

# OPTGEN

## Manual del usuario

VERSIÓN 7.4



PSR

## Tabla de contenido

1	Notas sobre la instalación y manipulación de datos.....	4
1.1	Instalación .....	4
1.2	Espacio necesario para la instalación.....	4
2	Primeros pasos.....	5
2.1	La apertura de la interfaz gráfica del OptGen .....	5
2.2	Selección del directorio.....	5
2.3	La creación de un nuevo caso.....	5
3	Visión general .....	6
3.1	Organización de interfaz .....	6
3.2	Cómo navegar .....	8
4	Datos de entrada.....	10
4.1	Cronograma de desembolsos.....	10
4.2	Datos de proyecto .....	10
4.3	Plan de expansión definido por el usuario .....	20
4.4	Restricciones de energía / potencia firme.....	22
4.5	Restricciones adicionales mínimas y máximas.....	27
4.6	Escenarios hidrológicos.....	28
4.7	Calculadora de día típico.....	29
5	Parámetros del modelo.....	31
5.1	Opciones de estudio.....	31
5.2	Selección de escenarios .....	34
5.3	Selección de proyectos.....	34
5.4	Opciones de ejecución.....	34
6	El Módulo Gráfico.....	39
6.1	Introducción .....	39
6.2	Opciones generales .....	39
6.3	Selección de etapas.....	40
6.4	Selección de bloques .....	40
6.5	Selección de series.....	40
6.6	Títulos de los ejes (opcional).....	40

6.7 Selección de variables, agentes y macro agentes.....	40
6.8 Filtros.....	41
7 Archivos de salida del modelo.....	42
7.1 Archivos de salida en planilla.....	42
7.2 Archivos de salida adicionales.....	42

## 1 NOTAS SOBRE LA INSTALACIÓN Y MANIPULACIÓN DE DATOS

### 1.1 Instalación

El usuario puede instalar el modelo OptGen descargándolo directamente desde nuestro sitio [www.psr-inc.com](http://www.psr-inc.com). En el menú situado en la parte superior, seleccione “Software> OptGen” para abrir la página donde se encuentra la última versión disponible del modelo en el menú a la derecha. Presione sobre la versión y siga los pasos de la instalación. El usuario también puede guardar el archivo en el equipo para una instalación posterior.

Tenga en cuenta que el programa debe ser instalado usando derechos de administrador para poder instalar correctamente todos los archivos necesarios.

En el momento de la instalación, se requiere una contraseña. Esta contraseña se envía por correo electrónico a los usuarios licenciados cuando se libera una nueva versión.

Las nuevas características y correcciones del modelo se describen en el archivo **Changelog**. Se puede acceder desde la interfaz gráfica de OptGen en la opción “Ayuda> Lista de alteraciones detalladas” del menú principal. Por favor, lea cuidadosamente antes de usar cada nueva versión del modelo. Los manuales de usuario y metodología del OptGen también se encuentran en la opción “Ayuda”.

Para ejecutar el modelo, se requiere una clave *hard lock* insertada en una de las puertos USB. Esta clave es programada específicamente para cada usuario y se envía en el momento de la adquisición de la licencia.

### 1.2 Espacio necesario para la instalación

OptGen requiere 500 MB de espacio libre en disco para instalar el sistema. Además, los resultados generados por el modelo también pueden ocupar un gran espacio en disco, dependiendo de las dimensiones del estudio de caso.

## **2 PRIMEROS PASOS**

### **2.1 La apertura de la interfaz gráfica del OptGen**

El modelo se inicializa mediante la apertura de la interfaz gráfica del OptGen. Cuando se utiliza la plataforma Windows, se ejecuta el modelo desde el área de trabajo, seleccionando el icono OptGen, o desde el menú “Inicio> Programas> PSR> OptGen”.

### **2.2 Selección del directorio**

Después de abrir la interfaz, el primer paso es elegir el directorio donde se encuentran los datos de entrada. Presione en “Buscar...” para encontrar el directorio elegido. Análogamente al modelo SDDP, OptGen también permite al usuario mantener, en el mismo directorio, los datos de diferentes configuraciones de bloques de demanda. Por esta razón, en esta pantalla, el usuario debe definir el número de bloques y el tipo de etapa (semanal o mensual) para ser considerado.

### **2.3 La creación de un nuevo caso**

Si no hay datos OptGen en el directorio seleccionado, la interfaz crea automáticamente los nuevos datos considerando los valores estándar de los parámetros de ejecución.

### 3 VISIÓN GENERAL

#### 3.1 Organización de interfaz

La interfaz modelo OptGen se divide en dos secciones principales: la barra de herramientas del menú principal y la pantalla principal.















##### 3.1.1 Menú principal





En la parte superior de la pantalla, el usuario encuentra el menú principal (barra de herramientas) que contiene los botones para acceder a las pantallas de edición de datos, de ejecución del modelo y de visualización de salidas. Cada una de las opciones presenta una serie de opciones secundarias que se presentan a continuación (los que no se describen aquí tienen una sección dedicada a su explicación en este documento):

- a) *Archivo*
  - *Guardar*: Guarda los cambios realizados en las opciones de la pantalla principal
  - *Directorio*: Selecciona un nuevo directorio de datos
  - *Compactar datos del caso*: Genera un archivo zip que contiene todos los archivos de datos de entrada OptGen-SDDP
  - *Salir*: Cierra la interfaz
- b) *Editar*
  - SDDP: En una base de datos OptGen-SDDP, todos los datos operativos son manejados por el modelo SDDP, esta opción permite al usuario acceder directamente a la interfaz SDDP y editar los datos operativos
  - [Cronograma de desembolsos](#)
  - [Proyectos](#)
  - [Plan de expansión definido por el usuario](#)
  - [Restricción de energía firme](#)
  - [Restricción de capacidad firme](#)
  - [Restricciones adicionales mínimas y máximas](#)
  - [Escenarios hidrológicos](#)
  - [Calculadora de día típico](#)
- c) *Opciones*
  - *Definir directorios*: Permite al usuario configurar los directorios de instalación para el modelo SDDP y la aplicación MPI
- d) *Ejecutar*
  - *Optimización*: Ejecuta la optimización de la planificación de la expansión
  - *Graficador*: Permite al usuario acceder al [módulo graficador](#) para la visualización de informes de resultados
- e) *Informes*
  - [Informe de ejecución](#)
  - [Plan de expansión óptimo](#)
  - [Plan de expansión detallado](#)
  - [Informe de convergencia](#)
  - [CAPEX de la expansión óptima](#)
  - [O&M fijo de la expansión óptima](#)
  - [Costo promedio de largo plazo](#)

- [Costo marginal de largo plazo](#)
- f) *Herramientas*
- *Activar Dashboard:* Permite la activación de apertura automática del panel *dashboard* después de cada ejecución del modelo.
- g) *Idioma:* Permite al usuario seleccionar el idioma de la interfaz gráfica y de los informes de salida:
- *Inglés*
  - *Español*
  - *Portugués*
- h) *Ayuda:* Proporciona acceso a los siguientes documentos:
- *Lista de alteraciones detalladas:* Archivo que contiene una breve explicación de las últimas modificaciones y mejoras realizadas en el modelo, en general relacionadas con versiones menores del modelo.
  - *Actualizar licencia:* Si el usuario recibe el mensaje de error “Wrong Hard Lock – Error code 0003”, debe utilizar primero esta opción para actualizar el archivo de licencia y ejecutar el modelo nuevamente. Si este mensaje sigue apareciendo, el usuario debe ponerse en contacto con el equipo de soporte del OptGen a través del correo electrónico: [optgen@psr-inc.com](mailto:optgen@psr-inc.com)
  - *Manual de metodología:* Opción para acceder al manual de metodología de OptGen
  - *Manual de usuario:* Opción para acceder al manual del usuario de OptGen

En la segunda línea del menú se encuentran los botones con las opciones más frecuentes, de acuerdo con la tabla a seguir:

Botón	Opción
	Abrir
	Guardar
	SDDP
	Cronograma de desembolsos
	Datos de proyecto
	Plan de expansión definido por el usuario
	Restricción de energía firme
	Restricción de potencia firme
	Restricciones adicionales mínimas y máximas
	Escenarios hidrológicos
	Calculadora de día típico
	Optimización
	Limpiar carpeta del caso
	Graficador

	Abrir Dashboard
	Informes
	Salir
	Ayuda

### 3.1.2 Pantalla principal

La pantalla principal se divide en cuatro secciones:

#### a) *Opciones de estudio*

Constituyen las opciones de ejecución generales de un estudio de la expansión, asociados a los criterios de planificación, horizonte de estudio, parámetros económicos, etc.

#### b) *Selección de escenarios*

Contiene la selección de uno o más [Escenarios de caudales](#) que serán considerados en el estudio y sus probabilidades de ocurrencia correspondientes. Es importante señalar que estos escenarios sólo se consideran si la opción del modelo de operación es “Escenarios” en el campo de “planificación de la expansión” o “simulación del plan de expansión” en la pestaña “Opciones de estudio”.

#### c) *Selección de proyectos*

En esta pestaña se presenta todos los proyectos candidatos que existen en la base de datos OptGen-SDDP. En esta pantalla, el usuario puede (i) visualizar un resumen de las características del proyecto en la parte inferior de la pantalla presionando sobre el proyecto y (ii) seleccionar (o deseleccionar) cada proyecto para ser considerado (o no) en la ejecución corriente del OptGen.

#### d) *Opciones de ejecución*

Contiene la especificación de parámetros de ejecución y de convergencia, y también la selección de los procedimientos heurísticos de solución.

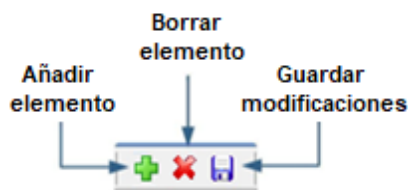
## 3.2 Cómo navegar

### 3.2.1 Abrir, editar y guardar datos


La barra de herramientas de la interfaz (segunda línea del menú principal) permite al usuario abrir las pantallas asociadas a cada tipo de datos. Al presionar en uno de los botones, la pantalla de visualización y edición de datos correspondiente abre inmediatamente. Una lista muestra los elementos en el orden en que se añaden, y el primer elemento se selecciona automáticamente.

En la parte superior de la pantalla de datos hay una barra de herramientas que contiene las opciones para añadir y eliminar elementos, como se muestra a continuación, y otras opciones específicas para cada tipo de dato.








Al seleccionar un elemento de la lista, todos los campos de la pantalla se asocian con la información de este agente. Todos los campos habilitados se pueden editar. Si se produce cualquier cambio de datos, aparecerá una pantalla requiriendo confirmación para guardar estas modificaciones. El usuario puede optar por guardar o ignorar las modificaciones. Este mensaje permite al usuario descartar modificaciones no deseadas.

Un botón de información  está disponible en algunos de los campos para aclarar su usabilidad. Descanse el puntero del *mouse* para aparecer un mensaje descriptivo.

### 3.2.2 Manejo de datos

OptGen incorpora una serie de controles del Microsoft Excel que pueden ser utilizados en todas las pantallas que tienen células en el formato de hojas de cálculo Excel, tales como escenarios de caudales hidrológicos, restricciones de capacidad/energía firme y otras pantallas. De este modo, OptGen está provisto de una potente herramienta de edición y análisis de datos, que incluye: (i) la compatibilidad con hojas de cálculo MS Excel, es decir, el usuario puede manejar los datos utilizando una hoja de cálculo Excel y después cargarlo en OptGen, utilizando las funciones del Windows para copiar y pegar; y (ii) botones    para cortar, copiar y pegar directamente en la interfaz.

El capítulo siguiente describe todas las pantallas y los datos de entrada del OptGen respetando el orden en que las opciones están disponibles en la interfaz.

## 4 DATOS DE ENTRADA

Para crear un caso de estudio de planificación de la expansión, el usuario debe informar los datos de inversión y operación de todos los componentes de un sistema de energía eléctrica. Todos los datos operativos son manejados por el modelo SDDP y la descripción detallada está disponible en el manual del usuario del SDDP.

Este capítulo presenta los datos de entrada de inversión, que son manejados por el modelo OptGen. La descripción de los datos respecta el orden de los botones en el menú principal del OptGen, de la izquierda para la derecha.

### 4.1 Cronograma de desembolsos

Diferentes cronogramas de desembolsos pueden ser creados para cumplir con las características de los diferentes tipos de proyectos. Las opciones de configuración son:

a) *Código*

b) *Número de desembolsos*

Representa el número de desembolsos anuales (normalmente realizados durante la construcción del proyecto) para pagar el costo de la inversión de un proyecto, y es utilizado por el modelo en el cálculo del gasto de capital final (CAPEX) del proyecto.

c) *Año de entrada en operación*

Representa el año relativo en que el proyecto inicia su operación desde su decisión de construcción. Este valor debe ser igual al número de años para el tiempo de construcción más uno.

d) *Desembolsos (%)*

Representa el porcentaje del costo de la inversión pagado en cada desembolso anual. La suma de todos los pagos debe ser igual a 100%.

