|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Centro de EnergÃ­a | | E:\U\Logo FCFM.png | Centro de Energía  Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  Universidad de Chile  Dirección: Plaza Ercilla 847, Santiago  Contacto: Myriam Reyes Email: contacto@centroenergia.cl Fono: +56 2 2978 0967. |
| **Manual modelo energético PMR** | | | |
|  | Manual para uso interno  Autor: Carlos Benavides, Vicente Sepúlveda  Abril 2024 | | |

Contenido

[1 Introducción 3](#_Toc163640769)

[2 Implementación computacional 5](#_Toc163640770)

[2.1 Estructura 6](#_Toc163640771)

[2.2 Modelo de optimización 6](#_Toc163640772)

[3 Ejecución del modelo 8](#_Toc163640773)

[3.1 Ejecutar un único caso 8](#_Toc163640774)

[3.2 Ejecutar múltiples casos 9](#_Toc163640775)

[4 Descripción datos de entrada 11](#_Toc163640776)

[5 Descripción datos de salida 23](#_Toc163640777)

[6 Modelo demanda sectorial 26](#_Toc163640778)

[6.1 Introducción 26](#_Toc163640779)

[6.2 Herramienta de proyección de demanda 26](#_Toc163640780)

[6.3 Calibración Modelo IPMR con Balance Nacional de Energía (BNE) 34](#_Toc163640781)

[6.4 Código 38](#_Toc163640782)

[6.5 Fuentes de información 41](#_Toc163640783)

[7 Calibración del modelo PMR 0](#_Toc163640784)

[8 Actualización de página web modelo PMR 5](#_Toc163640785)

[9 Ultimas modificaciones 12](#_Toc163640786)

[9.1 Datos de entrada 12](#_Toc163640787)

[9.2 Modelo 12](#_Toc163640788)

[9.3 Salidas 12](#_Toc163640789)

[9.4 Rutinas auxiliares 12](#_Toc163640790)

[9.5 Modificaciones modelos sectoriales 13](#_Toc163640791)

[9.5.1 Industria varias 13](#_Toc163640792)

[9.5.2 Minas varias 13](#_Toc163640793)

[9.5.3 Cobre 13](#_Toc163640794)

[9.5.4 Generación eléctrica 13](#_Toc163640795)

# Introducción

El modelo energético PMR desarrollado por el Centro de Energía de la Universidad de Chile, es una herramienta de simulación y análisis para evaluar el impacto de distintos escenarios de mitigación de cambio climático. La herramienta computacional permite evaluar el impacto combinado de distintas medidas de mitigación que contribuyan a cumplir la meta de carbono neutralidad de emisiones en Chile hacia el año 2050. A continuación se describen algunos ejemplos de instrumentos y medidas de mitigación que se pueden modelar con esta herramienta:

* Impuesto a las emisiones de gases de efecto invernadero.
* Sistema de Permisos de Emisiones Transables.
* Sistema de Norma de Emisiones propuesto en Ley de Cambio Climático.
* Presupuesto de emisiones.
* Límite de emisiones sectoriales.
* Electromovilidad en vehículos particulares, taxis y transporte público.
* Hidrógeno en transporte y procesos industriales.
* Electrificación de sistemas de calefacción.
* Retiro de centrales a carbón y gas natural.
* Introducción de sistemas de almacenamiento.
* Eficiencia energética.
* Transporte no motorizado.
* Otras medidas

Las principales salidas del modelo son:

* Proyección de oferta de generación eléctrica por central y tipo de tecnología.
* Proyección de demanda de energía para todos los sectores del Balance Nacional de Energía.
* Proyección de demanda de demanda eléctrica.
* Proyección de capacidad instalada.
* Proyección de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
* Proyección de costos de inversión, operación y mantenimiento, para todos los sectores del Balance de Energía.

Algunas características del modelo:

* Modelo matemático basado en enfoque de optimización.
* Modelo integrado de oferta y demanda. Se proyecta en forma integrada tanto la oferta como la demanda energía, considerando la integración de ambos sectores.
* Proyección de la demanda de energía para los sectores transporte, industria y minería, comercial, público y residencial.
* Proyección de oferta de energía considerando distintas fuentes y tecnologías: centrales solares fotovoltaicas, CSP, eólica, sistemas de almacenamiento, hidroelectricidad, geotermia, etc.
* Representación de restricciones de corto plazo del sector generación eléctrica.
* Proyección de todos los energéticos primarios y secundarios representados en el Balance Nacional de Energía: diésel, gasolina, kerosene, gas natural, gas licuado, carbón, electricidad, hidrógeno, etc.
* Proyección de emisiones basada en las metodologías del Inventario de Gases de Efecto Invernadero.

Los resultados de las simulaciones se publican a través de este link: https://modelopmr.cl/

# Implementación computacional

El modelo computacional implementado tiene la siguiente estructura:

* Datos de entrada: Los datos de entrada al modelo se ingresan en formato CSV siguiendo una estructura de base de datos relacional. Los archivos en formato CSV se pueden editar utilizando Excel, lo cual facilita la manipulación y visualización de estos datos.
* Modelo matemático: La formulación del problema de optimización se implementa en lenguaje GAMS. Asimismo, el programa GAMS tiene rutinas especializadas para leer los datos de entrada en formato CSV. Tanto el modelo energético como el modelo macroeconómico están programados en lenguaje GAMS, con el objeto de facilitar la integración entre ambos modelos y facilitar la transparencia de la modelación utilizada.
* Datos de salida: Los datos de salida del modelo de optimización se imprimen en formato CSV.

La siguiente figura muestra el esquema general del modelo energético.



Figura 2‑1: Estructura general del modelo energético. Fuente: Elaboración propia.

El modelo puede ser ejecutado tanto en computador con sistema operativo Windows (por ejemplo, a través de GAMS Studio) o Linux.

## Estructura

La estructura específica del IPMR viene dada por cuatro carpetas:

* *bin*: En esta carpeta se encuentran los ejecutables “Ejecutar\_Modelo\_PMR\_Observatorio.py” y “Ejecutar\_Modelo\_PMR.py”. Este último posee líneas con las que podemos decidir qué etapas del modelo queremos ejecutar (ver imágen 2), lo cual resulta útil a la hora de realizar pruebas al modelo, sin tener la necesidad de correrlo completo.

Texto, Carta

Descripción generada automáticamente

* *data\_input*: Acá se ubica el Excel “IPMR\_Nacional\_Generacion\_Electrica\_20230905”, del que se extraen todos los datos de entrada. Es el propio código “Generar\_csv.py” (contenido en la carpeta src) el que extrae las hojas, y las convierte en archivos .csv y, en algunos casos, crea archivos .gdx o gsp.
* *data\_output*: En esta carpeta se obtienen las salidas del modelo, es decir, las soluciones al problema de optimización.
* *src*: En esta carpeta están los códigos “Entrada\_PMR.py”, “Generar\_csv.py”, “reduccion\_emisiones.py", “Salidas\_PMR.py”, y “modelo\_energetico\_PMR\_20230807.gms” (contiene la mayor parte del código GAMS), entre otros. Estos programas se ejecutan todos por defecto al correr “Ejecutar\_Modelo\_PMR.py”, por lo que puede resultar útil, como se mencionó, dicho código si se desean realizar pruebas sobre ciertas etapas del modelo.

## Modelo de optimización

La estructura general del modelo de optimización se muestra en la siguiente imagen. El modelo minimiza los gagos en energía, costos de inversión en nuevas tencologías y pagos asociados a la modelación de instrumentos de precio al carbono (impuesto a las emisiones, compensación u offsets).



Figura 2‑2: Estructura general del modelo de optimización

# Ejecución del modelo

## Ejecutar un único caso

Para ejecutar el modelo debe seguir los siguiente pasos:

1. Crear la carpeta data\_input y data\_output, las cuales contendrán los datos de entrada y salidas, respectivamente.
2. Verificar que tiene instalado en programa PYTHON y el programa GAMS en el computador o servidor donde se ejecutará el modelo.
3. Verificar que se tienen instaladas las librerías requeridas. A la fecha de esta actualización, las versiones funcionales de las librerías utilizadas son:

Texto

Descripción generada automáticamente

1. Ir a la carpeta “bin” donde se encuentra el programa “Ejecutar\_Modelo\_PMR.py”.
2. Ejecutar el código “Ejecutar\_Modelo\_PMR.py” (utilizar, en la carpeta bin, el comando python Ejecutar\_Modelo\_PMR.py o python3 Ejecutar\_Modelo\_PMR.py según la versión de Python con la que se desea correr el modelo).

