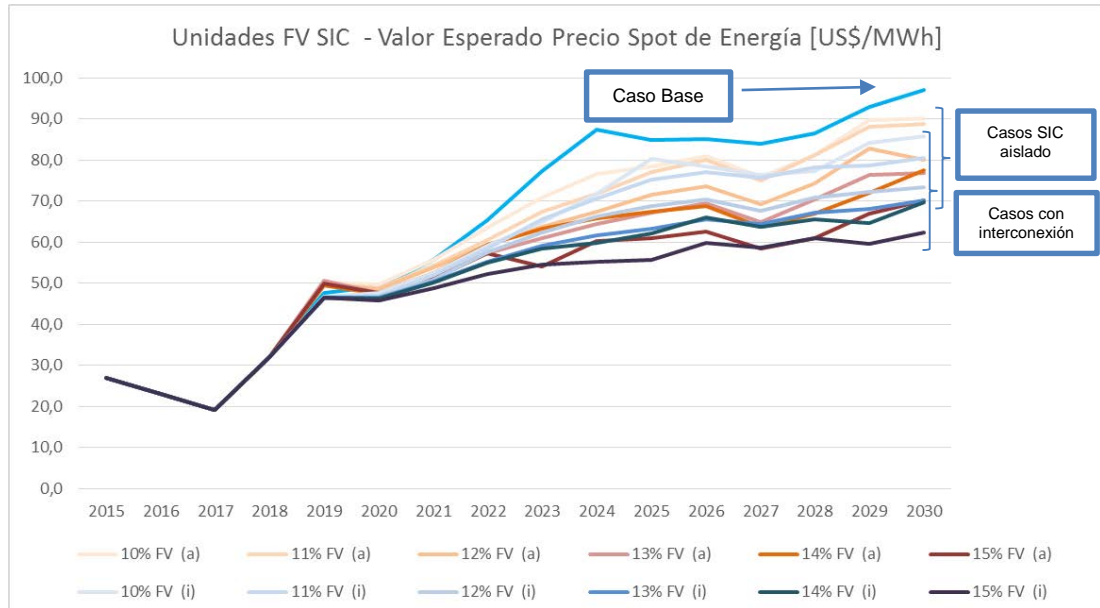


De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del precio spot de energía de inyección disminuye para las unidades FV del SING (entre un 11% y 51% menor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea mayor (entre un 28% y 51% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

### 5.2.2. Unidades Fotovoltaicas del SIC

La siguiente ilustración muestra el valor esperado anual del precio de spot de energía de inyección para el promedio de las unidades fotovoltaicas del SIC para cada caso analizado.

**Ilustración 3. Precio Spot Energía de Inyección – Unidades FV SIC**

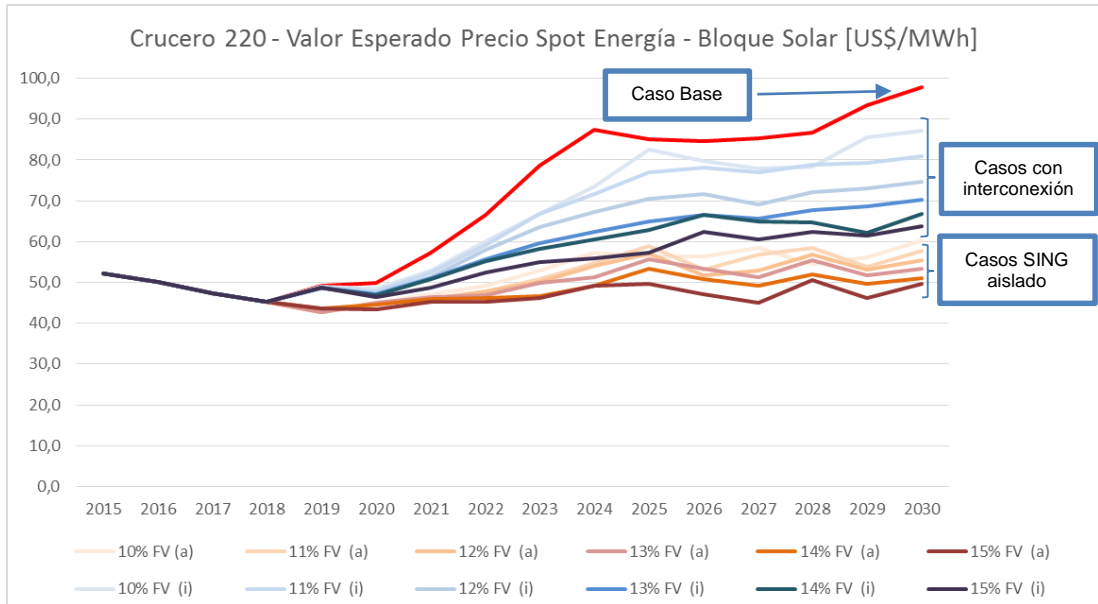


De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del precio spot de energía de inyección disminuye para las unidades FV del SIC (entre un 6% y 33% menor respecto al caso base en el largo plazo). A diferencia de las unidades FV del SING y para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión implica que este valor esperado sea menor (entre un 3% y 6% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

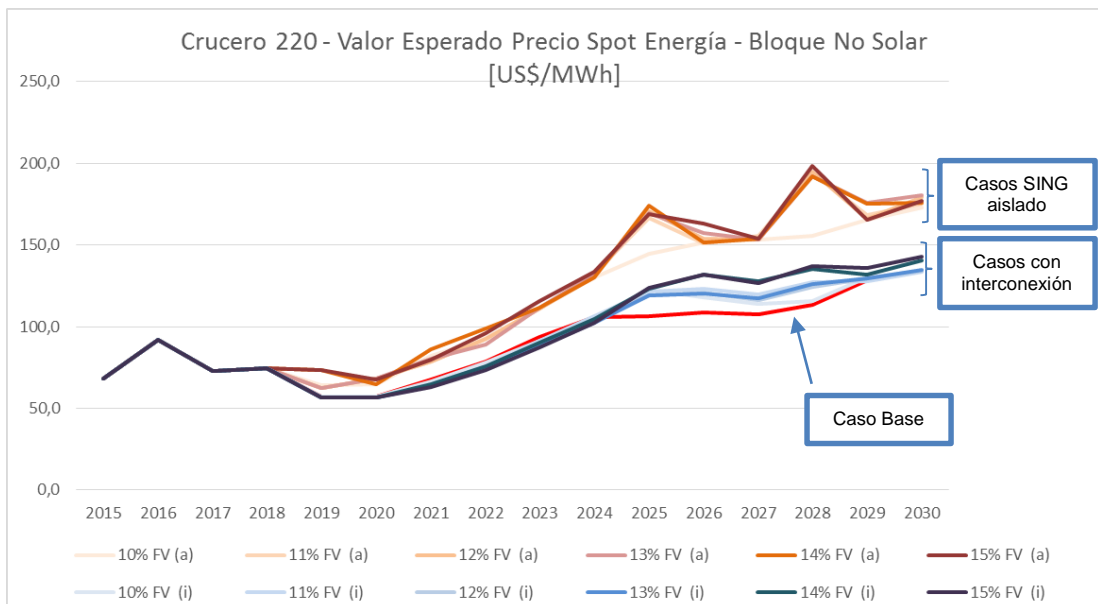
### 5.2.3. Precios Spot de Energía por Bloques en el SING

Las siguientes ilustraciones muestran el valor esperado anual del precio de spot de energía para los bloques solares y no solares. A modo de referencia, se consideró la barra Crucero 220 en el SING.

**Ilustración 4. Precio Spot Energía Bloque Solar – Crucero 220 SING**



**Ilustración 5. Precio Spot Energía Bloque No Solar – Crucero 220 SING**



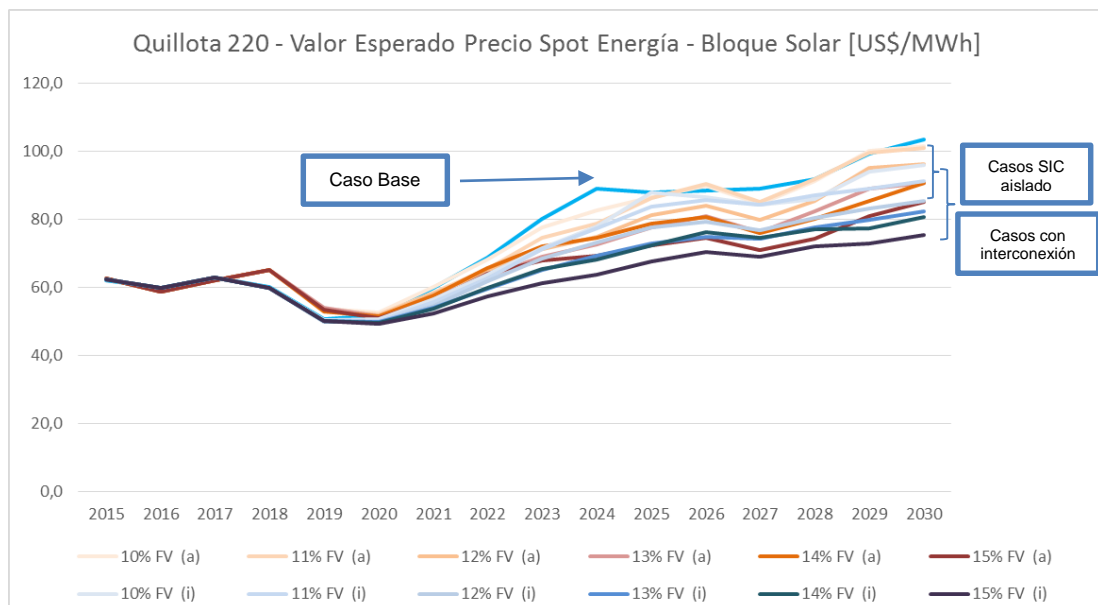
De la ilustración 4 se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del precio spot de energía en bloques solares disminuye en el SING (entre un 8% y 46% menor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea mayor (entre un 26% y 43% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

Si bien gráficamente no es evidente, de la ilustración 5 se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del precio spot de energía en bloques no solares aumenta en el SING (entre un 5% y 47% mayor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión implica que este valor esperado sea menor (entre un 22% y 27% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

#### 5.2.4. Precios Spot de Energía por Bloques en el SIC

La siguiente ilustración muestra el valor esperado anual del precio de spot de energía para los bloques solares. A modo de referencia, se consideró la barra Quillota 220 en el SIC.

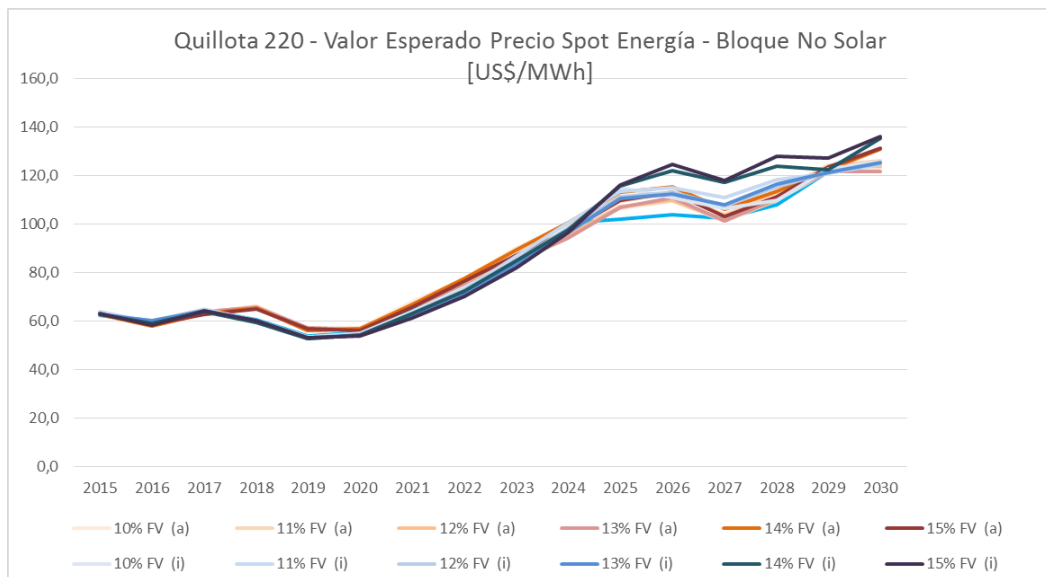
**Ilustración 6. Precio Spot Energía Bloque Solar – Quillota 220**



De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del precio spot de energía en bloques solares disminuye en el SIC (entre un 1% y 24% menor respecto al caso base en el largo plazo). A diferencia de las unidades FV del SING y para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión implica que este valor esperado sea menor (entre un 4% y 7% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

La siguiente ilustración muestra el valor esperado anual del precio de spot de energía para bloques no solares en la barra Quillota 220 del SIC.

**Ilustración 7. Precio Spot Energía Bloque No Solar – Quillota 220**



Si bien gráficamente no es evidente, a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del precio spot de energía en bloques no solares aumenta en el SIC (entre un 1% y 13% mayor respecto al caso base en el largo plazo). Para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión implica que este valor esperado sea mayor (entre un 2% y 8% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

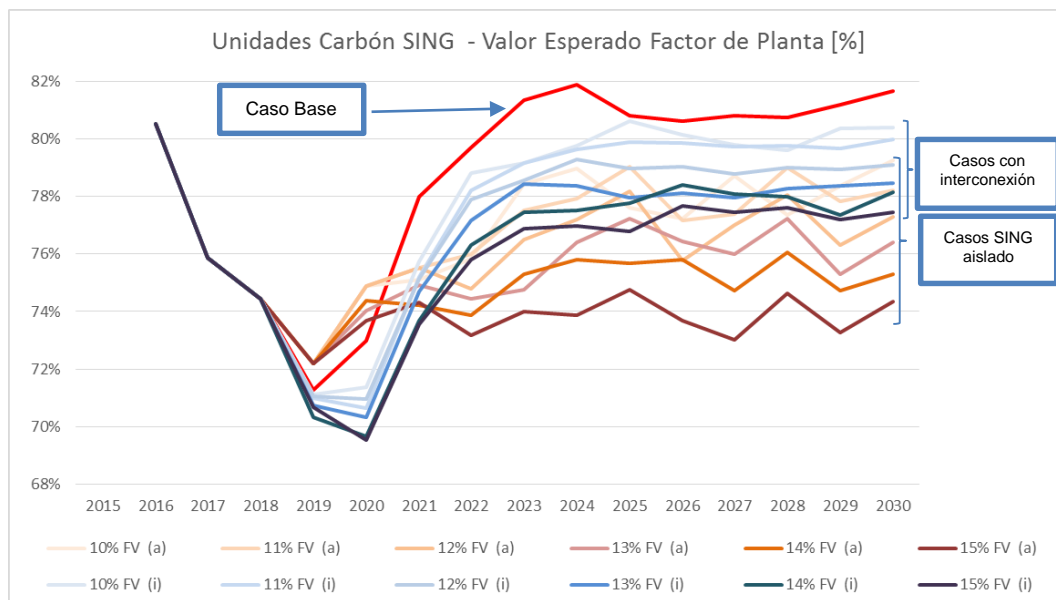


### 5.3. Despacho por Tipo de Tecnología

#### 5.3.1. Despacho por Tipo de Tecnología en el SING

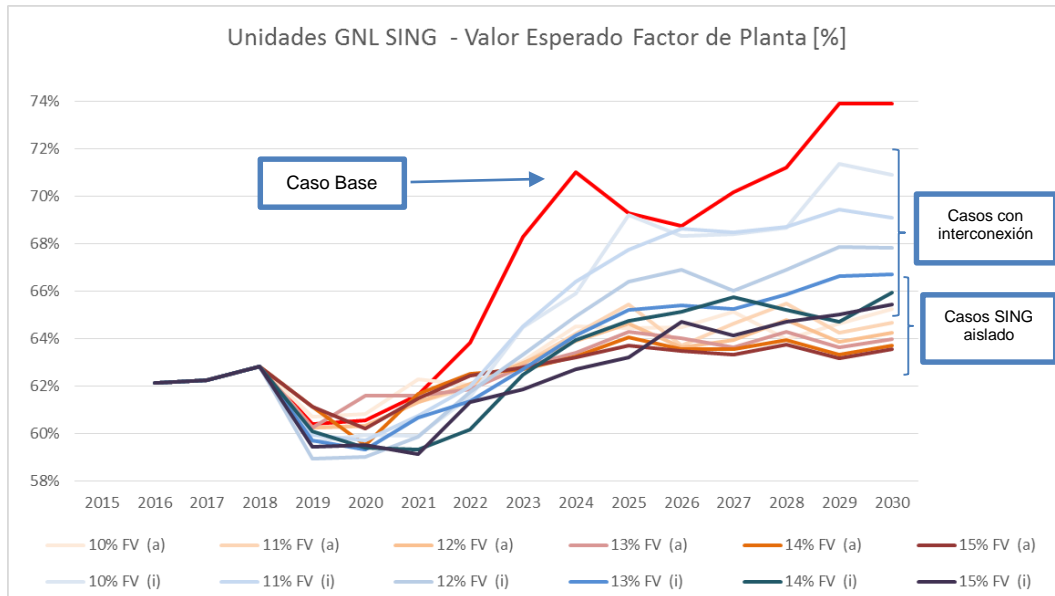
Las siguientes ilustraciones muestran el valor esperado anual del factor de planta para el promedio de las unidades correspondientes a cada tecnología del SING y para cada caso analizado. Se analizaron las unidades carboneras, motores y la unidad U16.

**Ilustración 8. Factor de Planta – Unidades Carbón SING**



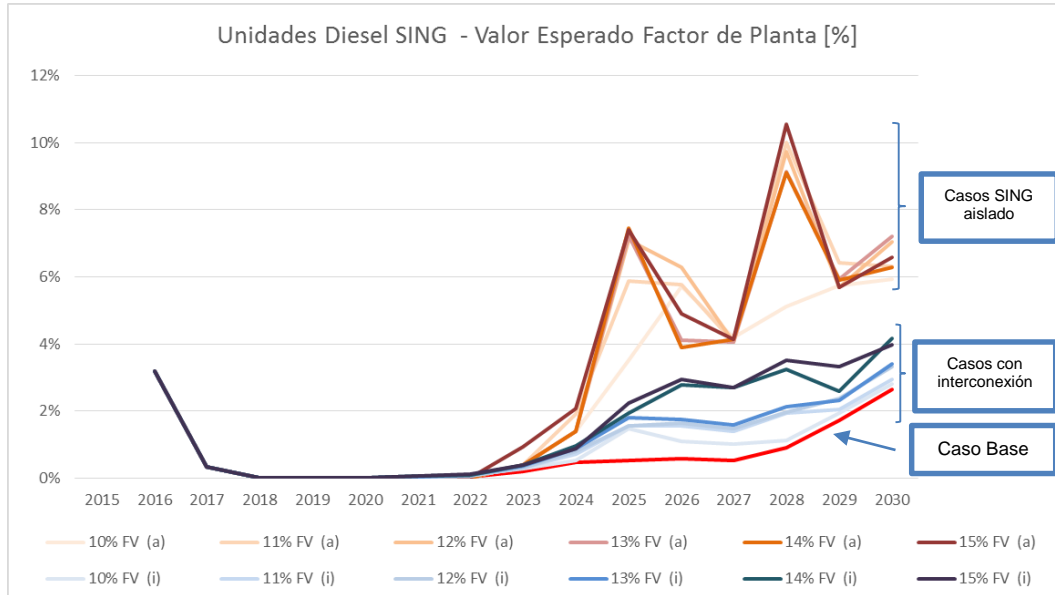
De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta disminuye (entre un 1% y 9% menor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea mayor (entre un 2% y 5% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

**Ilustración 9. Factor de Planta – U16 SING**



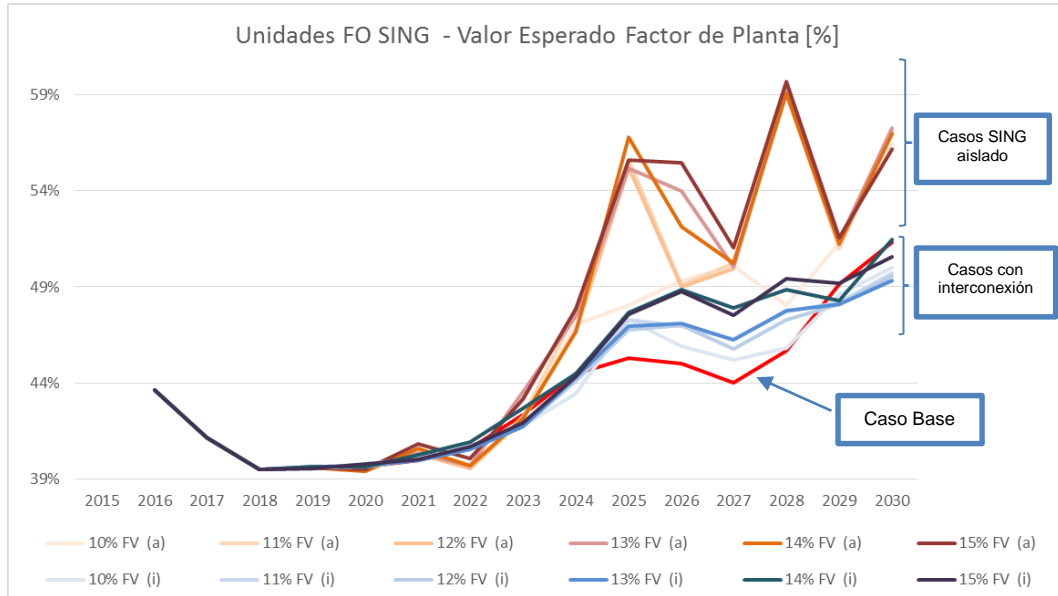
De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta disminuye (entre un 2% y 11% menor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea mayor (entre un 2% y 7% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

**Ilustración 10. Factor de Planta – Unidades Diesel SING**



De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta aumenta (entre un 37% y 480% mayor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea menor (entre un 52% y 70% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

**Ilustración 11. Factor de Planta – Unidades Fuel Oil SING**

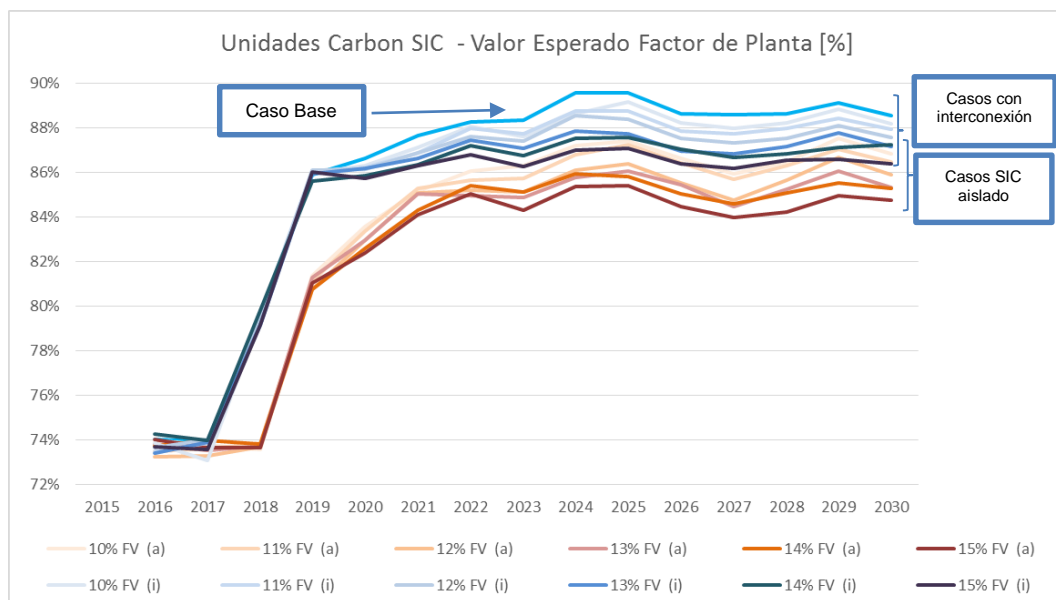


De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta aumenta (entre un 1% y 18% mayor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea menor (entre un 7% y 13% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

### 5.3.2. Despacho por Tipo de Tecnología en el SIC

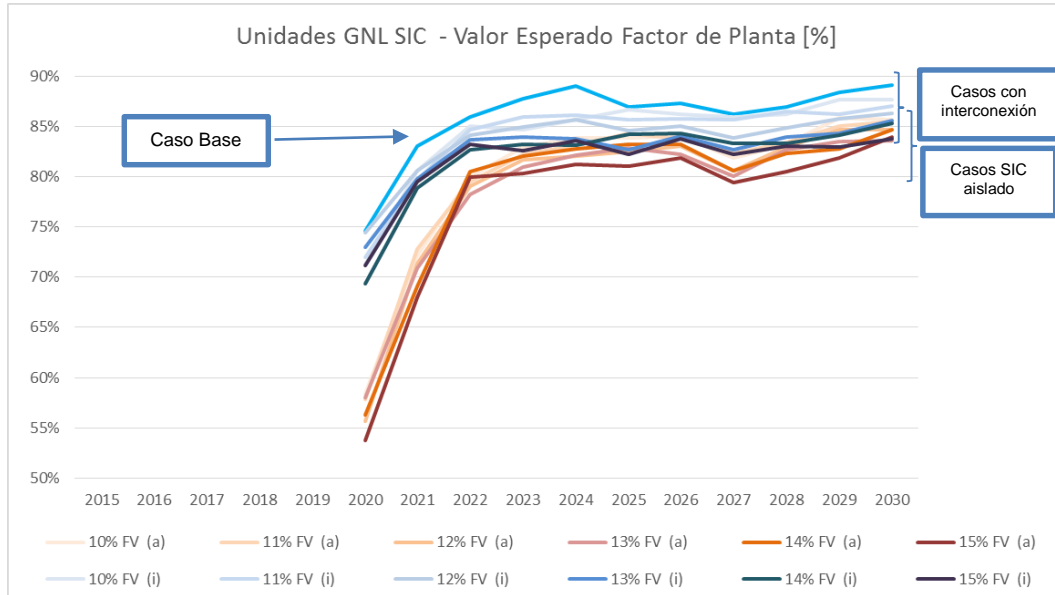
Las siguientes ilustraciones muestran el valor esperado anual del factor de planta para el promedio de las unidades correspondientes a cada tecnología del SIC y para cada caso analizado. Se analizaron las unidades carboneras, motores, la futura unidad CC Campesino e hidroeléctricas de embalse.