Para obtener más información sobre los desembolsos y cómo se utilizan los cronogramas dentro del modelo, por favor refiérase a la sección [“tratamiento y evaluación del costo de inversión”](#).



### 4.2 Datos de proyecto

El modelo OptGen es muy flexible y diversos tipos de proyectos candidatos puede contemplarse en un estudio, tales como: (i) componentes de producción de energía: hidroeléctricas, centrales térmicas y renovables; (ii) enlaces de interconexión y circuitos de transmisión (líneas, transformadores, enlaces CC, etc.); (iii) gasoductos, nodos de producción de gas, estaciones de regasificación. Es importante todavía explicar lo que es un proyecto candidato y cómo crearlo. Para facilitar, consideremos solamente los componentes de producción de energía y los separemos en tres tipos:

- **Tipo A:** Plantas existentes;
- **Tipo B:** Plantas futuras que tienen la fecha de entrada en operación ya definida (plantas comisionadas que generalmente hacen parte del plan de expansión de corto plazo y pueden estar en construcción);


- **Tipo C:** Plantas futuras cuya decisión de entrada en operación, si debe ser construido y cuando, debe ser optimizada (plantas aún no comisionadas que hacen parte del portafolio de proyectos candidatos a la expansión de largo plazo).

Una vez que todos los datos de operación se definen en el modelo SDDP, entonces todas las centrales futuras de una base de datos SDDP son elegibles para ser consideradas como proyectos por el OptGen, es decir, todas las plantas de los **Tipos B y C**. Este concepto se extiende a todos los otros agentes mencionados anteriormente que pueden ser considerados como proyectos candidatos.

Partiendo de una base de datos SDDP, a continuación se describe las dos maneras de crear nuevos proyectos en la pantalla “Datos de proyecto” del OptGen: (i) adición individual presionando el botón  y seleccionando una de las plantas futuras (**Tipo B o C**); (ii) importación conjunta presionando el botón , que añade automáticamente todas las plantas futuras (**Tipos B y C**) de la base de datos SDDP.

Como buena práctica, se recomienda que se haga el procedimiento de importación una única vez, durante la creación del caso de planificación de la expansión. Posteriormente, los usuarios deben realizar las adiciones incrementales de proyectos individualmente. Vale la pena señalar que si el usuario define o hace cambios en algunos datos de proyectos y luego aplica el procedimiento de importación, todos los datos de proyectos anteriores son reemplazados.


#### 4.2.1 Adición y eliminación individual de proyectos

Al presionar el botón , aparecen todos los agentes definidos como futuros en la base de datos SDDP. Entonces, el usuario puede filtrar por tipo de agente y / o por sistema y seleccionar el elemento que desea considerar como proyecto. Después presiona el botón “OK”.

Después de la creación, el usuario también es capaz de eliminar un proyecto seleccionado de la lista, y luego presionar el botón “Eliminar”, que se queda inmediatamente a la derecha del botón “Nuevo”. Vale la pena señalar que la eliminación de un proyecto del OptGen no hace efecto en los datos de operación del SDDP, es decir, este procedimiento no es capaz de eliminar el elemento futuro de la base de datos SDDP.

#### 4.2.2 Importación de proyectos

Esta funcionalidad permite al usuario crear automáticamente los datos de proyectos para el módulo de inversión del OptGen mediante la importación de todos los agentes futuros de una base de datos SDDP.

Al presionar el botón , se muestra una pantalla de importación. El botón “Mostrar opciones >>” permite al usuario definir valores típicos para grupos de proyectos para ser considerados por el importador. Para cada grupo de proyecto, es posible definir un costo de inversión, vida útil y costo de O&M fijo. El usuario puede crear grupos de proyecto mediante la selección de intervalos de capacidad para cada tipo de proyecto. Para proyectos térmicos, sin embargo, los grupos se crean de acuerdo con el tipo de combustible.

**Nota importante:** el proceso de importación sobrescribe en el directorio corriente todos los datos anteriormente creados de proyectos y cronogramas de desembolsos del OptGen.

Además, el procedimiento añade todas las plantas futuras de los Tipos B y C del SDDP como proyectos para el OptGen. La sección a continuación provee más detalles sobre la relación entre los elementos de las bases OptGen y SDDP.

#### **4.2.3 Comprendiendo cómo se manejan los elementos (proyectos o no) y la integración automática entre OptGen y SDDP**

En primer lugar, es importante aclarar la separación natural de las plantas definidas en una base de datos SDDP: (i) las plantas que sólo existen en el modelo SDDP y (ii) las plantas que el usuario ha seleccionado como proyectos para el modelo OptGen.

Para los elementos pertenecientes al grupo (i), los que sólo existen en SDDP, es decir, los existentes y los elementos futuros que no se seleccionan como proyectos, siempre se contempla todas las modificaciones definidas en el modelo SDDP para estos elementos y nunca serán cambiadas o eliminadas por el modelo OptGen.

Para los elementos pertenecientes al grupo (ii), los elementos futuros seleccionados como proyectos, el propio modelo OptGen controla todas sus modificaciones automáticamente. Por lo tanto, todas las modificaciones previamente definidas en el SDDP para las plantas seleccionadas como proyectos en el OptGen serán ignoradas de forma automática, ya que cabe al OptGen informar si el elemento debe ser construido y cuándo.

Sólo para ejemplificar, si el usuario ejecuta el OptGen y decide construir una planta X en 2025, una modificación en esta etapa se imprimirá automáticamente en el archivo de modificación correspondiente del SDDP. Si el usuario accede a la pantalla de modificación de la interfaz del SDDP, se puede visualizar esta información. Sin embargo, si el usuario realiza un cambio en el caso y ejecuta el modelo nuevamente, entonces el OptGen borra automáticamente la entrada de la planta X en 2025 y hace la optimización nuevamente. Si, en esta segunda ejecución, el OptGen decide que la planta X entra en operación en 2022, la modificación de esta planta se imprime en 2022.

Ahora, de vuelta a la definición de los Tipos A, B y C, todas las plantas de Tipo A pertenecen al grupo (i) y todas las plantas de Tipo C pertenecen al grupo (ii). Con respecto a las plantas comisionadas, las de Tipo B, estas pueden ser (o no) consideradas como proyectos en el OptGen, dependiendo de la elección del usuario. Vale la pena recordar que el procedimiento de [importación](#) añade automáticamente estas plantas como proyectos. Si el usuario desea, puede eliminarlos de los datos de proyecto de forma manual. En este caso, los elementos de Tipo B pertenecerán al grupo (i). Por otro lado, si estas plantas se mantienen como proyectos en el OptGen, entonces pertenecen al grupo (ii).

Generalmente, los usuarios que los mantienen como proyectos, lo hacen con el fin de realizar fácilmente análisis de sensibilidad mediante el cambio de la fecha de entrada en operación para ver los impactos en el plan de expansión final. Como se explicará más adelante en este documento, el usuario puede definir un [plan de expansión definido por el usuario](#) y permitir que el modelo OptGen lo considere a través de la opción "[Lectura de plan de expansión](#)". Por lo tanto, como el OptGen controla todos los datos de modificación relacionados con los proyectos, si el usuario cambia la fecha de entrada en operación del proyecto en el plan de expansión definido por el usuario, esto se contempla automáticamente por el modelo OptGen.

En resumen, todas las modificaciones relacionadas con los elementos que no están definidos como proyectos en el OptGen, nunca serán cambiados por el modelo OptGen, sólo el usuario puede cambiar

manualmente desde la interfaz del SDDP. Por otro lado, todas las modificaciones que se refieren a los proyectos son controladas automáticamente por el OptGen.

#### 4.2.4 Decisión y tipos de variables de proyectos

La decisión del proyecto y los tipos de variables se encuentran inmediatamente debajo de la pantalla de selección de proyectos y se describen en esta sección. En las secciones siguientes, se explicarán detalladamente las pestañas “Datos financieros”, “Cronograma de entrada” y “Costos cronológicos”.

##### a) Tipo de decisión

Permite al usuario elegir si la decisión de inversión de un proyecto es opcional u obligatorio. Para proyectos opcionales, OptGen decide cuándo y si debe o no ser construido. Para los proyectos obligatorios, la decisión de construir el proyecto ya está tomada de antemano y, como consecuencia, el modelo sólo decide cuándo debe ser construido respetando las fechas mínima y máxima de entrada en operación del proyecto.

##### b) Tipo de variable

Permite al usuario elegir si la decisión de un proyecto se representa en el problema de optimización con una variable continua, binaria o entera.

En el caso de variable **continua**, OptGen puede decidir construir cualquier porcentaje (entre el 0% y el 100%) de la capacidad del proyecto. Esta opción se aplica generalmente a: (i) nuevos *hotspots* de proyectos renovables intermitentes, para los cuales el usuario establece el máximo potencial que se acepta en cada *hotspot* y el OptGen determina la cantidad óptima para el sistema; (ii) en algunos estudios específicos cuando la configuración detallada de las centrales térmicas no es necesaria y el usuario busca optimizar el *mix* de tecnología de generación (en general, en el año horizonte del estudio); (iii) proyectos genéricos para dimensionar los nuevos requisitos en baterías, interconexiones y enlaces CC.

Para las variables **binarias**, el modelo sólo puede decidir si se debe construir la capacidad de todo el proyecto o no (0% o 100%). Esta opción se utiliza generalmente para (i) proyectos hidroeléctricos; (ii) proyectos térmicos, cuando todos los detalles del proyecto están disponibles y (iii) los proyectos de transmisión.

Para las variables **enteras**, OptGen considera el proyecto como módulos binarios que se puede añadir tantas veces cuanto se hace económicamente atractivo durante el proceso de optimización. Un límite superior en el número total de módulos individuales añadidos se debe definir como una restricción de capacidad máxima instalada, en la pantalla “[restricciones adicionales mínimas y máximas](#)”.

A medida que el tiempo requerido por el modelo para optimizar el problema de expansión se ve afectado sustancialmente por el número de variables binarias o enteras, el usuario también puede definir proyectos que se representan por variables binarias durante las primeras etapas y continuas para el período de planificación restante. La opción “Continua a partir de” representa la etapa en que una variable de decisión binaria es sustituida por una variable continua en el problema de optimización de la expansión.

#### 4.2.5 Datos financieros

a) *Costo de inversión (M\$ o \$/kW o M\$/año)*

Tal como se presentó anteriormente, existen tres tipos de unidades para definir el costo de inversión para cada proyecto. Es importante señalar que, dentro del modelo, independientemente de la unidad elegida, el flujo de inversión siempre se calculará como se explica en la sección [“tratamiento y evaluación del costo de inversión”](#).

b) *Costo de O&M (\$/kW año)*

Representa el costo de operación y mantenimiento anual fijo del proyecto.

c) *Costo de integración al área eléctrica (\$/kW)*

Representa el costo para conectar el proyecto a la red eléctrica. Generalmente, refleja los costos de subestación y línea de transmisión de uso exclusivo que son necesarios para conectar la planta a la red.

d) *Tasa de descuento anual del proyecto (%)*

Representa la tasa de interés utilizada para calcular el costo la inversión anualizado del proyecto cuando definido en M\$ o \$/kW. Sin embargo, para calcular el valor presente neto (VPN) de los desembolsos, OptGen siempre utiliza la [tasa de descuento](#) sistémica que se define en la pantalla principal en “Opciones de estudio> Parámetros generales”.

Si la opción está activada, OptGen utilizará la tasa de descuento definido en este campo para calcular el costo anualizado, caso contrario, el modelo utilizará la [tasa de descuento](#) sistémica.

e) *Cronograma de desembolso*

Identifica el cronograma de desembolso utilizado por el proyecto que se define en la pantalla de [“Cronograma de desembolsos”](#).

f) *Vida útil (años)*

Representa el tiempo total de amortización de la inversión del proyecto y, por lo tanto, puede interpretarse como la vida útil financiera.

g) *Substituye un existente*

Identifica un agente existente (planta, interconexión, línea de transmisión, etc.) que será reemplazado si el proyecto entra en operación. Esta opción se aplica generalmente para evaluar las opciones de repotenciación y remodelación.

h) *Factor de capacidad promedio, factor de capacidad garantizado y factor de utilización (%)*

Para cada proyecto, OptGen calcula un costo marginal de referencia (\$/MWh) e imprime en el informe de ejecución. El costo marginal de referencia se calcula como sigue:

Las centrales hidroeléctricas:

$$\frac{ca \cdot 10^6}{\omega \cdot MF \cdot 8760h}$$

Las centrales térmicas:

$$\frac{ca \cdot 10^6 + co \cdot \omega \cdot MF \cdot 8760h}{\omega \cdot MF \cdot 8760h}$$

Plantas renovables:

$$\frac{ca \cdot 10^6}{\omega \cdot MF \cdot 8760h}$$

Interconexiones, circuitos y enlaces de corriente continua:

$$\frac{ca \cdot 10^6}{\omega \cdot UF \cdot 8760h}$$

dónde:

<i>ca</i>	Costo de inversión anual	M\$
<i>co</i>	Costo operativo unitario	\$/MWh
$\omega$	Capacidad instalada	MW
<i>MF</i>	Factor de capacidad promedio	Pu
<i>WF</i>	Factor de capacidad garantizado	pu
<i>UF</i>	Factor de utilización	pu

El usuario define *MF*, *WF* y *UF*, dependiendo de la tecnología del proyecto. Entonces OptGen calcula el costo marginal de referencia de cada proyecto e imprime en el [informe de ejecución](#) (archivo optgen.out). El costo marginal de referencia también se conoce como el costo nivelado de energía (LCOE) en la literatura, que es una métrica para comparar las diferentes tecnologías directamente en \$/MWh. Como se puede ver, el cálculo mencionado utiliza solamente parámetros definidos por el usuario, por lo tanto, los costos marginales de referencia son únicamente informativos y no afectan los resultados de la optimización durante la ejecución del OptGen. Por otro lado, es muy importante mencionar que el LCOE final de cada proyecto es un resultado del proceso de optimización, ya que el factor real de despacho de las plantas depende de la operación del sistema que contempla el plan óptimo de expansión para todo el horizonte de estudio. Como consecuencia, los costos marginales de referencia deben ser vistos como una información previa al procesamiento para proveer una sensibilidad de la competitividad de cada tecnología en comparación con las demás.