El código Ejecutar\_Modelo\_PMR.py ejecuta 3 funciones principales:

1. Crea los datos de entrada a partir de los datos la base de datos IPMR. Los datos de entrada se crean en la carpeta data\_input.
2. Ejecuta el modelo de optimización implementado en GAMS.
3. Una vez finalizado el proceso de optimización, se procesan las salidas y se crean datos adicionales en la carpeta carpeta data\_output.

## Ejecutar múltiples casos

Para ejecutar el modelo para múltiples casos se deben seguir los siguientes pasos:

1. Crear la carpeta data\_input y data\_output, las cuales contendrán los datos de entrada y salidas, respectivamente.
2. Verificar que tiene instalado en programa PYTHON y el programa GAMS en el computador o servidor donde se ejecutará el modelo.
3. Ir a la carpeta “bin” donde se encuentra el programa **“Ejecutar\_Modelo\_PMR\_Observatorio.py”.**
4. Ejecutar el código “Ejecutar\_Modelo\_PMR.py”

El código **Ejecutar\_Modelo\_PMR\_Observatorio** ejecuta las siguientes funciones:

1. Para cada escenario o caso de estudio se crean los datos de entrada que leerá el modelo de optimización (función “crear\_documentos”). Los datos de entrada se crean dentro de la carpeta “resultados” dentro de una carpeta cuyo nombre se define como se explica a continuación. La definición del nombre de los escenarios y las medidas que lo componen se definen en la hoja “Escenario”. Por ejemplo, la siguiente figura muestra que la hoja “Esc\_MA\_CC” contiene la definición de los escenarios.

Aplicación, Tabla

Descripción generada automáticamente

Figura 3: Definición de hoja Escenario desde la cual se leerán los nombre de los casos o escenarios

La siguiente figura muestra la definición de los escenarios y las medidas que lo componen. Este caso, existen 2 casos: “Todas\_las\_medidas” y “Caso\_base”.

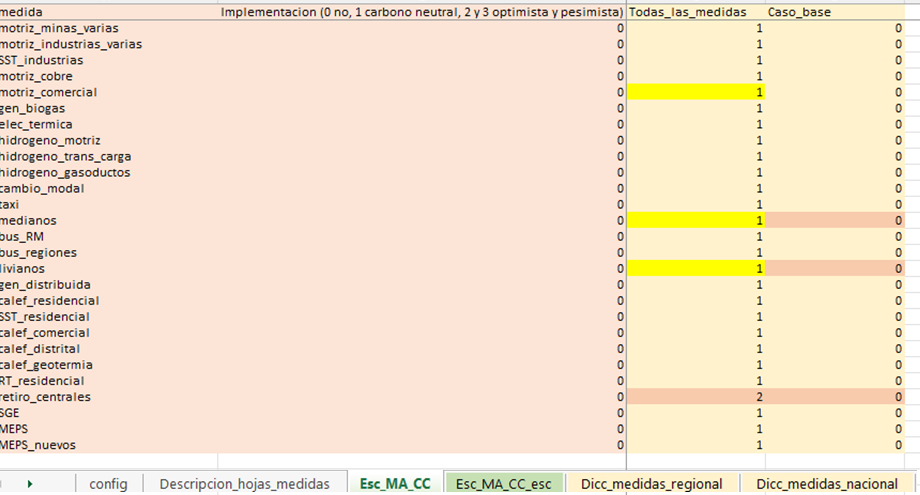


Figura 4: Definición de medidas que componen cada caso o escenaio

1. Luego se itera para cada escenario y se resuelven los problemas de optimización en forma paralela o en forma secuencial (la función “simulacion\_PMR” ejecuta el modelo de optimización). El tipo de ejecución del tipo paralela o secuencial se contrala con el el parámetro “flag\_paralelo\_secuencial”.

## Ejecutar modelo regional

El modelo regional tiene base de datos IPMR separadas por sector. A su vez, dentro de cada IPMR sectorial los procesos están desagregados por región. Esta separación de archivos se realiza para facilitar el procesamiento de los datos de entrada.

1. Selección de sectores a simular

En la hoja “data\_IPMR\_sectores” del archivo IPMR\_Base\_20240322.xlsx se especifican los sectores a simular. Se debe marcar con 1 o un 0 la columna “Simulación”.

Aplicación, Tabla, Excel

Descripción generada automáticamente

1. Selección de escenarios.

Al igual que el caso anterior, la definición de las los escenarios y medidas asociadas a cada escenario se definen en el archivo Escenarios.xlsx que se encuentra en la carpeta “data\_observatorio” de la ruta “Modelo PMR regional\data\_observatorio”. La definición del nombre de los escenarios y las medidas que lo componen se definen en la hoja “Escenario”. Por ejemplo, la siguiente figura muestra que la hoja “Esc\_MA\_CC” contiene la definición de los escenarios.

Aplicación, Tabla

Descripción generada automáticamente

Figura 5: Definición de hoja Escenario desde la cual se leerán los nombre de los casos o escenarios

La siguiente figura muestra la definición de los escenarios y las medidas que lo componen. Este caso, existen 2 casos: “Todas\_las\_medidas” y “Caso\_base”.

Interfaz de usuario gráfica, Aplicación

Descripción generada automáticamente

Figura 6: Definición de medidas que componen cada caso o escenario

Importante: En la carpeta /data\_observatorio/ debe estar creada previamente la carpeta /resultados

Interfaz de usuario gráfica, Texto, Aplicación

Descripción generada automáticamente

1. Cambios adicionales

Para simular sectores de demanda, sin incluir el sector generación eléctrica, se deben realizar las siguientes modificaciones:

* Dejar Inercia\_Mínima igual a 0 en hoja “data\_inercia\_reservas”
* Dejar Demanda igual a 0 en hoja “data\_demanda\_electrica”

1. Ejecutar modelo.

Para ejecutar el modelo se debe llamar a la siguiente rutina: python Ejecutar\_Modelo\_PMR\_Observatorio.py

Texto

Descripción generada automáticamente

Figura 7: Ejecutar modelo PMR con datos regionalizados.

La rutirna Ejecutar\_Modelo\_PMR\_Observatorio.py a su vez ejecuta la rutina Generar\_Entrada\_PMR.py

Generar\_Entrada\_PMR.py: Rutina encargada de concatenar los datos de entrada de las IPMR sectoriales y crear los datos de entrada en formato CSV del caso de estudio. La rutina crea un conjunto de datos de entrada a partir de la IPMR\_Base y luego crea los datos de entrada adicionales a partir de la información contenida en las IPMR sectoriales.

Texto

Descripción generada automáticamente

Figura 8: Escritura de archivos a partir de IPMR Base.

Texto

Descripción generada automáticamente

Figura 9: Proceso de concatenación a partir de datos de la IPMR sectoriales.

# Descripción datos de entrada

Las siguientes tablas describen de manera general los datos utilizados por el modelo energético y también en el modelo macroeconómico. Los datos de entrada del modelo energético están en formato CSV lo cuales pueden ser editables desde Excel u otro programa equivalente.

Es importante destacar que el modelo de datos no tienen ninguna restricción en cuanto a las cantidad de sectores, energéticos, gases de efecto invernadero, cantidad de procesos, etc. que se pueden modelar.

Tabla 1: Descripción de datos de entrada de modelo energético.