**Ilustración 12. Factor de Planta – Unidades Carbón SIC**



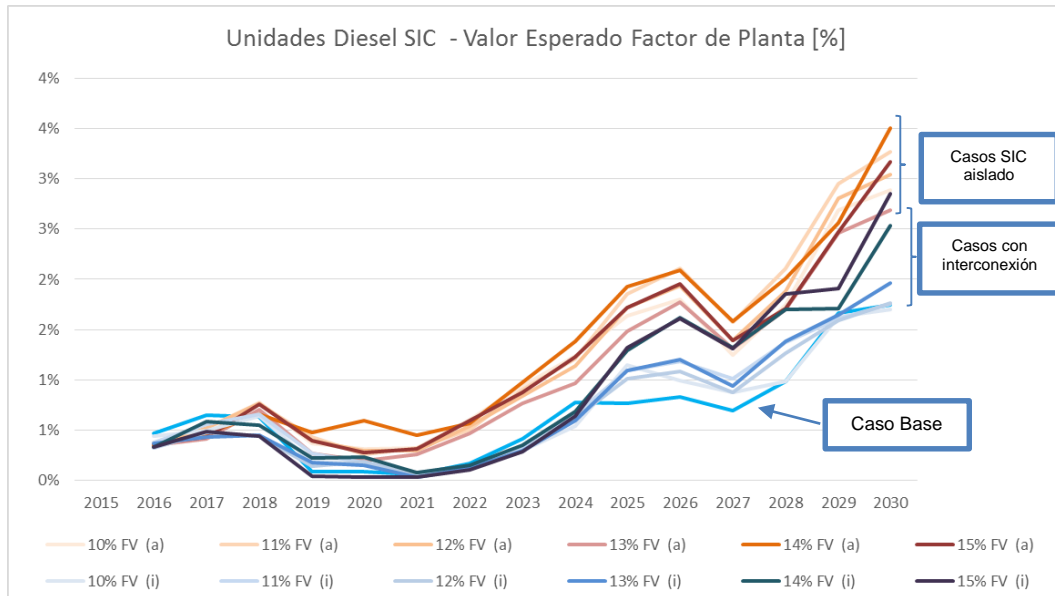
De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta disminuye (entre un 0% y 5% menor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea mayor (entre un 1,8% y 2,2% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

**Ilustración 13. Factor de Planta – CC Campesino SIC**



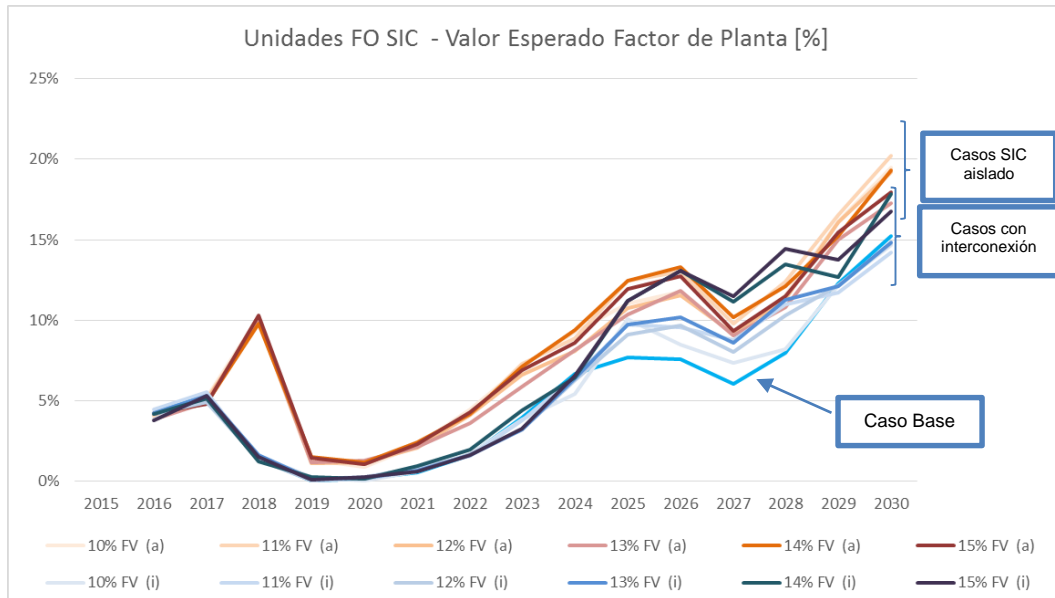
De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta disminuye (entre un 1% y 7% menor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea mayor (entre un 2% y 3% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

**Ilustración 14. Factor de Planta – Unidades Diesel SIC**



De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta aumenta (entre un 10% y 108% mayor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea menor (entre un 13% y 42% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

**Ilustración 15. Factor de Planta – Unidades Fuel Oil SIC**

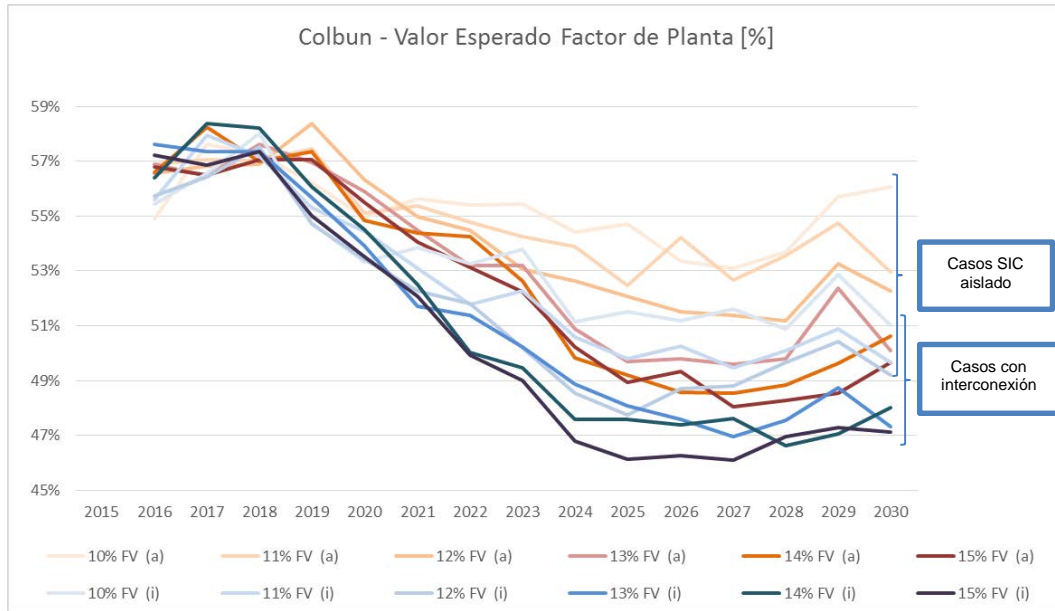


De la ilustración anterior se observa que a medida que aumenta el nivel de penetración FV (ya sea para los casos con y sin interconexión), el valor esperado del factor de planta aumenta (entre un 7% y 49% mayor respecto al caso base en el largo plazo). Sin embargo, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que este valor esperado sea menor (entre un 0% y 23% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

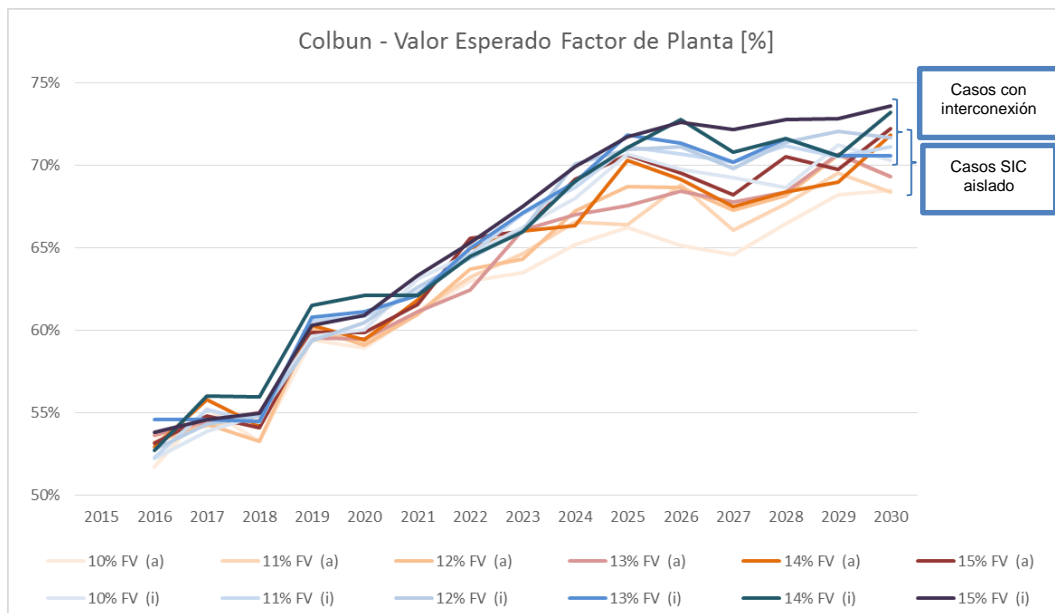


En las siguientes ilustraciones se analizan 2 centrales hidroeléctricas con capacidad de regulación para efectos de analizar su factor de planta durante bloques solares y no solares.

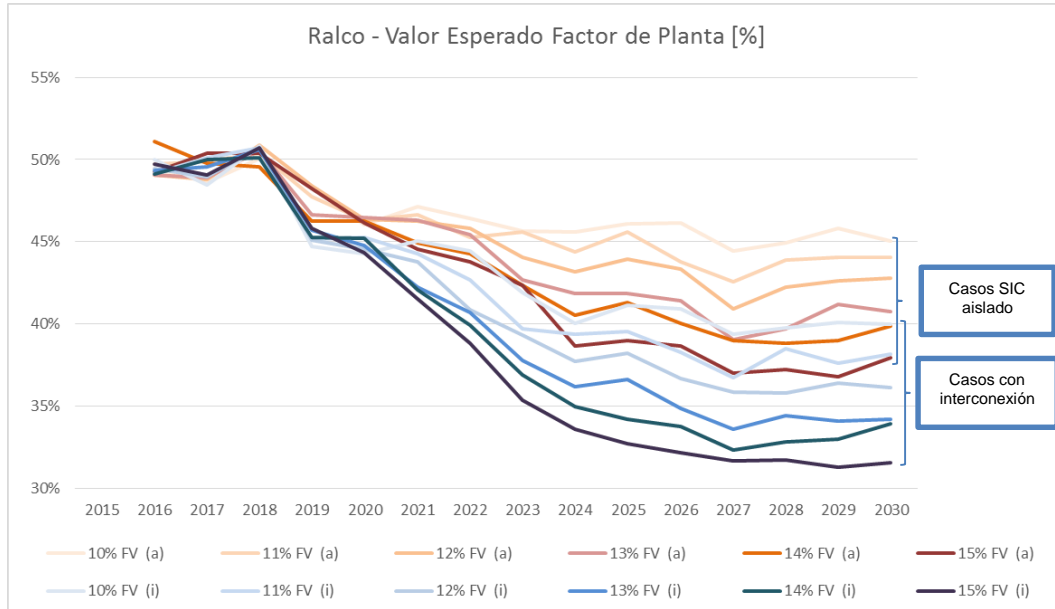
**Ilustración 16. Factor de Planta – Central Colbún Bloque Solar**



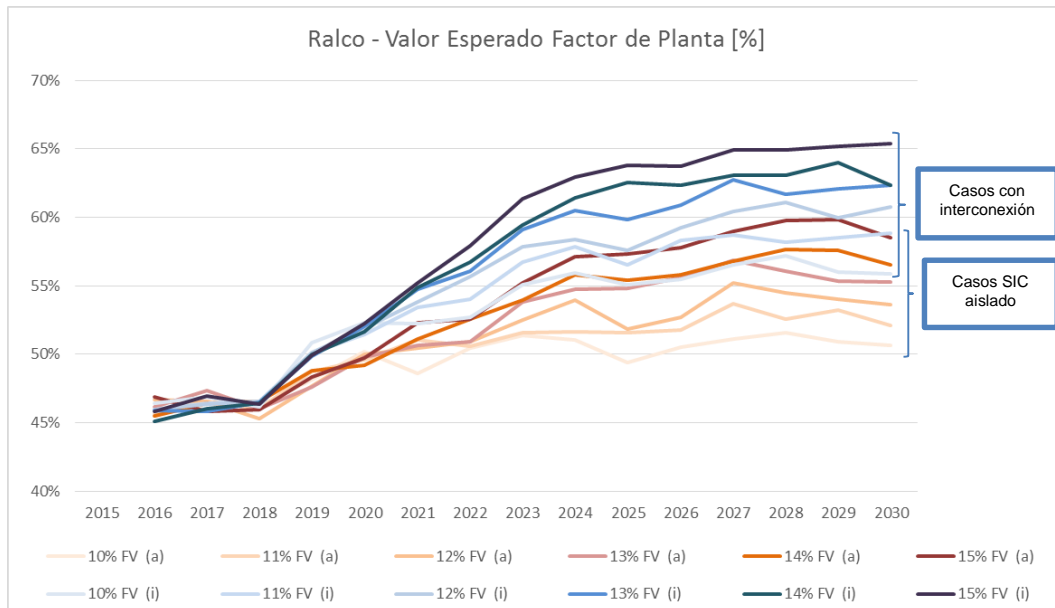
**Ilustración 17. Factor de Planta – Central Colbún Bloque No Solar**



**Ilustración 18. Factor de Planta – Central Ralco Bloque Solar**



**Ilustración 19. Factor de Planta – Central Ralco Bloque No Solar**



En ambos casos, las centrales hidroeléctricas con capacidad de regulación adecúan su despacho en función de la cantidad de energía solar fotovoltaica. A mayor nivel de penetración FV, el despacho en bloques solares disminuye y el despacho en bloques no solares aumenta. En el caso de la interconexión, lo anterior se acentúa aún más.

Para el caso de Colbún y para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que el valor esperado del factor de planta en bloques solares disminuya (entre un 4% y 6% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV) y el valor esperado del factor de planta en bloques no solares aumente (entre un 3% y 5% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

Para el caso de Ralco y para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión permite que el valor esperado del factor de planta en bloques solares disminuya (entre un 11% y 16% menor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV) y el valor esperado del factor de planta en bloques no solares aumente (entre un 10% y 12% mayor respecto al caso aislado en el largo plazo dependiendo del nivel de penetración FV).

#### 5.4. Centrales de Pasada y Capacidad de Regulación

Es de interés evaluar el incentivo que tienen los propietarios de centrales de pasada para invertir en estanques de regulación al enfrentar los distintos casos propuestos. Para lo anterior, se evalúan los ingresos por energía que tendrían dos centrales de pasada en los casos simulados con y sin estanque de regulación. Se asume que la capacidad de almacenamiento del estanque es suficiente para una completa regulación, esto es, el volumen turbinado en un bloque de demanda puede diferir del caudal afluente con el requerimiento que la suma de los caudales turbinados y vertidos en la etapa considerada sea el caudal promedio del caudal afluente.

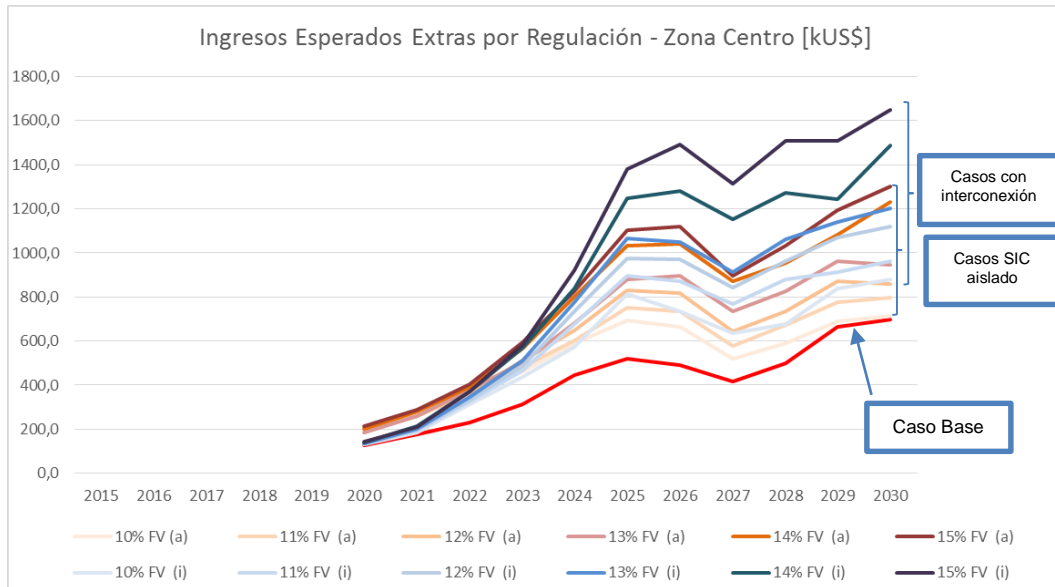
La siguiente tabla muestra las características de las centrales de pasada, ambas parte de la expansión de todos los casos simulados.

**Tabla 6. Parámetros de Central de Pasada**

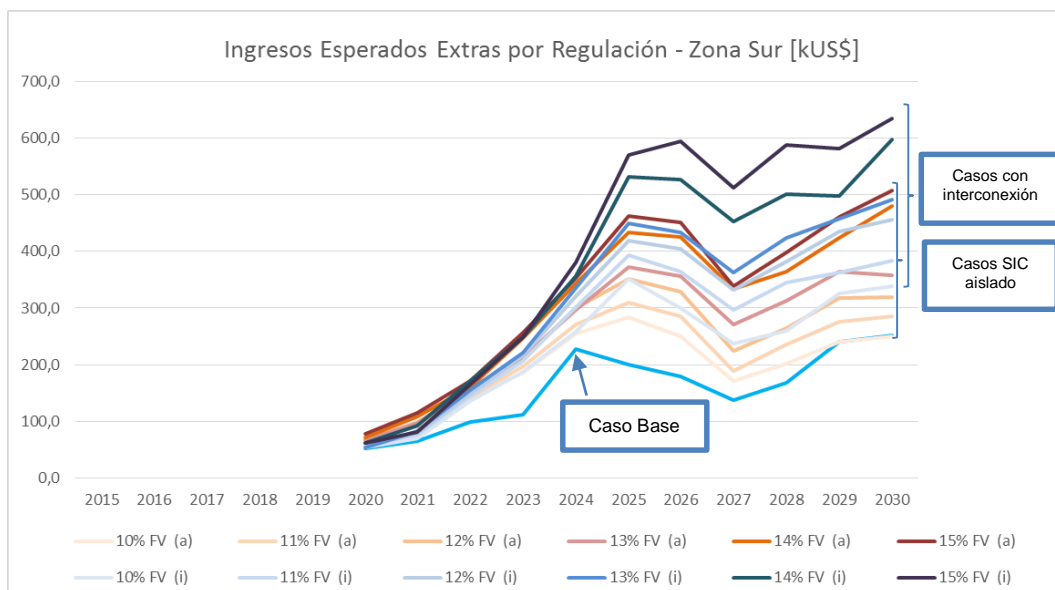
| Variable                 | Central<br>Zona Centro | Central<br>Zona Sur |
|--------------------------|------------------------|---------------------|
| Potencia Neta            | 20 [MW]                | 20 [MW]             |
| Factor de Producción     | 20 [MW/m3/s]           | 20 [MW/m3/s]        |
| Caudal Máximo Turbinable | 1 [MW/m3/s]            | 1 [MW/m3/s]         |
| Tasa Salida              | 4 %                    | 4 %                 |
| Generación Anual         | 116,6 [GWh]            | 149,8 [GWh]         |
| Factor de Planta         | 67 %                   | 85 %                |
| Barra Conexión           | Itahue 220             | Valdivia 220        |
| Inicio Operación         | Enero 2020             | Enero 2020          |

Para las centrales analizadas y para cada caso, se calcula la diferencia esperada anual entre los ingresos de cada central con estanque de regulación y los ingresos de cada central sin estanque de regulación. En las siguientes ilustraciones se muestra la diferencia de ingresos debido al estanque regulación.

**Ilustración 20. Ingresos Esperados Extras – Central Zona Centro**



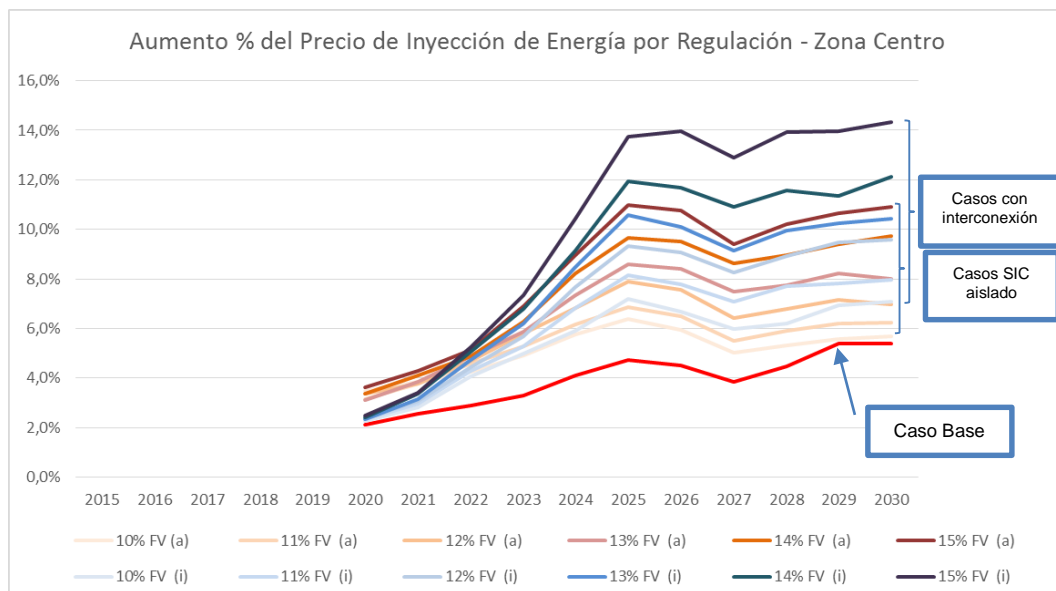
**Ilustración 21. Ingresos Esperados Extras – Central Zona Sur**



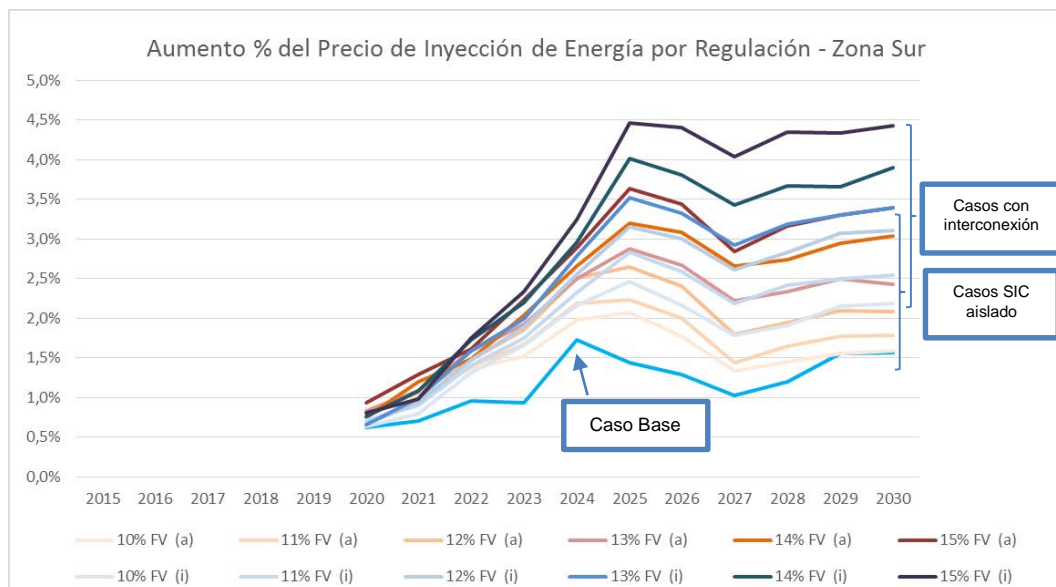
Independiente del nivel de penetración FV, la interconexión mejora los ingresos esperados extras por regulación. Además, a medida que aumenta el nivel de penetración, estos ingresos esperados extras van aumentando. Lo anterior se debe al diferencial de precios entre bloques solares y no solares, los cuales aumentan cuando se produce la interconexión y a medida que aumenta el nivel de penetración FV.

Un resultado interesante de observar es que el estanque de regulación permite ingresos extras en mayor magnitud para la central de la zona centro en comparación a la zona sur. Esto se debe al factor de planta, ya que aquella central con menor factor de planta y que no genera a su capacidad máxima en bloques de alto precio, puede colocar energía en estos bloques para lograr un mejor precio de inyección. Las siguientes ilustraciones muestran el aumento porcentual del precio de inyección de energía anual esperado debido al uso del estanque de regulación.

**Ilustración 22. Aumento % del Precio de Inyección de Energía – Central Zona Centro**



**Ilustración 23. Aumento % del Precio de Inyección de Energía – Central Zona Sur**



La siguiente tabla muestra la tasa interna de retorno de la inversión de los estanques de regulación para los diferentes casos analizados. Se asume que la inversión en un estanque que permite completa regulación para una central de 20 [MW] es de 2.700.000 [US\$] (5% del costo de inversión en la central de pasada). Además, esta inversión se realiza un año antes de la entrada en operación, la vida útil es de 20 años y los ingresos corresponden a aquellos que se deben a la presencia del estanque de regulación.

**Tabla 7. Tasa Interna de Retorno de la Inversión en Estanque de Regulación**

| Caso              | Central<br>Zona Centro | Central<br>Zona Sur |
|-------------------|------------------------|---------------------|
| Base 8%           | 14,1%                  | 3,4%                |
| Aislado 10%       | 17,2%                  | 4,6%                |
| Aislado 11%       | 18,2%                  | 5,6%                |
| Aislado 12%       | 19,3%                  | 6,8%                |
| Aislado 13%       | 20,2%                  | 7,8%                |
| Aislado 14%       | 22,8%                  | 10,1%               |
| Aislado 15%       | 23,8%                  | 10,8%               |
| Interconexión 10% | 17,9%                  | 6,7%                |
| Interconexión 11% | 19,6%                  | 8,2%                |
| Interconexión 12% | 21,0%                  | 9,5%                |
| Interconexión 13% | 22,0%                  | 10,2%               |
| Interconexión 14% | 24,4%                  | 12,1%               |
| Interconexión 15% | 26,0%                  | 13,0%               |

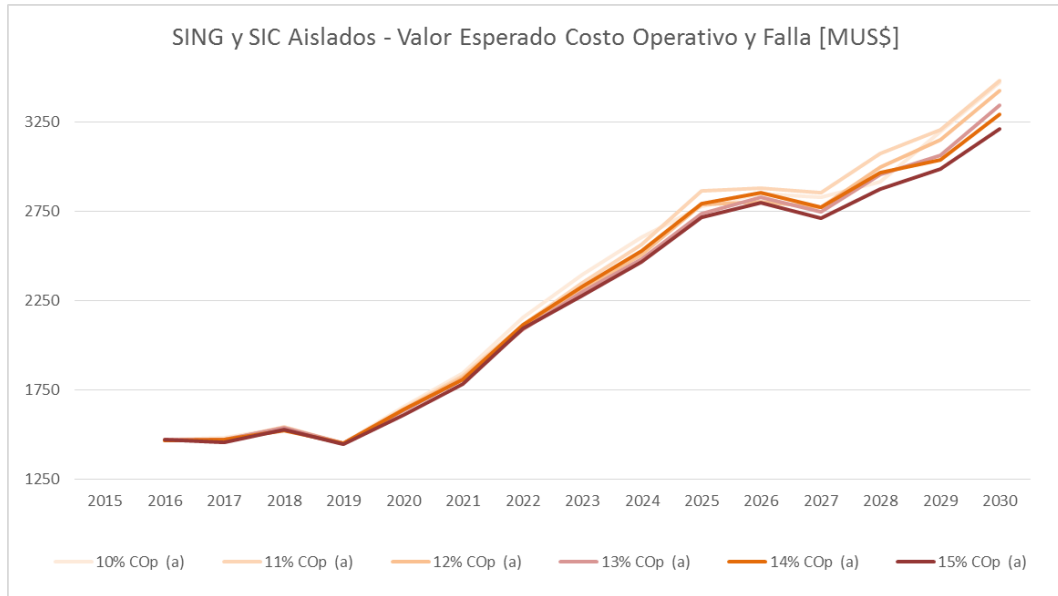
La tabla anterior muestra que, independiente de la central y de que los sistemas se encuentren aislados o interconectados, a medida que aumenta el nivel de penetración FV la rentabilidad de la inversión en el estanque sube. Además, para un mismo nivel de penetración FV, la interconexión aumenta la rentabilidad. Finalmente, es claro que la rentabilidad de la inversión en el estanque es mucho mayor para una central con menor factor de planta.

Cabe señalar que si bien la TIR estimada depende del supuesto de inversión en el estanque, las conclusiones para los casos analizados no varían.