#### 4.2.6 Cronograma de entrada

##### a) Fechas Mínima y Máxima

Representa las fechas mínima y máxima para la entrada en operación del proyecto si el modelo decide por construirlo.

##### b) Cronograma de entrada de unidades

Durante la construcción de un proyecto de generación, es posible que la planta no pueda ser totalmente potenciado a la vez, dado el proceso de comisionamiento y motorización de la planta. Este dado representa el cronograma de entrada de las unidades de un proyecto. El usuario puede especificar hasta diez etapas para la motorización de la planta a través de una tabla de datos cronológicos con el número de unidades de generación y la etapa de entrada relativa correspondiente. La principal aplicación de esta opción es para los grandes proyectos de centrales hidroeléctricas, pero también se puede aplicar a proyectos térmicos y renovables.

Para ejemplificar, imaginemos una planta de energía que tiene cuatro unidades de generación. Las dos primeras unidades entran en la fecha de la entrada en operación del proyecto y los otros dos entran seis meses después. Por lo tanto, en la primera columna de la tabla, el usuario debe definir: línea “Mes” = 1; línea “Unidades” = 2. En la segunda columna, el usuario debe definir: línea “Mes” = 6; línea “Unidades” = 2.

#### 4.2.7 Costos cronológicos

En esta pantalla, el usuario puede definir costo de inversión del proyecto variable en el tiempo. En la primera columna, el usuario informa el año, en la segunda el costo de inversión (respetando la misma unidad elegida para el proyecto) y en la tercera el costo de O&M fijo.

Esta opción es particularmente útil para incorporar curvas de reducción de CAPEX generalmente relacionadas con las energías renovables no convencionales (como solar y eólica *onshore/offshore*) y baterías, ya que el precio de estas tecnologías está disminuyendo en todo el mundo debido a la madurez de la tecnología y las ganancias económicas de escala.

#### 4.2.8 Tratamiento y evaluación del costo de inversión

Con el fin de evaluar el costo de la inversión asociado a la construcción de cada proyecto para cada posible etapa del horizonte de estudio, los siguientes datos de entrada son considerado por el modelo (tomando en cuenta un ejemplo numérico para ser más intuitivo):

Cronograma de desembolso:

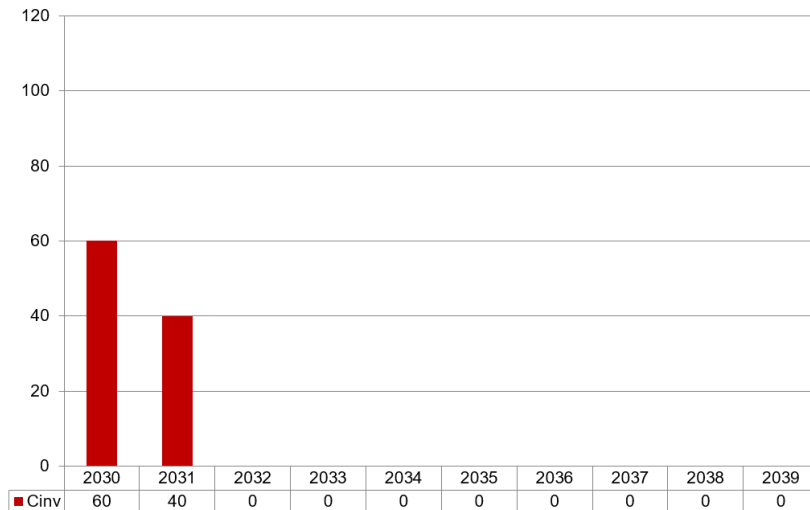
$N$	número de desembolsos	2	
$n^0$	año relativo de la entrada en operación	2	
$p_n$	desembolsos	[60%; 40%]	%

Datos del proyecto:

$c^{inv}$	costo de inversión	99	M\$
$c^{ele}$	costo de integración al área eléctrica	10	\$/KW
$c^{o\&m}$	costo de operación & mantenimiento fijo	10	\$/KW-año
$\omega$	capacidad instalada	100	MW
$L$	vida útil	10	años
$tx^{prj}$	tasa de descuento del proyecto	10%	%

En este ejercicio, vamos a imaginar que el horizonte de estudio  $T$  es 2030-2039 y el proyecto entra en operación en 2031 (segundo año del horizonte de estudio). En este caso, se necesitan los siguientes desembolsos anuales para pagar el costo de inversión del proyecto:





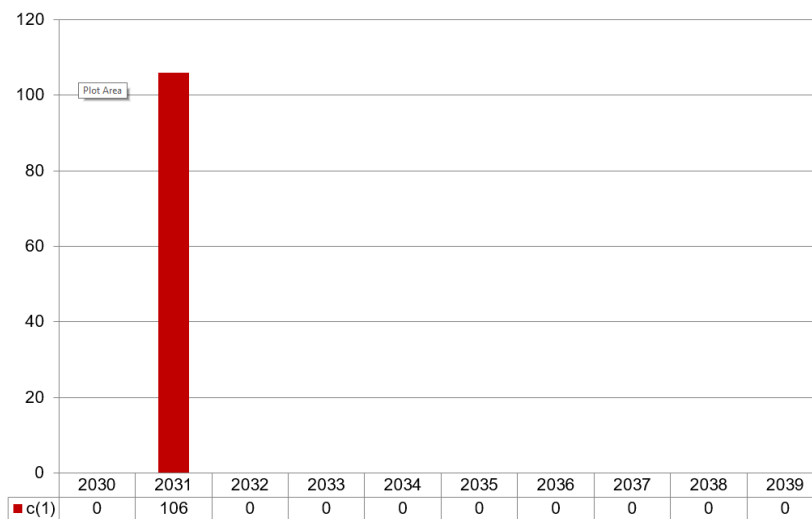
**Figura 4.1 - Desembolsos anuales para pagar el costo de inversión del proyecto**

A continuación, los siguientes pasos se realizan automáticamente por el modelo OptGen:

**Paso 1:** la suma del costo de inversión y el costo de integración eléctrica se refieren al año de entrada en operación, teniendo en cuenta el cronograma de desembolso, de la siguiente manera:

$$c0 = \left( c^{inv} + \frac{c^{ele} \cdot \omega}{1000} \right) \cdot \sum_{n=1}^N \frac{p_n}{100} \cdot (1 + tx)^{(n^0-n)}$$

$$c0 = 100 \times (0.6 \times 1.1 + 0.4) = 106 \text{ M\$}$$



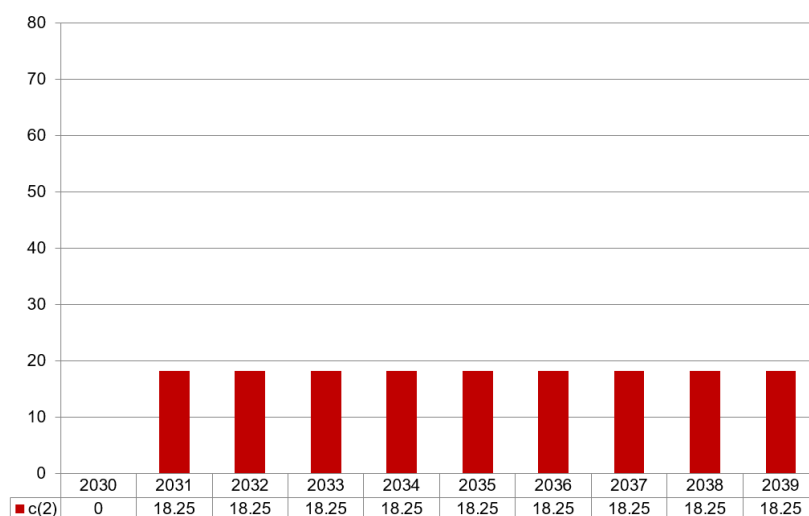
**Figura 4.2 - CAPEX total del proyecto**

**Paso 2:** el costo anual de inversión (o costo anualizado) es calculado y contemplado como un flujo de caja de pagos durante la vida útil del proyecto, que corresponde al costo total de la inversión. A este valor se agrega el costo de operación y mantenimiento fijo:

$$ca = c0 \cdot \frac{tx \cdot (1 + tx)^L}{(1 + tx)^L - 1} + \frac{c^{o\&m} \cdot \omega}{1000}$$

$$c0 = 106 \times [0.1 \times (1.1)^{10}] / [(1.1)^{10} - 1] + 1 = 18.25 \text{ M\$/year}$$

La figura a continuación presenta el flujo de caja de inversión del proyecto dentro del horizonte de estudio:



**Figura 4.3 - Flujo de caja del proyecto dentro del horizonte de estudio 2030-2039**

Aunque este flujo de caja pueda comenzar antes de la fecha de entrada en operación del proyecto (durante el período de construcción) y finalizar muchos años después del final del horizonte de estudio, las anualidades consideradas pelo modelo están asociadas al periodo en que el proyecto opera dentro del horizonte de estudio. Como se puede ver en el ejemplo, sólo hay 9 costos anuales dentro del horizonte de estudio y la vida útil del proyecto es de 10 años. En este caso, el modelo transforma automáticamente los costos anuales posteriores al final del horizonte en un valor terminal. Esto será mejor detallado a continuación.

**Paso 3:** Se calcula el valor presente neto (VPN) del flujo de caja referido al primer año del estudio.

$$ct = ca \cdot \frac{(1 + tx)^{L'} - 1}{tx \cdot (1 + tx)^{(t^0 + L' - 1)}}$$

donde  $t^0$  es la etapa de entrada en operación:

$$t^0 = t + (n^0 - 1)$$

y  $L'$  es el número de etapas en que el proyecto opera dentro del horizonte de estudio:

$$L' = \min\{T - t^0 + 1, L\}$$

En consecuencia, el costo de inversión  $ct$  en este ejemplo es:

$$ct = 18.25 \cdot \frac{(1.1)^9 - 1}{0.1 \cdot (1 + 0.1)^{(2+9-1)}}$$

$$ct = 96 \text{ M\$}$$

El cuadro que se presenta a continuación resume el VPN del flujo de inversión en función de la fecha de entrada en operación del proyecto  $t^0$ :

$t$	$t^0$	$L'$	$ct = ca \cdot \frac{(1 + tx)^{L'} - 1}{tx \cdot (1 + tx)^{(t^0 + L' - 1)}}$
1	2	9	96
2	3	8	80
3	4	7	67
4	5	6	54
5	6	5	43
6	7	4	33
7	8	3	23
8	9	2	15
9	10	1	7

Para la evaluación del valor terminal  $cr$ , definimos  $L^r$  como los años restantes de la vida útil del proyecto después del final del horizonte de estudio:

$$L^r = \max\{0, L - (T - t^0)\}$$

Si  $L^r = 0$ , entonces:

$$cr = 0$$

Caso contrario, el valor terminal se calcula como el valor presente neto de los desembolsos anuales asociados a los años después del final del horizonte de estudio:

$$cr = ca \cdot \frac{(1 + tx)^{L^r} - 1}{tx \cdot (1 + tx)^{(T + L^r)}}$$


En resumen, para la evaluación de los costos de inversión se supone que los desembolsos anuales:

- comienzan en el mismo año de la entrada en operación
- terminan en el último año del estudio o al final de la vida del proyecto
- se pagan al final de cada año

De esta manera, el costo asociado a la decisión de construcción de cada proyecto en cada etapa de inversión se evalúa para el periodo en el que el proyecto está disponible para su operación. En consecuencia, en el proceso de optimización, ambos los costos de inversión y operación son contabilizados en el mismo periodo en el horizonte de estudio.

En las secciones a continuación, se describen las restricciones de relación entre los proyectos. Estas restricciones pueden ser definidas inmediatamente después del procedimiento de creación/importación de los proyectos.

#### 4.2.9 Proyectos excluyentes


Las restricciones de “proyectos excluyentes” pueden definirse presionando el botón . Esta opción permite al usuario informar un conjunto de proyectos mutuamente excluyentes. El modelo crea una restricción de exclusividad para que **uno** o **ninguno** de los proyectos de la lista sea decidido para la

inversión. Una aplicación de esta función, por ejemplo, es la selección óptima de una planta de energía a partir de un conjunto de proyectos con diferentes tecnologías.