| Archivo de entrada (.csv) | Descripción | Fuentes |
| --- | --- | --- |
| data\_set\_agnos | Se definen los años del horizonte de evaluación del modelo (Por ejemplo: 2017 a 2050). | El usuario define el horizonte de evaluación. |
| data\_set\_etapas | Se definen las etapas de cada año del horizonte de evaluación (Ejemplo: meses o trimestres) | El usuario define las etapas. Por ahora las simulaciones que se presentaron en este informe consideran etapas mensuales (1 a 12). |
| data\_set\_bloques | Se definen los bloques asociados a cada etapa. | El usuario define los bloque. Por ahora las simulaciones que se presentaron en este informe consideran 5 bloques para representar cada mes. |
| data\_set\_procesos | Se definen los procesos modelados (Ejemplo: industrias, centrales eléctricas, etc.) .Es fundamental que se expliciten en esta hoja, todos los procesos que están en “data\_procesos”, de lo contrario no serán considerados. | Se definen los procesos modelados por el usuario para cada sector. En el caso generación eléctrica los procesos corresponden a las centrales en operación (Fuente: Coordinador Eléctrico Nacional) y nuevas centrales que podrían entrar a futuro. En el caso de industria y minería corresponde a las industrias asociadas a los sectores económico. |
| data\_set\_sectores | Se definen los sectores modelados (Ejemplo: minería del cobre, papel y celulosa, generación eléctrica, transporte terrestre pasajeros, etc.) | Los sectores se basan en la desagregación del Balance Nacional de Energía. |
| data\_set\_subsectores | Se definen los subsectores contenidos en cada sector. |  |
| data\_set\_sectores\_BNE |  |  |
| data\_set\_regiones | Se definen las regiones (I, II, III, IV, …, XVI) |  |
| data\_set\_productos | Se definen los productos modelados asociados a cada proceso productivo. | El usuario define los productos asociados a cada sector productivo (energéticos, producción industrial, etc.). |
| data\_set\_energeticos | Se definen los energéticos modelados (Ejemplo: diesel, petroleo\_combustible, gasolina, kerenose, gas\_licuado, gasolina\_aviacion, kerosene\_aviacion, etc.). | Balance Nacional de Energía. |
| data\_set\_flujos | Se definen los flujos modelados asociados a cada proceso productivo | El usuario define los flujos de entrada y salida asociados a cada sector productivo. |
| data\_set\_demandas | Se definen de las demandas asociados a los productos generados por cada proceso productivo (Ejemplo: demanda azúcar, demanda cobre, demanda celulosa, etc). | El usuario define las distintas demandas modeladas asociadas a cada sector productivo. |
| data\_set\_gei | Se definen los gases de efecto invernadero modelados (Ejemplo: CO2, CH4, N2O, HFC, PFC, SF6) | Inventario de Gases de Efecto Invernadero. |
| data\_set\_segmentos | En esta hoja son definidas los segmentos vehiculares. Es útil si se requiere evaluar metas de eficiencia energética aplicados al sector transporte. Permite establecer metas diferenciadas para cada categoría de vehículos. Estos pueden ser livianos (LDV), comerciales (LCV), medianos (MDV) y pesados (HDV) | Se definen categorías basada en clasificación por pesos brutos vehiculares del 3CV. |
| data\_set\_offset | Se definen offsets del sistema | Elaboración propia |
| data\_set\_lineas | Se definen las líneas modeladas del Sistema de Transmisión | Elaboración propia, basado en un sistema de transmisión simplificado de la red eléctrica nacional. |
| data\_set\_almacenamiento | Se definen los almacenamientos (XII, SING, II-III y IV) |  |
| data\_set\_zonas\_ernc | Se definen las zonas geográficas para modelar los perfiles de centrales de ERNC. | Se definen las zonas basadas en el estudio Política Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía, 2017. |
| data\_set\_curvas\_carga | Se definen las curvas de carga de demanda eléctrica para los subsectores económicos modelados. | Elaboración propia con datos de demanda real. |
| data\_set\_tecnologias | Se definen las tecnologías de los procesos productivos (Ejemplo: carbón, carbon\_CCS, diesel, eólica, almacenamiento, biomasa, biomasa\_forestal, biomasa\_licor\_fuel\_oil, bombeo, etc.) | Elaboración propia, basado en tecnologías actualmente en operación y tecnologías que podría ingresar a futuro. |
| data\_set\_precios | Se definen los identificadores de los precios de energéticos aplicables a cada subsector económicos. | Elaboración propia con datos de precios reales y sus proyecciones. |
| data\_set\_barras | Se definen las barras del Sistema de Transmisión que han sido modeladas. | Elaboración propia, basado en un sistema de transmisión simplificado de la red eléctrica nacional. |
| data\_set\_cap | Se definene las trayectorias de cap de emisiones aplicable a cada sector económico definido por el usuario | Elaboración propia. |

Tabla 2: Descripción de datos de entrada de modelo energético (continuación).

| Archivo de entrada (.csv) | Descripción | Fuentes |
| --- | --- | --- |
| data\_productos | Se definen los parámetros asociados a los productos modelados. | El usuario define los parámetros asociados a los productos. |
| data\_procesos | Se definen los parámetros de los procesos modelados. | Balance Nacional de Energía, Inventario de Calderas, Fuentes Afectas a Impuestos Verdes y Varias Fuentes para caracterizar usos finales por sector productivo. Estudio de Capacidad Técnica Disponible, Coordinador Eléctrico Nacional, 2018. |
| data\_etapa\_inicio | Se define, para cada central, un año en el que inicia su operación, y la etapa de susodicho año en la cuál se debe comenzar a considerar que está operativa. La resolución máxima a efectos del presente informe, es de 12 etapas (modelando los 12 meses). | El mes en el que comienza a estar operativa una central, se obtiene del plan de obras que aparece en en el IPLP. A su vez se complementa la información con la herramienta “INFOTECNICA” del CEN. |
| data\_proceso\_capacidad | Se define la capacidad instalada de cada proceso para cada año |  |
| data\_flujos | Se definen los parámetros asociados a los procesos productivos modelados | Las intensidades del sector Industria y Minería se calculan en base a producción real 2017 por sector económico (fuentes: ver demanda\_sectorial) y Balance Nacional de Energía. |
| data\_relacion\_flujos | Se definen los parámetros para la restricción de relación entre flujos modelados. | El usuario define la relación entre flujos de entrada y salida de cada proceso. |
| data\_tipo\_flujo | Se define el tipo de flujo (entrada o salida) asociado a cada proceso. | El usuario define el tipo de flujo asociado a cada proceso. |
| data\_participacion\_flujos | Se definen los parámetros de participación de los flujos asociados a los procesos productivos. | Los datos de participación de los flujos se basan en los resultados del estudio Bienes Públicos de CORFO: “Herramienta para la estimación, reporte y actualización de potenciales de eficiencia energética para el sector productivo.” |
| data\_demanda\_sectorial | Se definen las proyecciones de demanda sectorial (Ejemplo: demanda de cobre, celulosa, azúcar, etc.). | Varias fuentes dependiendo del sector (CORMA, FAO, INE, Instituto Chileno del Hormigón, SERNAPESCA, BNE, Methanex, ALACERO, Instituto Chileno del Acero, Anuario de la Minería, Banco Central, Ministerio de Hacienda, COCHILCO). Ver Sección 4.2. |
| data\_energeticos | Se definen los parámetros de los distintos energéticos modelados. | Se definen los parámetros de los distintos energéticos modelados. |
| data\_precios | Se definen los energéticos a los que se les asignará un precio en “data\_precio\_energeticos” |  |
| data\_precio\_energeticos | Se definen las proyecciones de precio de los distintos energéticos. | Escenario B Política Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía, 2017. |
| data\_gei | Se definen los parámetros los gases de efecto invernadero modelados. | Guía IPCC 2016 |
| data\_fe | Se definen los factores de emisión para cada sector, energético y gas de efecto invernadero. | Guía IPCC 2016 |
| data\_impuesto | Se define la trayectoria de impuesto para cada gas de efecto invernadero. | El usuario puede definir el impuesto a las emisiones de GEI. En el caso del sector de generación eléctrica se utilizaron valores de acuerdo a la legislación actual. Además, se evaluaron escenarios de trayectoria de impuestos basados en estudios anteriores PMR. |
| data\_set\_cap |  |  |
| data\_limite\_etps |  |  |
| data\_limite\_compensaciones\_etps |  |  |
| data\_limite\_compensaciones |  |  |
| data\_cap | Se define el límite de emisiones de gases de efecto invernadero(“cap”). | El usuario define el límite de emisiones. Por ahora las simulaciones se han realizado con un valor suficientemente alto de manera que no se active la restricción. No obstante, durante el desarrollo del proyecto se espera utilizar distintas trayectorias del *cap* de emisiones. |
| data\_offset |  |  |
| data\_limite\_offset |  |  |
| data\_sectores | Se definen los parámetros asociados a cada uno de los sectores modelados. | Usuario |
| data\_subsectores |  |  |
| data\_sectores\_BNE |  |  |
| data\_regiones |  |  |
| data\_costo\_inversion | Se definen los datos de las proyecciones de los costos de inversión de los distintos procesos modelados | Los costos de inversión del sector generación eléctrica son los informados en el escenario B de la Política Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía, 2017. Para los otros sectores económicos se utilizan datos de inversión de informacion levantada por el consultor. Estos costos corresponden a costos de medidas de eficiencia energética, costos de recambio de combustible, entre otros. |
| data\_coma | Se definen los datos de costo de operación y mantenimiento anual de los distintos procesos modelados. | Se utilizan los mismos supuestos que para el costo de inversión. |
| data\_pmin | Se definen las trayectorias de potencia mínima de procesos candidatos. Utilizado para forzar la entrada de medida de mitigación. | Usuario. |
| data\_pmax | Se definen las potencias máximas para cada proceso modelado. | Por ahora no se han puesto limitaciones a la capacidad máxima por tecnología. |
| data\_pdec |  |  |
| data\_segmentos | Permite asociar un segmento a un ID, necesario para la modelación. Sólo requerido para evaluación de metas de rendimiento en transporte. | Usuario. |
| data\_demanda | Asignacion de consumos eléctricos a sus respectivas curvas de carga. | Usuario. |
| data\_meta\_ee | Permite fijar metas de rendimiento promedio anual para los vehículos (por segmento) nuevos que se incorporan al parque. Se solicita el segmento (LDV,HDV, etc), el año y el valor de rendimiento esperado en miles km/Tcal (para pasar de rendiento de km/litro de gasolina equivalente a miles km/Tcal, multiplicar el primer por 120) |  |
| data\_retiro\_veh | Tasa de chatarrización promedio. Supuesto basado en la longevidad de los vehículos (procesos). Permite determinar el número de vehículos nuevos vendidos por año. | Basado en la antigüedad del parque de vehículos livianos y medianos (ANAC , 2017) |
| data\_duración | Se define la duración de cada uno de los bloques temporales que fueron modelados. | La duración de cada bloque se obtiene de resultados de estudios previos utilizando el modelo PLP. |
| data\_lineas | Se definen los parámetros de las líneas de transmisión modeladas del Sistema de Transmisión. | Elaboración propia, basado en un sistema de transmisión simplificado de la red eléctrica nacional. |
| data\_barras | Se definen los parámetros de las barras modeladas de los Sistemas de Transmisión (Ejemplo: Sistema Eléctrico Nacional). | Elaboración propia, basado en un sistema de transmisión simplificado de la red eléctrica nacional. |
| data\_dem\_distr\_barra | Se distribuyen los consumos de procesos eléctricos de consumos en las respectivas barras del sistema eléctrico modelado. | Elaboración propia con datos de demanda eléctrica del Coordinador Electrico Nacional. |
| data\_dem\_distr\_etapa | Se distribuyen los consumos de procesos eléctricos de consumos en las respectivas etapas del sistema eléctrico modelado. | Elaboración propia con datos de demanda eléctrica del Coordinador Electrico Nacional. |
| data\_dem\_sec\_etapa | Se distribuyen los consumos de procesos eléctricos del sector residencial en las respectivas etapas del sistema eléctrico modelado. Valores utilizados para la modelación de la medida de autogeneración en distribución. | Elaboración propia con datos de demanda eléctrica del Coordinador Electrico Nacional. |
| data\_dem\_distr\_bloque | Se construyen las curvas de cargas de demanda eléctrica en los respectivos bloques del sistema eléctrico modelado. | Elaboración propia con datos de demanda eléctrica del Coordinador Electrico Nacional y consumos característicos de estudios previos. |
| data\_curvas\_carga | Definición de las curvas de carga de cada subsector económico modelado. | Usuario. |
| data\_demanda\_electrica | Se definen las proyecciones de demanda del sector generación eléctrica. | Corresponde a la demanda eléctrica del Escenario B del estudio de Política Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía, 2017. No obstante, se espera en futuras entregas que la demanda provenga de la misma herramienta de simulación. |
| data\_inercia\_reservas | Datos de inercia mínima por bloque para modelación de reservas primarias y secundarias del sistema. | Datos de inercia a partir de datos del Coordinador Electrico. |
| data\_zonas\_ernc | Se definen los parámetros asociadas a cada zona ERNC modelada. | Se definen las zonas basadas en el estudio Política Energética de Largo Plazo del Ministerio de Energía, 2017. |
| data\_perfil\_ERNC | Se definen los perfiles ERNC para cada zona modelada. | Los perfiles ERNC se basan en los datos de perfiles horarios y la definición de bloques explicada anteriormente. |
| data\_factor\_planta | Se definen los factores de planta por etapa para las centrales definidas en este archivo. | Los factores de planta de las centrales hidroeléctricas se estiman a partir de simulaciones de modelo PLP para una condición hidrológica media-seca. |
| data\_factor\_planta\_anual |  |  |
| data\_tecnologias | Se definen los atributos a las distintas tecnologías modeladas. | Usuario. |
| data\_almacenamientos | Se definen las horas de almacenamiento de cada central candidata de esa tecnologia. | Elaboración propia a partir de sistemas de almacenamiento de menos de 12 horas. |
| data\_costos\_inv\_almacenamiento | Se definen las trayoctorias de costos de inversión de las tecnologías de almacenamiento. | Ver informes para supuestos. |
| data\_participacion\_tec |  |  |
| data\_perfil\_almacenamiento | Se definen los perfiles de las centrales de almacenamiento. | Elaboración propia. |
| data\_flujos\_intensidad |  |  |
| data\_flujos\_calibracion |  |  |
| data\_participacion\_uso |  |  |
| data\_participacion\_uso\_2 |  |  |
| data\_participacion\_energetico |  |  |
| data\_balance\_energia |  |  |
| data\_fpci |  |  |