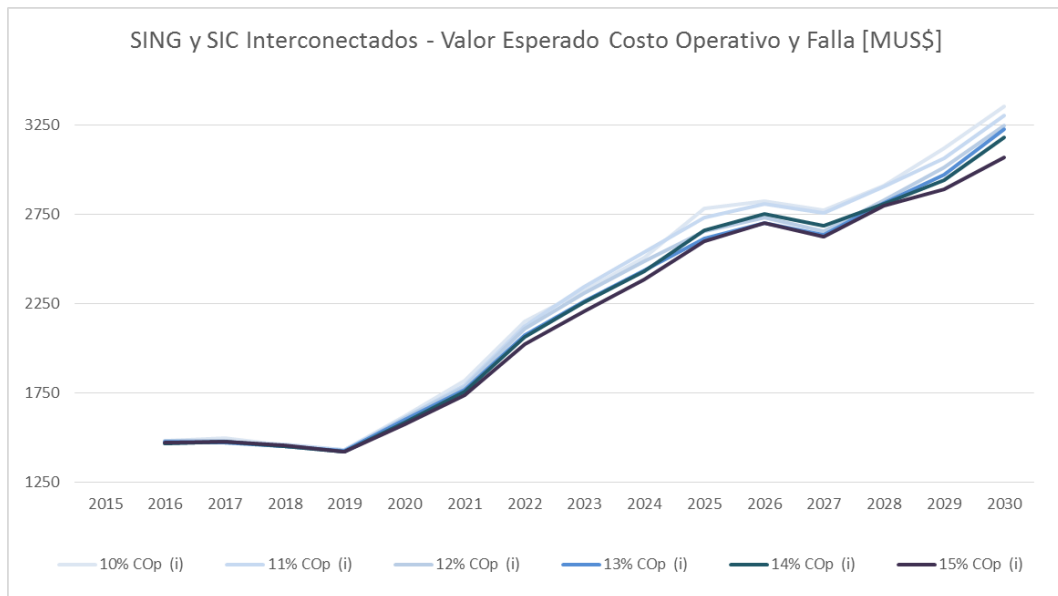
## 5.5. Costos Operativos y de Falla

Las siguientes ilustraciones muestran el valor esperado anual del costo operativo térmico y de falla del SIC y SING desarrollados de manera aislada e interconectada.

**Ilustración 24. Costo Operativo Térmico y de Falla – SING y SIC aislados**



**Ilustración 25. Costo Operativo Térmico y de Falla – SING y SIC interconectados**

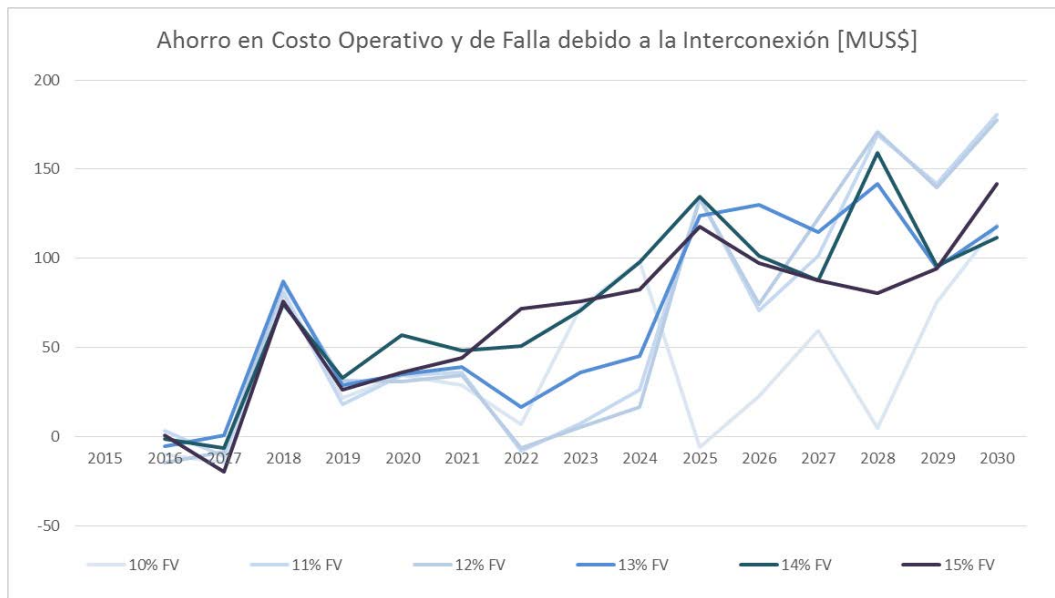




Como se aprecia, el aumento del nivel de penetración FV disminuye el costo operativo térmico y de falla (ya sea para un desarrollo aislado o interconectado de los sistemas). El detalle del costo operativo se puede apreciar en el punto 5.6.

La siguiente ilustración muestra el ahorro esperado anual del costo operativo y de falla debido a la interconexión.

**Ilustración 26. Ahorro en Costo Operativo Térmico y de Falla debido a la interconexión**



Se puede comprobar que en el largo plazo la interconexión produce un ahorro de costo operativo y de falla. El detalle del ahorro esperado anual en costo operativo y de falla se puede apreciar en el punto 5.6.

## 5.6. Evaluación Económica

Para la evaluación económica de los casos estudiados se aplicó la metodología tradicional de planificación eléctrica, consistente en calcular el valor presente del costo de expandir y operar los sistemas SIC y SING en forma aislada e interconectada y determinar la diferencia entre ambos.

Se ha supuesto que los costos de inversión en generación a evaluar son todos aquellos incurridos después de Enero de 2020 (dado que a partir de esta fecha se ajusta la expansión de la generación para cada caso). Además, se consideran los costos operativos anuales del sistema entre el año 2016 y 2030.

La siguiente tabla muestra la comparación de los casos en valor presente (Enero 2016).

**Tabla 8. Comparación de valor presente (MUS\$)**

| Nivel FV | Caso          | SING                 |                         | SIC                  |                         | TOTAL                |                         | TOTAL  |
|----------|---------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|--------|
|          |               | Inversión Generación | Costo Operación y Falla | Inversión Generación | Costo Operación y Falla | Inversión Generación | Costo Operación y Falla |        |
| 10%      | Caso aislado  | 785                  | 7.304                   | 3.190                | 8.700                   | 3.975                | 16.004                  | 19.979 |
|          | Interconexión | 1.836                | 7.299                   | 1.986                | 8.450                   | 3.822                | 15.749                  | 19.571 |
| 11%      | Caso aislado  | 762                  | 7.320                   | 3.227                | 8.707                   | 3.989                | 16.027                  | 20.016 |
|          | Interconexión | 1.955                | 7.203                   | 1.908                | 8.449                   | 3.864                | 15.652                  | 19.515 |
| 12%      | Caso aislado  | 800                  | 7.280                   | 3.315                | 8.546                   | 4.115                | 15.826                  | 19.941 |
|          | Interconexión | 1.968                | 7.115                   | 1.968                | 8.337                   | 3.936                | 15.452                  | 19.388 |
| 13%      | Caso aislado  | 814                  | 7.266                   | 3.341                | 8.450                   | 4.155                | 15.716                  | 19.871 |
|          | Interconexión | 2.116                | 7.045                   | 1.910                | 8.262                   | 4.026                | 15.307                  | 19.333 |
| 14%      | Caso aislado  | 846                  | 7.216                   | 3.309                | 8.559                   | 4.155                | 15.775                  | 19.930 |
|          | Interconexión | 2.200                | 7.000                   | 1.849                | 8.308                   | 4.049                | 15.309                  | 19.357 |
| 15%      | Caso aislado  | 857                  | 7.180                   | 3.324                | 8.355                   | 4.181                | 15.535                  | 19.716 |
|          | Interconexión | 2.340                | 6.907                   | 1.764                | 8.208                   | 4.104                | 15.115                  | 19.219 |

Como se observa en la tabla, la inversión en generación sube en el SING y baja en el SIC cuando se pasa de un estado aislado a interconectado (independiente del nivel de penetración), ya que en el caso interconectado el desarrollo FV se produce principalmente en el SING. Lo anterior, permite que el costo de inversión en generación se reduzca para los sistemas SING y SIC interconectados en comparación a ambos sistemas aislados.

Además, independiente del nivel de penetración FV, el costo de operación y falla es siempre menor para el SING y SIC interconectados que ambos sistemas aislados.

Lo anterior permite concluir que, sin considerar el costo de expandir el sistema de transmisión, la interconexión es favorable desde el punto de vista de la inversión en generación y operación.

Los casos analizados consideraron la expansión en transmisión según los criterios señalados en el punto 3.1.1. Para lo anterior, se evaluaron líneas que por motivo de la interconexión debieron ser construidas o ampliadas. Para el caso aislado, el mismo ejercicio procede. Cabe mencionar que la principal ampliación en transmisión para los casos aislados corresponden al desarrollo de la zona Diego de Almagro 220 y Cardones 220 en el SIC. Para los casos interconectados, corresponde a las instalaciones relacionadas con la interconexión de los sistemas SING-SIC.

La siguiente tabla muestra la diferencia que debe existir en valor presente (Enero 2016) en la ampliación en transmisión entre el caso interconectado y aislado, para que exista indiferencia entre preferir una expansión interconectada o aislada.

**Tabla 9. Comparación de valor presente (MUS\$)**

| Nivel FV | Diferencia en valor presente de la ampliación en transmisión entre el caso interconectado y aislado que permite indiferencia |
|----------|--|
| 10 %     | 408  |
| 11 %     | 501  |
| 12 %     | 553  |
| 13 %     | 538  |
| 14 %     | 573  |
| 15 %     | 497  |

## **6. CONCLUSIONES**

### **6.1. Respecto al Trabajo de Tesis**

En el presente trabajo se utilizaron metodologías de planificación y operación en un contexto dado por el mercado eléctrico chileno para evaluar el beneficio económico operativo y otras variables ante distintos niveles de penetración de energía solar fotovoltaica y ante una expansión interconectada y aislada de los sistemas SING y SIC.

Los resultados obtenidos muestran un beneficio económico positivo de la inversión en generación, operación y falla del sistema para la interconexión, el cual aumenta a medida que aumenta el nivel de penetración FV para el período analizado. Lo anterior se debe al aumento de la capacidad de regulación de los sistemas al estar interconectados y a la mayor participación FV en el despacho. Esto se refleja en el cambio del despacho de aquellas tecnologías que ofrecen regulación (adaptando su despacho ante mayor presencia fotovoltaica y ante la interconexión).

Además, la interconexión presenta una oportunidad para los desarrolladores de energía solar fotovoltaica en el SING. Para un escenario aislado del SING y en el contexto de mercado eléctrico presente en Chile, los costos de inversión deben ser mucho más bajos en comparación ante un escenario interconectado para que dicho desarrollo se lleve a cabo. Por otro lado, las unidades del SIC se ven perjudicadas ante la interconexión al ver precios levemente menores en comparación a los casos aislados. Lo anterior permite concluir que el desarrollo fotovoltaico se debiese dar en mayor medida en el SING que en el SIC (para un escenario interconectado).

El diferencial de precios entre bloques solares y no solares genera incentivos para que tecnologías con capacidad de regulación sean desarrolladas. En este trabajo se analizaron dos centrales de pasada con y sin capacidad de regulación con distinto factor de planta. El incentivo para instalar un estanque de regulación es mayor para aquellas centrales de pasada con menor factor de planta ante un escenario con interconexión y para un mayor nivel de penetración de energía solar fotovoltaica. Dado lo anterior, es posible concluir que tecnologías como centrales de pasada con estanque de regulación o de concentración solar de potencia (cuyo despacho es similar al de una central de pasada con estanque de regulación para efectos del despacho económico) debiesen ser desarrolladas ante un escenario con interconexión y alto nivel de penetración FV.

## **6.2. Trabajo Futuro**

Si bien los casos analizados consideraron niveles generación de energía fotovoltaica relativamente bajos en comparación a otros estudios, es necesario evaluar la factibilidad técnica de dichos casos. Para esto, es necesario integrar una etapa de modelación que considere las limitaciones técnicas de los parques de generación propuestos, las reservas operativas, análisis adicionales que consideren despachos horarios y costos no considerados en este estudio como la detención y partida de unidades, eficiencia de las unidades dependiendo de la potencia de operación, entre otros. Esto permitirá estimar de mejor manera el costo operativo para los casos que técnicamente sean factibles. Si a lo anterior se suman más escenarios que consideren sensibilidades respecto a niveles de demanda y precios de combustible, es posible obtener un nivel óptimo de penetración de energía intermitente.

Además, la solución en expansión de la transmisión propuesta en este estudio para el caso aislado correspondió a la ampliación de la zona Diego de Almagro 220 – Cardones 220. Para los casos con altos niveles de penetración FV, fue necesario expandir esta zona con una cantidad de circuitos que en la realidad no sería posible desarrollar. Es por esto que la solución técnica propuesta no fue la adecuada para efectos de realizar una evaluación económica realista al momento de considerar a la transmisión dentro de los costos de expansión. Una mejor solución técnica para un escenario aislado de expansión con alta penetración FV en el SIC permitiría determinar la conveniencia económica entre un caso aislado y otro interconectado para distintos niveles de penetración FV.

Finalmente, es de interés integrar en los criterios de expansión aquellas tecnologías que permitan una capacidad de regulación intradiaria de bajo costo variable. Centrales de pasada con estanques de regulación y las tecnologías de concentración solar de potencia deberían ser integradas, ya que estas enfrentan incentivos importantes para ser desarrolladas producto del diferencial de precios entre los bloques solares y no solares. El equilibrio para la instalación de esta tecnología estará dado por su costo medio de desarrollo y la indiferencia para generar su energía disponible entre bloques solares y no solares, lo que se logrará cuando los precios de estos bloques sean similares. Un escenario como el descrito permitiría lograr energía de base con bajo costo variable, logrando como consecuencia precios spot de energía bajos de manera permanente.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Synex Ingenieros Consultores, «Análisis Técnico y Económico de una Interconexión SING-SIC,» Comisión Nacional de Energía, 2012.
- [2] H. Ulloa, «Interconexión SING-SIC y Emisiones de Carbono del Sector Eléctrico,» Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012.
- [3] Centro de Energía, «Evaluación Técnica de Proyecto de Interconexión SIC-SING,» Universidad de Chile, 2014.
- [4] DICTUC, «Estudio de Interconexión SIC-SING 2020 vía Línea de Transmisión en 500 kV en CA, con Subestación Intermedia,» Pontificia Universidad Católica de Chile, 2014.
- [5] J. Larrain, «Factibilidad Económica para el Desarrollo de la Energía Solar en Sistemas Térmicos,» Pontificia Universidad Católica de Chile, 2014.
- [6] CDEC-SING, «Estudio Técnico Económico sobre Integración Eólica y Solar en el SING,» Centro de Despacho Económico de Carga - SING, 2012.
- [7] CDEC-SIC, «Estudio de Operación de la Zona Norte del SIC en el período 2014-2017,» Centro de Despacho Económico de Carga - SIC, 2014.
- [8] CDEC-SING, «Estudio Efecto Técnico Económico de la Integración de Energía Eólica y Solar en el SING: Escenarios 2017,» Centro de Despacho Económico de Carga - SING, 2015.
- [9] R. Schmalensee, «The Performance of U.S. Wind and Solar Generating Units,» National Bureau of Economic Research, 2013.
- [10] M. Milligan y et al., «Markets to Facilitate Wind and Solar Energy Integration in the Bulk Power Supply,» National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [11] S. Eftekharijad, V. Vittal, G. Thomas Heydt, B. Keel y J. Loehr, «Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems,» *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 28, n° 2, pp. 893-901, 2013.
- [12] J. Von Appen, M. Braun, T. Stetz, C. Diwold y D. Geibel, «Time in the Sun: The Challenge of High PV Penetration in the German Electric Grid,» *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 11, n° 2, pp. 55-64, 2013.
- [13] S. Bernstein, «Competition, Marginal Cost Tariffs and Spot Pricing in the Chilean Electric Power Sector,» *Energy Policy*, vol. 16, n° 4, pp. 369-377, 1988.

- [14] O. Moya, «Experience and New Challenges in the Chilean Generation and Transmission Sector,» *Energy Policy*, vol. 30, n° 7, pp. 575-582, 2002.
- [15] M. Boiteaux, «Peak Load Pricing,» *Journal of Business*, vol. 33, n° 2, pp. 157-179, 1960.
- [16] M. Crew, C. Fernando y P. Kleindorfer, «The theory of peak-load pricing: A survey,» *Journal of Regulatory Economics*, vol. 8, n° 3, pp. 215-248, 1995.
- [17] Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, *Ley General de Servicios Eléctricos (texto refundido 29 de Enero de 2015)*, 2015.
- [18] T. Fahrenkrog, «Tarificación de Sistemas de Transmisión Eléctrica,» Universidad de Chile, 2004.
- [19] Gobierno de Chile, «Proyecto de Ley que Establece Nuevos Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica y Crea un Organismo Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional,» Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2015.
- [20] R. Green y I. Stafell, «The Impact of Government Interventions in Investment in the GB Electricity Market,» Imperial College Business School, 2013.
- [21] Centro de Energía, «Análisis Económico del Despacho Eléctrico de Generadores con Contratos de Suministro de Combustible GNL Take or Pay,» Universidad de Chile, 2014.
- [22] D. Charlin, H. Rudnick y J. Araneda, «Transmission Expansion Under Uncertainty in the Chilean System Via Minmax Regret with GA,» *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, n° 3, pp. 698-706, 2015.
- [23] Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems, «Levelized Cost of Electricity Renewable Energy Technologies,» 2013.
- [24] Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems, «Current and Future Cost of Photovoltaics: Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems,» 2015.
- [25] Comisión Nacional de Energía, «Modelación del Recurso Solar y Eólico en el Norte de Chile,» 2009.
- [26] PSR Inc., «SDDP Manual de Metodología,» 2014.
- [27] Comisión Nacional de Energía, «Informe de Precio de Nudo Definitivo Abril 2015 - SING y SIC,» 2015.

[28] Comisión Nacional de Energía, «Plan de Expansión del Sistema de Transmisión Troncal para los 12 meses siguientes (RE 96),» 2015.

[29] CDEC-SIC, «Estudio Control de Frecuencia y Determinación de Reservas,» 2014.

[30] CDEC-SING, «Estudio Control de Frecuencia y Determinación de Reservas,» 2014.

[31] World Bank, «Commodity Markets Outlook - Quarterly Report April 2015,» 2015.



## 8. ANEXOS

### 8.1. Operación Económica de Sistemas Eléctricos

#### 8.1.1. Descripción del Problema de Despacho Económico en un Sistema Hidrotérmico

Un sistema hidrotérmico es aquel que dispone de recursos hidráulicos (almacenables en cuencas y embalses del sistema) para generar electricidad y se complementa mediante la generación de electricidad con recursos térmicos.

El despacho económico en un sistema hidrotérmico corresponde a la optimización simultánea del abastecimiento de la demanda en una red eléctrica y del uso de los recursos hidráulico y térmico, sujeto a las restricciones propias del sistema analizado.

##### 8.1.1.1 Formulación del problema con programación lineal estocástica<sup>13</sup> (PLE)

El objetivo es determinar la secuencia de despachos de los recursos hidroeléctricos que minimice el valor esperado del costo operativo total a lo largo del período de estudio. La operación de un sistema hidrotérmico en el largo plazo es un problema acoplado en el tiempo ya que los recursos hidroeléctricos no poseen un costo directo de operación, pero el agua embalsada puede evitar un costo de recursos térmicos en el futuro.

La formulación convencional del despacho hidrotérmico estocástico se plantea como un árbol de escenarios solucionable con algoritmos de programación lineal. El problema a resolver por el operador del sistema es la minimización de los costos operativos en los diferentes escenarios para horizonte de tiempo estudiado.

$$FO = \min_x \left[ \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{n_j(t)} p_j^t \cdot COp_j^t(x) \right]$$

Sujeto a

(8.1)

$$\begin{aligned} g_j^t(x) &\geq 0 \\ f_j^t(v_{a(j)}^{t-1}, v_j^t) &\geq 0 \\ \bar{x} &\geq x \geq \underline{x} \end{aligned}$$

---

<sup>13</sup> La denominación estocástica viene dada por la probabilidad futura de caudales en las centrales hidroeléctricas.

Para el problema descrito en (8.1),  $T$  representa la cantidad de etapas que se consideran,  $n_j(t)$ .<sup>14</sup> representa la cantidad de escenarios en la etapa  $t$ ,  $p_j^t$  corresponde a la probabilidad de ocurrencia del escenario  $j$  en la etapa  $t$  y  $x$  representa tanto a las variables de decisión como las de estado  $v_j^t$ . Los costos operativos  $COp_j^t(x)$  incluyen términos relacionados a los costos de generación y energía no suministrada. La función  $g_j^t(x)$  incluye todas las restricciones en el modelo de estudio.

Las ecuaciones de estado están representadas por  $f_j^t(v_{a(j)}^{t-1}, v_j^t)$ , donde  $a(j)$  corresponde al escenario anterior de  $j$ . En un sistema hidrotérmico, estas ecuaciones son las restricciones que permiten conservar el flujo del agua para cada embalse<sup>15</sup>. La ecuación de estado es posible plantearla según la ecuación (8.2), en la que  $q_{ENj}^t$  representa los caudales que entran al embalse en el escenario  $j$  para la etapa  $t$ ,  $q_{SALj}^t$  son los caudales que salen del embalse y  $u(q_j^t)$  la función que permite calcular el volumen equivalente de un caudal. Por tanto, el estado del escenario  $j$  en la etapa  $t$  es el vector de volúmenes de agua que queda en los diferentes embalses al final de la etapa  $t$ , dado el escenario  $j$ .

$$v_{a(j)}^{t-1} + u(q_{ENj}^t) = v_j^t + u(q_{SALj}^t) \quad (8.2)$$

La solución de este problema corresponde a la resolución del árbol de escenarios como un único problema de optimización, en el que se incluyen explícitamente las variables de decisión correspondientes a todas las etapas y a todos los escenarios. Sin embargo, la dimensión del problema para sistemas reales es demasiado grande pues se modelan docenas de plantas hidroeléctricas y el horizonte de planificación es de varios años. Esta limitación basada en árboles de escenarios ha motivado el desarrollo de esquemas de solución basados en programación dinámica dual.

#### 8.1.1.2 Formulación del problema con programación dinámica dual estocástica (PDDE)

El mismo problema planteado como un árbol de escenarios puede ser resuelto en varios subproblemas de una etapa de manera recursiva.

---

<sup>14</sup> Un escenario  $j$  en la etapa  $t$ , queda definido por una secuencia de escenarios afluentes posibles, que van desde el comienzo del horizonte hasta dicha etapa  $t$ .

<sup>15</sup> Si se consideran como conocidos los escenarios afluentes que se podrían presentar en las etapas, las variables de estado corresponderían a los niveles de llenado de los embalses.

$$FCFE_{a(j)}^t(v) = E \left[ \min_v \left( FCI_j^t(v) + FCFE_j^t(v) \right) \right] \quad (8.3)$$

El operador minimizará la función objetivo descrita en (8.3), donde  $a(j)$  representa al escenario que precedería el actual subproblema. Para el escenario  $j$  en la etapa  $t$ , se define la Función de Costos Inmediatos  $FCI_j^t(v)$  (que representa a la función  $COP_j^t(x)$ ) y la Función de Costos Futuros Esperados  $FCFE_j^t(v)$  (que refleja el valor esperado del costo operativo de la siguiente etapa hasta el final del periodo de estudio). La resolución recursiva del subproblema requiere una FCFE parametrizada de forma tal que pueda representar toda la información futura al escenario que se quiere estudiar. De existir la FCFE, los subproblemas podrían ser resueltos para cada escenario  $j = 1 \rightarrow n_j(t)$  correspondiente a cada etapa  $t = 1 \rightarrow T$ . Se obtendría el mismo resultado que resolver el problema mediante PLE. La dificultad radica en conseguir la función FCFE [26].

### 8.1.2. Formulación Básica del Problema en el Modelo de Despacho Económico

Se presenta ahora en más detalle el cálculo de la decisión operativa óptima para cada etapa realizada por el programa SDDP. Se considera el caso de  $J$  centrales termoeléctricas e  $I$  centrales hidroeléctricas.

**Tabla 10. Representación del problema en SDDP**

| Variable      | Descripción  | Unidad            | Tipo Variable     |
|---------------|--|-------------------|-------------------|
| $FCI_t$       | Función de costo inmediato, etapa $t$                              | [\$]              | Salida            |
| $FCFE_t$      | Función de costo futuro esperado, etapa $t$                        | [\$]              | Salida            |
| $(i),(j),k,t$ | Índices de centrales hidroeléctricas, térmicas, bloques, etapas    |                   |                   |
| I,J,K,T       | Número de centrales hidroeléctricas, térmicas, bloques, etapas     |                   | Dato entrada      |
| $c_t(j)$      | Costo operativo central térmica $j$ , etapa $t$                    | [\$/MWh]          | Dato entrada      |
| $g_{t,k}(j)$  | Generación de energía central térmica $j$ , etapa $t$ , bloque $k$ | [MWh]             | Variable decisión |
| $v_{t+1}$     | Nivel almacenamiento embalses al final de etapa $t$                | [m <sup>3</sup> ] | Variable decisión |
| $a_t$         | Caudales afluentes a los embalses, etapa $t$                       | [m <sup>3</sup> ] | Dato entrada      |
| $c_\delta$    | Representa el costo por violación de una restricción operativa     | [\$/unidad]       | Dato entrada      |
| $\delta g_t$  | Monto de la violación en la etapa $t$                              | [unidad]          | Variable decisión |

El objetivo del despacho hidrotérmico será el resolver el problema de optimización planteado en (8.4).

$$\begin{aligned}
& \text{Min } \{FCI_t + FCFE_t\} \\
FCI_t &= \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J c_t(j) \cdot g_{t,k}(j) + c_\delta \cdot \delta g_t \\
FCFE_t &= \beta_{t+1}(v_{t+1}, a_t)^{16}
\end{aligned}$$

Sujeto a restricciones operativas de la etapa (8.4)

### 8.1.2.1 Restricciones operativas en centrales térmicas y FCI

En la tabla 13 y ecuación (8.5) se presentan las restricciones operativas básicas en centrales térmicas utilizadas.

**Tabla 11. Representación de centrales térmicas en SDDP**

| Variable                 | Descripción   | Unidad | Tipo Variable     |
|--------------------------|---|--------|-------------------|
| $(j), t, k$              | Índices para centrales térmicas, bloques, etapas                |        |                   |
| J, T, K                  | Número de centrales térmicas, bloques, etapas                   |        | Dato entrada      |
| $\bar{g}_t(j)$           | Potencia máxima central térmica j, etapa t                      | [MW]   | Dato entrada      |
| $g_t(j)$                 | Energía producida por central térmica j, etapa t                | [MWh]  | Variable decisión |
| $\underline{g}_t(j)$     | Potencia mínima central térmica j, etapa t                      | [MW]   | Dato entrada      |
| $h_{t,k}$                | Duración bloque k, etapa t                                      | [hora] | Dato entrada      |
| $\bar{g}_{t,k}(j)$       | Generación máx. energía central térmica j, etapa t, bloque k    | [MWh]  | Dato entrada      |
| $g_{t,k}(j)$             | Generación de energía central térmica j, etapa t, bloque k      | [MWh]  | Variable decisión |
| $\underline{g}_{t,k}(j)$ | Generación mín. energía de central térmica j, etapa t, bloque k | [MWh]  | Dato entrada      |

$$\underline{g}_t(j) \leq g_t(j) \leq \bar{g}_t(j)$$

$$\underline{g}_{t,k}(j) \leq g_{t,k}(j) \leq \bar{g}_{t,k}(j)$$

$$\bar{g}_{t,k}(j) = \bar{g}_t(j) \cdot h_{t,k}$$

$$\underline{g}_{t,k}(j) = \underline{g}_t(j) \cdot h_{t,k}$$

<sup>16</sup> El programa SDDP entrega la opción de determinar la FCFE como dependiente del caudal actual  $FCFE_t = \beta_{t+1}(v_{t+1}, a_t)$ . A modo de ejemplo, si el caudal del mes pasado fue más “seco” que el promedio, el caudal del mes siguiente debería ser seco. Esto se debe al efecto de los acuíferos subterráneos, los cuales funcionan como “capacitores” (la tasa de vaciado del acuífero depende del volumen total absorbido en el pasado).

$$g_t(j) = \sum_{k=1}^K g_{t,k}(j)$$

(8.5)

$$j \in \{1, \dots, J\} \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad t \in \{1, \dots, T\}$$

- *Centrales térmicas “unit commitment”*

Muchas centrales térmicas tienen una restricción de generación mínima (en caso de ser despachadas). Estas centrales son modeladas usando una variable binaria de decisión, la cual es aplicada por etapa (una vez despachada, la central opera durante toda la etapa).

- *Centrales térmicas multicombustible*

Este tipo de central es representada por un conjunto de centrales asociadas, las cuales comparten ciertas características operacionales (potencia máxima y mínima, tasas de salida forzada y mantenimientos) y otras son exclusivas del tipo de combustible usado (tasa de consumo de combustible y costo operativos).

- *Mantenimiento*

El objetivo de este dato de entrada es definir los mantenimientos programados de las centrales térmicas. En el modelo se expresan como el porcentaje de potencia indisponible (%) que tendrá la central en mantenimiento durante una etapa.