Procedimiento:

1. Presione el botón “Nuevo”. Informe el nombre de la restricción y presione “OK”.
2. Mueva los proyectos a la lista “Seleccionado” para considerar en esta restricción. Use los filtros para ayudar a la búsqueda de proyectos de un tipo o un sistema específico.
3. Guarde los cambios y cierre la pantalla.


#### 4.2.10 Proyectos asociados

Las restricciones de “proyectos asociados” pueden definirse presionando el botón . Esta opción permite al usuario informar un conjunto de proyectos asociados. El modelo crea una restricción de asociación para que **todos** o **ninguno** de los proyectos de la lista sean decididos para la inversión. Como los proyectos asociados pueden construirse en diferentes etapas a lo largo del horizonte de planificación, el usuario también es capaz de establecer un retraso máximo (años) para la entrada de los proyectos.

Procedimiento:

1. Presione el botón “Nuevo”. Informe el nombre de la restricción y presione “OK”.
2. Mueva los proyectos a la lista “Seleccionado” para considerar en esta restricción. Use los filtros para ayudar a la búsqueda de proyectos de un tipo o un sistema específico.
3. Informe el tiempo de retraso máximo para la entrada en operación de los proyectos.
4. Guarde los cambios y cierre la pantalla.


#### 4.2.11 Restricciones de precedencia

Las restricciones de “precedencia” pueden definirse presionando el botón . Esta opción permite al usuario especificar el **orden de entrada** de los proyectos con un tiempo mínimo de retraso.

Procedimiento:

1. Presione el botón “Nuevo”. Informe el nombre de la restricción y presione “OK”.
2. Mueva los proyectos a la lista “Seleccionado” para considerar en esta restricción. Use los filtros para ayudar a la búsqueda de proyectos de un tipo o un sistema específico.
3. Utilice las flechas arriba y abajo situadas a la derecha de la pantalla para cambiar el orden de prioridad de los proyectos.
4. Informe el tiempo de retraso mínimo para la entrada en operación entre los proyectos.
5. Guarde los cambios y cierre la pantalla.

### 4.3 Plan de expansión definido por el usuario

Permite al usuario crear un nuevo plan de expansión para ser considerado por el modelo. Esta opción se puede utilizar para (i) la evaluación de un plan fijo o (ii) la contemplación de un plan parcial durante el proceso de optimización que debe complementarse con proyectos adicionales, si necesario. Para crear un nuevo plan de expansión definido por el usuario, se debe presionar el botón “Nuevo plan” .

## Procedimiento:

## 1. Seleccione el tipo del plan:

a. *Fijo*

El modelo OptGen lee el plan de expansión y considera todas las decisiones como fijas, es decir, no hay margen para la optimización de la expansión. En términos prácticos, esto es sólo una optimización del despacho (puede ser interpretado como una ejecución SDDP) con la ventaja de presentar, como resultado, todas las salidas de inversión producidas por el OptGen.

b. *Complementar con otros proyectos si necesario*

El modelo considera como fijas las decisiones que hacen parte del plan parcial definido por el usuario y evalúa si vale la pena o no construir cualquier otro proyecto presentado en los datos de proyectos y seleccionado para la ejecución corriente.

## 2. Utilice el botón “Añadir proyecto” (+) para incorporar una nueva decisión de expansión en el plan.

a. Seleccione un proyecto de la lista. Use los filtros para ayudar a la búsqueda de proyectos de un tipo o un sistema específico.

b. Para un **plan fijo**, sólo hay disponible la opción “Fecha de decisión> Fija”. En este caso, informe la fecha de decisión y la capacidad añadida (MW).

## i. Activar o no la opción “Decisión planificada”:

- En este caso, para todos los proyectos, esta opción es meramente ilustrativa y sólo utilizada en los informes de salida. La idea principal de esta opción es diferenciar los proyectos, es decir, separar los proyectos que ya se encuentran en construcción (decisiones planificadas) de los proyectos que fueran fijados por el usuario basado en sus propias suposiciones (decisiones no planificadas oficialmente). Esta información se imprime en la décima columna del archivo del [plan de expansión óptimo](#).

c. Para un **plan complementar**, el usuario debe:




i. Seleccionar la fecha de decisión como “fija” o “variable”. En el caso “variable”, el usuario informa las fechas inicial y final, y el modelo optimiza la decisión dentro de este intervalo de tiempo.


ii. Seleccionar el tipo de decisión como “Exacta”, “Al menos” o “A lo sumo” el valor especificado para la capacidad añadida (MW). La escogida de la opción de decisión “Exacta” significa que el OptGen invertirá exactamente el valor de la capacidad especificada; la decisión “Al menos” significa que el OptGen invertirá más o igual al valor de la capacidad especificada; por último, la decisión “A lo sumo” significa que el OptGen invertirá menos o igual al valor de la capacidad especificada.

Basado en eso:

- Para las variables de decisión **binaria**: es intuitivo que sólo la opción “Exacta” puede ser seleccionada. En este caso, el proyecto se construirá en la fecha fija o dentro del intervalo de fechas, dependiendo de la opción “Fecha de decisión”;
- Para las variables de decisión **continua** o **entera**: si el usuario selecciona la opción “Exacta”, el valor de la capacidad definida por el usuario se construirá en la fecha fija o dentro del intervalo de fechas, dependiendo de la opción “Fecha de decisión”. Seleccionando la opción “Al menos” o


“A lo sumo”, el valor de la capacidad definida se considerará como límite inferior o superior, respectivamente, para la fecha fija o dentro del rango de fechas.

- iii. Activar o no la opción “Decisión planificada”:
  - En el caso de variables de decisión **binaria**: esta opción es meramente ilustrativa y sólo utilizada en los informes. Esta información se imprime en la décima columna del archivo del [plan de expansión óptimo](#).
  - En el caso de variables de decisión **continua** o **entera**: esta opción afecta el proceso de optimización. Si activada, el modelo no puede añadir más capacidad de estos proyectos fuera de la fecha fija o fuera del intervalo de fechas especificado, una vez que estos proyectos ya están en construcción con la capacidad exacta definida por el usuario. Si desactivada, entonces el modelo se queda libre para añadir más capacidad del proyecto en cualquier otra fecha diferente de la fija, o fuera del intervalo de fechas especificado.
3. Utilice el botón “Eliminar” () para borrar una decisión de expansión seleccionada del plan.
4. Utilice el botón “Editar” () para modificar las fechas y valores de una decisión de expansión seleccionada del plan. Para más detalles, vea el paso 2.
5. Utilice el botón “Guardar” () para informar el nombre del archivo del plan de expansión.

También es posible abrir y editar los planes de expansión previamente definidos. La pantalla muestra un plan a la vez. Para visualizar otro plan, utilice el botón “Abrir” ()

Después de creado el plan, aparecerá automáticamente seleccionado el campo “[Lectura de plan de expansión](#)” en la pantalla principal del OptGen.

## 4.4 Restricciones de energía / potencia firme

Permite al usuario especificar restricciones de energía o potencia firme de cada sistema o de todos en conjunto. Al presionar el botón , se mostrará la pantalla “Restricción de energía firme”. Si el usuario presiona en la flecha que se encuentra al lado de este botón, se puede elegir entre esta pantalla o la pantalla “Restricción de potencia firme”.

### 4.4.1 Definición de restricción de energía firme

Antes de explicar cómo definir los datos de entrada, vale la pena dar una visión general de estas restricciones. El concepto de suministro firme surgió a finales del siglo XIX, cuando se estudió el dimensionamiento de los embalses para el suministro de agua a la población. El objetivo fue determinar la capacidad de almacenamiento que garantice el caudal "firme" en la ocurrencia de la secuencia histórica más seca.

El concepto de suministro firme fue transferido al sector eléctrico y se aplica al dimensionamiento económico de los proyectos hidroeléctricos. Esencialmente, para cada alternativa de capacidad del embalse y de la instalación de las máquinas, se calcula la energía firme resultante (capacidad sostenible de producción de energía). La relación entre el costo de la construcción de cada alternativa y su respectiva energía firme se utiliza como un índice de costo / beneficio que permite la comparación de diferentes alternativas del proyecto.

Este concepto se extendió a un conjunto de plantas, con el objetivo de garantizar una cierta cantidad de producción de energía, amortizando las oscilaciones de la producción de cada planta. El concepto fue ampliamente utilizado en estudios de inventario, lo que sirvió para definir la "división de caída" de cada río.

Posteriormente, se ha propuesto un criterio probabilístico. En lugar de garantizar un suministro firme de agua (o energía) teniendo en cuenta los flujos históricos (en particular, la "oferta firme" es superiormente limitada a la peor sequía histórica), la "energía asegurada" se calculó como la producción máxima que se puede mantener a un cierto porcentaje - por ejemplo, 95% - de los años hidrológicos simulados. Este criterio probabilístico, junto con la consideración del impacto económico de las fallas de suministro, permitieron un análisis más detallado de la relación costo / beneficio de las inversiones.

En resumen, en los países predominantemente hidroeléctricos (sistemas con limitaciones en energía), como el caso de Brasil, los criterios de energía firme están relacionados con la seguridad del suministro y generalmente se definen con el objetivo de minimizar el riesgo de racionamiento, protegiendo el sistema de situaciones extremas. Como mencionado anteriormente, hay diferentes metodologías que se pueden aplicar con el fin de calcular el "certificado" de energía firme de cada planta, como (i) un criterio probabilístico o (ii) un criterio determinativo, por ejemplo, a partir de la energía máxima que cada planta puede producir con el peor registro histórico de caudales (también conocido como el período crítico).

En términos de la planificación de la expansión del sistema, el usuario puede asignar los certificados de energía firme de las plantas (existentes y futuras) y un requisito sistémico que deben cumplirse en cada año (o en cada etapa de inversión, si necesario). Esto es interesante porque estas restricciones entran como criterios inflexibles de planificación dentro del módulo de inversión, es decir, el modelo OptGen tiene que cumplir con las restricciones, caso contrario el problema de optimización es inviable.

#### 4.4.2 Definición de restricción de potencia firme

En los sistemas con limitaciones de capacidad, la principal preocupación en la tarea de planificación de la expansión es asegurar que el sistema sea capaz de satisfacer la demanda de pico en el largo plazo. Por lo tanto, con el fin de proteger el sistema contra (inesperados) cortes forzados y falta de generadores disponibles en el sistema en situaciones de "estrés", lo que suele ocurrir en los momentos de carga máxima, el usuario debe incorporar un criterio de planificación con el fin de garantizar un cierto exceso (mínimo) de oferta. Esta cantidad se define como el **margen de reserva**. El margen de reserva es la diferencia entre la capacidad disponible del sistema y la demanda, y como consecuencia, debe incorporar requisitos fríos y calientes de reserva.

Basado en esto, el usuario puede asignar un "certificado" de potencia firme de cada planta (también conocido como crédito de capacidad) y un requisito sistémico que deben cumplirse en cada año (o en cada etapa de inversión, si necesario). Esto es interesante porque estas restricciones entran como criterios inflexibles de planificación dentro del módulo de inversión, es decir, el modelo OptGen tiene que cumplir con las restricciones, caso contrario el problema de optimización es inviable.


Como se mencionó anteriormente, este problema era una preocupación importante sólo para los sistemas con limitaciones de pico. Por otro lado, con la rápida penetración de la energía renovable variable (ERV) en los sistemas, este escenario ha cambiado.

La penetración de estas nuevas fuentes también ha planteado algunas preocupaciones tanto para los planificadores como para los operadores por dos razones principales: (i) la mayoría de estas fuentes son no despachables, es decir, su generación no puede ser controlada por el operador del sistema; y (ii) su producción de energía presenta una fuerte volatilidad, es decir, la producción puede cambiar significativamente de una hora a la siguiente (debido a su naturaleza fluctuante). Como consecuencia, todos los sistemas con una penetración masiva de ERV, que en el pasado podrían ser clasificados como con limitaciones de energía o pico, necesitan prepararse para tener suficiente generación despachable en todo momento, ya que no se puede garantizar que el viento soplará o no habrá ninguna nube en el cielo. Por lo tanto, la preocupación sobre la potencia firme no más existe sólo en los momentos de máxima carga.

En resumen, el requisito sistémico y la asignación de crédito de capacidad debe definirse con cuidado, especialmente para las energías renovables intermitentes.

#### 4.4.3 Definición de requerimientos de energía / potencia firme

El usuario es capaz de añadir restricciones de energía / potencia según se desee. Hay dos maneras diferentes de definir los requerimientos de energía / potencia firme. La primera se hace a través de la especificación de un factor de la energía / potencia firme por año.

Como se explica en el comienzo de esta sesión, si el usuario presiona en la flecha que se encuentra inmediatamente después del botón , se puede seleccionar la pantalla de “Restricción de energía firme” o la pantalla “Restricción de potencia firme”. Vale la pena destacar que, la definición de los datos, operacionalmente hablando, en ambas pantallas son iguales (y, por supuesto, dentro del modelo son tratados de maneras distintas).