La siguiente tabla describe las columnas del archivo data\_procesos:

Tabla 3: Descripción del archivo data\_procesos.csv

| Columna | Descripción |
| --- | --- |
| Proceso | Nombre del proceso |
| ID | Numero identificador del proceso |
| ID\_Sector | Identificador del sector del proceso |
| ID\_Subsector | Identificador del subsector del proceso |
| ID\_Sector\_BNE | Identificador del sector del BNE |
| ID\_Region | Identificador de la región donde se ubica el proceso. |
| ID\_Producto | Identificador del producto |
| Uso\_final | Identificador del uso final |
| Energectico\_principal | Identificador del energético principal del proceso |
| Tipo | Identificador del tipo de producto (1=producto final, por ejemplo Cobre, 2=energía útil, por ejemplo electricidad motriz) |
| Capacidad\_Instalada | Capacidad instalada del elemento |
| Unidad\_capacidad | Unidad de la capacidad instalada |
| Fplanta | Factor de planta del elemento |
| Unidad\_Fplanta | Unidad del factor de planta |
| Estado | Estado del elemento, 1 = Existente, 0 = Candidato |
| Agno\_ini | Año de inicio del elemento |
| Agno\_fin | Año final del elemento |
| Vutil | Vida útil del elemento |
| Zona | Zona del elemento |
| ID\_Curva | Identificador de la curva de consumo del elemento |
| ID\_Tecnologia | Identificador de la tecnología del elemento |
| ID\_Costo\_inversion | Identificador del costo de inversión asociado al proceso |
| ID\_Ener | Identificador del energético primario del elemento |
| ID\_Precio\_energ | Identificador del precio del energético primario del elemento |
| ConEsp | Consumo específico del elemento |
| Cvar\_no | Costo variable no combustible del elemento |
| Fcal | Factor de ajuste de unidades para transformar consumo de energía del elemento en TCal |
| Fprecio | Factor de ajuste de unidades para que costo de operación del elemento quede expresado en US$ |
| ID\_Barra | Identificador de la barra de conexión al sistema del elemento |
| Es\_ERNC | Flag que identifica los elementos que corresponden a centrales ERNC. 1 = Es ERNC, 0 = No es ERNC |
| ID\_Zona\_ERNC | Identificador de la zona de generación ERNC |
| Pmin | Potencia mínima del elemento (en MW) |
| Regula | Flag que identifica si el elemento regula o no la potencia generada. 1 = Regula potencia, 2 = No regula potencia |
| ConPropio | Consumo propio del elemento, expresado como factor de la capacidad instalada |
| Inercia | Tiempo de inercia característico del elemento expresado en segundos |
| Reserva\_Primaria | Monto máximo de reserva primaria en MW |
| Reserva\_Secundaria | Monto máximo de reserva secundaria en MW |
| Impuesto | Flag que identifica si el elemento participa o no del impuesto a las emisiones. 1 = Participa, 0 = No Participa |
| SPT | Identificador de la trayectoria del cap de emisiones que afecta al elemento |
| ID\_Seg\_Tran | Identificador de restriccion de meta de eficiencia energética en transporte |
| Creditos | Ponderador para créditos de eficiencia en transporte |

# Descripción datos de salida

La siguiente tabla describe los archivos que contienen los resultados del modelo energético.