- *Tasa de Salida Forzada*

Representa el efecto aleatorio por indisponibilidad no programada (fallas) en la central térmica. Si el mantenimiento es programado por la planta, la potencia de la planta después de mantenimiento es multiplicada por  $(1 - \text{TSF}/100)$  en cada etapa.

### 8.1.2.2 Restricciones operativas en centrales hidroeléctricas y FCF

A continuación se presentan las restricciones operativas básicas utilizadas para las centrales hidroeléctricas.

**Tabla 12. Representación de centrales hidroeléctricas en SDDP**

| Variable           | Descripción   | Unidad             | Tipo Variable     |
|--------------------|---|--------------------|-------------------|
| $(i),t,k$          | Índices para centrales hidroeléctricas, bloques, etapas |                    |                   |
| I,T,K              | Número de centrales hidroeléctricas, bloques, etapas    |                    | Dato entrada      |
| $v_{t+1}(i)$       | Nivel almacenamiento embalse al final de etapa t        | [hm <sup>3</sup> ] | Variable decisión |
| $v_t(i)$           | Nivel almacenamiento embalse al comienzo de etapa t     | [hm <sup>3</sup> ] | Dato entrada      |
| $a_t(i)$           | Caudal afluente al embalse, etapa t+1                   | [hm <sup>3</sup> ] | Dato entrada      |
| $u_{t,k}(i)$       | Volumen turbinado por central i, etapa t, bloque k      | [hm <sup>3</sup> ] | Variable decisión |
| $s_{t,k}(i)$       | Volumen vertido por central i, etapa t, bloque k        | [hm <sup>3</sup> ] | Variable decisión |
| $\varphi_{t,k}(i)$ | Volumen filtrado por central i, etapa t, bloque k       | [hm <sup>3</sup> ] | Variable decisión |
| $I_U(i)$           | Conjunto de centrales que turbinan para la central i    |                    | Dato entrada      |
| $I_S(i)$           | Conjunto de centrales que vierten para la central i     |                    | Dato entrada      |
| $I_F(i)$           | Conjunto de centrales que filtran para la central i     |                    | Dato entrada      |

- *Balance hídrico*

La ecuación de balance hídrico relaciona el volumen de los embalses con el caudal afluente y el caudal defluente, tal como muestra la ecuación.

$$v_{t+1}(i) = v_t(i) + a_t(i) - \sum_{k=1}^K [u_{t,k}(i) + s_{t,k}(i)] + \sum_{m \in I_U(i)} \sum_{k=1}^K u_{t,k}(m) + \sum_{m \in I_S(i)} \sum_{k=1}^K s_{t,k}(m) + \sum_{m \in I_F(i)} \sum_{k=1}^K \varphi_{t,k}(m) \quad (8.6)$$

$$i \in \{1, \dots, I\} \quad k \in \{1, \dots, K\} \quad t \in \{1, \dots, T\}$$

- *Límites de almacenamiento y turbinamiento*

Los límites de almacenamiento reflejan la capacidad de los embalses definidos. Además, la máxima energía generada por una central hidroeléctrica está limitada por el mínimo valor entre la capacidad de la turbina y la capacidad del generador.

- *Función de costo futuro*

La función de costo futuro se representa como un conjunto de restricciones lineales, donde cada una representa una linealización de la función [26].

### 8.1.2.3 Centrales de Generación Fotovoltaicas y Eólicas

Una central solar puede ser modelada como una central térmica, pero considerando sus características particulares (básicamente su perfil de generación). El detalle de la modelación de las centrales solares se discute en el punto 8.1.3.

Dado que el objetivo está centrado en el estudio de las centrales de generación en base a energía solar, la energía eólica ha sido modelada de la siguiente forma:

- Para cada central eólica modelada, se tiene un perfil de generación horario para un año completo (año base por eólica).
- Para cada central eólica, cada hora de generación será asignada a un bloque según las definiciones del punto 8.1.4.
- Finalmente, para cada bloque de un mes en particular, la potencia de generación de cada central eólica corresponderá a la potencia media que posee dicha central en las horas de generaciones definidas para cada bloque. Notar que según esta definición, las eólicas generarán todos los años tal como se hizo en el año base.

### 8.1.2.4 Modelación de la Red de Transmisión

- *Modelación del flujo de potencia linealizado*

El modelo de flujo de potencia activa linealizado se compone de dos conjuntos de ecuaciones, correspondientes a la primera y segunda leyes de Kirchhoff y a las restricciones de límite de flujo en los circuitos.

La primera ley de Kirchhoff de cuenta del balance de energía en cada nodo del sistema de transmisión. La segunda ley da cuenta de los flujos de energía por tramo y su dependencia de la susceptancia de línea y los ángulos nodales.

Las restricciones de límite de flujo son características a cada circuito e imponen un límite a los flujos que resulten de la simulación de la operación.

- *Representación de los circuitos*

Cada circuito tiene una resistencia, reactancia y potencia activa característica. Además, es posible determinar un límite a los flujos que pasen por el circuito por bloque (esto considerando que durante el día y la noche las temperaturas varían, incidiendo en la capacidad del flujo por un circuito).

Para el presente estudio, no se han considerado análisis dinámicos, por lo que no se han establecido probabilidades de falla sobre los distintos circuitos. Por tanto, se considera que todo el sistema de transmisión modelado opera según las condiciones normales de operación establecidos por los CDEC.

Finalmente, es posible establecer una restricción de límite de flujo sobre circuitos en paralelo que salen de un mismo nodo. Esto es útil para establecer la restricción N-1 de operación sobre todos los circuitos modelados que tengan esa definición según los CDEC, además de esquemas EDAG y ERAG existentes.

#### 8.1.2.5 Modelación de la Demanda y Energía No Suministrada

El detalle de la modelación de la demanda se discute en el punto 8.1.3. Cabe señalar que esta demanda es inelástica, no obstante se definen costos de falla para profundidades de la energía no suministrada siguiendo lo propuesto por la CNE.

#### 8.1.2.6 Modelación de la Reserva en Giro

Sin perjuicio de que los desarrollos de generación previstos reconocen en sus costos de inversión elementos de control y regulación de frecuencia, mantener la frecuencia del sistema dentro de los límites establecidos por la reglamentación vigente requiere de una operación coordinada de las unidades de generación, destinada a mantener un margen de reserva de potencia en el sistema.

Para el caso del SING, se incorporó en la modelación una reducción de 8,5 % de la potencia de las centrales generadoras del SING que no han sido limitadas por restricciones operacionales.

Para el caso del SIC, se consideró en la simulación que el sistema debe soportar la salida de una unidad de 390 MW, repartiendo la reserva necesaria para tal contingencia entre las centrales Ralco, Colbún, Pehuenche y El Toro, a prorrata de su potencia instalada.



### 8.1.3. Modelación de la Demanda y Centrales Solares Fotovoltaicas

#### 8.1.3.1 General

La demanda de energía eléctrica se representa a través de una restricción en que la suma de la energía producida (en las centrales térmicas e hidroeléctricas) debe ser igual a la demanda.

Tabla 13. Descripción de la Demanda en SDDP

| Variable       | Descripción  | Unidad                 | Tipo Variable     |
|----------------|--|------------------------|-------------------|
| $d_{t,k}$      | Demanda de energía eléctrica, etapa t, bloque k            | MWh                    | Dato entrada      |
| $g_{t,k}(j)$   | Energía producida por central térmica j, etapa t, bloque k | [MWh]                  | Variable decisión |
| $\rho(v_t(i))$ | Coefficiente producción central hidroeléctrica i, etapa t  | [MW/ hm <sup>3</sup> ] | Dato entrada      |
| $u_{t,k}(i)$   | Volumen turbinado por central i, etapa t, bloque k         | [hm <sup>3</sup> ]     | Variable decisión |

$$\sum_{j=1}^J g_{t,k}(j) + \sum_{i=1}^I \rho(v_t(i)) \cdot u_{t,k}(i) = d_{t,k} \quad (8.7)$$

#### 8.1.3.2 Curva de duración de demanda

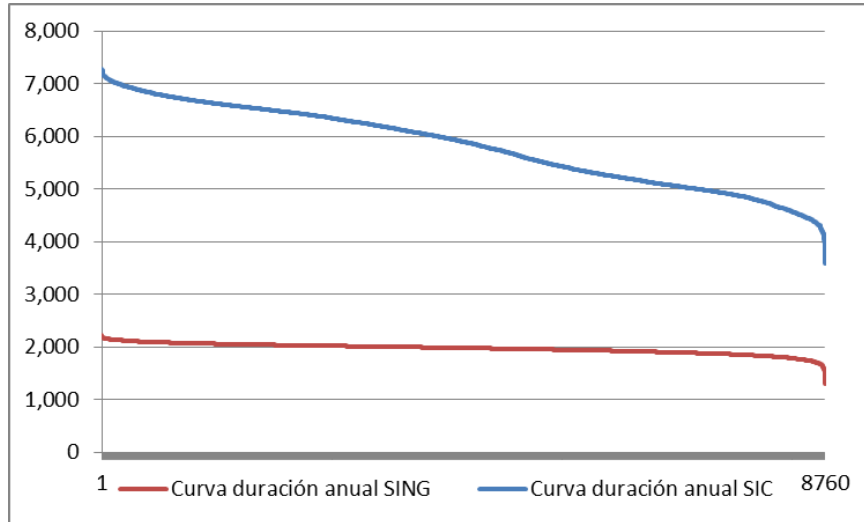
La curva de duración de demanda muestra la variación de demanda de energía eléctrica por unidad de tiempo (potencia eléctrica) en un sistema eléctrico. Se ordena de mayor a menor, perdiendo el orden temporal. Sin embargo, permite identificar la potencia eléctrica máxima del sistema que es necesario abastecer. Además, permite simplificar el análisis al establecer unidades de tiempo más grandes (bloques) para definir la curva a usar en los modelos de despacho económico (ahorrando tiempo computacional). Lo anterior impone un trade-off entre establecer de manera exacta la potencia eléctrica máxima del sistema y los tiempos computacionales necesarios en los modelos de despacho económico.

#### 8.1.3.3 Curva de duración de demanda en Chile

Las curvas de duración de demanda en Chile son registradas por los CDEC de los sistemas SING y SIC. En la siguiente figura se observa la curva de duración de demanda horaria<sup>17</sup> del año 2013 para ambos sistemas. Se observa que la curva relacionada al SING es mucho más plana que la del SIC.

<sup>17</sup> Esta curva considera la generación bruta de energía horaria.

**Ilustración 27. Curva duración de demanda anual SING y SIC [MW vs hora]**



Para los datos del año 2013, se observa que las curvas de duración mensual para ambos sistemas mantienen la tendencia (SING es una curva más plana que el SIC). Además, si se analiza la curva de duración diaria (promedio mensual), en el SING no hay una diferenciación entre días, cosa que si sucede en el SIC (donde claramente los fines de semana la demanda de energía horaria es menor).

#### 8.1.3.4 Definición de la curva de duración de demanda

Para efectos de la modelación en el modelo de despacho económico, la curva de duración se modelará de manera mensual y usando 7 bloques, usando como datos las curvas de duración de demanda anual de los sistemas SING y SIC año 2013 entregados por los CDEC respectivos.

Dado que esta modelación intenta representar la potencia eléctrica máxima del sistema (perdiendo el orden temporal), es necesario definir un segundo criterio que capture el efecto de la generación de las centrales en base a energía solar.

#### 8.1.4. Centrales Solares Fotovoltaicas

Si bien se considera a este tipo de generación de energía eléctrica como intermitente, bajo ciertas condiciones (como ocurre en la zona norte de Chile) esta intermitencia es predecible. La siguiente tabla muestra el perfil de generación horario promedio esperado de 9 centrales existentes y futuras en base a energía solar fotovoltaica<sup>18</sup>.

**Tabla 14. Perfil de Generación de Energía Promedio Mensual [0/1]<sup>19</sup>**

| Hora/Mes | Ene  | Feb  | Mar  | Abr  | May  | Jun  | Jul  | Ago  | Sept | Oct  | Nov  | Dic  |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 2        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 3        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 4        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 5        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 6        | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 7        | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0    | 0,01 | 0    | 0    | 0    | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 8        | 0,16 | 0,08 | 0,10 | 0,07 | 0,15 | 0,11 | 0,09 | 0,18 | 0,14 | 0,22 | 0,29 | 0,25 |
| 9        | 0,56 | 0,43 | 0,39 | 0,33 | 0,50 | 0,46 | 0,45 | 0,56 | 0,44 | 0,62 | 0,67 | 0,59 |
| 10       | 0,75 | 0,69 | 0,68 | 0,63 | 0,65 | 0,63 | 0,63 | 0,70 | 0,69 | 0,79 | 0,83 | 0,78 |
| 11       | 0,87 | 0,83 | 0,80 | 0,74 | 0,72 | 0,68 | 0,69 | 0,76 | 0,80 | 0,89 | 0,92 | 0,89 |
| 12       | 0,93 | 0,90 | 0,86 | 0,79 | 0,74 | 0,69 | 0,71 | 0,79 | 0,84 | 0,93 | 0,95 | 0,94 |
| 13       | 0,95 | 0,93 | 0,90 | 0,81 | 0,74 | 0,69 | 0,71 | 0,78 | 0,86 | 0,94 | 0,97 | 0,96 |
| 14       | 0,96 | 0,93 | 0,90 | 0,81 | 0,72 | 0,68 | 0,70 | 0,77 | 0,86 | 0,94 | 0,96 | 0,96 |
| 15       | 0,95 | 0,91 | 0,88 | 0,79 | 0,69 | 0,66 | 0,67 | 0,74 | 0,84 | 0,92 | 0,95 | 0,96 |
| 16       | 0,92 | 0,89 | 0,85 | 0,76 | 0,63 | 0,60 | 0,61 | 0,68 | 0,80 | 0,88 | 0,91 | 0,92 |
| 17       | 0,85 | 0,83 | 0,78 | 0,68 | 0,49 | 0,46 | 0,49 | 0,56 | 0,72 | 0,80 | 0,84 | 0,85 |
| 18       | 0,74 | 0,71 | 0,64 | 0,49 | 0,14 | 0,11 | 0,14 | 0,23 | 0,53 | 0,65 | 0,70 | 0,73 |
| 19       | 0,55 | 0,50 | 0,41 | 0,21 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,24 | 0,37 | 0,46 | 0,52 |
| 20       | 0,24 | 0,18 | 0,07 | 0,01 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,01 | 0,04 | 0,10 | 0,19 |
| 21       | 0,01 | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0,01 |
| 22       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 23       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 24       | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

En base a lo anterior, se puede observar la regularidad de la generación horaria en base a energía solar (por mes). Se puede distinguir un período verano (Octubre-Marzo), un período invierno (Mayo-Agosto) y un período entre estaciones (Abril y Septiembre).

Dado lo anterior, la siguiente tabla muestra la clasificación de horas de días típicos mensuales en tres tipos.

<sup>18</sup> Ubicadas tanto en el SING como en el SIC, en las regiones 2ª y 3ª.

<sup>19</sup> Perfil de generación de energía horario promedio de 9 unidades (promedio mensual) respecto a su potencia máxima (0/1).

**Tabla 15. Clasificación horas de días típicos mensuales**

| Mes | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|-----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Ene | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  |
| Feb | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  |
| Mar | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  |
| Abr | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  | N  |
| May | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  | N  | N  |
| Jun | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  | N  | N  |
| Jul | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  | N  | N  |
| Ago | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  | N  | N  |
| Sep | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  | N  |
| Oct | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  |
| Nov | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  |
| Dic | N | N | N | N | N | N | N | L | L | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | H  | L  | L  | N  | N  | N  | N  |

En base a lo anterior, se realiza la primera separación entre horas solares y no solares (para un día promedio en cada mes). Esta es válida para el SING, SIC y su interconexión.

**Tabla 16. Clasificación de horas solares por mes**

| Mes        | Inicio  | Fin      | Total horas no solares | Total horas solares | Total horas mes |
|------------|---------|----------|------------------------|---------------------|-----------------|
| Enero      | 8.00 am | 20.59 pm | 341                    | 403                 | 744             |
| Febrero    | 8.00 am | 20.59 pm | 308                    | 364                 | 672             |
| Marzo      | 8.00 am | 20.59 pm | 341                    | 403                 | 744             |
| Abril      | 8.00 am | 19.59 pm | 360                    | 360                 | 720             |
| Mayo       | 8.00 am | 18.59 pm | 403                    | 341                 | 744             |
| Junio      | 8.00 am | 18.59 pm | 390                    | 330                 | 720             |
| Julio      | 8.00 am | 18.59 pm | 403                    | 341                 | 744             |
| Agosto     | 8.00 am | 18.59 pm | 403                    | 341                 | 744             |
| Septiembre | 8.00 am | 19.59 pm | 360                    | 360                 | 720             |
| Octubre    | 8.00 am | 20.59 pm | 341                    | 403                 | 744             |
| Noviembre  | 8.00 am | 20.59 pm | 330                    | 390                 | 720             |
| Diciembre  | 8.00 am | 20.59 pm | 341                    | 403                 | 744             |

Dado que el software de despacho económico permite modelar 7 bloques por mes (con la intención de representar un día promedio de demanda mensual en el sistema respectivo), se utilizarán 3 bloques que representen las horas no solares y 4 bloques que representarán las horas solares.

La definición de los bloques se realizó según la siguiente metodología:

- Bloques No Solares (Horas N): Corresponden a los bloques 1, 2 y 3. Estos han sido ordenados como una curva de duración de demanda estándar, siendo el bloque 1 el bloque de punta.
- Bloques Solares (Horas H y L): Dado que en el SIC la demanda durante la semana y el fin de semana presenta grandes diferencias en las horas de alta generación solar (a pesar de que la generación solar debiese ser la misma), se ha definido en el bloque 4 las horas de alta generación solar (H) para días de semana y el bloque 5 las horas de alta generación solar (H) para días de fin de semana. Finalmente, en el bloque 6 se incluyen las horas de baja generación solar (L) de la tarde y en el bloque 7 las de la mañana (sin distinción diaria).

Las siguientes tablas muestran la duración de los bloques obtenidos para cada sistema. Cabe señalar que la duración de los bloques se mantendrá invariante para el período de estudio.

**Tabla 17. Definición de bloques**

| <b>Tipo</b>               | <b>Bloque</b> | <b>Ene</b> | <b>Feb</b> | <b>Mar</b> | <b>Abr</b> | <b>May</b> | <b>Jun</b> | <b>Jul</b> | <b>Ago</b> | <b>Sep</b> | <b>Oct</b> | <b>Nov</b> | <b>Dic</b> |
|---------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| No Solar                  | 1             | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         |
|                           | 2             | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        | 140        |
|                           | 3             | 161        | 128        | 161        | 180        | 223        | 210        | 223        | 223        | 180        | 161        | 150        | 161        |
| Alto Sol<br>Dia Laboral   | 4             | 232        | 214        | 209        | 206        | 177        | 136        | 179        | 157        | 162        | 215        | 205        | 214        |
| Alto Sol<br>Fin de Semana | 5             | 47         | 38         | 70         | 34         | 40         | 74         | 38         | 60         | 78         | 64         | 65         | 65         |
| Bajo Sol Tarde            | 6             | 62         | 56         | 62         | 60         | 62         | 60         | 62         | 62         | 60         | 62         | 60         | 62         |
| Bajo Sol Mañana           | 7             | 62         | 56         | 62         | 60         | 62         | 60         | 62         | 62         | 60         | 62         | 60         | 62         |
| <b>Total</b>              |               | <b>744</b> | <b>672</b> | <b>744</b> | <b>720</b> | <b>744</b> | <b>720</b> | <b>744</b> | <b>744</b> | <b>720</b> | <b>744</b> | <b>720</b> | <b>744</b> |

## 8.2. Instalaciones en el SING y SIC

### 8.2.1. SING

La siguiente tabla muestra las características de las principales centrales de generación en el SING que han sido modeladas.

**Tabla 18. Centrales Térmicas de Generación del SING**

| Unidad<br>CDEC       | Central<br>Modelo | Potencia<br>Neta<br>Máxima<br>[MW] | Potencia<br>Neta<br>Mínima<br>[MW] | Energía<br>Primaria<br>Usada | Subestación<br>Conexión<br>Modelo | Estado<br>Unidad |
|----------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| CC SALTA             | SaltaCC           | 202,9                              | 119,0                              | GNL                          | Andes 220                         | Existente        |
| CTA                  | AndinaVC          | 146,4                              | 87,0                               | Carbón                       | Chacaya220                        | Existente        |
| ANG1                 | AngamosVC1        | 235,6                              | 130,0                              | Carbón                       | Angamos220                        | Existente        |
| ANG2                 | AngamosVC2        | 235,6                              | 130,0                              | Carbón                       | Angamos220                        | Existente        |
| CTTAR                | CeltaVC           | 138,2                              | 87,0                               | Carbón                       | Tarapaca 220                      | Existente        |
| TGTAR                | CeltaTG           | 23,9                               | 0,0                                | Diesel                       | Tarapaca 220                      | Existente        |
| GMAR<br>M1AR<br>M2AR | AricaMD           | 8,4<br>2,9<br>2,8                  | 0,0<br>0,0<br>0,0                  | Diesel                       | Arica66<br>Arica66<br>Arica66     | Existente        |
| CUMMINS<br>DEUTZ     | EnaexMD           | 0,7<br>2,0                         | 0,0<br>0,0                         | Diesel                       | Mejillones110<br>Mejillones110    | Existente        |
| MAIQ<br>MSIQ         | IquiqueMFO        | 5,6<br>5,9                         | 0,0<br>0,0                         | Diesel+FO                    | PAlmonte110<br>PAlmonte110        | Existente        |
| MIIQ<br>SUIQ         | IquiqueMD         | 2,8<br>4,1                         | 0,0<br>0,0                         | Diesel                       | PAlmonte110<br>PAlmonte110        | Existente        |
| TGIQ                 | IquiqueTG         | 23,8                               | 0,0                                | Diesel                       | PAlmonte110                       | Existente        |
| CTM1                 | CTM1              | 143,8                              | 78,0                               | Carbón                       | Chacaya220                        | Existente        |
| CTM2                 | CTM2              | 155,6                              | 80,0                               | Carbón                       | Chacaya220                        | Existente        |
| CTM3                 | CTM3GN            | 243,2                              | 155,2                              | GNL                          | Chacaya220                        | Existente        |
| TG1<br>TG2           | TocoTG1-2         | 24,9<br>24,9                       | 0,0                                | Diesel                       | Tocopilla110<br>Tocopilla110      | Existente        |
| TG3                  | TocoTG3           | 37,7                               | 0,0                                | GNL                          | Tocopilla220                      | Existente        |
| U10                  | Toco10            | 36,5                               | 15,0                               | FO N6                        | Tocopilla110                      | Existente        |
| U11                  | Toco11            | 36,5                               | 11,0                               | FO N6                        | Tocopilla110                      | Existente        |
| U12                  | Toco12            | 82,1                               | 48,0                               | Carbón                       | Tocopilla110                      | Existente        |
| U13                  | Toco13            | 80,2                               | 47,0                               | Carbón                       | Tocopilla110                      | Existente        |
| U14                  | Toco14            | 123,6                              | 68,0                               | Carbón                       | Tocopilla220                      | Existente        |
| U15                  | Toco15            | 118,1                              | 68,0                               | Carbón                       | Tocopilla220                      | Existente        |

|                        |                   |            |       |              |                            |           |
|------------------------|-------------------|------------|-------|--------------|----------------------------|-----------|
| U16                    | TocoCCGN          | 343,0      | 145,0 | GNL          | Tocopilla220               | Existente |
| ZOFRI_1-6<br>ZOFRI_2-5 | ZofriMD3          | 0,9<br>3,9 | 0,0   | Diesel       | PAlmonte110<br>PAlmonte110 | Existente |
| ZOFRI_13<br>ZOFRI_7-12 | ZofriMD1-2        | 1,3<br>4,8 | 0,0   | Diesel       | PAlmonte110<br>PAlmonte110 | Existente |
| INACAL                 | Inacal            | 6,6        | 0,0   | FO N6        | Mejillones110              | Existente |
| CC1                    | GAtacamaCC1G      | 325,5      | 130,3 | GNL          | Atacama220                 | Existente |
| CC2                    | GAtacamaCC2G      | 325,5      | 130,3 | GNL          | Atacama220                 | Existente |
| CTH                    | HornitosVC        | 153,9      | 93,2  | Carbón       | Chacaya220                 | Existente |
| PAM                    | Noracid           | 17,0       | 0,0   | Cogeneración | Mejillones110              | Existente |
| NTO1                   | NuevaToco1        | 126,2      | 60,0  | Carbón       | Norgener220                | Existente |
| NTO2                   | NuevaToco2        | 126,2      | 60,0  | Carbón       | Norgener220                | Existente |
| Chapiquina             | Chapiquina        | 10,1       | 0,0   | Hidro        | Arica66                    | Existente |
| Cavancha               | Cavancha          | 2,6        | 0,0   | Hidro        | Condores220                | Existente |
| Solar Pack2            | SFV_Solarpa2      | 7,5        | 0,0   | Solar FV     | PAlmonte110                | Existente |
| Solar Pack3            | SFV_Solarpa3      | 16,0       | 0,0   | Solar FV     | PAlmonte110                | Existente |
| Valle Vientos          | EOL_VVientos      | 90,0       | 0,0   | Eólica       | Calama110                  | Existente |
| El Aguila              | SFV_EIAguila      | 2,0        | 0,0   | Solar FV     | Arica66                    | Existente |
| MIMB                   | ManBlancos 1 - 10 | 27,9       | 0,0   | FO N6        | MBlancos220                | Existente |
| SUTA                   | Tamaya 1-10       | 100,0      | 0,0   | FO N6        | Tamaya110                  | Existente |
| Pica                   | SFV_PMGDPica      | 0,6        | 0,0   | Solar FV     | Lagunas220                 | Existente |
| La Huayca              | SFV_LaHuayca      | 30,0       | 0,0   | Solar FV     | PAlmonte110                | Existente |
| Arica 1                | SFV_Arica1        | 40,0       | 0,0   | Solar FV     | Parinacota220              | Existente |
| Crucero                | SFV_Crucero       | 64,4       | 0,0   | Solar FV     | Crucero220                 | Existente |
| Jama                   | SFV_Jama          | 30,0       | 0,0   | Solar FV     | Calama220                  | Existente |
| Pular                  | SFV_Pular         | 24,0       | 0,0   | Solar FV     | Calama220                  | Existente |
| Andes 1                | SFV_Andes1        | 20,0       | 0,0   | Solar FV     | Andes 220                  | Existente |
| Camaron                | SFV_Camaron       | 9,0        | 0,0   | Solar FV     | PAlmonte110                | Existente |
| Kelar                  | KelarCC           | 500,0      | 200,0 | GNL          | Kapatur220                 | Futura    |
| Bolero                 | SFV_Bolero        | 146,0      | 0,0   | Solar FV     | Laberinto220               | Futura    |
| Finis Terra            | SFV_FinisTer      | 160,0      | 0,0   | Solar FV     | Crucero220                 | Futura    |
| Cerro Pabellon         | GEO_CPabello      | 50,0       | 0,0   | Geotérmica   | Calama220                  | Futura    |
| CSP Atacama 1          | CSP_Atacama1      | 110,0      | 0,0   | Solar CSP    | Encuentro220               | Futura    |
| CSP Atacama 2          | CSP_Atacama2      | 110,0      | 0,0   | Solar CSP    | Encuentro220               | Futura    |
| Atacama 1              | SFV_Atacama1      | 100,0      | 0,0   | Solar FV     | Encuentro220               | Futura    |
| Atacama 2              | SFV_Atacama2      | 100,0      | 0,0   | Solar FV     | Encuentro220               | Futura    |
| Cochrane U1            | CochraneVC1       | 236,0      | 150,0 | Carbón       | Cochrane220                | Futura    |
| Cochrane U2            | CochraneVC2       | 236,0      | 150,0 | Carbón       | Cochrane220                | Futura    |
| Pacifico U1            | PacificoVC1       | 175,0      | 105,0 | Carbón       | Pacifico220                | Futura    |
| Pacifico U2            | PacificoVC2       | 175,0      | 105,0 | Carbón       | Pacifico220                | Futura    |
| IE U1                  | InfEnerfel        | 340,0      | 150,0 | Carbón       | Kapatur220                 | Futura    |

|            |            |       |       |          |                           |                        |
|------------|------------|-------|-------|----------|---------------------------|------------------------|
| IE U2      | InfEnerfe2 | 340,0 | 150,0 | Carbón   | Kapatur220                | Futura                 |
| SFV_SING0X | SFV_SING0X | 100,0 | 0,0   | Solar FV | Zona Lagunas-Pozo Almonte | Futura (Genérica SING) |
| SFV_SING1X | SFV_SING1X | 100,0 | 0,0   | Solar FV | Zona Laberinto-Domeyko    | Futura (Genérica SING) |

La siguiente tabla muestra las barras del SING que han sido modeladas.