En la pantalla “Energía firme” o en la pantalla “Potencia firme”, el usuario debe seleccionar en primer lugar si quiere incorporar un requisito de energía / potencia firme para “<Todos los sistemas>” y / o para cada sistema (lo que significa que el usuario puede establecer una para “<Todos los sistemas>” y también uno para cada sistema, o sólo para “<Todos los sistemas>”; o sólo para un subconjunto de los sistemas). Todos los sistemas que existen en la base de datos SDDP aparecerán en esta pantalla de selección.

Con el fin de explicar mejor por qué las opciones antes mencionadas están disponibles, podemos utilizar algunos ejemplos. El sistema brasileño se divide en muchos sistemas y las necesidades de energía firme se define para todo el país. En este caso, solamente un requisito para “<Todos los sistemas>” es suficiente. Ahora, imaginemos otro ejemplo en el que el usuario no quiere depender de las interconexiones entre los sistemas para suministrar la demanda. Entonces, se puede incorporar una restricción de energía / potencia firme en cada sistema. Por otro lado, si queremos realizar un estudio con la base de datos de la América Central contemplando seis países, en este caso se puede definir restricciones de energía / potencia firme para cada sistema, pero no hay necesidad de definir para “<Todos los sistemas>”, una vez que las importaciones / exportaciones de los países se basan en oportunidades.

Basado en esto, vamos a pasar a la definición del factor de energía / potencia firme:

##### a) Factor de Energía Firme

El usuario define un factor por año. Para cada año, el OptGen suma la demanda en GWh definida para todos los bloques de todas las etapas y divide por 8760 horas para obtener la demanda en



GWpromedio (GWprom) para cada año. A continuación, el modelo multiplica este valor por el Factor de Energía Firme definido por el usuario en pu, y usualmente mayor que 1 pu

*b) Factor de Potencia Firme*

El usuario define un factor por año. Para cada año, el OptGen toma la demanda en GWh definida en todos los bloques de todas las etapas y divide por la duración del bloque para obtener la demanda en GW para todos los bloques en todas las etapas de cada año. A continuación, el modelo toma el valor máximo observado en el año y multiplica por el Factor de Potencia Firme definido por el usuario en p.u., y usualmente mayor que 1 p.u.

Como se puede notar, el criterio para modelar las restricciones de energía / potencia firme a través de factores anuales es una opción directa y sencilla, pero inflexible, es decir, los factores son tratados dentro del modelo y el usuario no tiene la flexibilidad para definir una restricción diferente. La manera alternativa de definir restricciones de energía / potencia firme es a través de [restricciones adicionales mínimas y máximas](#), que serán detalladas más adelante en este documento. Esta opción es muy flexible, lo que permite la representación de cualquier restricción de energía / potencia firme definida por el usuario. En este caso, el usuario selecciona un subconjunto de las plantas, introduce el requisito y define las fechas de las restricciones (que incorporan, por lo tanto, el número de etapas de inversión que desee).

**4.4.4 Definición del certificado de energía / potencia firme**

Hay dos maneras de definir el certificado de energía / potencia firme de cada planta: (i) por un factor sistémico por tipo de tecnología o (ii) por cada planta individualmente.

Vamos a empezar con el procedimiento (i). Dado que la metodología de asignación de certificado puede cambiar de un sistema a otro, en primer lugar, el usuario debe seleccionar los sistemas para los cuales se quiere definir los factores.

Procedimiento:

1. A partir de la lista de la parte superior de la pantalla, seleccione el sistema que se aplicará el factor.
2. Después de seleccionar el sistema, los campos de “valor estándar de la energía / potencia firme (p.u.)” serán desbloqueados en la parte superior derecha de la pantalla. Informe el valor estándar de la energía / potencia firme en p.u. para los diferentes tipos de plantas (hidroeléctrica, térmica y renovables) del sistema seleccionado.

Los valores estándar (antes de la edición del usuario) son:

	Energía Firme (p.u.)	Potencia Firme (pu)
Planta hidroeléctrica	0.6	1
Planta térmica	1	1
Fuente renovable	0	0

La segunda manera de definir el certificado de energía / potencia firme de cada planta es: (ii) por cada planta individualmente. Esto se puede hacer en los “datos de hidroeléctricas” / “datos de térmicas” / “datos de fuente renovable”.

#### 4.4.4.1 Datos de hidroeléctricas / térmicas / fuente renovable

Estas pantallas permiten al usuario configurar los certificados de energía firme (MW<sub>prom</sub>) / potencia firme (MW) para cada planta hidro / térmica / renovable en todos los sistemas. Los valores que aparecen automáticamente son los valores estándar para cada planta, es decir, la capacidad instalada multiplicada por el factor de la energía / potencia firme definido para la tecnología (en p.u.). También vale la pena mencionar que, para las centrales hidroeléctricas, la columna “Capacidad (MW)” muestra el valor mínimo entre la capacidad instalada y el producto del caudal máximo turbinable y el coeficiente de producción promedio.

Es intuitivo que, si el usuario establece un **valor específico** para una planta, este valor anula el valor estándar y, caso contrario, si ningún valor específico se establece para una planta, entonces el valor estándar será aplicado.

#### 4.4.4.2 Modificaciones de hidroeléctricas / térmicas / fuente renovable

Las pantallas de modificación permiten al usuario cambiar en el tiempo los datos de configuración de la energía firme (MW<sub>prom</sub>) / potencia firme (MW) de las centrales hidroeléctricas / térmicas / renovables. Las modificaciones pueden ser añadidas por planta en la pestaña “Por planta” o por fecha en la pestaña “Por fecha” (respectando la planta seleccionada en la pestaña “por la planta”). Las modificaciones se impondrán a la información establecida en [“Datos de hidroeléctricas”/“Datos de térmicas”/“Datos de fuente renovable”](#).

#### 4.4.4.3 Certificados de energía / potencia firme durante el proceso de comisionamiento de la planta

Como se comentó en la sección de [cronograma de entrada](#), durante la construcción de un proyecto de generación, es posible que la planta no sea motorizada completamente de una sola vez, y como consecuencia considera un cronograma de entrada de las unidades. En este caso, durante la motorización, los certificados se calculan como sigue:

- Para fuentes renovables y térmicas: tanto los certificados de la energía y potencia firme siguen la misma lógica y serán multiplicados por un factor de disponibilidad, que a su vez se calcula como el número de unidades en operación en la etapa de inversión actual dividido por el número total de unidades generadoras. Se puede interpretar como una rampa lineal proporcional al número de unidades en operación
- Para las centrales hidroeléctricas: el certificado de energía firme será el mínimo entre el certificado de energía firme y el producto del caudal máximo turbinable, el coeficiente de producción promedio y el factor de disponibilidad. Esto significa que hasta el certificado de energía firme de la planta, hay agua suficiente para las unidades que se encuentran en operación y por lo tanto la energía firme en una etapa debe ser igual a la capacidad instalada corriente de la planta. Entonces, cuando se alcanza el certificado de energía firme de la planta, el valor se mantiene constante. Por otro lado, el certificado de potencia firme será simplemente multiplicado por el factor de disponibilidad (misma lógica que se aplica para las térmicas y renovables).

## 4.5 Restricciones adicionales mínimas y máximas

La tarea de planificación de expansión debe cumplir con los criterios operacionales, económicos y ambientales, en el marco de las políticas nacionales de energía. En consecuencia, restricciones adicionales pueden ser definidas en esta pantalla de manera tal que OptGen cumpla con los criterios definidos por el usuario para atender a los supuestos de expansión mencionados.

Esta pantalla fue diseñada para ser muy flexible con el fin de englobar una amplia gama de restricciones adicionales que los usuarios pueden definir, tales como, restricciones específicas de margen de reserva, políticas gubernamentales con respecto a la inserción de una tecnología, meta de penetración renovable, limitaciones presupuestarias, etc.

Permite al usuario informar las restricciones de capacidad instalada o restricciones de energía / potencia firme mínima y / o máxima para un conjunto de elementos existentes y futuros.

Procedimiento:

1. Presione el botón “Nuevo”. Informe el nombre de la restricción y presione “OK”.
2. Seleccione el tipo de restricción: “Capacidad instalada (MW)”, “Energía firme (MWprom)” o “Potencia firme (MW)”.
3. Seleccione si la restricción es “Incremental” o “Total”:
  - a. “Incremental”: en este caso, el usuario debe configurar ambas las fechas inicial y final en el paso 7.
  - b. “Total”: en este caso, el usuario debe configurar sólo la fecha final en el paso 7.
4. Informe el tipo de límite de la restricción: “Mínima ( $> =$ )” o “Máxima ( $< =$ )”.
5. Informe si el lado derecho de la restricción (*right-hand side* ou RHS) es un “Valor absoluto” o un porcentaje relacionado con un solo sistema o todos los sistemas. Vale la pena señalar que las opciones porcentuales sólo están disponibles en el caso de las restricciones “Total”.
6. Informe el valor del RHS de la restricción:
  - a. Si la restricción es “Incremental”, el valor definido corresponde al mínimo y / o máximo que se puede añadir en el intervalo de tiempo especificado en el paso 7.
  - b. Si la restricción es “Total”, el valor corresponde al total hasta la fecha final especificada en el paso 7.
7. Informe las fecha inicial (sólo para las restricciones “Incremental”) y final.
8. Seleccione los elementos que se incluirán en el lado izquierdo de la restricción (*left-hand side* ou LHS). Use los filtros para ayudar a la búsqueda de elementos de un tipo y / o sistema específico. Es muy importante destacar que no sólo los proyectos están disponibles en esta pantalla de selección, pero todos los elementos existentes y futuros (que pertenecen a los **Tipos A, B y C**) pueden ser seleccionados:
  - a. En el caso de una restricción “Incremental”, ya que el límite inferior o superior corresponde a la cantidad incremental que se puede añadir en el intervalo de tiempo elegido, por lo general sólo plantas futuras (pertenecientes a los **Tipos B y C**) están en el LHS de la restricción.
  - b. En el caso de una restricción “Total”, ya que no se especifica la fecha inicial, entonces el límite corresponde a la cantidad mínima o máxima total que debe estar en el sistema en la fecha final informada. En este caso, dependiendo de la aplicación, la restricción puede (o no) incorporar las plantas existentes y comisionadas. Como un ejemplo, si el usuario establece una restricción total para forzar una penetración máxima de las centrales

térmicas de carbono en el sistema, ya que debe englobar todas las centrales térmicas que queman carbón, no sólo proyectos, entonces tanto las plantas existentes y comisionadas (pertenecientes a los Tipos A, B y C) deben estar en el LHS de la restricción.

## 4.6 Escenarios hidrológicos

La incertidumbre hidrológica se considera en la optimización del problema de planificación de expansión y su representación depende del modelo operativo (SDDP o Escenarios) seleccionado por el usuario en la pestaña “[Opciones de estudio](#)” en la pantalla principal del OptGen.

### 4.6.1 SDDP

Los datos hidrológicos históricos de cada planta, así como los parámetros del modelo estocástico considerado en la operación del sistema se definen en la interfaz del SDDP. Para más detalles, consulte el Manual del usuario del SDDP.

### 4.6.2 Escenarios

Los escenarios de caudales de las hidroeléctricas se informan en la interfaz del OptGen en la pantalla “Escenarios hidrológicos”, donde los valores están en m<sup>3</sup>/s para todas las plantas hidroeléctricas en cada etapa. Para crear un nuevo escenario, el usuario debe presionar el botón “Nuevo” y seleccionar el origen de los escenarios: manual o mediante importación del archivo de escenarios del SDDP / TSL o del archivo histórico del SDDP.

Cuando se selecciona la opción “Manual”, el usuario debe añadir sólo un escenario a la vez:

1. Informe el nombre del escenario y presione el botón “OK”.
2. Seleccione cada planta hidroeléctrica de la lista en la parte derecha de la pantalla.
3. Informe los valores de caudales para cada planta hidroeléctrica en cada etapa. Estos datos se manejan por una [tabla de datos cronológicos](#).

Cuando se selecciona la opción “Recuperar del archivo de escenarios del SDDP / TSL”, un conjunto de escenarios se importa desde el archivo forw.dat del SDDP o TSL (Time Series Lab). Para más información acerca de cómo se genera este archivo por los modelos SDDP y TSL, consulte el Manual del usuario del modelo correspondiente.

1. Seleccione el archivo forw.dat con el botón de navegación.
2. Presione el botón “OK”.
3. Todos los escenarios se importan automáticamente desde el archivo forw.dat con probabilidades de ocurrencia idénticas por defecto.
4. Seleccione cada escenario de la lista a la izquierda y cada planta hidroeléctrica de la lista a la derecha de la pantalla para visualizar y editar los valores de caudales.

Cuando se selecciona la opción “Recuperar del archivo de histórico del SDDP”, un conjunto de escenarios se importa desde el archivo hinflw.dat del SDDP.

1. Seleccione el archivo hinflw.dat con el botón de navegación.
2. Informe el número de escenarios y el número de años que cada escenario tendrá.