| Archivo de salida (.csv) | Descripción |
| --- | --- |
| Generacion\_observatorio | Suma la generación de todas las centrales, distinguiéndolas por sector, para cada año. |
| Potencia\_observatorio | Suma la potencia instalada de todas las centrales, distinguiéndolas por sector, para cada año. |
| salida\_emisiones.csv |  |
| salida\_emisiones\_ge |  |
| salida\_emisiones\_regiones |  |
| solucion\_barras |  |
| solucion\_costo\_operacion\_sectores |  |
| solucion\_costos\_sectores |  |
| solucion\_demanda\_barra |  |
| solucion\_demanda\_no\_suministrada |  |
| solucion\_detalle\_costos |  |
| solucion\_emisiones | Resultados de emisiones de gases de efecto invernadero |
| solucion\_emisiones\_co2e |  |
| solucion\_emisiones\_ge | Resultados de emisiones de gases de efecto invernadero del sector generación eléctrica |
| solucion\_emisiones\_ge\_co2e |  |
| solucion\_energia | Resultados de energía consumida por cada proceso productivo |
| solucion\_energia\_2 | Resultados de energía consumida por cada proceso productivo |
| solucion\_excedente\_emisiones.csv |  |
| solucion\_expansion\_lineas |  |
| solucion\_flujos |  |
| solucion\_flujos\_bloques |  |
| solucion\_flujos\_procesos | Resultados de los flujos asociados a cada proceso productivo |
| solución\_generacion | Resultados de generación eléctrica para cada proceso (central eléctrica) y para cada año, etapa y bloque |
| solución\_generacion\_anual | Resultados de generación eléctrica por año. |
| solucion\_lineas | Resultados de flujos por líneas de transmisión |
| solucion\_offset | Resultados de offset adquiridos para cumplir con restricción de GEI |
| solucion\_offset\_cap | Resultados de offset adquiridos para cumplir con restricción de GEI |
| solucion\_pago\_impuesto |  |
| solucion\_potencia | Resultados de potencia instalada por proceso |
| solucion\_potencia\_calibracion |  |
| solucion\_precio\_sombra\_cap |  |
| solucion\_recuadacion\_impuesto |  |
| solucion\_resumen\_costos |  |
| solucion\_resumen\_costos\_sin\_tasa |  |
| solucion\_costos\_marginales | Resultados de costos marginales para cada barra modelada |
| solution\_generation\_sector |  |
| solution\_generation\_sector\_actualizado |  |

|  |  |
| --- | --- |
| Archivo de salida (.png) | Descripción |
| generacion | Gráfico de “Generacion\_observatorio”. |
| potencia | Gráfico de “Potencia\_observatorio”. |

# Modelo demanda sectorial

## Introducción

El modelo de optimización recibe como dato de entrada las proyecciones de demanda sectoriales. El modelo determina la forma óptima de satisfacer esos requerimientos de demanda y los procesos energéticos que se necesitan.



Las proyecciones de demanda sectoriales son un dato de entrada del modelo y son obtenidas a partir de referencias de instituciones públicas o privadas (ejemplo, proyección de producción de cobre de COCHILCO) o partir de proyecciones utilizando modelos econométricos específicos de cada sector.

A continuación se describe la metodología de proyección las rutinas para automatizar el proceso de proyección de demanda.

## Herramienta de proyección de demanda

Para facilitar la actualización de las proyecciones de demanda que depende de las proyecciones de drive como PIB, población, etc., se desarrolló una rutina en Python “Actualizar\_demada.py” la cual lee los datos de entrada del archivo Modelo\_demanda\_IPMR.xlsx.

Inicialmente el modelo IPMR en la hoja Proyecciones demanda contenía datos de proyecciones de demanda para distintos sectores, ingresados directamente desde otras fuentes y otros calculados a través de fórmulas mediante el mismo Excel. Dentro de esta misma hoja también se encuentran datos proyectados relacionados al crecimiento a nivel país, como lo son el PIB, la población, la cantidad de viviendas, la tasa del PIB, etc.

En primera instancia, el objetivo es actualizar los datos de esta hoja de proyecciones de demanda utilizando las fuentes de información más recientes y adoptando distintos modelos de proyección de demanda que puedan depender de otras variables como el PIB.

Para ello, inicialmente se crea un nuevo archivo llamado “Modelo demanda IPMR.xlsx”, al cual se le crea una hoja llamada *datos\_entrada*, donde se añade cada variable proyectada a partir de fuentes de información. En este caso se añade como dato de entrada las siguientes variables (variable – unidad):

* Tipo cambio dólar – CLP/USD
* Tasa PIB - %
* Tasa Población - %
* PIB – miles mill CLP
* Población – habitantes
* Viviendas – viviendas (\*)
* electricidad\_res
* manufactura – Tcal (\*\*)
* celulosa – miles ton
* azúcar – miles ton
* cemento – Tcal (\*\*)
* hierro – Tcal
* pesca – miles ton
* acero – miles ton
* petroquímica – miles ton
* salitre – miles ton
* cobre – miles ton
* energía\_publico – Tcal (\*)

En este caso, las variables marcadas con (\*) indican que se ingresó solamente información histórica hasta el año 2021, mientras que para las variables marcadas con (\*\*) indican que se ingresa solamente información histórica del año inicial (2017) ya que para el resto de años se realiza una proyección a través del PIB.

Adicional a esta hoja, se adopta la estructura del modelo STEP3.0 para obtener las proyecciones de pkm, tkm y vkm hasta el año 2050. Por ende, se añaden las hojas necesarias y se modifica el código fuente de tal forma que se obtengan solamente las proyecciones de pkm, tkm y vkm del modelo STEP3.0 en formato csv. Estos son almacenados dentro de la carpeta llamada “datos\_proyecciones”. Para el caso de Transantiago y bus rígido urbano en la RM, realizó un ajuste de forma que Transantiago corresponde a bus articulado + % buses rígidos urbano en la RM, mientras que buses urbanos RM queda como la parte restante de buses rígidos. Para obtener el % correspondiente de buses rígidos urbanos que pertenecen a Transantiago, se tomó la información histórica de buses Transantiago a través del [Directorio de Transporte Público Metropolitano](https://www.dtpm.cl/index.php/documentos/informes-de-gestion), y de buses rígidos y articulados obtenidos del modelo STEP3.0 hasta el año 2021. Como la información disponible útil comienza a partir del 2016, y considerando que los años 2020 y 2021 son anómalos debido al estallido social y el COVID, la información útil es muy poca para poder realizar una proyección hasta el año 2050. Sin embargo, considerando que la flota de buses y los trayectos en general son constantes y por ende, los kilómetros recorridos en general tienden a un mismo número, se añadió el promedio de los datos para los años 2022 hasta 2025. Utilizando además la proyección de vkm rígidos urbanos en la RM y articulados, se vuelve a calcular la fracción de buses rígidos que pertenecen al Transantiago de la forma:

De forma que los km de Transantiago queden modelados por:

Así, los datos quedan de la siguiente forma:

Interfaz de usuario gráfica, Tabla

Descripción generada automáticamente

Luego para proyectar el valor de la fracción de rígidos hasta el año 2050, se utiliza el método de regresión [Ridge](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.Ridge.html). De esta forma, entregando como variables independientes vkm\_rigido y vkm\_articulado, se realizó una proyección de la fracción rígidos, mediante el código presentado en Anexos [1]. Con esto finalmente se obtiene un archivo csv con la proyección de fracción rígidos, datos que son ingresados posteriormente al archivo “Modelo demanda IPMR.xlsx” en una nueva hoja llamada *aux\_transantiago.*

Adicionalmente, se añaden hojas de modelos econométricos obtenidos del modelo CNE para la proyección de cementos, industrias varias y minas varias, llamándose *parametros\_cemento*, *parametros\_industrias\_varias* y *parametros\_minas\_varias* respectivamente. Así, para estos sectores se realiza una proyección en base a estas variables econométricas y el PIB ingresado en los datos de entrada.

Para el caso del sector residencial, se incluyó la demanda base por región, uso y energético obtenidos del modelo IPMR en la hoja *datos\_demanda\_sectorial*. Para el sector comercial se realiza algo similar, ingresando así la eficiencia por uso y energético en la hoja *eficiencia\_uso\_comercial*, la participación por energéticos en la hoja *participación\_energéticos\_com* y la participación por uso y energético en la hoja *participación\_uso\_comercial.*

De forma análoga, para el sector cobre se incluyen los datos de participación por proceso en la

hoja participación\_cobre, las leyes en la hoja leyes\_cobre y la recuperación por proceso en la hoja

recuperación\_cobre.

Es importante mencionar que si bien estos datos son utilizados para realizar algunos datos de proyección de demanda en cada uno de los sectores mencionados, estos no están sincronizados de momento con los datos al interior del modelo IPMR, por lo que el modelo tomará solamente los datos que están dentro del archivo IPMR y los datos en el archivo “Modelo Demanda IPMR” solamente serán utilizados para realizar cálculos que servirán para una visualización en una nueva estructura de los datos proyectados (las que se verán más adelante en este documento). La estructura recién mencionada se puede observar en Anexos [2].

Con la estructura de datos ya armada, se busca realizar una actualización de las proyecciones de demanda de forma automática ejecutando algún código en Python. Para ello se crea el código llamado *Actualizar\_demanda.py*, donde inicialmente adopta el código del modelo STEP3.0 modificado de tal forma que solo extraiga los datos de PKM, TKM y VKM. Esto se realiza a través de la clase llamada *Escenario\_Base*.