**Tabla 19. Barras del SING**

| Barra      | Tensión | Barra        | Tensión | Barra        | Tensión | Barra        | Tensión |
|------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|--------------|---------|
| A110       | 110     | Cochrane220  | 220     | Laberinto220 | 220     | Parinaco220  | 110     |
| Andes220   | 220     | Collahua220  | 220     | Lagunas220   | 110     | Parinaco66   | 110     |
| Angamos220 | 220     | Colorado110  | 110     | MBlancos220  | 110     | QBlanca220   | 66      |
| Antofa110  | 110     | Condores220  | 110     | Mejillon110  | 66      | Quillagua220 | 220     |
| Arica110   | 110     | Crucero220   | 66      | Mejillon220  | 220     | Salar110     | 110     |
| Arica66    | 66      | Domeyko220   | 220     | Negra110     | 110     | Salar220     | 220     |
| Atacama220 | 220     | E21-66       | 110     | Norgener220  | 220     | SdC110       | 110     |
| Calama110  | 110     | ElCobre220   | 220     | NvaCruEnc220 | 110     | Tamaya110    | 220     |
| Calama220  | 220     | Encuentro220 | 110     | NvaCruEnc500 | 220     | Tarapaca220  | 220     |
| Caprico110 | 110     | Escondida220 | 220     | NVictoria220 | 220     | Tesoro220    | 220     |
| Caprico220 | 220     | Esmeralda110 | 220     | NZaldivar220 | 220     | Tocopilla110 | 500     |
| Chacaya220 | 220     | Esmeralda220 | 220     | Oeste220     | 500     | Tocopilla220 | 110     |
| Changos220 | 220     | Esperanza220 | 500     | Ohiggins220  | 110     | TOQuiani66   | 220     |
| Changos500 | 500     | Gaby220      | 110     | PAlmonte110  | 220     |              |         |
| Chuqui110  | 110     | Kapatur220   | 220     | PAlmonte110b | 220     |              |         |
| Chuqui220  | 220     | Km6          | 220     | PAlmonte220  | 220     |              |         |

La siguiente tabla muestra la proyección de demanda anual de energía para el SING al año 2030.



**Tabla 20. Proyección de Demanda SING**

| Año  | Demanda [GWh] | Tasa crecimiento Energía | Demanda Máxima [MW] <sup>20</sup> |
|------|---------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 2015 | 17.024        | 8,1%                     | 2.234                             |
| 2016 | 18.445        | 8,3%                     | 2.420                             |
| 2017 | 20.383        | 10,5%                    | 2.675                             |
| 2018 | 21.338        | 4,7%                     | 2.800                             |
| 2019 | 22.519        | 5,5%                     | 2.955                             |
| 2020 | 23.488        | 4,3%                     | 3.082                             |
| 2021 | 24.767        | 5,4%                     | 3.250                             |
| 2022 | 26.483        | 6,9%                     | 3.475                             |
| 2023 | 27.542        | 4,0%                     | 3.614                             |
| 2024 | 28.645        | 4,0%                     | 3.759                             |
| 2025 | 29.792        | 4,0%                     | 3.909                             |
| 2026 | 30.982        | 4,0%                     | 4.065                             |
| 2027 | 31.911        | 3,0%                     | 4.187                             |
| 2028 | 32.868        | 3,0%                     | 4.313                             |
| 2029 | 33.857        | 3,0%                     | 4.442                             |
| 2030 | 34.868        | 3,0%                     | 4.575                             |

La siguiente tabla muestra las características principales de las líneas de transmisión existentes que han sido modeladas en el SING. Los valores para las capacidades en el modelo fueron usados considerando criterio de operación N-1 en el sistema troncal (donde corresponda), además de aplicación de EDAG que permite la operación con criterio N de algunos circuitos.

---

<sup>20</sup> Factor de carga de 87%

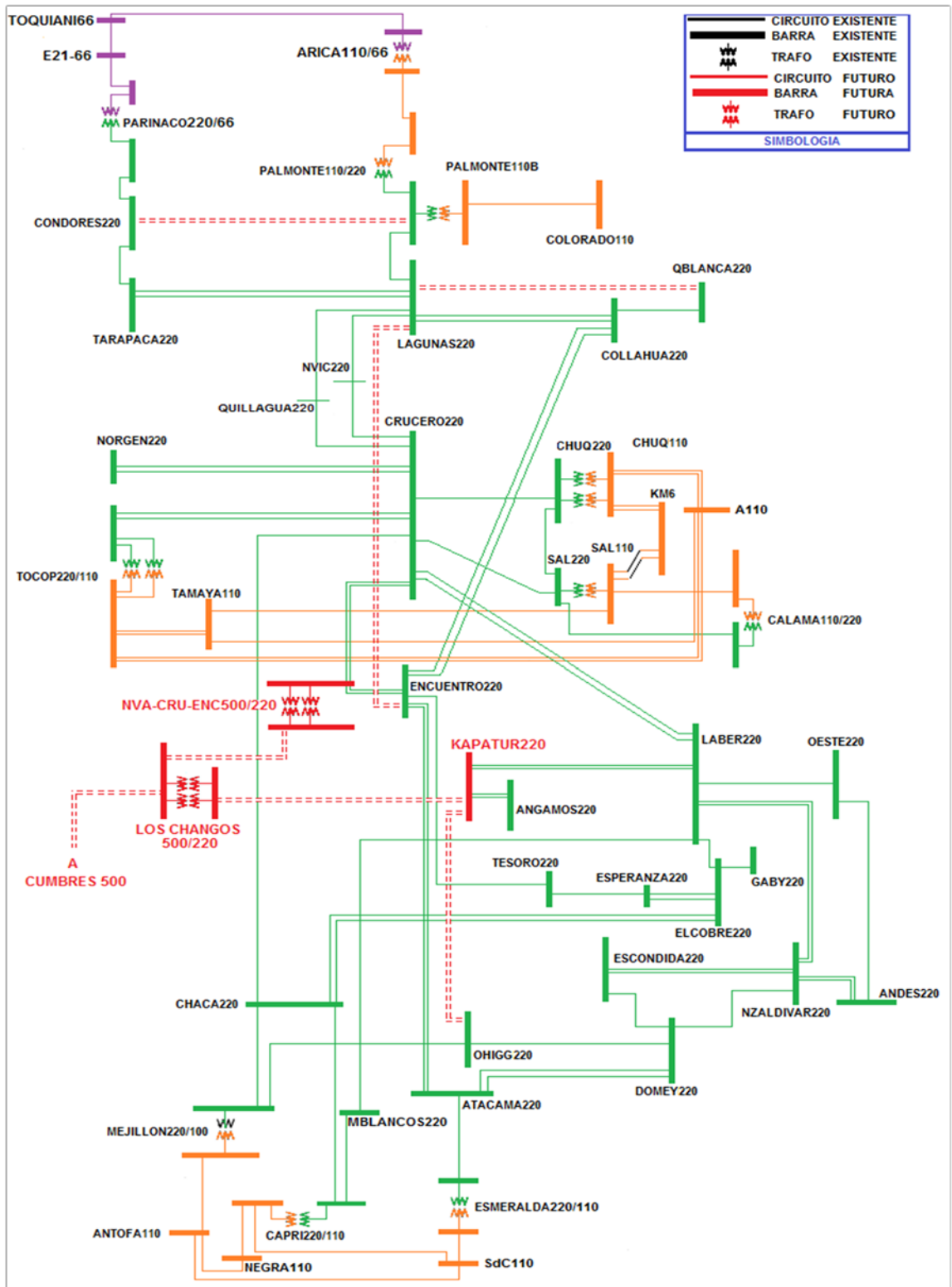
**Tabla 21. Características de líneas de transmisión del SING**

| Tramo de Línea |               | R (%) | X (%) | Capacidad<br>[MW] | Estado<br>Circuito |
|----------------|---------------|-------|-------|-------------------|--------------------|
| De Barra       | A Barra       |       |       |                   |                    |
| Tarapaca220    | Lagunas220    | 0,28  | 2,25  | 366               | Existente          |
| Tarapaca220    | Condores220   | 1,29  | 5,77  | 183               | Existente          |
| Condores220    | Parinaco220   | 4,16  | 19,06 | 91                | Existente          |
| Parinaco220    | Parinaco66    | 0,00  | 10,85 | 120               | Existente          |
| Parinaco66     | E21-66        | 1,30  | 3,47  | 54                | Existente          |
| E21-66         | TOQuiani66    | 0,30  | 0,40  | 15                | Existente          |
| TOQuiani66     | Arica66       | 2,47  | 3,50  | 43                | Existente          |
| Arica110       | Arica66       | 1,32  | 19,70 | 50                | Existente          |
| Arica110       | PAlmonte110   | 53,07 | 74,39 | 34                | Existente          |
| PAlmonte220    | PAlmonte110   | 0,05  | 13,28 | 100               | Existente          |
| Lagunas220     | PAlmonte220   | 1,45  | 6,04  | 183               | Existente          |
| PAlmonte220    | PAlmonte110b  | 0,00  | 13,28 | 100               | Existente          |
| PAlmonte110b   | Colorado110   | 5,03  | 20,12 | 57                | Existente          |
| Salar220       | Calama220     | 1,30  | 6,50  | 104               | Existente          |
| Calama220      | Calama110     | 0,00  | 13,28 | 100               | Existente          |
| Salar110       | Calama110     | 1,18  | 6,81  | 95                | Existente          |
| Salar220       | Salar110      | 0,10  | 10,49 | 120               | Existente          |
| Mejillones220  | Mejillones110 | 0,00  | 13,23 | 100               | Existente          |
| Mejillones110  | Antofag110    | 3,00  | 9,80  | 91                | Existente          |
| Antofag110     | Negra110      | 2,50  | 6,24  | 91                | Existente          |
| Antofag110     | SdC110        | 0,57  | 1,87  | 95                | Existente          |
| Negra110       | Capricor110   | 5,40  | 16,57 | 95                | Existente          |
| Capricor220    | Capricor110   | 0,17  | 16,13 | 80                | Existente          |
| Capricor110    | SdC110        | 2,46  | 7,99  | 95                | Existente          |
| Esmeralda110   | SdC110        | 1,12  | 3,04  | 95                | Existente          |
| Esmeralda220   | Esmeralda110  | 0,00  | 7,10  | 195               | Existente          |
| Atacama220     | Esmeralda220  | 1,29  | 5,93  | 197               | Existente          |
| Atacama220     | Domeyko220    | 2,10  | 8,70  | 492               | Existente          |
| Mejillones220  | Chacaya220    | 0,02  | 0,11  | 366               | Existente          |
| Mejillones220  | Ohiggins220   | 1,30  | 4,75  | 261               | Existente          |
| Chacaya220     | Capricor220   | 0,83  | 4,24  | 305               | Existente          |
| Capricor220    | MBlancos220   | 0,27  | 1,36  | 305               | Existente          |
| Ohiggins220    | Domeyko220    | 1,90  | 7,57  | 246               | Existente          |
| Chacaya220     | Crucero220    | 3,15  | 13,17 | 305               | Existente          |
| Chacaya220     | ElCobre220    | 0,69  | 5,82  | 700               | Existente          |
| MBlancos220    | Laberinto220  | 1,44  | 5,95  | 271               | Existente          |

|               |               |       |       |      |           |
|---------------|---------------|-------|-------|------|-----------|
| Encuentro220  | Atacama220    | 0,76  | 4,77  | 772  | Existente |
| Domeyko220    | Escondida220  | 0,15  | 0,60  | 246  | Existente |
| Domeyko220    | NZaldivar220  | 0,29  | 1,19  | 293  | Existente |
| NZaldivar220  | Escondida220  | 0,11  | 0,26  | 548  | Existente |
| Andes220      | NZaldivar220  | 0,40  | 2,52  | 457  | Existente |
| Oeste220      | Andes220      | 0,78  | 3,23  | 274  | Existente |
| Laberinto220  | Oeste220      | 1,75  | 7,23  | 272  | Existente |
| Laberinto220  | NZaldivar220  | 0,74  | 3,96  | 586  | Existente |
| Laberinto220  | ElCobre220    | 0,06  | 0,23  | 361  | Existente |
| Angamos220    | Laberinto220  | 0,37  | 4,20  | 1400 | Existente |
| ElCobre220    | Esperanza220  | 0,57  | 2,29  | 300  | Existente |
| Tesoro220     | Esperanza220  | 0,26  | 1,07  | 85   | Existente |
| Encuentro220  | Tesoro220     | 1,97  | 7,74  | 125  | Existente |
| Crucero220    | Laberinto220  | 1,05  | 5,57  | 586  | Existente |
| Crucero220    | Encuentro220  | 0,00  | 0,04  | 732  | Existente |
| ElCobre220    | Gaby220       | 1,22  | 5,09  | 73   | Existente |
| Collahuasi220 | Encuentro220  | 1,86  | 8,48  | 267  | Existente |
| Collahuasi220 | QBlanca220    | 0,31  | 2,01  | 57   | Existente |
| Lagunas220    | Collahuasi220 | 0,97  | 4,86  | 218  | Existente |
| Lagunas220    | Quillagua220  | 1,86  | 8,60  | 183  | Existente |
| Quillagua220  | Crucero220    | 1,34  | 6,23  | 183  | Existente |
| Lagunas220    | NVictoria220  | 0,33  | 1,40  | 183  | Existente |
| NVictoria220  | Crucero220    | 3,26  | 13,61 | 183  | Existente |
| Crucero220    | Norgener220   | 0,36  | 2,88  | 610  | Existente |
| Crucero220    | Tocopi220     | 0,29  | 1,19  | 732  | Existente |
| Tocopi220     | Tocopi110     | 0,00  | 7,16  | 200  | Existente |
| Tocopi110     | Tamaya110     | 0,75  | 2,45  | 130  | Existente |
| Tocopi110     | A110          | 7,00  | 23,48 | 130  | Existente |
| Tamaya110     | A110          | 12,34 | 41,88 | 65   | Existente |
| Tamaya110     | Salar110      | 14,34 | 45,99 | 65   | Existente |
| Chuquica110   | A110          | 0,00  | 0,00  | 166  | Existente |
| Crucero220    | Chuquica220   | 0,74  | 5,95  | 274  | Existente |
| Chuquica220   | Chuquica110   | 0,07  | 5,83  | 240  | Existente |
| Salar220      | Chuquica220   | 0,15  | 1,02  | 274  | Existente |
| Chuquica110   | Km6-110       | 0,24  | 0,99  | 208  | Existente |
| Crucero220    | Salar220      | 0,79  | 6,36  | 366  | Existente |
| Salar110      | Km6-110       | 0,14  | 0,34  | 208  | Existente |
| Condores220   | PAlmonte220   | 0,67  | 3,08  | 180  | Futura    |
| Lagunas220    | QBlanca220    | 2,00  | 10,0  | 200  | Futura    |

|              |              |      |      |      |        |
|--------------|--------------|------|------|------|--------|
| Angamos220   | Kapatur220   | 0,03 | 0,36 | 700  | Futura |
| Kapatur220   | Laberinto220 | 0,34 | 3,85 | 700  | Futura |
| Kapatur220   | Ohiggins220  | 0,61 | 2,25 | 260  | Futura |
| Changos220   | Kapatur220   | 0,00 | 0,06 | 1500 | Futura |
| Changos500   | Changos220   | 0,00 | 0,91 | 1500 | Futura |
| Changos500   | NuevaCE500   | 0,06 | 0,72 | 1500 | Futura |
| NuevaCE500   | NuevaCE220   | 0,00 | 0,91 | 1500 | Futura |
| Crucero220   | NuevaCE220   | 0,00 | 0,02 | 1000 | Futura |
| Encuentro220 | NuevaCE220   | 0,00 | 0,02 | 1000 | Futura |
| Encuentro220 | Lagunas220   | 0,8  | 3,71 | 580  | Futura |
| Changos500   | Cumbres500   | 0,17 | 0,72 | 1500 | Futura |
| Cochrane220  | Encuentro220 | 0,05 | 6,01 | 600  | Futura |

Ilustración 28. Diagrama Unilineal del SING Modelado



## 8.2.2. SIC

La siguiente tabla muestra las características principales de las centrales de generación existentes en el SIC que han sido modeladas.

**Tabla 22. Centrales Térmicas de Generación del SIC**

| Unidad<br>CDEC        | Central<br>Modelo | Potencia<br>Neta<br>Máxima<br>[MW] | Potencia<br>Neta<br>Mínima<br>[MW] | Energía<br>Primaria<br>Usada | Subestación<br>Conexión<br>Modelo | Estado<br>Unidad |
|-----------------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Diego de Almagro TG   | DAlmagroTG        | 23,0                               | 0,0                                | Diesel                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| El Salvador TG        |                   | 23,0                               | 0,0                                | Diesel                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| Emelda 01             | EmeldaMD1         | 33,3                               | 0,0                                | Diesel                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| Emelda 02             | EmeldaMD2         | 36,0                               | 0,0                                | Diesel                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| Salvador RTS          | Salvador_RTS      | 2,8                                | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| San Lorenzo U1        | SanLorenzo        | 28,5                               | 0,0                                | Diesel                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| San Lorenzo U2        |                   | 26,0                               | 0,0                                | Diesel                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| Taltal 1              | TalTalTG1         | 121,5                              | 0,0                                | GNL                          | DAlmagro220                       | Existente        |
| Taltal2               | TalTalTG2         | 123,4                              | 0,0                                | GNL                          | DAlmagro220                       | Existente        |
| Taltal Eólica         | EOL_Taltal        | 99,0                               | 0,0                                | Eólica                       | DAlmagro220                       | Existente        |
| Amarillo FV           | SFV_Amarillo      | 2,2                                | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| Chañares FV           | SFV_Chanares      | 40,0                               | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| D. Almagro FV         | SFV_DAlmagro      | 30,0                               | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| Lalackama FV          | SFV_Lalackam      | 55,0                               | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| Salvador FV           | SFV_Salvador      | 70,0                               | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| San Andres FV         | SFV_SanAndre      | 48,2                               | 0,0                                | FV                           | DAlmagro220                       | Existente        |
| Cardones              | CardonesTGPD      | 144,7                              | 0,0                                | Diesel                       | Cardones220                       | Existente        |
| Termopacífico         | TermoPacifMD      | 96,0                               | 0,0                                | Diesel                       | Cardones220                       | Existente        |
| Amanecer FV           | SFV_Amanecer      | 93,7                               | 0,0                                | FV                           | Cardones220                       | Existente        |
| Cenizas               | Cenizas           | 17,1                               | 0,0                                | Fuel Oil                     | Cardones110                       | Existente        |
| Guacolda 1            | Guacolda1         | 142,9                              | 75,0                               | Carbón                       | Maitenci220                       | Existente        |
| Guacolda 2            | Guacolda2         | 142,9                              | 75,0                               | Carbón                       | Maitenci220                       | Existente        |
| Guacolda 3            | Guacolda3         | 137,1                              | 75,0                               | Carbón                       | Maitenci220                       | Existente        |
| Guacolda 4            | Guacolda4         | 139,0                              | 75,0                               | Carbón                       | Maitenci220                       | Existente        |
| Huasco TG             | HuascoTG          | 58,0                               | 0,0                                | Diesel                       | Maitenci110                       | Existente        |
| Punta Colorada Eólica | PColoraEol        | 20,0                               | 0,0                                | Eólica                       | PColorada220                      | Existente        |
| Punta Colorada        | PColoraMFO        | 16,3                               | 0,0                                | Fuel Oil                     | PColorada220                      | Existente        |

|                       |              |       |       |         |              |           |
|-----------------------|--------------|-------|-------|---------|--------------|-----------|
| Monte Patria          | MPatriaMD    | 9,2   | 0,0   | Diesel  | PAzucar110   | Existente |
| El Peñón              | PenonMD      | 81,0  | 0,0   | Diesel  | PAzucar110   | Existente |
| Punitaqui             | PunitaquiMD  | 9,3   | 0,0   | Diesel  | PAzucar110   | Existente |
| Tambo Real            | TamboReal    | 1,2   | 0,0   | FV      | PAzucar110   | Existente |
| El Arrayan            | EOL_Arrayan  | 115,0 | 0,0   | Eólica  | Arrayan220   | Existente |
| Talinay               | TalinayEol   | 90,0  | 0,0   | Eólica  | Talinay220   | Existente |
| Monte Redondo         | MonteRedEol  | 48,0  | 0,0   | Eólica  | MonteRed220  | Existente |
| Cururos               | EOL_Cururos  | 108,0 | 0,0   | Eólica  | MonteRed220  | Existente |
| Totoral (eólica)      | TotoralEol   | 46,0  | 0,0   | Eólica  | LasPalmas220 | Existente |
| Canela I              | CanelaEol    | 18,2  | 18,2  | Eólica  | LasPalmas220 | Existente |
| Canela 2              |              | 60,0  | 60,0  | Eólica  | LasPalmas220 | Existente |
| Punta Palmeras        | EOL_PPalmera | 45,0  | 0,0   | Eólica  | LasPalmas220 | Existente |
| Los Espinos           | EspinosTG    | 122,0 | 0,0   | Diesel  | LosVilos220  | Existente |
| Olivos                | OlivosMD     | 92,0  | 0,0   | Diesel  | LosVilos220  | Existente |
| Nueva Ventanas        | Ventanas3    | 242,0 | 110,0 | Carbón  | Nogales220   | Existente |
| Campiche              | Campiche     | 242,0 | 110,0 | Carbón  | Nogales220   | Existente |
| Nehuenco 1            | Nehuenco1GN  | 361,9 | 250,0 | GNL     | SLuis220     | Existente |
| Nehuenco 2            | Nehuenco2GN  | 391,5 | 260,0 | GNL     | SLuis220     | Existente |
| Nehuenco TG           | Nehuenco31   | 92,0  | 0,0   | GNL     | SLuis220     | Existente |
|                       | Nehuenco32   | 16,0  | 0,0   | GNL     | SLuis220     | Existente |
| San Isidro 1          | SIsidro1     | 370,0 | 200,0 | GNL     | SLuis220     | Existente |
| San Isidro 2          | SIsidro2     | 365,0 | 209,0 | GNL     | SLuis220     | Existente |
| Quintero              | QuinteroTGGN | 257,0 | 0,0   | GNL     | SLuis220     | Existente |
| Ventanas 1            | Ventanas1    | 112,8 | 60,0  | Carbón  | Ventanas110  | Existente |
| Ventanas 2            | Ventanas2    | 207,9 | 100,0 | Carbón  | Ventanas110  | Existente |
| Las Vegas             | LVegasTG     | 2,1   | 0,0   | Diesel  | SanPedro110  | Existente |
| Los Vientos TG        | LVientosTG   | 132,0 | 0,0   | Diesel  | SanPedro110  | Existente |
| Colmito               | ColmitoTG    | 55,0  | 0,0   | Diesel  | Miraflor110  | Existente |
| Concon                | ConconMD     | 2,3   | 0,0   | Diesel  | Miraflor110  | Existente |
| L.Verde TG            | LVerdeTG     | 17,9  | 0,0   | Diesel  | AguaSanta110 | Existente |
| L.Verde               | LVerdeVC     | 52,7  | 0,0   | Diesel  | AguaSanta110 | Existente |
| Agua Santa TG         | ASantaMD     | 19,4  | 0,0   | Diesel  | AguaSanta110 | Existente |
| Nueva Renca           | NRenca       | 369,9 | 240,0 | GNL     | CNavia110    | Existente |
| Renca                 | Renca        | 92,0  | 50,0  | Diesel  | CNavia110    | Existente |
| Loma Los Colorados    | Colorados2   | 4,5   | 0     | Biomasa | CNavia110    | Existente |
| Loma Los Colorados II |              | 4,5   | 0     | Biomasa | CNavia110    | Existente |
| Coligues U1 U2        | Coligues     | 20,0  | 0,0   | Diesel  | Rancagua154  | Existente |
| Esperanza TG          | EsperanTG    | 18,8  | 0,0   | Diesel  | Rancagua154  | Existente |

|                      |              |       |       |          |               |           |
|----------------------|--------------|-------|-------|----------|---------------|-----------|
| San Fco. de Mostazal | SFranciscoTG | 25,0  | 0,0   | Diesel   | Rancagua154   | Existente |
| Candelaria 1         | Candela1TGGN | 125,3 | 0,0   | GNL      | Candelaria220 | Existente |
| Candelaria 2         | Candela2TGGN | 128,6 | 0,0   | GNL      | Candelaria220 | Existente |
| Ucuquer              | EOL_Ucuquer  | 16,2  | 0,0   | Eólica   | Rapel220      | Existente |
| Cem Bio              | CemBioBio    | 13,6  | 0,0   | Fuel Oil | Teno154       | Existente |
| Teno                 | TenoMD       | 58,0  | 0,0   | Diesel   | Teno154       | Existente |
| Licantén             | Licanten1    | 1,0   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
|                      | Licanten2    | 3,0   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Viñales              | Viñales      | 32,0  | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Celco 1              | BIO_Celco1   | 3,0   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Celco 2              | BIO_Celco2   | 2,0   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Celco 3              | BIO_Celco3   | 3,0   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Constitucion EV      | BIO_ConstiEV | 7,0   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Triful               | HTriful      | 0,5   | 0,0   | Biomasa  | Itahue154     | Existente |
| Laja CMPC            | BIO_CMPCLaj2 | 10,0  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
| Laja CMPC            | BIO_CMPCLaj3 | 10,0  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
|                      | BIO_LajaCMPC | 5,0   | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
| CMPC Pacifico        | CMPC_Pacif1  | 11,6  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
|                      | CMPC_Pacif2  | 10,9  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
| CMPC Pacifico        | CMPC_Pacif3  | 10,5  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
| Los Pinos            | LPinosTG     | 104,2 | 0,0   | Diesel   | Charrua220    | Existente |
| Santa Maria          | SantaMaria1  | 343,0 | 137,0 | Carbón   | Charrua220    | Existente |
| Santa Lidia          | SLidiaTG     | 137,7 | 60,0  | Diesel   | Charrua220    | Existente |
| Orafiti              | Orafiti      | 0,5   | 0,0   | Diesel   | Charrua220    | Existente |
| Negrete              | NegreteEol   | 33,0  | 0,0   | Eólica   | Charrua220    | Existente |
| SF Energia           | StaFe1       | 17,0  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
|                      | StaFe2       | 16,8  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
|                      | StaFe3       | 16,1  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
|                      | StaFe4       | 10,8  | 0,0   | Biomasa  | Charrua220    | Existente |
| Cholguán             | Cholguan1    | 9,0   | 0,0   | Biomasa  | Charrua154    | Existente |
|                      | Cholguan2    | 4,0   | 0,0   | Biomasa  | Charrua154    | Existente |
| Laja                 | LajaEV       | 7,0   | 0,0   | Biomasa  | Charrua154    | Existente |
| Los Sauces I         | LSaucesMD    | 1,5   | 0,0   | Diesel   | Charrua154    | Existente |
| Los Sauces II        |              | 1,0   | 0,0   | Diesel   | Charrua154    | Existente |
| Cabrero (Masisa)     | Masisa       | 11,1  | 0,0   | Biomasa  | Charrua154    | Existente |
| Nueva Aldea          | NAldea1      | 14,0  | 0,0   | Biomasa  | Charrua154    | Existente |
| Nueva Aldea 2        | NAldea2TG    | 10,0  | 0,0   | Diesel   | Charrua154    | Existente |