3. Informe si el escenario MLT (promedio de largo plazo) debe ser incluido. En este caso, uno de los escenarios consistirá en un escenario estático que contienen los caudales promedios mensuales de todo el histórico.
4. Informe el año del archivo histórico correspondiente al año inicial de cada escenario.
5. Informe la probabilidad de ocurrencia de cada escenario en p.u. El usuario puede informar los valores manualmente o presionando el botón “Generar probabilidad automáticamente”. En este caso, todos los escenarios tendrán la misma probabilidad. Tenga en cuenta que la suma de las probabilidades de todos los escenarios debe ser siempre igual a 1.
6. Informe si los caudales negativos deben convertirse en valores nulos.
7. Informe si los escenarios deben ser estáticos. En este caso, los caudales correspondientes al año inicial especificado se repetirán para todos los años de cada escenario.
8. Presione el botón “OK”.
9. Seleccione cada escenario de la lista a la izquierda y cada planta hidroeléctrica de la lista a la derecha de la pantalla para visualizar y editar los valores de caudales.

Después de crear todos los escenarios de caudales, la selección y la edición de la probabilidad de los escenarios se manejan en la pestaña “[Selección de escenarios](#)” en la pantalla principal.


#### 4.7 Calculadora de día típico

En primer lugar, es importante señalar que la opción “Calculadora de día típico” sólo es útil para la estrategia de solución “OptGen 2” (esta opción no tiene ningún efecto sobre la estrategia de solución “OptGen 1”). A continuación, se presenta una breve descripción de algunos conceptos importantes sobre el “OptGen 2”:

- El modelo considera etapas anuales de inversión, es decir, un problema de la co-optimización de la inversión y de la operación se resuelve para cada año adelante en el tiempo en un esquema de horizonte rodante;
- Cada año se divide en T estaciones del año (por ejemplo, meses o trimestres). Las estaciones son agrupamientos más amplios de las etapas del SDDP. Mientras SDDP sólo admite etapas semanales y mensuales, las estaciones pueden durar desde una semana hasta un año entero. Estaciones reducen los tiempos computacionales de ejecución mediante la agregación de etapas similares con misma decisión operativa. Estaciones deben seguir la estacionalidad del sistema eléctrico y deben ser cronológicas.
- Cada estación del año se compone de D perfiles de carga de 24 horas (por ejemplo, días laborales y feriados / fines de semana), también llamados días típicos. Los días típicos son días dentro de una estación del año que se consideran representativos de los datos de entrada. Por lo tanto, en lugar de representar todos los días de la estación, el usuario debe seleccionar un cierto número de días típicos para representar diferentes perfiles de carga de cada estación del año. En este caso, cada día típico representa un grupo de día “reales” (por supuesto con perfiles de carga similares). Por ejemplo, es común para diferenciar entre días laborales y fin de semana. Un tercer grupo también podría ser creado que representa sólo los domingos y feriados;
- Para cada estación del año, se considera S escenarios de generación renovable y caudales hidrológicos;

- La operación del sistema se evalúa sobre una base horaria, con *unit commitment*, reserva de generación (incluyendo baterías y otros dispositivos de almacenamiento) e interconexiones regionales (un modelo de red de transmisión completo también está disponible).
- Como el “OptGen 2” evalúa la operación del sistema mediante intervalos de tiempo cronológicos horarios con *unit commitment*, para algunos sistemas reales el esfuerzo computacional puede ser muy elevado, mismo aplicando las agregaciones y procedimientos heurísticos mencionados. En este caso, otro tipo de heurística está disponible, que se llama **bloques de *commitment* por día**. Los bloques de *commitment* sólo se utilizan para unir las decisiones de *commitment* térmico. En otras palabras, el modelo decidirá, al comienzo de cada bloque, el estado operativo de las plantas térmicas que representan *unit commitment*, y mantendrá el mismo estado hasta el final del bloque.

Para más detalles metodológicos, consulte el Manual de Metodología OptGen.

Con base a la revisión anterior, la opción “Calculadora de día típico” crea automáticamente las estaciones del año, los días típicos y los bloques de *commitment* por día. Entonces, después de presionar el botón , hay dos parámetros que el usuario debe informar:

e) *Número de estaciones por año*

El usuario debe informar el número deseado de estaciones del año. Para los casos mensuales, el valor estándar es 12, lo que significa que cada mes es una estación del año. Para los casos semanales, el valor estándar es 52, lo que significa que cada semana es una estación del año.

f) *Número de bloques de *commitment* por día*

El usuario debe informar el número deseado de horas en cada bloque de *commitment* por día. El valor estándar es 24 horas, lo que significa que la decisión de *unit commitment* se hace en cada hora de cada día típico dentro de cada estación del año.

Vale la pena destacar que esta ejecución requiere datos de mapeo hora-bloque ya definidos en la base de datos SDDP. Para más información, consulte el Manual del usuario del SDDP.

Después de ajustar estos parámetros, el usuario puede presionar el botón “Ejecutar”. Esta calculadora realiza las siguientes acciones:

- Mapeo de meses / semanas para estaciones del año;
- Mapeo de días reales para días típicos. La calculadora creará dos días típicos en cada estación del año (días hábiles y fines de semana). El primer día típico de cada estación se calculará para los días hábiles, es decir, utilizando la demanda horaria de los cinco días con los mayores valores de carga en cada semana. El segundo representará los fines de semana (a partir de los dos días con los menores valores de carga de cada semana);
- Mapeo de las horas del día para bloques de *commitment*.

La calculadora genera archivos de datos de entrada OptGen que contienen estas informaciones, que son obligatorios para ejecutar la estrategia de solución “OptGen 2” con la resolución horaria.

## 5 PARÁMETROS DEL MODELO

Los datos descritos en este capítulo están asociados a la selección y especificación de los parámetros generales del modelo con el fin de realizar un estudio de planificación de expansión.

### 5.1 Opciones de estudio

En primer lugar, es muy importante señalar que durante la ejecución del OptGen, independiente de la opción seleccionada como estrategia de solución, dos tareas serán realizadas automáticamente por el modelo:

- **Tarea 1 - Planificación de la expansión:** el modelo evalúa las alternativas de expansión y encuentra el plan de expansión óptimo a través de la minimización de la inversión más el valor esperado de los costos de operación;
- **Tarea 2 - Simulación del plan de expansión:** después de encontrar el plan de expansión óptimo en la Tarea 1, el OptGen ejecuta automáticamente el modelo SDDP para evaluar la optimización final del despacho e imprimir todos los resultados en los archivos de salida.

Las tareas anteriormente mencionadas corresponden a procedimientos separados que se pueden realizar con diferentes suposiciones y criterios, de acuerdo con las opciones seleccionadas como modelos de operación y confiabilidad.

#### 5.1.1 Planificación de la expansión

##### a) Estrategia de solución

El usuario debe seleccionar la estrategia de solución que se aplicará en la búsqueda por el plan de expansión óptimo:

- “OptGen 1”: utiliza técnicas de descomposición que permiten el uso del modelo SDDP para la evaluación de relación de compromiso multietapa considerando la operación hidrotérmica estocástica;
- “OptGen 2”: utiliza modelo horario de operación y escenarios de caudales / generación renovable para incorporar *unit commitment*, restricciones de rampa y reserva probabilística de generación.

Para más detalles sobre los modelos “OptGen 1” y “OptGen 2”, consulte el Manual de Metodología.

##### b) Modelo de operación

La selección del modelo de operación está relacionada con el tipo de representación de incertidumbre:

- “SDDP”: modelo SDDP utiliza los parámetros estocásticos especificados para calcular una política operativa que se simula en seguida, para un conjunto de escenarios. Para más detalles sobre el algoritmo SDDP y parámetros, consulte los Manuales de metodología y usuario del SDDP.
- “Escenarios”: el modelo de operación utiliza escenarios multi-determinísticos para los caudales, generación renovable y otras fuentes de incertidumbre. Para los caudales hidrológicos, específicamente, el usuario puede definir el conjunto de escenarios y sus

probabilidades de ocurrencia en la pantalla de “[Escenarios hidrológicos](#)”. En este caso, no hay política operativa calculada por el algoritmo SDDP

Cuando la estrategia de solución seleccionada por el usuario es el “OptGen 1”, el procedimiento de descomposición separa las decisiones de inversión y de operación, lo que permite al usuario seleccionar el modelo operativo como multi-determinístico (a través de la representación de escenarios y probabilidades) o estocástico (modelo SDDP).

Cuando la estrategia de solución es el “OptGen 2”, la opción “Escenarios” es la única disponible ya que el modelo considera dentro del mismo problema la co-optimización de la inversión y operación multi-determinística.

#### c) *Modelo de confiabilidad*

- “Coral”: Esta opción permite la consideración de las restricciones de seguridad en la tarea de planificación utilizando el modelo de Coral para evaluar la confiabilidad del sistema durante el proceso de descomposición del OptGen. Por esta razón, esta opción sólo está disponible cuando la estrategia de solución seleccionada es el “OptGen 1”. Para más detalles sobre el algoritmo y los parámetros, consulte los Manuales de usuario y metodología del Coral.

Además de todos los datos de entrada necesarios para ejecutar Coral, cuando se selecciona el modelo de confiabilidad, un criterio de seguridad en términos de la máxima potencia esperada no suministrada (EPNS – *Expected Power Not Supplied*) debe ser definido por el usuario. Para obtener más información, consulte la sección “[Parámetros de confiabilidad](#)”.

### 5.1.2 Simulación del plan de expansión

Como se explica en el comienzo de este capítulo, después de encontrar el plan de expansión óptimo en la Tarea 1, OptGen ejecuta automáticamente el modelo SDDP para evaluar la optimización final de despacho e imprimir todos los resultados de inversión y operación en los archivos de salida, independientemente de la estrategia de solución y otras opciones de planificación de la expansión que el usuario haya seleccionado.

#### a) *Modelo de operación*

Selección del modelo operativo, “Escenarios” o “SDDP”, para evaluar los resultados operativos, teniendo en cuenta el plan de expansión óptimo. Ambas las opciones se explican en la sección “[Planificación de la expansión](#)”.

#### b) *Modelo de confiabilidad*

Al activar esta opción, un análisis de confiabilidad se realiza para calcular los índices de confiabilidad del sistema teniendo en cuenta el plan de expansión óptimo, en otras palabras, esto es sólo un procesamiento posterior que no afecta el proceso de toma de decisiones de inversión en los proyectos (como sucede cuando el usuario contempla criterio de confiabilidad en la tarea de planificación de la expansión).

### 5.1.3 Parámetros generales

#### a) *Año inicial, año final y número de años*



Estos tres campos se deben utilizar para establecer el horizonte de estudio. El usuario debe informar siempre el “Año inicial”. Después de eso, se puede establecer el “Año final” o el “Número de años” (con uno de los campos, el otro se actualiza automáticamente).

*b) Etapa de inversión*

Selección del intervalo de tiempo para las decisiones de inversión que pueden ser anuales, semestrales, trimestrales o mensuales. Para la gran mayoría de los estudios de expansión de largo plazo, etapa anual de inversión suele ser suficiente. La necesidad de aumentar la granularidad de las etapas de inversión debe ser evaluado en detalle por el usuario.

*c) Etapa de operación*

Este campo muestra el intervalo de tiempo para las decisiones operativas que pueden ser mensuales o semanales, y esta información proviene de los datos SDDP. En la pantalla “Opciones de Estudio” del SDDP, el usuario también puede seleccionar “Representación horaria” de los resultados de las simulaciones operativas.

*d) Bloques de demanda*

Este campo muestra el número de bloques de demanda definido en los datos SDDP.

*e) Tasa de descuento (%)*

Este campo establece la tasa de interés anual que se usa para evaluar el valor presente de los flujos de caja futuros. Para calcular el costo de inversión anualizado el usuario puede optar por especificar las tasas de descuento individualizadas para cada proyecto en la pantalla “Datos de proyecto”, caso contrario el modelo toma en cuenta el valor informado en este campo.

#### **5.1.4 Lectura de plan de expansión**

Esta opción permite al usuario conducir diferentes tipos de estudios de planificación en función del nivel de flexibilidad que se da al modelo de optimización en términos de decisiones informadas por un [plan de expansión definido por el usuario](#):

- Manual: el usuario define un plan de expansión fijo que contiene todos los proyectos que se construirán y sus fechas y valores de decisión asociados. Esta opción se utiliza para simular la inversión y los costos de operación mínimos para el plan de expansión seleccionado.
- Semiautomático: el usuario define un plan de expansión parcial que contiene proyectos fijos y / o flexibles que se deben construir, y deja que el modelo de optimización complemente el plan de expansión con proyectos adicionales si necesario.
- Automático: no se considera plan de expansión definido previamente y el modelo optimiza todas las decisiones de expansión.

De este modo, el usuario puede seleccionar un archivo de plan de expansión del directorio de datos (modos manual o semiautomático) o no seleccionar ninguno plan y dejar que el modelo funcione en el modo automático.

#### **5.1.5 Parámetros de confiabilidad**

*a) Máxima EPNS*

Representa la máxima potencia esperada no suministrada en términos de p.u. de la demanda en la restricción de seguridad. Esta información se utiliza cuando se selecciona la confiabilidad como criterio de planificación. Para obtener más información sobre EPNS, consulte el manual de metodología del Coral.