Adicional a esto, se genera una función llamada *transformar\_entrada* la cual recibe como entrada las direcciones de los archivos del modelo IPMR y del modelo de demanda IPMR donde están los datos de entrada. Esta función lee la hoja *datos\_entrada* y la hoja *Proyecciones Demanda*, de forma que crea un nuevo dataframe con las columnas de la hoja *Proyecciones Demanda* rellenando con los datos disponibles en la hoja *datos\_entrada*.

También se crea la función *importar\_datos* que sirve como función auxiliar para importar los datos provenientes del modelo IPMR y del archivo Modelo demanda IPMR. Del primer archivo se importan los datos de las hojas *Parámetros\_aux*, *Panel Medidas* y *4.-Edificacion\_sostenible*.

Del segundo archivo se importan los datos econométricos de las hojas *parámetros\_cemento*, *parámetros\_industrias\_varias*, *parámetros\_minas\_varias* y datos del sector comercial en las hojas *eficiencia\_uso\_comercial*, *participación\_uso\_comercial* y *participación\_energeticos\_com.*

Todos estos datos importados se almacenan en un solo diccionario el cual contiene distintos dataframes.

Para añadir la información del sector transporte a través del model STEP3.0, se crea la función llamada *proyecciones\_step* la cual lee los archivos csv generados por el código modificado del modelo STEP, además de la hoja auxiliar para obtener la fracción de buses rígidos urbanos en la RM que pertenecen a Transantiago. Así, a través de filtros se obtienen los pkm, tkm y vkm para cada tecnología entre los años 2017 y 2050, ya sea en ámbito urbano o interurbano según corresponde. Esta función entrega finalmente un solo dataframe con los KM, pkm y tkm de cada tecnología que se encuentra en la hoja *Proyecciones demanda*.

Para algunas de las variables, se crean códigos propios para realizar los cálculos en cada año. A continuación, se presenta cada una de las funciones programadas:

* 1000000
* **(\*)**
* **(\*)**

**(\*)** Indica que es una ecuación genérica para la demanda sectorial, es decir, azúcar, cobre, minas varias, industrias varias, hierro, cemento, celulosa, etc.

En Anexo [4] Se pueden apreciar algunos ejemplos de estas funciones programadas.

Con estas ecuaciones programadas se procede a rellenar el dataframe transformado de los datos de entrada, de forma que si ya existe un dato dado en la entrada, este no se reemplace, pero si no hay dato en los datos de entrada, este sea calculado por las formulas. Adicional a esto, se añaden los datos del sector transporte obtenidos por la funcion anteriormente mencionada. Así, se genera a través de la función *calcular\_proyecciones* un nuevo dataframe que posee las proyecciones de demanda en la misma estructura que la hoja *Proyecciones demanda*.

Con esto, se procede a crear una nueva función llamada *crear\_proyeccion\_demanda* la cual toma el dataframe recién mencionado y lo transforma a una estructura tal que cada columna se vuelve una variable dentro de otra columna llamada *Variable*, añadiendo además la unidad. Esto se resume como una transformación de una gran tabla con las variables de forma horizontal o columnas, a una gran tabla con las variables en forma vertical o filas. Adicionalmente se añade la unidad de cada variable como una nueva columna. La misma función almacena esta nueva tabla en una nueva hoja llamada *datos\_proyecciones\_demanda* tanto en el modelo IPMR como en el archivo Modelo Demanda IPMR.

Con las hojas ya creadas, mediante una nueva función llamada *actualizar\_proyecciones\_demanda* se actualizan los valores de las hojas *Proyecciones demanda* y *Demanda\_Cobre* del modelo IPMR. Para ello se reemplazan los valores de cada celda con la formula *SUMAR.SI.CONJUNTO*, donde la formula busca para cada columna y año el match con la tabla de la nueva hoja de proyección de demanda. Es importantemencionar que esta fórmula para hacer match se incluye en el mismo código en Python, por lo que no es necesario ir actualizando la formula desde el mismo Excel. Luego la misma función recalcula todas las fórmulas del archivo Excel y lo vuelve a guardar.

Paralelo a esto, se crea una función llamada *generar\_salidas*, la cual lee los datos de la hoja *datos\_proyeccion\_demanda* y los datos auxiliares de eficiencia, participación y leyes para el sector residencial, comercial y cobre. Esta función genera en el archivo *Modelo demanda IPMR* salidas de cada uno de los sectores en un formato similar al STEP3.0, transformando los años en columnas y las variables en filas. Así, se obtienen las salidas para driver, sector comercial, sector residencial, publico, transporte, demanda sectorial, cobre y proyección de material procesado. En el Anexo [3] se puede apreciar la estructura de las salidas añadidas al archivo *Modelo demanda IPMR.xlsx*.

Para realizar la ejecución de este código basta con abrir la consola de comando y dirigirse al directorio en que se encuentran los archivos del modelo IPMR y *Modelo demanda IPMR.xlsx*, a través del comando cd. Una vez se encuentra en la dirección, se ejecuta el archivo Python *Actualuizar\_demandas.py* como se muestra en la siguiente figura:

Texto

Descripción generada automáticamente

## Calibración Modelo IPMR con Balance Nacional de Energía (BNE)

Para ajustar la demanda de energía por sector y energético a los datos históricos del BNE, se toma inicialmente como referencia el año 2017 para realizar el ajuste. De esta forma, se realiza una comparación entre los datos originales en el modelo con los datos históricos del balance hasta el año 2021. Para ello se implementó un código en Python donde se recibe el balance nacional en formato csv y los datos de demanda energética obtenidos del modelo IPMR llamado *solución\_energia2.csv*, coincidiendo los sectores y energéticos del modelo IPMR con los del BNE.

Como resultado se obtiene la siguiente comparación:

Tabla

Descripción generada automáticamente

Tabla

Descripción generada automáticamente

De esta forma, para calibrar el modelo, se modifican las intensidades de la hoja *data\_flujo*, modificando así solamente los flujos de salidas (OUT).

Para ver como modificar las intensidades, se crea una nueva columna llamada *parametro\_aux* en la comparación por sector y energético, como se muestra a continuación:

Tabla

Descripción generada automáticamente

Esta columna inicialmente toma la ecuación , sin embargo este valor es ajustado a medida que se va ejecutando el modelo con sus respectivas correcciones, ya que las demandas no son lineales y por ende las intensidades no siempren coinciden con esa simple ecuación.

Para actualizar las intensidades, se replicó en este archivo llamado *calibracion.xlsx* la tabla de data\_flujo como se muestra a continuación:

Una captura de pantalla de una computadora

Descripción generada automáticamente con confianza media

En este caso se hace un match entre la tabla anterior con la actual, utilizando como columnas de coincidencia el sector y el energético. En la columna ajuste se agrega el ajuste implementado en la primera tabla, y en intensidad se obtiene la intensidad inicial multiplicada por el ajuste. En caso de no haber coincidencia, se mantiene el valor original de intensidad. Con los ajustes ya realizados, se copian los valores nuevos de intensidad en la hoja *data\_flujos* del modelo IPMR, para asi ejecutar el modelo y observar los resultados de demanda de energía. Este proceso se repite hasta alcanzar valores aceptables (dentro del rango -5% a 5%) de diferencia entre el modelo IPMR y los datos históricos del BNE.

Para ejecutar el archivo python de comparacion, se ejecuta el archivo *Comparar\_PMR.py* como se muestra a continuación:

Texto

Descripción generada automáticamente

Esto genera una carpeta llamada *Resultados\_Comparacion*, la cual en su interior contiene un archivo Excel llamado *datos\_comparacion.xlsx*, el cual contiene las comparaciones mostradas anteriormente.

Importante mencionar que los archivos *Balance Nacional.csv* y *solucion\_energia\_2.csv* deben estar en el mismo directorio que el archivo Python para que se realice la comparación:

Texto

Descripción generada automáticamente

## Código

[1] Código de modelo de proyección de fracción de buses rígidos en Transantiago.