|                  |               |       |       |         |              |           |
|------------------|---------------|-------|-------|---------|--------------|-----------|
| Nueva Aldea 3    | NAldea3       | 37,0  | 0,0   | Biomasa | Charrua154   | Existente |
| Yungay Gas 1 - 2 | YungayGN      | 104,5 | 0,0   | GNL     | Charrua154   | Existente |
| Yungay 3         | YungayTG3PD   | 53,5  | 0,0   | Diesel  | Charrua154   | Existente |
| Yungay CC        | YungayCC      | 45,8  | 0,0   | Diesel  | Charrua154   | Existente |
| Malleco          | MallecoMD     | 2,5   | 0,0   | Diesel  | Charrua154   | Existente |
| Bocamina 2       | Bocamina2     | 342,0 | 137,0 | Carbón  | Lagunilla220 | Existente |
| Bocamina         | Bocamina      | 121,0 | 70,0  | Carbón  | Lagunilla154 | Existente |
| Arauco           | Arauco1       | 20,6  | 0,0   | Biomasa | Lagunilla154 | Existente |
|                  | Arauco2       | 6,0   | 0,0   | Biomasa | Lagunilla154 | Existente |
| Cañete           | CaneteMD      | 3,1   | 0,0   | Diesel  | Lagunilla154 | Existente |
| TG Coronel       | CoronelTGGN   | 46,7  | 0,0   | GNL     | Lagunilla154 | Existente |
| Escuadrón        | BIO_Escuadron | 14,2  | 0,0   | Biomasa | Lagunilla154 | Existente |
| Horcones TG      | HorconesTGGN  | 24,3  | 0,0   | GNL     | Lagunilla154 | Existente |
| Lebu (Cristoro)  | LebuEol       | 3,6   | 0,0   | Eólica  | Hualpen154   | Existente |
| Petropower       | Petropower    | 54,2  | 0,0   | Biomasa | Hualpen154   | Existente |
| Newen            | NewenTG       | 14,1  | 0,0   | GNL     | Concep154    | Existente |
| Cristaleria Toro | HCristoro     | 3,6   | 0,0   | Biomasa | Concep154    | Existente |
| Cautín           | Cautín MD     | 6,3   | 0,0   | Diesel  | Cautín220    | Existente |
| Comasa-Lautaro   | Lautaro       | 21,0  | 0,0   | Biomasa | Cautín220    | Existente |
| Comasa-Lautaro 2 |               | 21,0  | 0,0   | Biomasa | Cautín220    | Existente |
| Valdivia         | Valdivia1     | 11,0  | 0,0   | Biomasa | Ciruelos220  | Existente |
|                  | Valdivia2     | 26,0  | 0,0   | Biomasa | Ciruelos220  | Existente |
|                  | Valdivia3     | 24,0  | 0,0   | Biomasa | Ciruelos220  | Existente |
| Antilhue_TG      | AntilhueTG    | 101,2 | 0,0   | Diesel  | Valdivia220  | Existente |
| Calle-Calle      | CalleCalleMD  | 20,0  | 0,0   | Diesel  | Valdivia220  | Existente |
| Chuyaca          | ChuyacaMD     | 20,0  | 0,0   | Diesel  | BBlanco220   | Existente |
| Chuyaca 2        |               |       |       |         | BBlanco220   | Existente |
| Watts I          | Watt          | 1,2   | 0,0   | Diesel  | BBlanco220   | Existente |
| Watts II         |               |       |       |         |              | Existente |
| Ancud            | AncudMD1      | 3,0   | 0,0   | Diesel  | PMontt220    | Existente |
| San Pedro Eólica | EOL_SanPedro  | 36,0  | 0,0   | Eólica  | PMontt220    | Existente |
| Chiloe           | ChiloeMD      | 9,0   | 0,0   | Diesel  | PMontt220    | Existente |
| Degan            | DeganMD       | 36,0  | 0,0   | Diesel  | PMontt220    | Existente |
| Quellon II       | Quellon2MD    | 10,0  | 0,0   | Diesel  | PMontt220    | Existente |
| Quellon          | QuellonMD     | 10,0  | 0,0   | Diesel  | PMontt220    | Existente |
| Trapen           | TrapenMD      | 81,0  | 0,0   | Diesel  | PMontt220    | Existente |
| Javiera          | SFV_Javiera   | 65,0  | 0,0   | FV      | DAlmagro220  | Futura    |
| Lalackama 2      | SFV_Lalackam2 | 19,0  | 0,0   | FV      | DAlmagro220  | Futura    |

|                  |              |       |       |           |                         |                       |
|------------------|--------------|-------|-------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| Conejo           | SFV_Conejo   | 104,0 | 0,0   | FV        | DAlmagro220             | Futura                |
| Chaka            | SFV_Chaka    | 39,6  | 0,0   | FV        | DAlmagro220             | Futura                |
| Pampa Solar      | SFV_PampaSN  | 90,6  | 0,0   | FV        | DAlmagro220             | Futura                |
| Malgarid         | SFV_Malgarid | 28,0  | 0,0   | FV        | DAlmagro220             | Futura                |
| Luz Norte        | SFV_LuzNorte | 140,9 | 0,0   | FV        | CPinto220               | Futura                |
| Carrera Pinto    | SFV_CarreraP | 97,0  | 0,0   | FV        | CPinto220               | Futura                |
| Los Loros        | SFV_LosLoros | 50,0  | 0,0   | FV        | Cardones110             | Futura                |
| Guacolda 5       | Guacolda5    | 139,0 | 0,0   | Carbón    | Maitenci220             | Futura                |
| San Juan         | EOL_SanJuan  | 150,0 | 0,0   | Eólica    | Maitenci220             | Futura                |
| El Romero        | SFV_ElRomero | 196,0 | 0,0   | FV        | PColorada220            | Futura                |
| Talinay Poniente | EOL_TalinayP | 61,0  | 0,0   | Eólica    | Talinay220              | Futura                |
| El Morado        | SFV_EIMorado | 20,0  | 0,0   | FV        | Polpaico220             | Futura                |
| SPV4             | SFV_SPV4     | 10,0  | 0,0   | FV        | Polpaico220             | Futura                |
| Quilapilun       | SFV_Quilalpu | 110,0 | 0,0   | FV        | Polpaico220             | Futura                |
| Olmue            | SFV_Olmue    | 130,8 | 0,0   | FV        | Polpaico220             | Futura                |
| Santiago         | SFV_Santiago | 79,0  | 0,0   | FV        | Polpaico220             | Futura                |
| Los Guindos      | LosGuindosTG | 127,0 | 0,0   | Diesel    | Charrua220              | Futura                |
| Campesino        | CCCampesino  | 640,0 | 384,0 | GNL       | Charrua500              | Futura                |
| Renaico          | EOL_Renaico  | 88,0  | 0,0   | Eólica    | Cautin220               | Futura                |
| Pilin            | EOL_Pilin    | 51,0  | 0,0   | Eólica    | Valdivia220             | Futura                |
| SFV_SICXX        | SFV_SICXX    | 100,0 | 0,0   | FV        | Zona D.Almagro-Cardones | Futura (Genérica SIC) |
| GEO_SICXX        | GEO_SICXX    | 100,0 | 0,0   | Geotermia | Sur SIC                 | Futura (Genérica SIC) |
| CSP_SICXX        | CSP_SICXX    | 100,0 | 0,0   | CSP       | Zona D.Almagro-Cardones | Futura (Genérica SIC) |
| BIO_SICXX        | BIO_SICXX    | 100,0 | 0,0   | Biomasa   | Sur SIC                 | Futura (Genérica SIC) |
| EOL_SICXX        | EOL_SICXX    | 100,0 | 0,0   | Eólica    | Centro Sur SIC          | Futura (Genérica SIC) |

**Tabla 23. Centrales Hidroeléctricas de Embalse del SIC**

| Central<br>Modelo | Potencia<br>Neta<br>Máxima<br>[MW] | Factor de<br>Producción<br>[MW/m3/s] | Subestación<br>Conexión<br>Modelo | Estado<br>Unidad |
|-------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Rapel             | 375,0                              | 0,64                                 | Rapel220                          | Existente        |
| Colbun            | 457,0                              | 1,53                                 | Colbun220                         | Existente        |
| Cipreses          | 105,0                              | 2,80                                 | Itahue154                         | Existente        |
| Pehuenche         | 560,0                              | 1,78                                 | Ancoa220                          | Existente        |
| ElToro            | 450,0                              | 4,8                                  | Charrua220                        | Existente        |
| Pangue            | 450,0                              | 0,9                                  | Charrua220                        | Existente        |
| Ralco             | 690,0                              | 1,58                                 | Charrua220                        | Existente        |
| Angostura         | 316,0                              | 0,45                                 | Mulchen220                        | Existente        |
| Canutillar        | 170,2                              | 1,92                                 | PMontt220                         | Existente        |

**Tabla 24. Centrales Hidroeléctricas de Pasada del SIC**

| Central Modelo | Potencia Neta Máxima [MW] | Factor de Producción [MW/m3/s] | Subestación Conexión Modelo | Estado Unidad |
|----------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------|
| LosMolles      | 18,6                      | 1,00                           | PAzucar110                  | Existente     |
| Aconcagua      | 82,0                      | 1,00                           | Polpaico220                 | Existente     |
| Chacabuquito   | 25,0                      | 1,00                           | Polpaico220                 | Existente     |
| Hornito        | 55,0                      | 1,00                           | Polpaico220                 | Existente     |
| LosQuilos      | 39,9                      | 1,00                           | Polpaico220                 | Existente     |
| Alfalfal       | 178,1                     | 5,94                           | LAAlmen220                  | Existente     |
| Florida        | 28,0                      | 1,00                           | Florida110                  | Existente     |
| Guayacan       | 12,0                      | 1,00                           | Florida110                  | Existente     |
| Maitenes       | 31,0                      | 1,00                           | Florida110                  | Existente     |
| Puntilla       | 23,0                      | 1,00                           | Florida110                  | Existente     |
| Vol+Quel       | 62,0                      | 1,00                           | Florida110                  | Existente     |
| Carbomet       | 10,0                      | 1,00                           | AJahuel110                  | Existente     |
| HMenCen *      | 50,0                      | 1,00                           | AJahuel110                  | Existente     |
| Chacayes       | 106,0                     | 1,00                           | Sauz110                     | Existente     |
| CoyaPangal     | 11,0                      | 1,00                           | Sauz110                     | Existente     |
| Sauzal         | 88,8                      | 1,00                           | Sauz110                     | Existente     |
| LaHiguera      | 155,0                     | 1,00                           | LaHiguera220                | Existente     |
| Confluencia    | 163,0                     | 1,00                           | LaHiguera220                | Existente     |
| SanAndres      | 40,0                      | 1,00                           | LaHiguera220                | Existente     |
| Chiburgo       | 19,4                      | 0,97                           | Colbun220                   | Existente     |
| Machicura      | 94,0                      | 0,34                           | Colbun220                   | Existente     |
| Curillinque    | 89,0                      | 1,01                           | Itahue154                   | Existente     |
| Isla           | 69,0                      | 0,81                           | Itahue154                   | Existente     |
| Lircay         | 19,0                      | 0,90                           | Itahue154                   | Existente     |
| OjosdeAgua     | 9,0                       | 0,46                           | Itahue154                   | Existente     |
| SanIgnacio     | 37,0                      | 0,19                           | Itahue154                   | Existente     |
| LomaAlta       | 39,0                      | 0,45                           | Ancoa220                    | Existente     |
| LosHierros     | 22,9                      | 1,00                           | Ancoa220                    | Existente     |
| SanClemente    | 5,4                       | 1,00                           | Ancoa220                    | Existente     |
| Lajal          | 36,8                      | 1,00                           | Charrua220                  | Existente     |
| Antuco         | 320,0                     | 1,56                           | Charrua220                  | Existente     |
| Carena         | 8,5                       | 1,00                           | Charrua220                  | Existente     |
| Mampil         | 49,0                      | 1,00                           | Charrua220                  | Existente     |
| Palmucho       | 32,0                      | 1,14                           | Charrua220                  | Existente     |
| Peuchen        | 77,0                      | 0,92                           | Charrua220                  | Existente     |

|              |       |       |              |                             |
|--------------|-------|-------|--------------|-----------------------------|
| Providencia  | 12,7  | 0,46  | Charrua220   | Existente                   |
| Quilleco     | 70,0  | 0,44  | Charrua220   | Existente                   |
| Rucue        | 178,4 | 1,21  | Charrua220   | Existente                   |
| Abanico      | 136,0 | 1,35  | Charrua154   | Existente                   |
| HMenSur *    | 50,0  | 1,00  | Charrua154   | Existente                   |
| Pullinque    | 51,4  | 1,00  | Valdivia220  | Existente                   |
| Capullo      | 12,0  | 1,00  | Rahue220     | Existente                   |
| Lican        | 17,0  | 1,00  | Rahue220     | Existente                   |
| Pilmaiquen   | 39,0  | 1,00  | Rahue220     | Existente                   |
| Rucatayo     | 56,5  | 1,00  | Pichirra220  | Existente                   |
| Alfalfal2    | 264,0 | 1,00  | LAlmen220    | Futura                      |
| Vol+Quel2    | 62,0  | 1,00  | Florida110   | Futura                      |
| LasLajas     | 267,0 | 1,00  | Florida110   | Futura                      |
| Maitenes2    | 31,0  | 1,00  | Florida110   | Futura                      |
| ElPaso       | 60,0  | 1,00  | LaHiguera220 | Futura                      |
| Ancoa        | 27,0  | 1,00  | Itahue154    | Futura                      |
| LosHierros2  | 6,0   | 1,00  | Ancoa220     | Futura                      |
| RioColorado  | 15,0  | 1,50  | Ancoa220     | Futura                      |
| Nuble        | 136,0 | 1,36  | Ancoa220     | Futura                      |
| LosCondores  | 150,0 | 6,00  | Ancoa220     | Futura                      |
| ElCastillo   | 30,0  | 1,88  | Ancoa220     | Futura                      |
| Centinela    | 105,0 | 3,09  | Ancoa220     | Futura                      |
| Punilla      | 93,4  | 0,9   | Ancoa220     | Futura                      |
| Carilafquen  | 10,0  | 10,00 | Charrua220   | Futura                      |
| Malalcahuell | 10,0  | 10,00 | Charrua220   | Futura                      |
| Picoiquen    | 19,0  | 1,00  | Charrua154   | Futura                      |
| Itata        | 20,0  | 1,00  | Charrua154   | Futura                      |
| RioClaro     | 23,4  | 1,00  | Rahue220     | Futura                      |
| Pulelfu      | 9,4   | 1,00  | Rahue220     | Futura                      |
| LosLagos     | 46,7  | 1,00  | Rahue220     | Futura                      |
| Osorno       | 51,3  | 1,00  | Rahue220     | Futura                      |
| Mediterraneo | 204,0 | 1,00  | PMontt220    | Futura                      |
| Blanco       | 369,3 | 0,97  | PMontt500    | Futura                      |
| Cuervo       | 546,6 | 0,97  | PMontt500    | Futura                      |
| Hidro_SICXX  | 50,0  | 0,0   | Sur SIC      | Futura<br>(Genérica<br>SIC) |

\* Centrales que representan PMGD

La siguiente tabla muestra las barras del SIC que han sido modeladas.

**Tabla 25. Barras del SIC**

| Barra         | Nivel Tensión [kV] | Barra        | Nivel Tensión | Barra           | Nivel Tensión |
|---------------|--------------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|
| AguaSanta110  | 110                | DesfaCC      | 220           | PAzucar110      | 110           |
| AguaSanta220  | 220                | Florida110   | 110           | PAzucar220      | 220           |
| AJahuel110    | 110                | Hualpen154   | 154           | PColorada220    | 220           |
| AJahuel154    | 154                | Hualpen220   | 220           | PCortes154      | 154           |
| AJahuel220    | 220                | Itahue154    | 154           | Pichirrah220    | 220           |
| AJhuel500     | 500                | Itahue220    | 220           | Pichirrop220    | 220           |
| AMelipilla220 | 220                | Lagunilla154 | 154           | Pichirrop500    | 500           |
| Ancoa220      | 220                | Lagunilla220 | 220           | PMontt220       | 220           |
| Ancoa500      | 500                | LaHiguera220 | 220           | PMontt500       | 500           |
| Arrayan220    | 220                | LAlmen110    | 110           | PolpaDesfa      | 220           |
| Buin110       | 110                | LAlmen220    | 220           | Polpaico220     | 220           |
| Candelaria220 | 220                | LAlmen500    | 500           | Polpaico500     | 500           |
| Cardones110   | 110                | Lampa220     | 220           | PuenteNegro220  | 220           |
| Cardones220   | 220                | LasPalmas220 | 220           | Quillota110     | 110           |
| Cautin220     | 220                | LasVegas110  | 110           | Quillota220     | 220           |
| Cautin500     | 500                | LoAguirre220 | 220           | Rahue220        | 220           |
| Charrua154    | 154                | LoAguirre500 | 500           | Rancagua154     | 154           |
| Charrua220    | 220                | LoEspejo110  | 110           | Rapel220        | 220           |
| Charrua500    | 500                | LosVilos220  | 220           | Salto110        | 110           |
| Chena110      | 110                | Maitenci110  | 110           | Salto220        | 220           |
| Chena220      | 220                | Maitenci220  | 220           | SanAndres220    | 220           |
| Ciruelos220   | 220                | Malloa154    | 154           | SanPedro110     | 110           |
| Ciruelos500   | 500                | Miraflor110  | 110           | Sauzal110       | 110           |
| CNavia110     | 110                | MonteRed220  | 220           | Sauzal154       | 154           |
| CNavia220     | 220                | Mulchen220   | 220           | SLuis220        | 220           |
| Colbun220     | 220                | Nogales220   | 220           | Talinay220      | 220           |
| Concep154     | 154                | NuevaCard500 | 500           | Teno154         | 154           |
| Concep220     | 220                | NuevaDALm220 | 220           | Tinguiriri220   | 220           |
| CPinto220     | 220                | NuevaMait500 | 500           | Tinguiririca154 | 154           |
| Cumbre220     | 220                | NuevaPAzu500 | 500           | Valdivia220     | 220           |
| Cumbre500     | 500                | Ochagavia110 | 110           | Ventanas110     | 110           |
| DAlmagro220   | 220                | Paine154     | 154           |                 |               |

La siguiente tabla muestra la proyección de demanda anual de energía para el SIC al año 2030.

**Tabla 26. Proyección de Demanda SIC**

| Año  | Demanda [GWh] | Tasa crecimiento Energía | Demanda Máxima [MW] <sup>21</sup> |
|------|---------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 2015 | 50.025        | 2,1%                     | 7.138                             |
| 2016 | 51.893        | 3,7%                     | 7.405                             |
| 2017 | 53.787        | 3,6%                     | 7.675                             |
| 2018 | 56.704        | 5,4%                     | 8.091                             |
| 2019 | 59.348        | 4,7%                     | 8.469                             |
| 2020 | 62.753        | 5,7%                     | 8.955                             |
| 2021 | 66.166        | 5,4%                     | 9.441                             |
| 2022 | 70.459        | 6,5%                     | 10.054                            |
| 2023 | 73.278        | 4,0%                     | 10.456                            |
| 2024 | 76.209        | 4,0%                     | 10.875                            |
| 2025 | 79.257        | 4,0%                     | 11.310                            |
| 2026 | 82.427        | 4,0%                     | 11.762                            |
| 2027 | 84.900        | 3,0%                     | 12.115                            |
| 2028 | 87.447        | 3,0%                     | 12.478                            |
| 2029 | 90.071        | 3,0%                     | 12.853                            |
| 2030 | 92.773        | 3,0%                     | 13.238                            |

La siguiente tabla muestra las características principales de las líneas de transmisión existentes que han sido modeladas en el SIC. Los valores para las capacidades en el modelo fueron usados considerando criterio de operación N-1 en el sistema troncal (donde corresponda), además de aplicación de EDAG que permite la operación con criterio N de algunos circuitos.

---

<sup>21</sup> Factor de carga de 80%

**Tabla 27. Características de líneas de transmisión del SIC**

| Tramo de Línea |             | R (%) | X (%) | Capacidad<br>[MW] | Estado<br>Circuito |
|----------------|-------------|-------|-------|-------------------|--------------------|
| De Barra       | A Barra     |       |       |                   |                    |
| DAlmagro220    | CPinto220   | 1,49  | 5,86  | 197               | Existente          |
| CPinto220      | SAndres220  | 0,93  | 3,72  | 197               | Existente          |
| SAndres220     | Cardones220 | 0,62  | 2,47  | 197               | Existente          |
| Cardones220    | Maitenci220 | 0,91  | 3,67  | 630               | Existente          |
| Cardones220    | Cardones110 | 0,14  | 5,94  | 225               | Existente          |
| Cardones110    | Maitenci110 | 36,57 | 50,91 | 46                | Existente          |
| Maitenci220    | Maitenci110 | 0,17  | 7,61  | 180               | Existente          |
| Maitenci220    | PColorad220 | 1,14  | 4,55  | 394               | Existente          |
| PColorad220    | PAzucar220  | 0,85  | 3,40  | 394               | Existente          |
| Maitenci110    | PAzucar110  | 47,92 | 63,01 | 79                | Existente          |
| PAzucar220     | PAzucar110  | 0,09  | 4,19  | 320               | Existente          |
| PAzucar220     | MRedon220   | 2,09  | 8,16  | 224               | Existente          |
| MRedon220      | LPalmas220  | 1,17  | 4,57  | 224               | Existente          |
| PAzucar220     | Arrayan220  | 1,48  | 5,81  | 224               | Existente          |
| Arrayan220     | Talinay220  | 0,67  | 2,63  | 224               | Existente          |
| Talinay220     | LPalmas220  | 0,89  | 3,49  | 224               | Existente          |
| LPalmas220     | LVilos220   | 0,72  | 2,82  | 448               | Existente          |
| LVilos220      | Nogales220  | 0,99  | 3,95  | 448               | Existente          |
| Nogales220     | Quillota220 | 0,30  | 1,20  | 448               | Existente          |
| Nogales220     | Polpaico220 | 0,10  | 1,48  | 1595              | Existente          |
| Quillota220    | Polpaico220 | 0,10  | 1,21  | 1200              | Existente          |
| Quillota220    | SLuis220    | 0,01  | 0,19  | 1973              | Existente          |
| SLuis220       | ASanta220   | 0,32  | 5,11  | 450               | Existente          |
| Quillota220    | Quillota110 | 0,05  | 4,68  | 300               | Existente          |
| ASanta220      | ASanta110   | 0,03  | 2,10  | 300               | Existente          |
| Quillota110    | SPedro110   | 0,08  | 4,79  | 300               | Existente          |
| ASanta110      | Miraflor110 | 0,13  | 0,93  | 284               | Existente          |
| SPedro110      | Miraflor110 | 2,69  | 4,55  | 114               | Existente          |
| Ventanas110    | SPedro110   | 1,26  | 4,90  | 236               | Existente          |
| Ventanas110    | Miraflor110 | 1,22  | 5,38  | 300               | Existente          |
| SPedro110      | LVegas110   | 0,70  | 4,53  | 300               | Existente          |
| LVegas110      | CNavia110   | 2,87  | 12,01 | 300               | Existente          |
| Polpaico500    | Polpaico220 | 0,00  | 1,01  | 1500              | Existente          |
| Polpaico220    | Lampa220    | 0,175 | 0,70  | 620               | Existente          |
| Lampa220       | CNavia220   | 0,14  | 0,55  | 620               | Existente          |
| Polpaico220    | Salto220    | 0,18  | 3,12  | 800               | Existente          |