## 5.2 Selección de escenarios

Cuando el usuario selecciona “Escenarios” como el modelo de operación, sea para la planificación de la expansión o para la simulación del plan de expansión, esta pestaña permite al usuario seleccionar cuales escenarios hidrológicos deben ser considerados y sus probabilidades de ocurrencia asociadas. El modelo resuelve los problemas operativos multi-determinísticos para todos los escenarios y calcula la solución promedia ponderada por sus probabilidades. Para obtener más detalles sobre cómo crear esos escenarios vea la sección [Escenarios hidrológicos](#).

## 5.3 Selección de proyectos

Esta pantalla permite al usuario seleccionar cuales proyectos deben ser considerados por el modelo como opciones para el plan de expansión.

## 5.4 Opciones de ejecución

Tradicionalmente, el modelo OptGen resuelve un problema para la obtención del *timing* de la expansión, o fechas de decisión para la entrada en operación de los proyectos a lo largo del horizonte de estudio. Dependiendo del número de proyectos considerados y el tamaño del horizonte de estudio, el problema para encontrar el plan de expansión óptimo puede ser muy complejo debido a la naturaleza combinatoria del conjunto de soluciones factibles.

Por ejemplo, considerando un horizonte de estudio de solo 1 año y un conjunto de 3 proyectos candidatos con variable de decisión binaria, entonces el número de posibles planes de expansión son  $2^3 = 8$ , como se muestra a continuación:

Planes de expansión	Plan 1	Plan 2	Plan 3	Plan 4	Plan 5	Plan 6	Plan 7	Plan 8
P1		X		X		X		X
P2			X	X			X	X
P3					X	X	X	X

En términos generales, el número de posibles planes de expansión crece exponencialmente con el número de años y proyectos binarios. Para un estudio de caso con X años y N proyectos, este número es  $2^{X*N}$ .

La definición del horizonte de estudio es una tarea importante porque la planificación de la expansión puede ser ineficaz con horizontes demasiado pequeños debido al efecto del tiempo de construcción de los proyectos y las economías de escala, por ejemplo. Por otro lado, cuanto más largos los horizontes, más pequeños serán los efectos de las decisiones tomadas en los últimos años del estudio, debido a la

tasa de descuento. Esto se conoce como el efecto de fin de horizonte y puede conducir a una estrategia de planificación pobre en los últimos años.

Las estrategias de solución de **Año Horizonte** y **Horizonte Rodante** se pueden aplicar al problema de planificación con el fin de reducir el tiempo empleado para encontrar un plan de expansión de mínimo costo y reducir al mínimo los efectos de fin de horizonte para planificación en largo plazo.

La estrategia Año Horizonte se basa en un procedimiento de dos etapas. En la primera etapa, el modelo resuelve un problema de *sizing* (dimensionamiento) con el fin de encontrar los proyectos que deberían pertenecer al sistema en el año horizonte. Utilizando la solución de este problema, el modelo resuelve el problema de *timing* (distribución en el tiempo) considerando automáticamente esta lista reducida de proyectos como opciones de expansión. En otras palabras, el problema de *sizing* decide cuales proyectos deben ser construidos, y el problema de *timing* decide cuando deberían ser construidos.

La estrategia del Horizonte Rodante se utiliza para resolver el problema de *timing* y consiste en solución encadenada de problemas de expansión obtenidos dividiendo el horizonte de estudio en pequeños sub-horizontes. Es importante tener en cuenta que la estrategia de solución “OptGen 2” utiliza siempre la heurística del horizonte rodante, dividiendo automáticamente el horizonte en sub-horizontes de 1 año. Para más detalles sobre la metodología “OptGen 2”, consulte el Manual de Metodología.

#### 5.4.1 Usar año horizonte

Al seleccionar esta opción, el modelo realiza la solución del problema de *sizing* teniendo en cuenta la configuración estática en el año horizonte, que se fija para el número de años especificado por el usuario. Este procedimiento se puede hacer incluso de forma incremental, mediante la definición de años horizonte intermedios y sus respectivos números de años fijos. La solución de estos problemas de *sizing* se usa para reducir la lista de proyectos candidatos que será considerada en el problema de *timing*.

Por ejemplo, supongamos un horizonte de estudio de 2021 hasta 2040, un conjunto de 100 proyectos candidatos y la selección de la opción “Usar año horizonte” para 2 problemas de *sizing* de la siguiente manera:

- Año horizonte 2030, 5 años
- Año horizonte 2040, 5 años

Para este caso, el modelo realizará automáticamente la tarea de planificación de expansión en 3 pasos:

1. Soluciona un problema de expansión de 5 años con la configuración estática del año 2030, teniendo en cuenta la lista original de proyectos candidatos.
2. Soluciona un problema de expansión de 5 años con la configuración estática del año 2040, teniendo en cuenta el plan de expansión obtenido en el paso 1 como un plan complementario, que el modelo incluirá, si necesario, nuevas decisiones de expansión de los proyectos de la lista original de candidatos.
3. Supongamos que el plan de expansión resultante obtenido después de los pasos 1 y 2 contiene 20 proyectos de la lista original de 100 candidatos, entonces el modelo resuelve el caso original 2021-2040 teniendo en cuenta únicamente los 20 proyectos que puedan someterse a las decisiones de *timing*.

### 5.4.2 Usar horizonte rodante

Por defecto, el problema de *timing* se resuelve para todo el horizonte de estudio. Al seleccionar esta opción, el usuario puede informar el particionamiento del estudio que permite que el modelo haga el encadenamiento de las soluciones de expansión de los problemas de sub-horizontes más cortos. Al establecer el año inicial y el número de años de cada sub-horizonte, el modelo automáticamente mantiene las decisiones tomadas en los años anteriores al año inicial de cada nuevo horizonte. Al final, el modelo simula el plan de expansión para generar resultados para todo el horizonte de estudio.

Por ejemplo, supongamos un horizonte de estudio de 2021 hasta 2040 y la selección de la opción “Usar horizonte rodante” para los 3 problemas de *timing* definidos de la siguiente manera:

- Año inicial 2021, 10 años
- Año inicial 2026, 10 años
- Año inicial 2031, 10 años

Entonces, el modelo realizará automáticamente la tarea de planificación de expansión en 4 pasos:

1. Resuelve el problema de expansión para 2021-2030.
2. Resuelve el problema de expansión para 2026-2035, teniendo en cuenta las decisiones de expansión obtenidas en el paso 1 para los años 2021-2025 como un plan complementario.
3. Resuelve el problema de expansión para 2031-2040, teniendo en cuenta las decisiones de expansión obtenidas en el paso 1 para los años 2021-2025 y en el paso 2 para los años 2026-2030 como un plan complementario.
4. Resuelve una simulación del plan de expansión, teniendo en cuenta las decisiones obtenidas en los pasos anteriores para todo el horizonte de estudio como un plan fijo.

### 5.4.3 Parámetros del modelo

Los parámetros del modelo se informan de forma independiente para los problemas de *sizing* y de *timing* y son diferentes para las estrategias OptGen 1 y OptGen 2.

#### 5.4.3.1 Parámetros del OptGen 1

##### a) Reiniciar

Esta opción permite al usuario reiniciar el modelo de optimización teniendo en cuenta la mejor solución encontrada en una ejecución previa. En función de los criterios utilizados para reiniciar, el usuario tiene la opción de “usar el límite superior anterior” o “recalcular el límite superior”.

Durante el proceso de descomposición en la tarea de planificación de la expansión, el modelo evalúa los límites superior e inferior para el costo total asociado al plan de expansión óptimo. Si el usuario realiza un cambio en el caso que puede aumentar el costo total del plan de expansión óptimo de la corrida original, entonces la opción de recalcular el límite superior debe ser seleccionada. Esto puede ocurrir cuando el usuario decide cambiar algunos de los datos de inversión, por ejemplo, incluyendo las restricciones de seguridad en el procedimiento de planificación, aumentando el costo de inversión de proyectos y así sucesivamente.

Por otro lado, si la opción de reinicio se utiliza con el fin de encontrar una solución de expansión con menor costo a través de un número mayor de iteraciones o tolerancia de convergencia más estrecha,

entonces el límite superior de la ejecución anterior no se ve afectado y el usuario debe seleccionar la opción de “utilizar el límite superior anterior”.

b) *Número mínimo de iteraciones*

Representa el número mínimo de iteraciones de descomposición de Benders que serán realizadas por el modelo antes de aplicar cualquier criterio de parada.

c) *Número máximo de iteraciones*

Criterio de parada para la estrategia de descomposición, que representa el número máximo de iteraciones de descomposición de Benders.

d) *Tolerancia de convergencia (%)*

Criterio de parada para la estrategia de descomposición, que representa la tolerancia mínima para el *gap* relativo calculado a partir de límites superior e inferior en cada iteración de descomposición de Benders. Se relaciona con la integración entre los módulos de operación y de inversión.

e) *Tolerancia de convergencia MIP (%)*

Criterio de parada para el MIP (problemas enteros mixtos), que representa la tolerancia para la convergencia del algoritmo de *branch-and-bound* que se utiliza en la solución de cada problema de inversión.

f) *Límite de tiempo para MIP (s)*

Criterios de parada para los problemas MIP, que representa el tiempo de CPU máximo para el algoritmo de *branch-and-bound*.

g) *Utilizar iteraciones consecutivas*

Esta opción es una estrategia de convergencia que fija las decisiones de inversión de los proyectos que han repetido su solución para el número de iteraciones consecutivas seleccionadas por el usuario (N). Es decir, si el modelo opta por no invertir en un determinado proyecto durante al menos N iteraciones consecutivas, entonces la decisión de no invertir en este proyecto se convertirá en fija. Lo mismo sucede con los proyectos que tienen la misma decisión de inversión para este número de iteraciones consecutivas. Las repeticiones se contabilizan cuando se cumple al menos uno de los siguientes criterios:

- Número total de iteraciones es mayor o igual a un valor específico; o
- *Gap* de convergencia es menor o igual a un valor específico.

Por ejemplo, consideremos los siguientes parámetros:

- a) Número de repeticiones (iteraciones consecutivas): 2
- b) Número de la iteración  $\geq 3$
- c) *Gap* de convergencia  $\leq 15\%$
- d) 3 proyectos con decisiones binarias
- e) Los siguientes *gaps* de convergencia / decisión de inversión para las primeras 5 iteraciones:

Iteración	<i>gap</i> (%)	Proyecto 1 (%)	Proyecto 2 (%)	Proyecto 3 (%)
-----------	----------------	----------------	----------------	----------------

1	100	0	0	0
2	90	0	100	100
3	70	0	100	0
4	40	100	100	0
5	15	0	100 (fijo)	0 (fijo)

Como el valor del *gap* requerido para fijar las decisiones sólo se alcanza en la iteración 5, el criterio que activa esta estrategia es el número mínimo de iteraciones (3). A partir de la iteración 3 el modelo empieza a computar las decisiones de inversión y las repeticiones se reinician a 1 cuando las decisiones de inversión cambian de una iteración a la otra. Podemos ver que, en la iteración 5, Proyecto 1 no es fijo porque el OptGen cambió su decisión de inversión de la iteración 3 para la 4. Proyecto 2 y 3 son fijos porque sus decisiones de inversión se repiten en iteraciones 3 y 4.

Esta estrategia está destinada a ayudar a la convergencia por lo general cuando el *gap* está cerca de la tolerancia. Si esta opción es mal utilizada, por ejemplo, mediante el establecimiento de un número pequeño de iteraciones consecutivas para fijar soluciones, especialmente cuando el *gap* de convergencia sigue siendo muy grande, entonces el modelo puede tomar decisiones para fijar los proyectos que probablemente no serían parte de la solución óptima. En términos de convergencia del modelo, se puede observar *gap* negativo en estos casos.

#### 5.4.3.2 Parámetros del OptGen 2

##### a) Tolerancia de convergencia (%)

Dado que el OptGen 2 co-optimiza los problemas de inversión y operación en el mismo modelo, entonces la tolerancia de convergencia es la tolerancia MIP de este proceso de resolución. Esta tolerancia es la diferencia entre la mejor solución factible binaria y la solución lineal óptima (que no es factible ya que las variables son binarias y no lineales). Así, por ejemplo, si el usuario está ejecutando un caso sin ninguna variable binaria (*unit commitment*, decisión de inversión binaria o entera), entonces la tolerancia de convergencia no será utilizada, ya que la solución lineal óptima también es una solución factible.

##### b) Límite de tiempo (s)

Este parámetro limita el tiempo total para la ejecución del OptGen 2. Por ejemplo, si un caso tiene 5 años y el límite de tiempo es de 300 segundos, entonces el OptGen 2 tiene 300 segundos para resolver todos los 5 años. Si se alcanza el límite de tiempo, una solución parcial estará disponible.