Texto

Descripción generada automáticamente

[2] Estructura datos auxiliares

Tabla

Descripción generada automáticamente

[3] Estructura salidas Modelo demanda IPMR

Tabla

Descripción generada automáticamente

[4] Cálculo de variables programadas en Python

Texto

Descripción generada automáticamente

## Fuentes de información

Las fuentes de información para obtener los datos históricos y las proyecciones se describe a continuación.

| **Variable** | **Espacialidad** | **Temporalidad** | **Fuente de la información** | **Periodicidad** | **Datos disponibles** | **Última fecha** | **Ubicación de la información** | **Acceso** | **Formato** | **Comentario** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Demanda energética del año base | Regional | Anual | Balance Nacional de Energía 2017. Ministerio de Energía | Anual | Disponibles a partir de 1992 | 2018 | <http://energiaabierta.cl/?s=balance&t=api> | Público | Xlsx,csv,json |  |
| Serie de PIB histórico (mil millones CLP2013) | Nacional | Anual. | Ministerio de Hacienda |  |  |  |  | Público (entregado de forma confidencial) | xlsx |  |
| Proyección de PIB | Nacional | Anual. | Ministerio de Hacienda |  |  |  |  | Público (entregado de forma confidencial) | xlsx |  |
| Producción de remolacha (sector azúcar) | Regional | Anual | Cultivos anuales regionales. ODEPA | Anual | Disponible para año base | 2022?  (fecha revisión junio 2023)  2021? | <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas> | Público | Xlsx |  |
| Producción de cemento | Nacional | Mensual | Índice de despacho de cemento. CChC |  |  | 2022 ¿ | <https://cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento> | Público | Xlsx |  |
| Producción de Hierro | Regional | Anual | Anuario estadístico de la Minería. Cochilco | Anual | A partir de 1998 | 2019 | <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx> | Público | Xlsx |  |
| Producción de minerales varios (Minas Varias) | Regional | Anual | Anuario estadístico de la Minería. Cochilco | Anual | A partir de 1998 | 2019 | https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx | Público |  |  |
| Producción de celulosa | Nacional | Anual | INE, CICEPLA, INFOR, CORMA. |  | A partir de 1975 | 2018 | https://wef.infor.cl/index.php/sector-forestal/industria-forestal/produccion/produccion-de-celulosa?view=comercio\_ind\_pro\_celulosa |  |  |  |
| Producción de pescado | Nacional | Anual | Anuario estadistico de pesca. SERNAPESCA | Anual | A partir de 2007 | 2018 | http://www.sernapesca.cl/informes/estadisticas | Público | xlsx |  |
| Producción de etanol y metanol (petroquímica) | Nacional | Anual | Memoria ENAP | Anual | A partir de 2000 | 2018 | https://www.enap.cl/pag/695/1709/memorias2018 | Público | pdf |  |
| Producción de nitratos y sales (sector salitre) | Regional | Anual | Anuario estadístico de la Minería. Cochilco | Anual | A partir de 1998 | 2019 | https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx | Público |  |  |
| Producción de acero | Nacional | Anual | América latina en cifras. ALACERO |  | A partir de 2014 | 2018 | https://cms.alacero.org/uploads/Alacero\_America\_latina\_en\_cifras\_Espanhol\_47683530c0.pdf | Público |  |  |
| Matriz de usos finales sectorial | Nacional | Anual | Estudio potencial EE. Centro de Energía |  | 2017 | No publicado a la fecha. |  | No público. Proyecto en desarrollo |  |  |
| Producción de cobre (TMF mineral) | Por empresas, regional | Anual y mensual | SERNAGEOMIN, COCHILCO y empresas mineras | Cada año | https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/Libro\_Anuario\_2018\_.pdf  https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx  https://www.mineriaabierta.cl/estadisticas/produccion-minera/ | Público | xls; csv; xml; json |  | Producción de cobre (TMF mineral) | Por empresas, regional |
| Producción de cobre proyectada | Nacional | Anual | Estudio Política Nacional de Minería 2050 | 2020 | ND | Público | ND | En elaboración | Producción de cobre proyectada | Nacional |
| Participación de la producción de cobre | Por empresas, regional | Anual y mensual | SERNAGEOMIN, COCHILCO y empresas mineras | Cada año | https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx | Público | xls; pdf | % Rajo vs % Subterránea  % Óxidos vs % Súlfuros | Participación de la producción de cobre | Por empresas, regional |
| Leyes del cobre | Nacional | Anual | SERNAGEOMIN, COCHILCO y empresas mineras | Cada año | https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Publicaciones/Anuario.aspx | Público | xls; pdf | Ley Óxidos y  Ley Súlfuros | Leyes del cobre | Nacional |
| Parámetros de recuperación y saturación de procesos del cobre | Por empresa | Anual | Encuesta a empresas mineras de COCHILCO | No se publica | ND | No es público | ND | Saturación Fundición  Saturación Refinería  Recuperación Óxidos  Recuperación Súlfuros | Parámetros de recuperación y saturación de procesos del cobre | Por empresa |
| Consumo energético | Por proceso | Anual |  | Cada año | https://www.mineriaabierta.cl/estadisticas/energia-y-gei/  http://energiaabierta.cl/catalogo/balance-energetico/ | Público | xls; csv; xml; json |  | Consumo energético | Por proceso |
| Consumo de energéticos por tonelada de material extraído y cobre fino | Por proceso | Anual |  | Cada año | https://www.mineriaabierta.cl/estadisticas/energia-y-gei/ | Público | xls; csv; xml; json | Coeficientes Unitarios Promedio Ponderado para la Industria Chilena del Cobre. | Consumo de energéticos por tonelada de material extraído y cobre fino | Por proceso |

# Calibración del modelo PMR

El proceso de calibración del modelo tiene como objetivo definir los parámetros que permitan validar la capacidad de predicción del modelo. El modelo ha sido calibrado utilizando como referencia los datos del Balance de Energía del periodo 2017-2021. Se espera que la energía proyectada por el modelo para el periodo de calibración tenga una diferencia mínima con respecto los datos históricos del balance de energía.

Una de las principales dificultades de este proceso de calibración radica en que el los datos del Balance de Energía no se encuentran desagregados según uso final (caldera, hornos, motriz, usos eléctricos, etc.). Por tanto, se deben hacer una serie de supuestos de manera de obtener participaciones de uso final que sean coherentes con la participación de uso final de cada sector, datos que pueden provenir de otras fuentes de información (Ejemplo, encuesta de eficiencia energética del industrial, etc.).

**Etapa 1:**

1. Determinar la potencia instalada de acuerdo a la energía generada, para ello, se dejan todos los procesos con estado igual a 0 (hoja ”datos\_procesos”), tanto para procesos existentes como nuevos.
2. Ingresar datos del balance de energía como restricción a través del archivo data\_balance\_energia.csv. Esto datos se utilizan para formular restricción que fuerza que los flujos de energía sean iguales a los datos del balance.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| agno | sector | energetico | energia\_bne |
| 2017 | industrias\_varias | biomasa | 5631.26913 |
| 2017 | industrias\_varias | carbon | 438.459 |
| 2017 | industrias\_varias | coque\_mineral | 8.683976 |
| 2017 | industrias\_varias | electricidad | 8098.896 |
| 2017 | industrias\_varias | solar | 0 |
| 2017 | industrias\_varias | gas\_licuado | 2178.13077 |
| 2017 | industrias\_varias | gas\_natural | 3698.24246 |
| 2017 | industrias\_varias | gasolina\_aviacion | 7.0365246 |
| 2017 | industrias\_varias | kerosene | 34.1175633 |
| 2017 | industrias\_varias | kerosene\_aviacion | 234.717005 |
| 2017 | industrias\_varias | petroleo\_combustible | 404.145977 |
| 2017 | industrias\_varias | diesel | 5659.06674 |
| 2018 | industrias\_varias | biomasa | 6056.6737 |

1. Ingresar datos de participación (mínima) de cada energético en los distintos usos finales representados a través del archivo datos\_participacion\_uso.csv. Por ejemplo, la siguiente tabla muestra que la biomasa tiene una participación de 50% en calor y 50% en calderas. Los porcentajes de participación dependen del tipo de sector y se requiere conocimiento experto para realizar estos supuestos.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| agno | energetico | producto | participacion |
| 2017 | biomasa | calor | 0.5 |
| 2017 | biomasa | calor\_calderas | 0.5 |
| 2018 | biomasa | calor | 0.5 |
| 2018 | biomasa | calor\_calderas | 0.5 |
| 2019 | biomasa | calor | 0.5 |
| 2019 | biomasa | calor\_calderas | 0.5 |
| 2020 | biomasa | calor | 0.5 |
| 2020 | biomasa | calor\_calderas | 0.5 |
| 2021 | biomasa | calor | 0.5 |
| 2021 | biomasa | calor\_calderas | 0.5 |
| 2017 | electricidad | motriz | 0.78 |
| 2017 | electricidad | electricidad\_otros | 0.1 |
| 2017 | electricidad | calor | 0.12 |
| 2018 | electricidad | motriz | 0.78 |
| 2018 | electricidad | electricidad\_otros | 0.1 |
| 2018 | electricidad | calor | 0.12 |
| 2019 | electricidad | motriz | 0.78 |
| 2019 | electricidad | electricidad\_otros | 0.1 |
| 2019 | electricidad | calor | 0.12 |