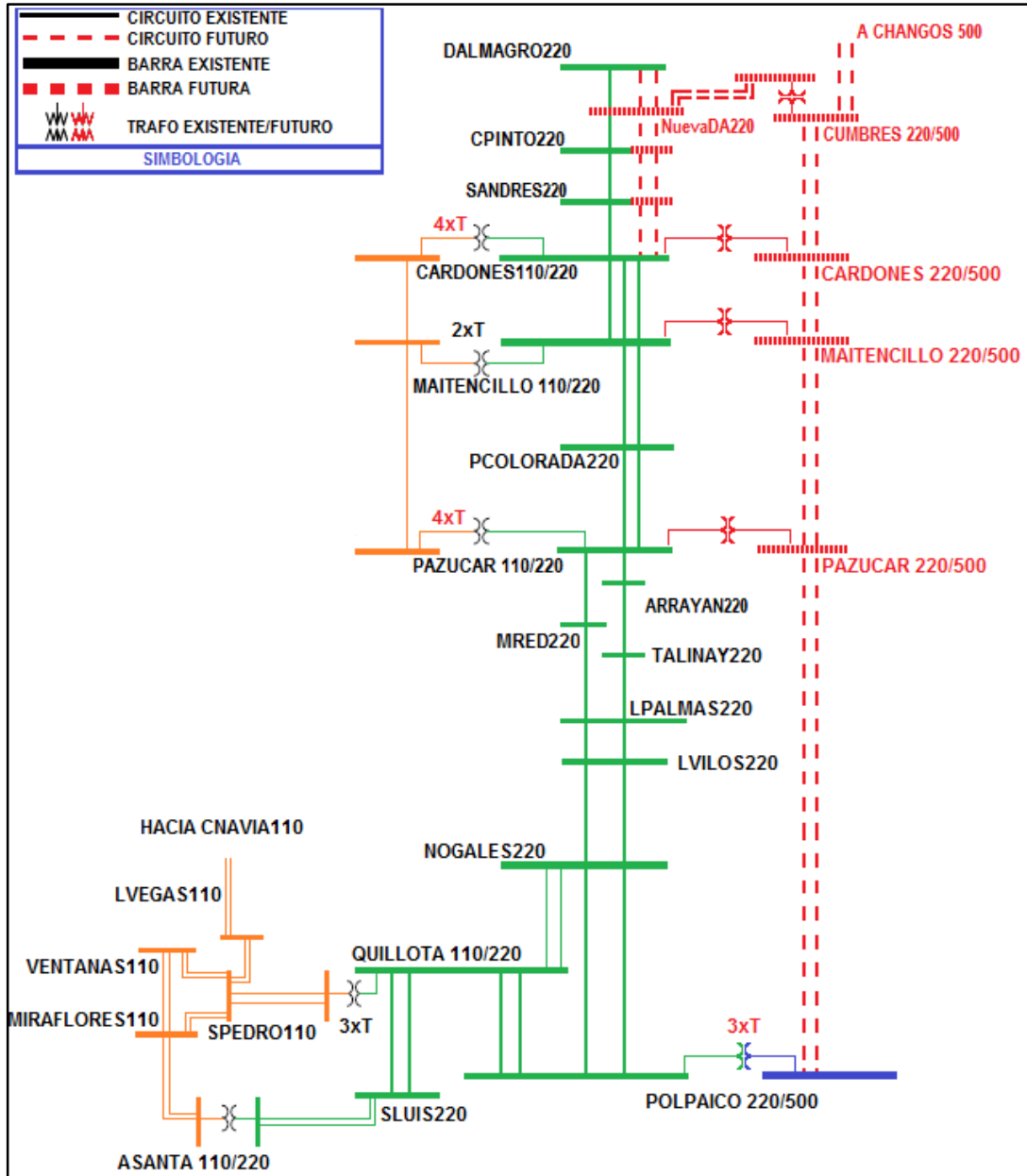


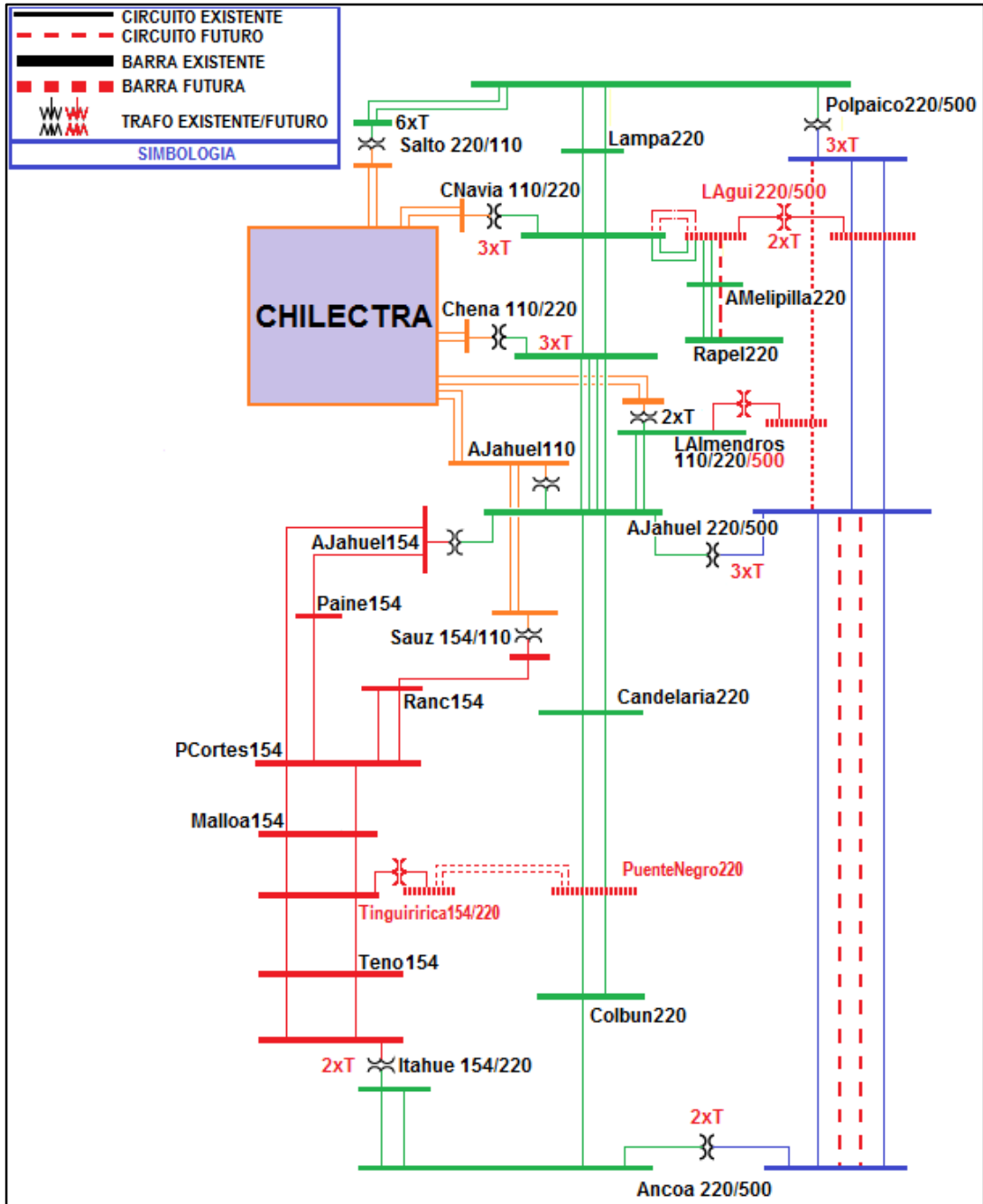
|               |               |      |       |      |           |
|---------------|---------------|------|-------|------|-----------|
| Salto220      | Salto110      | 0,01 | 1,49  | 800  | Existente |
| CNavia220     | Chena220      | 0,12 | 0,46  | 510  | Existente |
| CNavia220     | CNavia110     | 0,01 | 1,53  | 775  | Existente |
| Chena220      | Chena110      | 0,02 | 1,32  | 800  | Existente |
| CNavia220     | AMelipilla220 | 0,61 | 2,37  | 394  | Existente |
| AMelipilla220 | Rapel220      | 0,57 | 2,22  | 394  | Existente |
| CNavia110     | Chena110      | 0,48 | 1,82  | 254  | Existente |
| Salto110      | CNavia110     | 1,32 | 4,52  | 622  | Existente |
| LAlmend220    | LAlmend110    | 0,03 | 2,62  | 400  | Existente |
| LAlmend220    | AJahuel220    | 0,25 | 1,74  | 415  | Existente |
| Salto110      | LAlmend110    | 0,30 | 1,98  | 546  | Existente |
| LAlmend110    | Florida110    | 0,96 | 2,99  | 232  | Existente |
| AJahuel110    | Florida110    | 0,68 | 2,87  | 622  | Existente |
| AJahuel110    | Buin110       | 0,03 | 2,64  | 400  | Existente |
| Buin110       | LoEspejo110   | 0,49 | 2,37  | 320  | Existente |
| LoEspejo110   | Chena110      | 0,03 | 0,15  | 622  | Existente |
| Ochagavia110  | LoEspejo110   | 0,15 | 0,76  | 622  | Existente |
| Florida110    | Ochagavia110  | 0,57 | 2,15  | 270  | Existente |
| AJahuel220    | Chena220      | 0,20 | 0,95  | 1050 | Existente |
| Polpaico500   | AJahuel500    | 0,04 | 0,42  | 3088 | Existente |
| AJahuel500    | AJahuel220    | 0,01 | 1,08  | 1500 | Existente |
| AJahuel220    | AJahuel154    | 0,02 | 3,36  | 300  | Existente |
| AJahuel110    | Sauzal110     | 3,64 | 10,62 | 152  | Existente |
| AJahuel220    | Candelaria220 | 0,18 | 1,51  | 600  | Existente |
| Candelaria220 | Colbun220     | 0,80 | 2,77  | 900  | Existente |
| Colbun220     | Ancoa220      | 0,00 | 0,04  | 600  | Existente |
| AJahuel500    | Ancoa500      | 0,27 | 1,41  | 1544 | Existente |
| AJahuel154    | Paine154      | 0,61 | 2,83  | 182  | Existente |
| Paine154      | PCortes154    | 1,45 | 6,90  | 198  | Existente |
| AJahuel154    | PCortes154    | 2,20 | 9,89  | 182  | Existente |
| PCortes154    | Rancagua154   | 0,42 | 1,69  | 254  | Existente |
| Rancagua154   | Sauzal154     | 0,81 | 9,27  | 108  | Existente |
| Sauzal154     | Sauzal110     | 0,02 | 2,94  | 120  | Existente |
| PCortes154    | Malloa154     | 0,52 | 2,47  | 396  | Existente |
| Malloa154     | Tinguiriri154 | 0,34 | 1,61  | 396  | Existente |
| Tinguiriri154 | Teno154       | 0,61 | 2,89  | 364  | Existente |
| Tinguiriri154 | LaHiguera154  | 0,64 | 3,69  | 798  | Existente |
| Teno154       | Itahue154     | 0,63 | 2,98  | 364  | Existente |
| Itahue220     | Itahue154     | 0,02 | 3,37  | 300  | Existente |

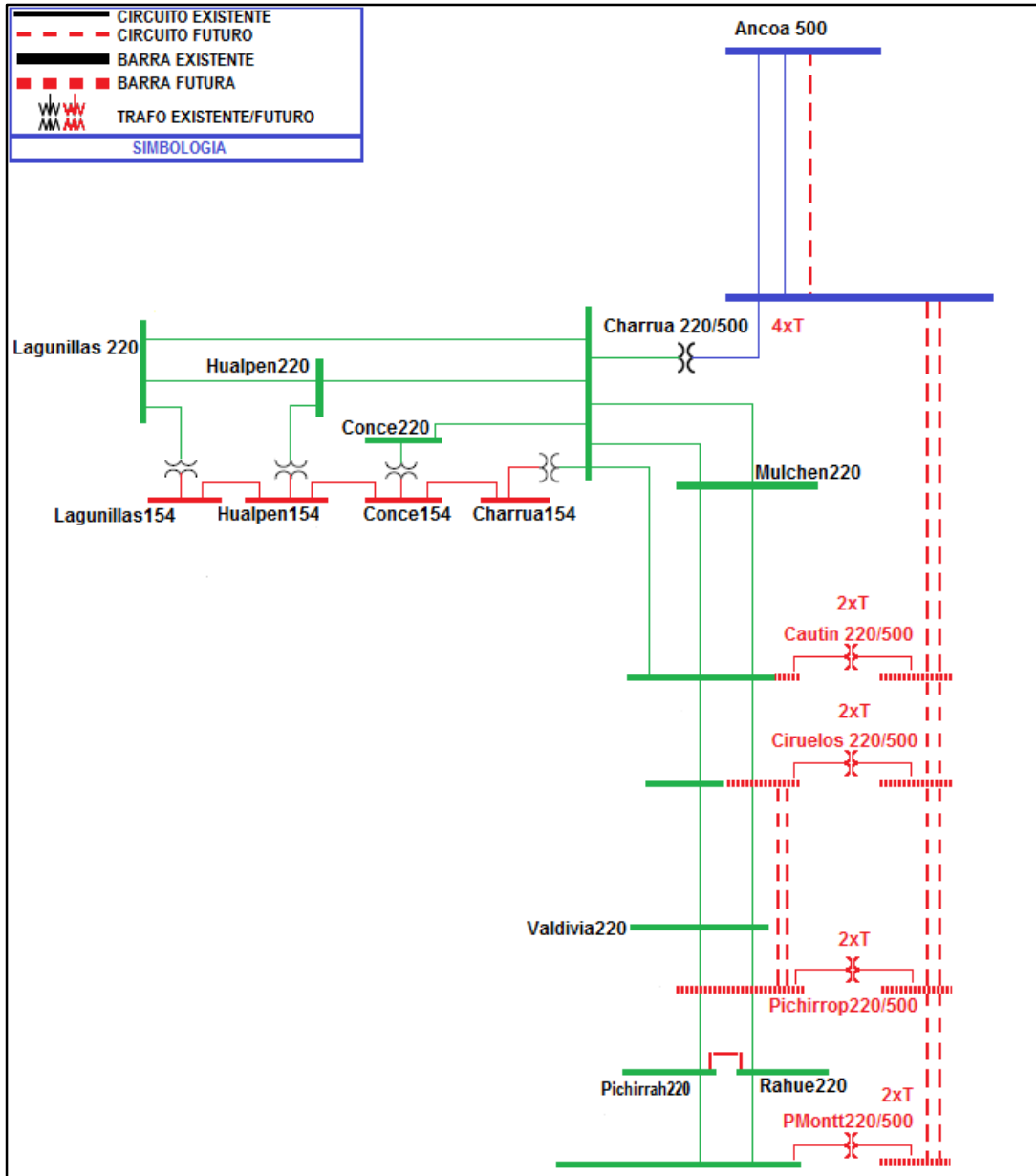
|               |               |      |       |      |           |
|---------------|---------------|------|-------|------|-----------|
| Itahue220     | Ancoa220      | 0,33 | 2,58  | 400  | Existente |
| Ancoa500      | Ancoa220      | 0,01 | 2,18  | 750  | Existente |
| Ancoa500      | Charrua500    | 0,10 | 0,62  | 1500 | Existente |
| Charrua500    | Charrua220    | 0,00 | 0,67  | 2100 | Existente |
| Charrua220    | Concep220     | 1,48 | 5,74  | 260  | Existente |
| Charrua220    | Hualpen220    | 1,33 | 6,81  | 227  | Existente |
| Charrua220    | Charrua154    | 0,01 | 2,79  | 390  | Existente |
| Charrua220    | Lagunillas220 | 1,31 | 6,65  | 150  | Existente |
| Charrua220    | Cautin220     | 3,12 | 15,99 | 264  | Existente |
| Charrua220    | Mulchen220    | 0,37 | 2,17  | 457  | Existente |
| Charrua154    | Concep154     | 3,99 | 12,49 | 168  | Existente |
| Lagunillas220 | Lagunillas154 | 0,01 | 2,79  | 390  | Existente |
| Hualpen220    | Lagunillas220 | 0,32 | 1,62  | 276  | Existente |
| Concep220     | Concep154     | 0,01 | 3,63  | 300  | Existente |
| Hualpen220    | Hualpen154    | 0,02 | 3,36  | 300  | Existente |
| Hualpen154    | Lagunillas154 | 0,88 | 3,33  | 215  | Existente |
| Hualpen154    | Concep154     | 0,48 | 1,43  | 298  | Existente |
| Mulchen220    | Cautin220     | 0,66 | 3,82  | 457  | Existente |
| Cautin220     | Ciruelos220   | 2,22 | 8,77  | 193  | Existente |
| Cautin220     | Valdivia220   | 3,91 | 12,50 | 145  | Existente |
| Ciruelos220   | Valdivia220   | 0,88 | 3,47  | 193  | Existente |
| Valdivia220   | Pichirrah220  | 3,28 | 8,75  | 145  | Existente |
| Valdivia220   | Rahue220      | 2,20 | 8,70  | 193  | Existente |
| Rahue220      | PMontt220     | 2,27 | 9,05  | 193  | Existente |
| Pichirrah220  | PMontt220     | 3,38 | 9,10  | 145  | Existente |
| DAlmagro220   | Cardones220   | 1,52 | 5,94  | 290  | Futura    |
| DAlmagro220   | NuevaDA220    | 0,03 | 0,14  | 777  | Futura    |
| NuevaDA220    | CPinto220     | 0,46 | 1,82  | 777  | Futura    |
| Changos500    | Cumbres500    | 0,17 | 0,72  | 1500 | Futura    |
| Cumbres500    | Cumbres220    | 0,01 | 1,82  | 750  | Futura    |
| Cumbres220    | NuevaDA220    | 0,06 | 0,67  | 600  | Futura    |
| Cumbres500    | NuevaCar500   | 0,08 | 0,44  | 1500 | Futura    |
| NuevaCar500   | Cardones220   | 0,01 | 1,82  | 750  | Futura    |
| NuevaCar500   | NuevaMai500   | 0,06 | 0,71  | 1500 | Futura    |
| NuevaMai500   | Maitenci220   | 0,01 | 1,82  | 750  | Futura    |
| NuevaMai500   | NuevaPAz500   | 0,08 | 0,37  | 1500 | Futura    |
| NuevaPAz500   | Polpaico500   | 0,19 | 1,34  | 1500 | Futura    |
| Polpaico500   | LoAguirre500  | 0,03 | 0,35  | 1518 | Futura    |
| LoAguirre500  | AJahuel500    | 0,05 | 0,53  | 1940 | Futura    |

|               |               |      |      |      |        |
|---------------|---------------|------|------|------|--------|
| LoAguirre500  | LoAguirre220  | 0,01 | 2,18 | 750  | Futura |
| CNavia220     | LoAguirre220  | 0,04 | 0,42 | 1500 | Futura |
| LoAguirre220  | AMelipilla220 | 0,87 | 3,39 | 394  | Futura |
| Polpaico500   | LAlmend500    | 0,06 | 0,72 | 1800 | Futura |
| LAlmend500    | LAlmend220    | 0,01 | 2,18 | 750  | Futura |
| LAlmend500    | AJahuel500    | 0,04 | 0,44 | 1800 | Futura |
| Candelaria220 | PteNegro220   | 0,66 | 5,62 | 900  | Futura |
| PteNegro220   | Colbun220     | 1,11 | 9,45 | 900  | Futura |
| Tinguiriri220 | PteNegro220   | 0,18 | 1,02 | 1138 | Futura |
| PteNegro220   | LaHiguera220  | 0,27 | 1,56 | 1138 | Futura |
| Tinguiriri220 | Tinguiriri154 | 0,02 | 3,36 | 300  | Futura |
| Charrua500    | Cautin500     | 0,04 | 0,25 | 1500 | Futura |
| Cautin500     | Cautin220     | 0,00 | 1,14 | 1500 | Futura |
| Cautin500     | Ciruelos500   | 0,02 | 0,15 | 1500 | Futura |
| Ciruelos500   | Ciruelos220   | 0,00 | 1,14 | 1500 | Futura |
| Ciruelos500   | Pichirrop500  | 0,02 | 0,12 | 1500 | Futura |
| Ciruelos220   | Pichirrop220  | 0,76 | 3,04 | 580  | Futura |
| Valdivia220   | Pichirrop220  | 0,69 | 2,32 | 290  | Futura |
| Pichirrop220  | Pichirrah220  | 1,61 | 4,29 | 145  | Futura |
| Pichirrop220  | Rahue220      | 1,08 | 4,26 | 193  | Futura |
| Pichirrop500  | Pichirrop220  | 0,00 | 1,14 | 1500 | Futura |
| Pichirrop500  | PMontt500     | 0,03 | 0,19 | 1500 | Futura |
| PMontt500     | PMontt220     | 0,00 | 1,14 | 1500 | Futura |

Ilustración 29. Diagrama Unilineal del SIC







### 8.3. Características de los recursos hídricos

#### 8.3.1. SIC

##### 8.3.1.1 Cuencas hidrográficas y convenios de riego

Las cuencas hidrográficas y convenios de riego definidos para este trabajo son las consideradas por los Informes de Precio de Nudo de la CNE [27].

##### 8.3.1.2 Energía de Afluentes Anual del Sistema

La estadística hidrológica considerada corresponde a las 30 hidrologías de los años 1984 a 2013 para todos los embalses y centrales de pasada modelados.

##### 8.3.1.3 Cota de embalses

La siguiente tabla muestra las cotas iniciales utilizadas.

**Tabla 28. Cotas de los embalses**

| Embalse      | Nivel de cota [m] |
|--------------|-------------------|
| Canutillar   | 222,0             |
| Cipreses     | 1304,5            |
| Colbún       | 423,4             |
| El Toro      | 1317,6            |
| Laguna Maule | 2157,9            |
| Pehuenche    | 644,2             |
| Ralco        | 692,3             |
| Rapel        | 102,2             |

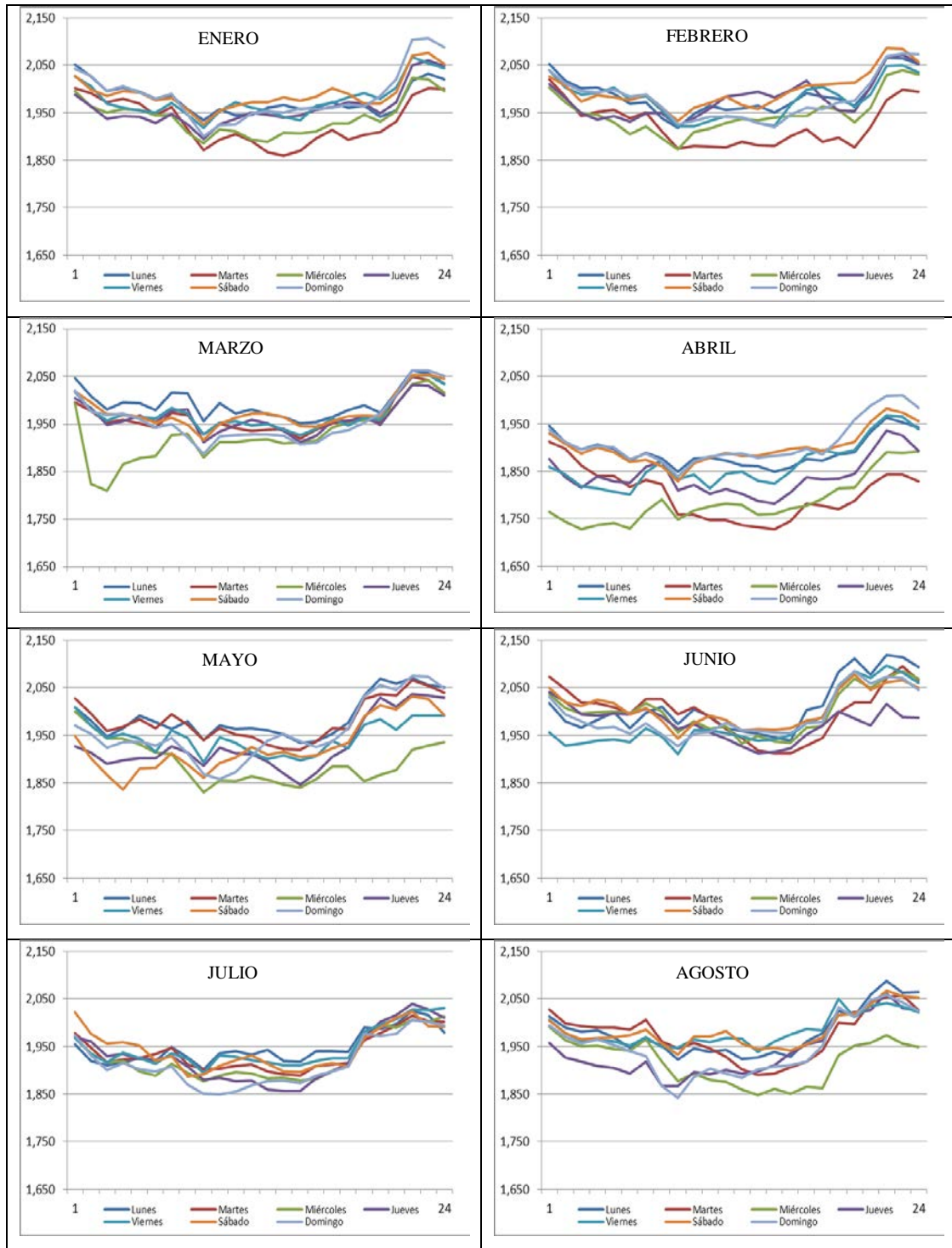
### 8.4. Curvas de Duración de Demanda

#### 8.4.1. SING

##### 8.4.1.1 Curva de duración de demanda diaria

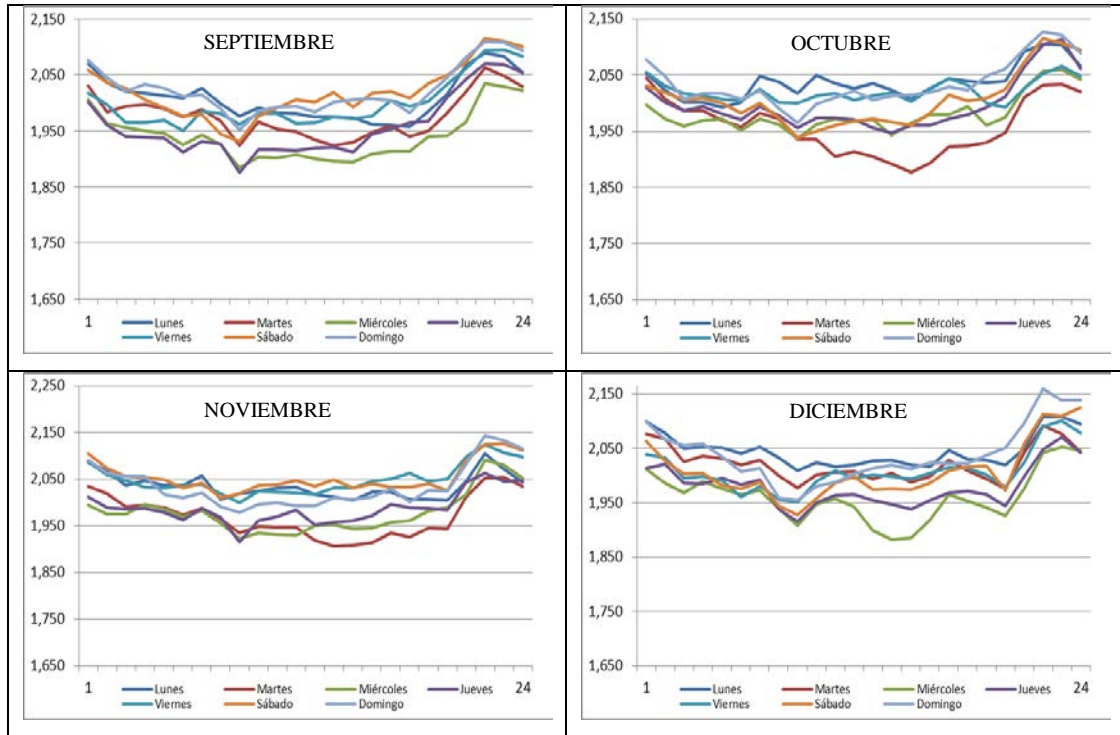
En el SING (independiente del mes) el perfil de generación horario es relativamente plano (independiente del día) con una punta entre las 20 y 24 horas (dependiendo del mes).

**Ilustración 30. Curva de duración de demanda diaria<sup>22</sup> SING año 2013 [MW vs hora]**



<sup>22</sup> Promedio mensual.

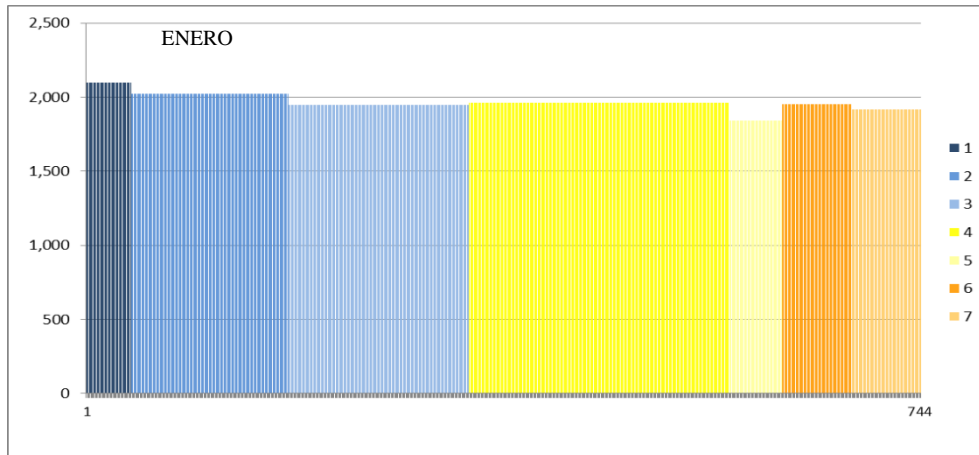


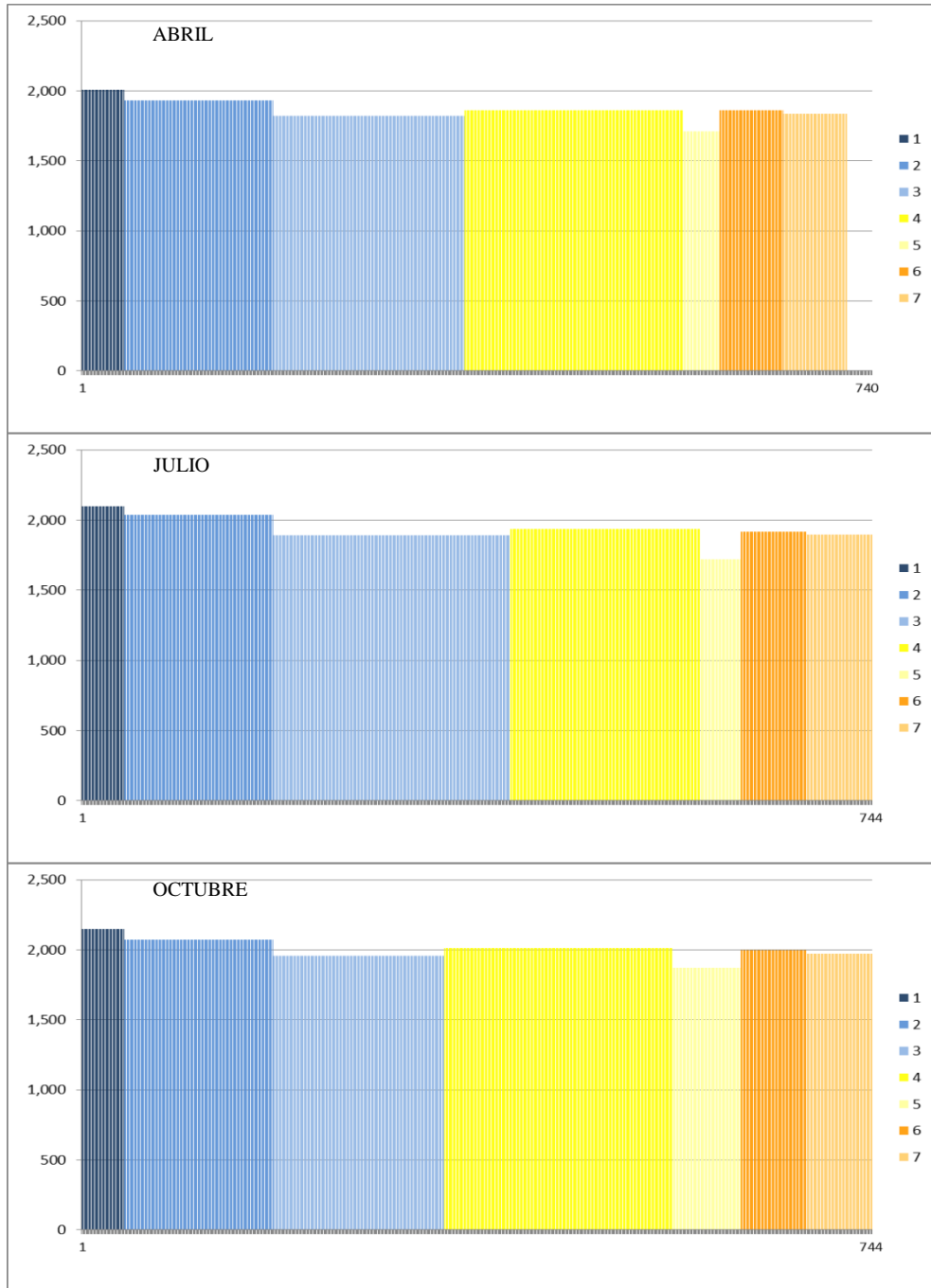


#### 8.4.1.2 Definición de Bloques SING para la curva de duración de demanda mensual

A continuación se entrega la definición de bloques para el SING para 4 meses (1 por estación).