## 6 EL MÓDULO GRÁFICO

### 6.1 Introducción

El módulo gráfico permite visualizar gráficamente la mayor parte de los resultados generados por los modelos OptGen y SDDP. Para acceder a este módulo, presione el botón correspondiente en la barra de menú del OptGen:

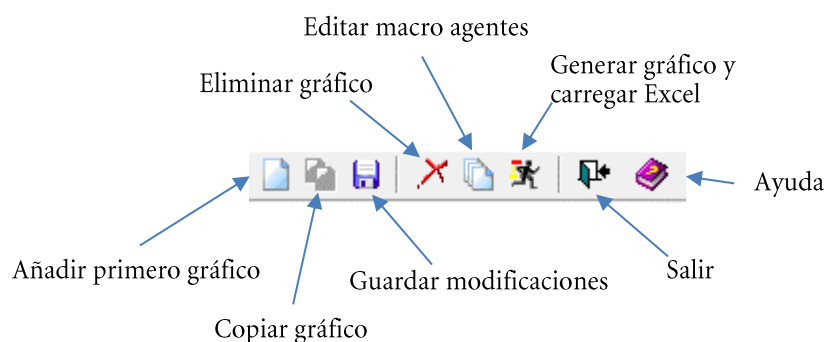


La pantalla del módulo gráfico se divide de la siguiente manera:

- Opciones generales
- Selección de etapas
- Selección de bloques
- Selección de series
- Definición de título de los ejes
- Selección de variables, agentes y macro agentes

Después de configurar todos los parámetros, el botón “Ejecutar” genera los gráficos en formato Excel.

### 6.2 Opciones generales



#### a) Creando del primero gráfico

Si ningún gráfico ha sido definido, utilice el botón "Añadir" para crear un nuevo gráfico. Introduzca el nombre del gráfico y presione "Ok".

#### b) Seleccionando un gráfico

Utilice el *combo box* situado en la parte superior de la pantalla para seleccionar un gráfico para visualización y edición.

#### c) Copiando un gráfico

Utilice el botón “Copiar” para generar un nuevo gráfico a partir de un gráfico previamente definido. Introduzca el nombre del nuevo gráfico y presione “OK”.

#### d) Eliminando un gráfico

Utilice el botón “Eliminar” para seleccionar los gráficos que serán removidos de la base de datos.

### e) Manipulación de macro agentes

Utilice el botón “Editor de macro agentes” para manejar los macro agentes, que se definen como la suma ponderada de un conjunto de agentes. Utilice los botones “Eliminar” o “Editar” para borrar o modificar un macro agente seleccionado. Utilice el botón “Añadir” para crear un nuevo macro agente: informe el nombre del macro agente, la variable asociada y seleccione los agentes que serán sumados con sus coeficientes especificados (pesos).

Por ejemplo, se puede definir un macro agente llamado HydroX que contiene la suma de las generaciones de todas las centrales hidroeléctricas de la compañía X. Macro agentes padrones también están disponibles, tales como: TotalHydro (todas las plantas hidroeléctricas), Exist.Hydro (todas las plantas hidroeléctricas existentes), etc.

## 6.3 Selección de etapas

Permite especificar el intervalo de fechas de interés, dentro del horizonte de estudio, para generar el gráfico.

## 6.4 Selección de bloques

Permite seleccionar los bloques de demanda de interés, presionando el número de cada bloque.

Además, el usuario puede agregar valores de un gráfico configurando las opciones para sumar valores por bloque y sumar valores por año.

## 6.5 Selección de series

Permite al usuario seleccionar la totalidad de escenarios o un subconjunto de escenarios de interés.

Además, es posible definir los tipos de cuantificadores para estas series:

- Graficar series: grafica el valor individual de cada serie seleccionada.
- Graficar promedio: grafica el valor medio de las series seleccionadas.
- Graficar desviación estándar: grafica la desviación estándar de las series seleccionadas.
- Graficar cuantil superior: grafica el cuantil superior de x%, es decir, el valor  $Q_x$  de tal manera que  $P(Q < Q_x) = x / 100$ , donde Q es la variable seleccionada.
- Graficar cuantil inferior: grafica el cuantil inferior de x%, es decir, el valor  $Q_x$  de tal manera que  $P(Q > Q_x) = x / 100$ , donde Q es la variable seleccionada.

## 6.6 Títulos de los ejes (opcional)


Representa las identificaciones para el eje X, eje Y y eje secundario.

## 6.7 Selección de variables, agentes y macro agentes

Las variables son los resultados obtenidos de la ejecución del modelo y se asocian a los archivos de salida en planilla. Los agentes son las entidades asociadas con los resultados de salida. Por ejemplo, “Capacidad instalada hidro” es una variable que se aplica a los agentes centrales hidroeléctricas.

Presionando el botón “Variables”, en la pantalla principal, una nueva ventana aparece. Para seleccionar y descartar variables de la lista “Variables seleccionadas” utilice los botones (<<) y (>>), respectivamente. El mismo procedimiento se aplica a la selección de los agentes y macro agentes. Para



seleccionar todas las variables de la lista, se puede seleccionar la primera variable, presionar “Shift” y  en el teclado.

## 6.8 Filtros

La herramienta de filtro se encuentra en la ventana de selección de agentes y permite al usuario especificar expresiones lógicas sobre atributos de los agentes con el fin de ayudar a la selección de un subconjunto de interés.

Al presionar el botón “Filtros”, una nueva ventana aparece donde los operadores y los atributos pueden combinarse como expresiones lógicas sofisticadas con el fin de construir el filtro deseado.

1. Seleccione un atributo.
2. Seleccione el tipo de restricción (entre, igual a, etc ..)
3. Informe el valor de la restricción
4. Presione el botón “Añadir”
5. Utilice paréntesis y operadores lógicos para combinar restricciones.
6. Utilice el botón “Limpiar” para eliminar toda la expresión

## 7 ARCHIVOS DE SALIDA DEL MODELO

### 7.1 Archivos de salida en planilla

A continuación se presentan los archivos de salida que pueden ser manejados por el módulo gráfico.

Palabras-claves de la tabla de descripción de salidas en planilla:

Tipo	Descripción
DE	Datos de entrada
DI	Decisiones de inversión

Agente	Descripción
H	Plantas hidroeléctricas
T	Plantas térmicas
S	Sistema
Io	Interconexiones
F	Combustibles
P	Proyectos

Para generar el gráfico deseado, el usuario debe seleccionar en el Módulo de Gráfico la variable correspondiente.

Además de todas las salidas operativas generadas por el modelo SDDP, esos son los archivos de salida generados por el modelo OptGen:

Gráfico	Nombre del archivo CSV	Agente	Unidad	Tipo
Costo de inversión	outdisbu.csv	P	k \$	DI
Energía firme hidro	outhea.csv	H	MWprom	DE
Potencia firme hidro	outhpa.csv	H	MW	DE
Energía firme térmica	outtea.csv	T	MWprom	DE
Potencia firme térmica	outtpa.csv	T	MW	DE
Energía firme renovable	outrea.csv	T	MWprom	DE
Potencia firme renovable	outrpa.csv	T	MW	DE
Capacidad añadida	outidec.csv	P	MW	DI

### 7.2 Archivos de salida adicionales

Todos los archivos que se presentan en esta sección se pueden acceder por la interfaz, en el botón “Informes”, en el menú superior de la pantalla principal.

#### 7.2.1 informe de ejecución

El archivo de informe de ejecución (optgen.out) contiene los siguientes conjuntos de datos de salida:

- Resumen de los datos de entrada
- Costos de inversión anualizados
- Informes de generación y transmisión
- Informe de convergencia
- Plan de expansión óptimo
- Costos totales
- Tiempo de CPU necesario para la optimización

### 7.2.2 Plan de expansión óptimo

El archivo outpdec.csv contiene el plan de expansión óptimo para el caso de estudio. Este archivo tiene el formato exacto de un plan de expansión definido por el usuario y puede ser usado como un dato de entrada para el modelo. La primera línea contiene la versión del archivo, la segunda línea es un comentario y la tercera línea contiene el tipo de plan. En este archivo, el tipo de plan es siempre “*exactly*” - consulte la sección “[Plan de expansión definido por el usuario](#)” para obtener detalles sobre los tipos de planes.

La cuarta línea es también un comentario y las líneas siguientes contienen el formato descrito a continuación:

Campo	Descripción
1	Fecha de entrada en operación (mes)
2	Fecha de entrada en operación (año)
3	Fecha de decisión de inversión (mes)
4	Fecha de decisión de inversión (año)
5	Código del proyecto
6	Nombre del proyecto
7	Tipo del proyecto: 0 = planta térmica; 1 = planta hidro; 2 = interconexión; 3 = nodo de gas; 4 = gasoducto; 5 = circuito; 6 = fuente renovable; 7 = enlace CC; 8 = batería
8	Capacidad añadida (MW)
9	Llave: exactly = valor de decisión exacto;
10	Tipo de decisión: -1 = decisión planificada fija -2 = decisión optimizada -3 = decisión planificada flexible

Adicionalmente al plan de expansión óptimo, el modelo OptGen también genera un archivo de plan de expansión para cada iteración. Estos archivos no son accesibles por la interfaz del modelo, pero se pueden encontrar en el directorio de datos del caso de estudio y se identifican como outpdec\_XXXXYYY.csv, donde XXXX es el número de la iteración y YYY es la identificación de los problemas *sizing* y *timing*.

### 7.2.3 Plan de expansión detallado

El plan de expansión detallado se puede encontrar en el archivo `optsol01.csv`. Sus registros están presentados en el siguiente formato:

Campo	Descripción
1	Fecha de entrada en operación
2	Fecha de decisión de inversión
3	> = si la fecha de entrada es la fecha máxima; <= si la fecha de entrada es la fecha mínima; F = si la fecha de entrada es fija; R = si la unidad existente se sustituye; * = si la fecha de entrada es única;
4	Tipo de proyecto: TPP = planta térmica; HPP = planta hidro; INT = interconexión; GAS = nodo de gas; GPL = gasoducto; CIR = circuito; RNW = fuente renovable; DCL = enlace CC; BAT = batería
5	Sistema
6	Nombre del proyecto
7	Decisión de inversión (%)
8	Capacidad añadida (MW)

### 7.2.4 informe de convergencia

El archivo `optgconv.csv` contiene el informe de convergencia del OptGen que se compone de las siguientes columnas:

- Carácter “\*” identifica que se ha encontrado una solución mejor y se actualiza el límite superior
- Carácter “B” identifica que la solución del MIP fue interrumpida por límite de tiempo de CPU
- Costo de inversión (M\$)
- Costo de operación aproximado (M\$)
- Costo de operación esperado (M\$)
- Costo total (M\$)
- Límite inferior (Costo de inversión + Costo de operación aproximado) (M\$)
- Límite superior (Costo de inversión + Costo de operación esperado) (M\$)
- *Gap* de convergencia (diferencia porcentual entre límites superior e inferior) (%)
- Tolerancia de convergencia (%)
- Tiempo de CPU del problema de inversión (min)
- Tiempo de CPU del problema operación (min)
- Inviabilidad de la restricción de seguridad (GWh)
- Criterio de confiabilidad (máximo EPNS) (%)
- EPNS de la mejor solución (%)

- Tiempo de CPU del problema de confiabilidad (min)
- Número de iteraciones del SDDP
- Límite superior del SDDP (M\$)
- Límite inferior del SDDP (M\$)
- *Gap* de convergencia del SDDP (M\$)
- Tolerancia de convergencia del SDDP (M\$ o %)

Si las estrategias año horizonte y/u horizonte de rodante (ver "[Opciones de ejecución](#)") fueran seleccionadas, este informe contendrá la convergencia de todas las ejecuciones de los subproblemas.

### 7.2.5 Valor del CAPEX de la expansión óptima

El archivo outcapex.csv contiene el valor sin descuento del CAPEX (en k\$) de cada proyecto al final de cada año, cuando en realidad incurre. La primera línea contiene un comentario, con los nombres de las columnas. A partir de la segunda línea, los datos se escriben en el siguiente formato: la primera columna contiene un año del estudio y las demás contienen los valores de gasto de capital para cada proyecto específico para ese año.

### 7.2.6 Valor del O&M fijo de la expansión óptima

El archivo outcoem.csv contiene el valor sin descuento del costo de O&M (en k\$) de cada proyecto al final de cada año, cuando en realidad incurre. El costo de O&M es fijo, es decir, sólo depende de la cantidad de capacidad invertida para el proyecto. La primera línea contiene un comentario, con los nombres de las columnas. A partir de la segunda línea, los datos se escriben en el siguiente formato: la primera columna contiene un año del estudio y los demás contienen los valores de costo de operación y mantenimiento para cada proyecto específico para ese año.

### 7.2.7 Costo promedio de largo plazo

El archivo outrac.csv contiene los valores para el costo promedio de largo plazo (LRAC) del sistema (en \$/MWh) en cada año. Para más detalles sobre el cálculo de los valores de LRAC, consulte el Manual de Metodología del OptGen.

### 7.2.8 Costo marginal de largo plazo

El archivo outlrnc.csv contiene los valores para el costo marginal de largo plazo (LRMC) del sistema (en \$/MWh) en cada año, que representa el costo total incremental asociado a un aumento de una unidad en la demanda. Para más detalles sobre el cálculo de los valores de LRMC, consulte el Manual de Metodología del OptGen.