**Ilustración 31. Definición de bloques – SING (MW vs horas)**



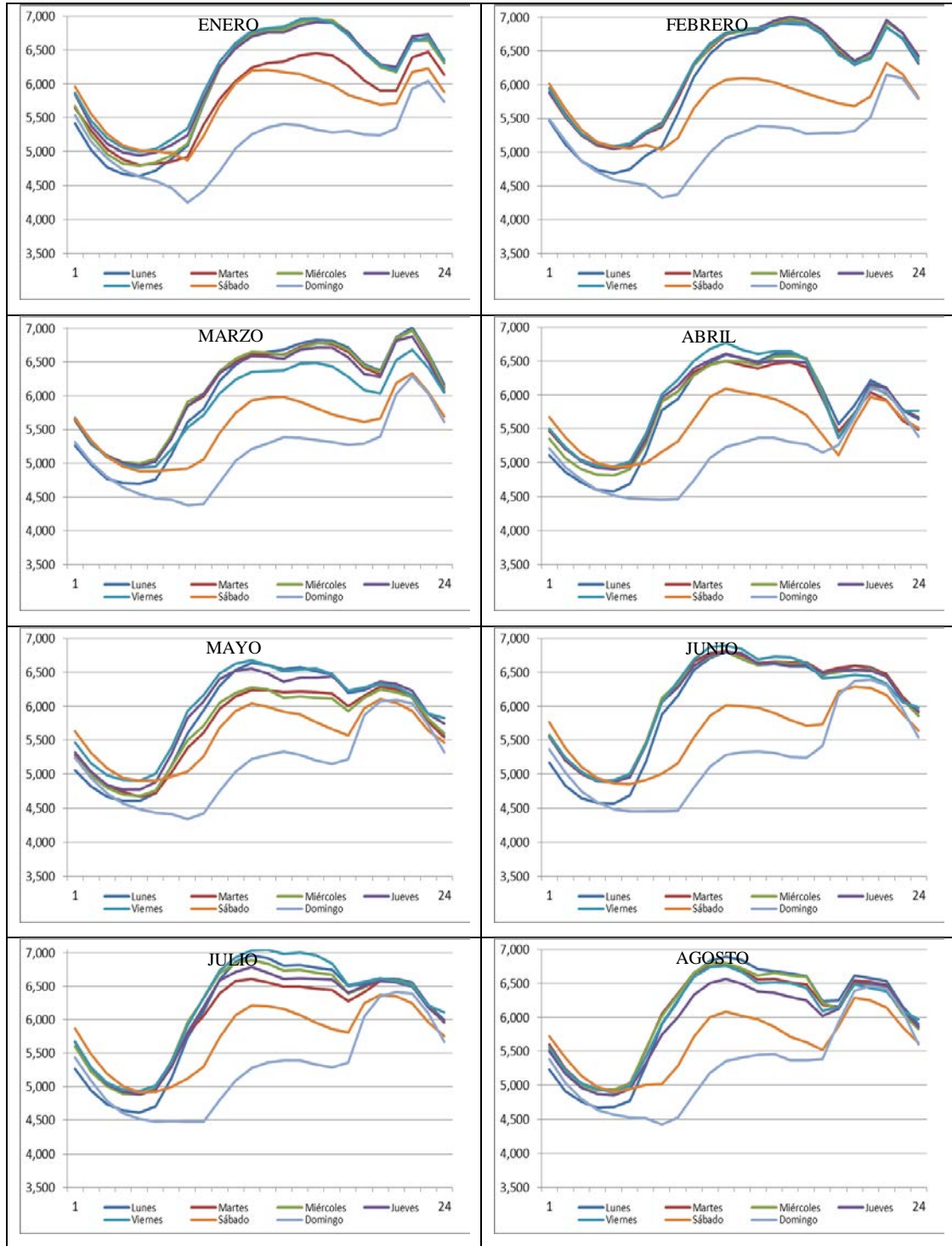


## 8.4.2. SIC

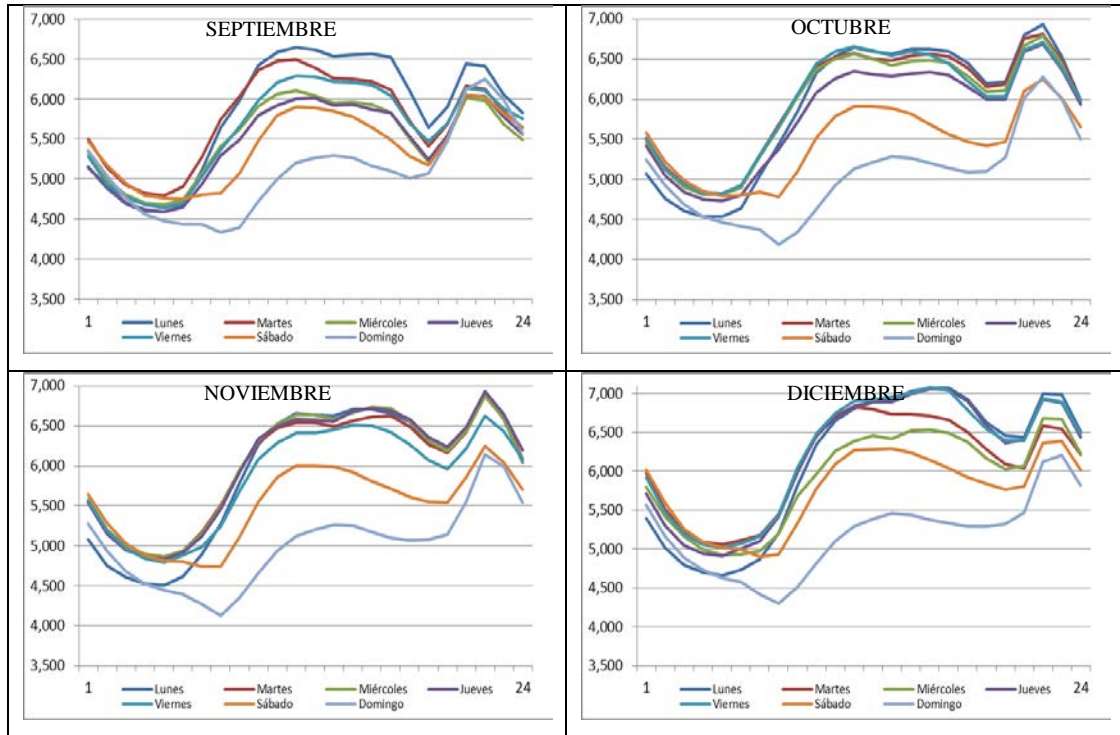
### 8.4.2.1 Curva de duración de demanda diaria

Existe una gran diferencia en magnitud de demanda durante el día. Además, existe una gran diferencia entre los días de semana y los fines de semana.

**Ilustración 32. Curva de duración de demanda diaria<sup>23</sup> SIC año 2013 [MW vs hora]**

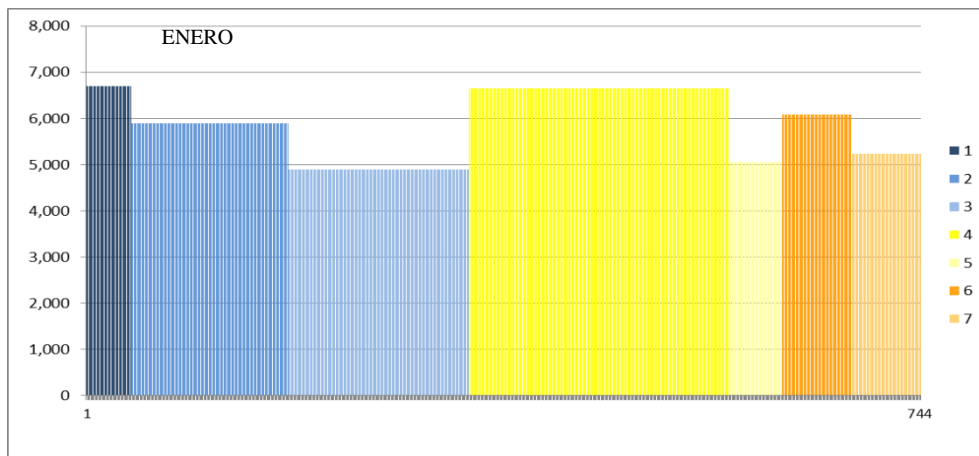


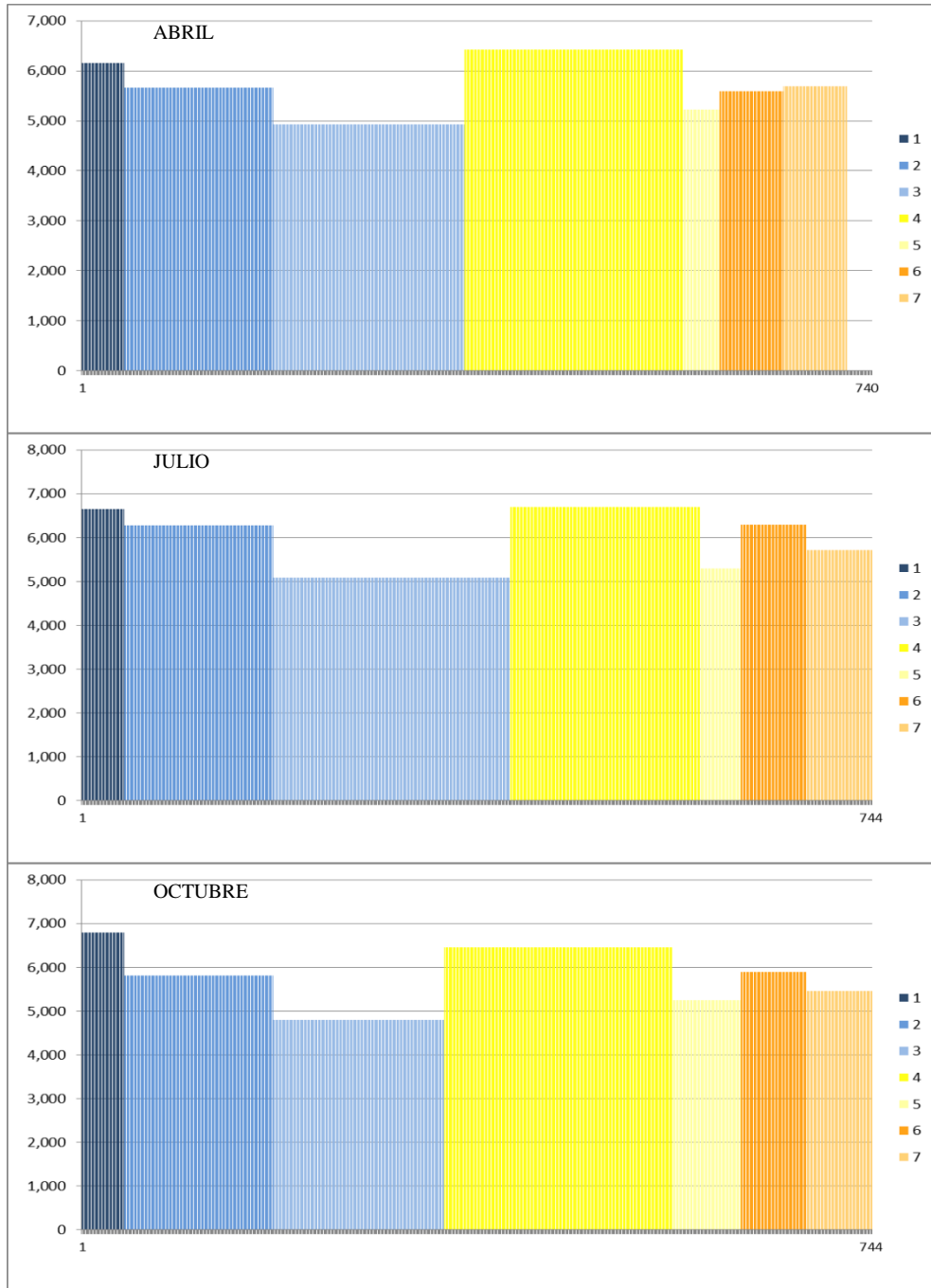
<sup>23</sup> Promedio mensual.



8.4.2.2 Definición de Bloques SIC para la curva de duración de demanda mensual

Ilustración 33. Definición de bloques – SIC (MW vs horas)





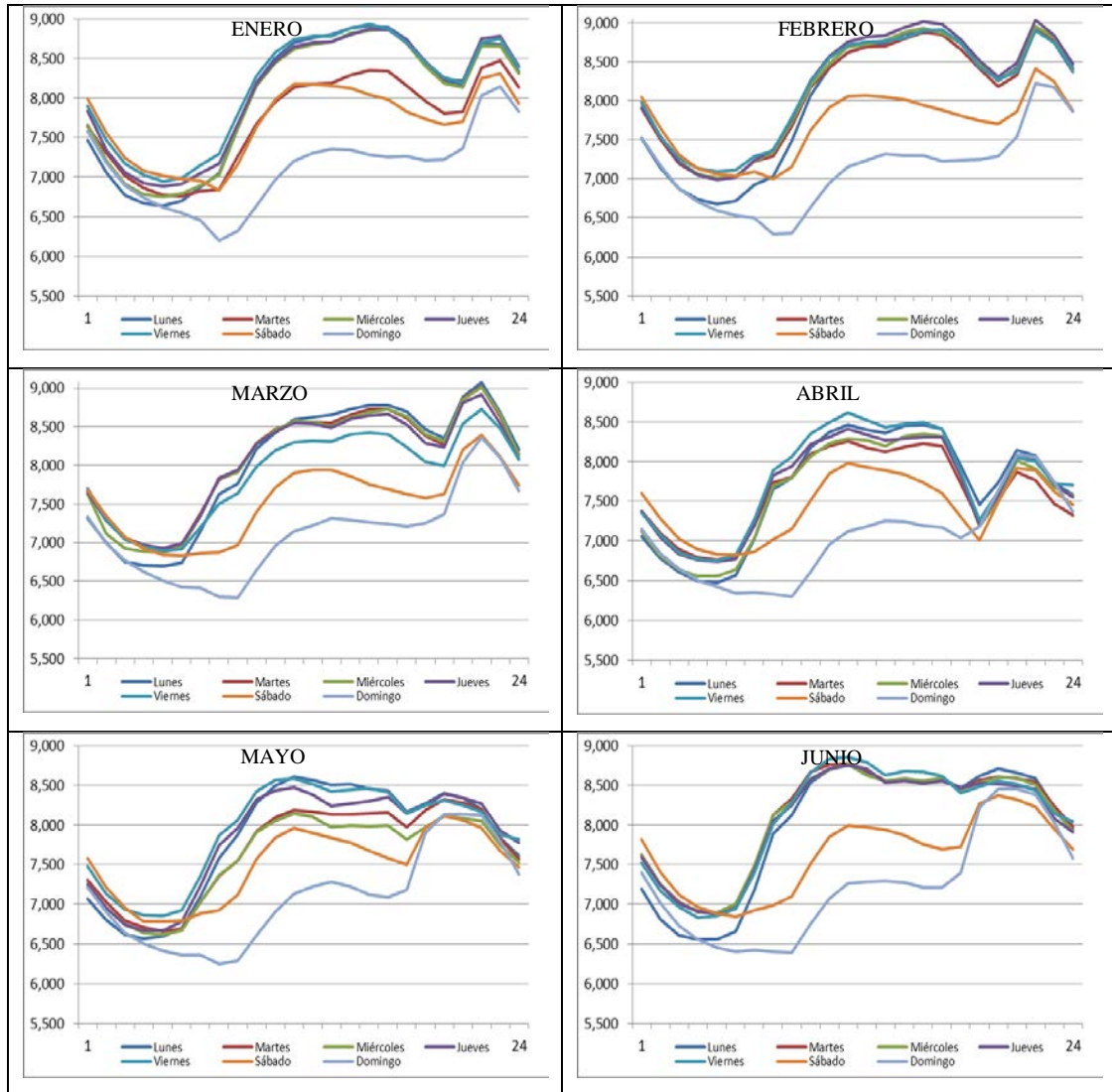
### 8.4.3. Interconexión SING - SIC

#### 8.4.3.1 Simplificación

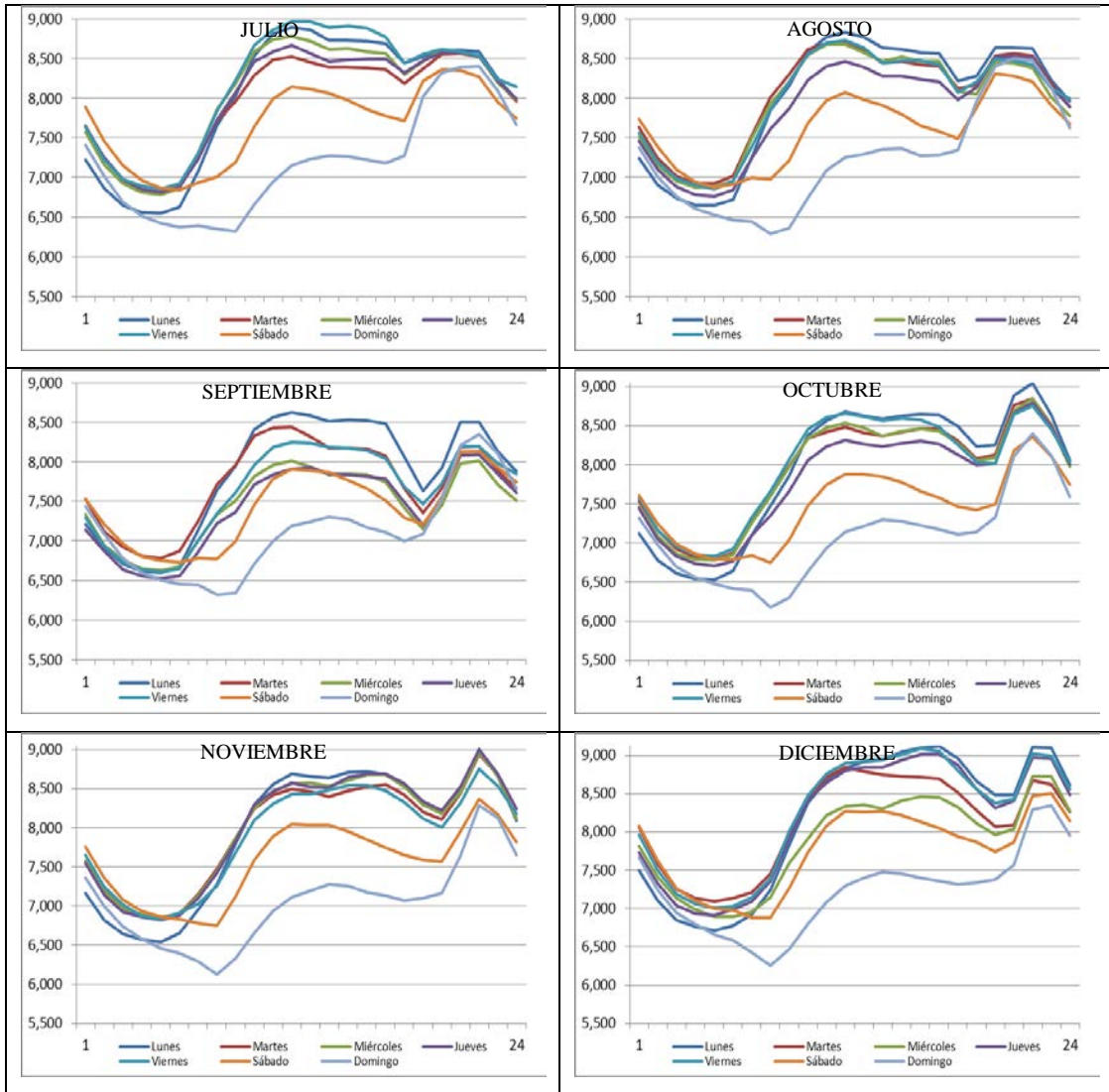
A partir de la interconexión de los sistemas, la curva de duración anual estará basada en la demanda agregada anual del SING más el SIC ocurrida durante el año 2013.

### 8.4.3.2 Curva de duración de demanda diaria

**Ilustración 34. Curva de duración de demanda diaria<sup>24</sup> SING-SIC año 2013 [MW vs hora]**

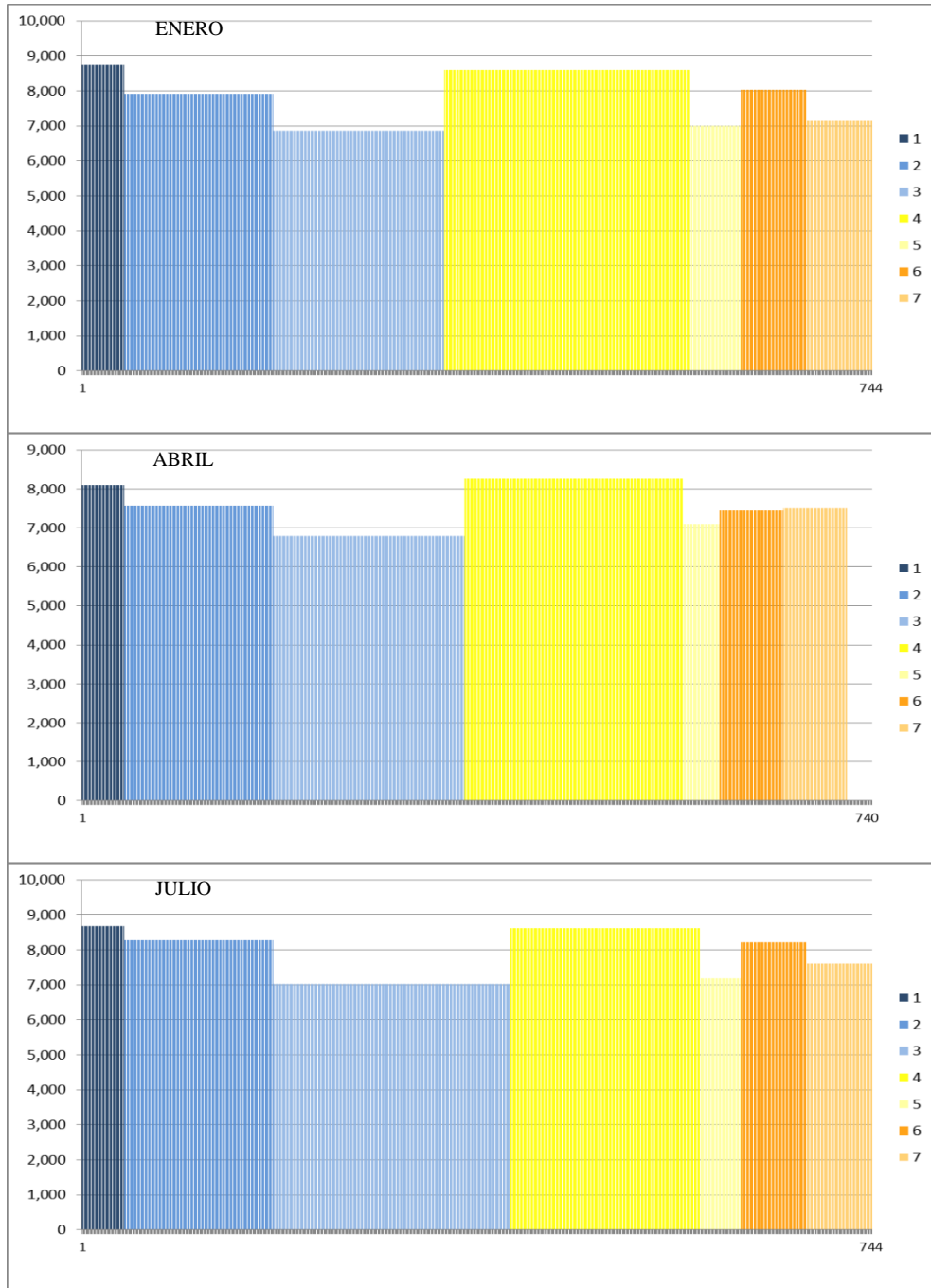


<sup>24</sup> Promedio mensual.

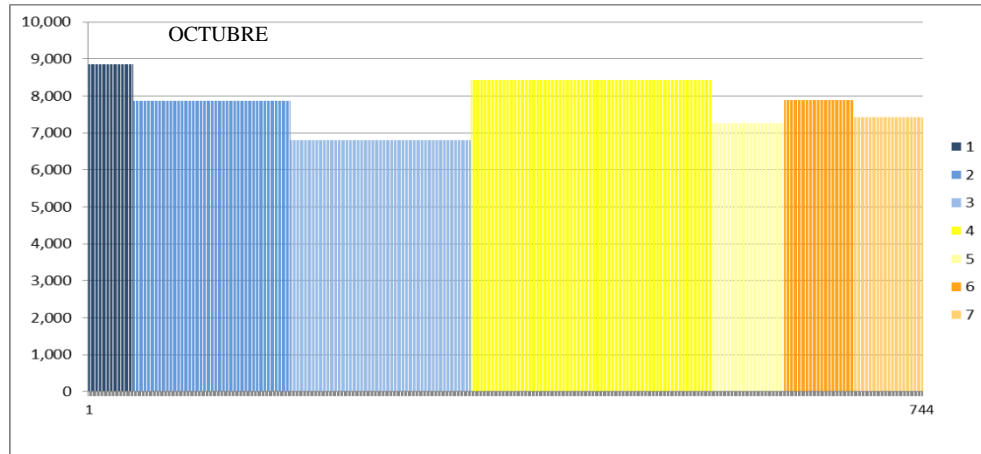


### 8.4.3.3 Definición de Bloques SING-SIC para la curva de duración de demanda mensual

Ilustración 35. Definición de bloques – SING-SIC (MW vs horas)







## 8.5. Proyección de precios de los combustibles

### 8.5.1. General

Los precios de combustible utilizados corresponden a los determinados en el Reporte del Banco Mundial Abril 2015 [31]. La siguiente tabla muestra los precios de combustible utilizados tanto en el SING como en el SIC.

**Tabla 29. Proyección de Precios de Combustibles SING y SIC (US\$ 2015)**

| Año       | Crudo Brent | Carbón Térmico <sup>25</sup> | GNL (HH)   | GNL (Chile) |
|-----------|-------------|------------------------------|------------|-------------|
|           | US\$/BBL    | US\$/Ton                     | US\$/MMBtu | US\$/MMBtu  |
| 2015      | 53,9        | 59,8                         | 4,1        | 10,1        |
| 2016      | 56,7        | 61,1                         | 4,2        | 10,2        |
| 2017      | 59,6        | 62,5                         | 4,4        | 10,5        |
| 2018      | 62,6        | 64,1                         | 4,6        | 10,8        |
| 2019      | 65,8        | 65,6                         | 4,7        | 10,9        |
| 2020      | 69,2        | 67,2                         | 4,9        | 11,2        |
| 2021      | 72,8        | 68,9                         | 5,1        | 11,4        |
| 2022      | 76,5        | 70,6                         | 5,4        | 11,7        |
| 2023      | 80,4        | 72,2                         | 5,6        | 12,0        |
| 2024      | 84,6        | 73,9                         | 5,8        | 12,2        |
| 2025-2030 | 88,9        | 75,6                         | 6,0        | 12,5        |

<sup>25</sup> [7000 kcal/kg].

## **8.6. Parámetros Económicos**

### **8.6.1. Costos de Inversión y Operación por tipo de Central de Generación**

Los costos de inversión por tecnología de generación corresponden a los determinados en el Informe Precio de Nudo de Abril de 2015 [27]. Para el Costo de Operación, Mantenimiento y Administración de las instalaciones de generación, se utilizó como valor fijo equivalente al 2% del Costo de Inversión de cualquier tipo de Central de Generación.

### **8.6.2. Costo de Racionamiento, Nivel de Precios y Tasa de Actualización**

El costo de racionamiento es el establecido en el Informe Precio de Nudo de Abril de 2015 [27]. El nivel de precios corresponde a US\$ reales de Abril de 2015. La tasa de descuento utilizada es de 9 %.