1. Ingresar datos de participación (mínima) de distribución de cada uso final en los distintos tipos de energéticos a través del archivo datos\_participacion\_uso\_2.csv. Por ejemplo, la siguiente tabla muestra que el los usos motrices debenen tener una participación mínima de 80%. Los porcentajes de participación dependen del tipo de sector y se requiere conocimiento experto para realizar estos supuestos. La restricción se plantea como “mínimo” de manera de dar cierta holgura al modelo de optimización.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| agno | producto | energetico | participacion |
| 2017 | motriz | electricidad | 0.8 |
| 2018 | motriz | electricidad | 0.8 |
| 2019 | motriz | electricidad | 0.8 |
| 2020 | motriz | electricidad | 0.8 |
| 2021 | motriz | electricidad | 0.8 |

1. Se libera restricción de Intensidad que relaciona la producción (que satisface demanda) con la energía útil que se requiere. Se libera esta restricción debido a que la Intensidad por defecto podría dar resultados de consumo de energía que son infactibles con respecto a los los datos del Balance de Energía que se ingresaron como restricción. La restricción se libera para el periodo de calibración. La restricción no se incluye hasta el año de calibración (“agno\_calibracion”) ingresado a través del archivo csv datos\_configuracion.csv.

|  |  |
| --- | --- |
| Parametro | Valor |
| agno\_calibracion | 2021 |
| tasa\_descuento | 0.06 |

1. Se libera restricción de participación que se ingresa data\_participacion\_flujos.csv. Se libera esta restricción debido a que la estas participaciones podrían ser incoherentes con los datos del Balance de Energía. La restricción no se incluye hasta el año de calibración (“agno\_calibracion”) ingresado a través del archivo csv datos\_configuracion.csv.
2. Se resuelve el modelo de optimización adaptado para la calibración.

**Etapa 2:**

1. Se verifican que el problema de optimización sea factible y se revisan las estimaciones de energía y energía por uso final. En caso de infactibildiad se deben revisar las participaciones de los usos finales definales en los pasos 3 y 4 de la etapa anterior.
2. Se obtienen las potencias aparentes, las cuales se fijan como potencia máxima a los procesos existentes. Para el perido de calibración se ha obtiene la potencia máxima para el periodo de calibración (se redondea hacia arriba para evitar problemas de infactibilidades por redondeos númericos). Estas potencias se obtienen del archivo solución\_potencia\_calibracion.csv. Se actualiza el estado de los procesos existentes como 1.
3. Se calcula el parámetro Intensidad (hoja “datos\_flujos”) a partir de los resultados del problema de optimización.
4. Actualizar intensidad variable en el tiempo a través del archivo datos\_flujos\_intensidad.csv
5. Se “re-calculan” las participaciones que se ingresan los data\_participacion\_flujos.csv.
6. Crear datos de entrada con IPMR actualizada con datos de Etapa 2. **Nota: Recuerda cambiar el nombre del archivo de entrada de la rutina Generar\_csv.py**
7. **La restricción para forzar la solución a los datos de balance de energía idealmente se debería liberar ya que se espera que la solución se aproxime a los resultados del balance a partir del proceso de calibración. Sin embargo, se podría forzar algún combustible que cuyo uso sea difícil de modelar utilizando un enfoque de minimización de costo, por ejemplo, lo que ocurre con el uso de biomasa. Debido a que se trata de un combustible de bajo precio, el modelo tiende a usar toda la capacidad disponible para procesar, sin embargo, los resultados podrían no coincidir con el balande de energía. Esto ocurre con el uso de biomasa en el sector industrias varias. El uso de biomasa tiene alguna bajas durante el periodo 2017-2021 que son difíciles de modelar.**
8. Se vuelve a resolver el problema de optimización.
9. En caso de infactibildiades revisar potencias máximas y estados (1 o 0) de procesos.

Nota 1 (agno\_calibracion):

Colocar como fecha de inicio año 2022 para procesos nuevos, si calibración termina el año 2021. Los procesos asociados a medida podrían tener un año distinto. En algunos casos, se fuerza PMIN con valores distintos de cero a partir de años anteriores al 2020.

Nota 2 (IPMR para calibración):

Durante el proceso de calibración se recomienda crear casos individuales para cada sector. Pasos recomendados a patir de un caso completo con todos los sectores:

* data\_procesos=dejar solo los procesos del sector
* data\_flujos=dejar solo los flujos asociados a los procesos del sector de análisis
* data\_relacion\_flujos=quitas las relaciones de los procesos que fueron eliminados
* data\_participacion\_flujos= quitas las relaciones de los procesos que fueron eliminados
* data\_demanda\_sectorial = dejar en cero las demandas de procesos que fueron eliminados. Si se dejan valores distintos de cero se generaran infactibilidades en el problema de optimización que no habrán procesos capaces de satisfacer dicha demanda.
* data\_demanda\_electrica = dejar en cero la demanda eléctrica durante el proceso de calibración.
* data\_inercia\_reservas=dejar en cero la inercia y requerimientos de reservas. Al no haber centrales eléctricas estas restricciones no se pueden satisfacer.
* set\_procesos=dejar solo los procesos de la hoja data\_procesos
* set\_flujos=dejar solo los flujos de la hoja data\_flujos
* data\_balance\_energia= actualizar los valores para el sector
* data\_participacion\_uso = actualizar los valores para el sector
* data\_participacion\_uso\_2= actualizar los valores para el sector

# Actualización de página web modelo PMR

Los resultados de las simulaciones se publican periódicamente en la página web <https://modelopmr.cl/#/>

Interfaz de usuario gráfica, Gráfico, Aplicación

Descripción generada automáticamente

Figura 10: Página web Modelo PMR.

Los datos de los indicadores que se muestran en la página web se ingresan a través de archivos en formato CSV que se encuentra en la siguiente ruta del código de la página web: “public\datasets”. Por ejemplo, los datos de emisiones se encuentran “public\datasets\emisiones\_gei” y su interior se encuentran archivos CSV como los que se muestran en la siguiente imagen.

Patrón de fondo

Descripción generada automáticamente con confianza baja

Figura 11: Archivos donde se ingresan los resultados de las emisiones para cada escenario.

El archivo Escenarios contiene los resultados de los distintos escenarios y que se visualizan cuando lo usuarios selecciona la opción “ver múltiples escenarios”

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Los indicadores vigentes se describen en la siguiente tabla[[1]](#footnote-1).

Tabla 4: Descripción de indicadores visualizados en página web del Modelo PMR.

| Indicador | Carpeta | Formato nombre archivo |
| --- | --- | --- |
| Emisiones netas de GEI | emisiones\_netas | Emisiones\_Netas\_Nombre\_Escenario.csv |
| Emisiones de GEI | emisiones\_gei | Emisiones\_Nombre\_Escenario.csv |
| Intensidad Emisiones | intensidad\_emisiones | Intensidad\_ Nombre\_Escenario.csv |
| Demanda Energía | demanda\_energia | Demanda\_ Nombre\_Escenario.csv |
| Demanda Eléctrica | demanda\_electrica | Demanda\_Electrica\_Sector\_ Nombre\_Escenario.csv |
| Generación eléctrica | generacion | Generacion\_ Nombre\_Escenario.csv |
| Potencia instalada generación eléctrica | potencia\_instalada | Potencia\_ Nombre\_Escenario.csv |
| Factor de emisión red eléctrica | factor\_emision\_red\_electrica | Factor\_Emision\_ Nombre\_Escenario.csv |

Los archivos Emisiones\_Netas\_Nombre\_Escenario.csv, Emisiones\_Nombre\_Escenario.csv, Generacion\_ Nombre\_Escenario.csv, etc. son obtenidos a partir de los resultados del modelo PMR, donde “Nombre\_Escenario” corresponde al nombre del escenario especificado en los datos de entrada del modelo[[2]](#footnote-2).

La mayoría de los archivos de salida contiene una columna con los datos del “Escenario Base”, como se muestra en el siguiente archivo.



Figura 12: Archivo Demanda\_Electrica\_Sector\_ Nombre\_Escenario.csv

Los valores de la columna “Escenario Base” permiten comparar los resultados del escenario en estudio con respecto a los resultados del Escenario Base. Por ejemplo, la siguiente figura muestra la proyección de demanda eléctrica para el “Escenario Carbono Neutralidad” por sector y se compara con respecto a la demanda total del Escenario Base[[3]](#footnote-3).

Gráfico

Descripción generada automáticamente

El indicaro de intensidad de emisiones se calcula a partir de las emisiones totales del sector dividido por PIB. Para el cálculo de este indicador se requiere como dato de entrada la proyección de PIB utilizada para realizar las proyecciones.

Gráfico, Gráfico de líneas

Descripción generada automáticamente

Los nombres de los escenarios y las medidas que contiene cada escenario se definen en el archivo **scenarios.json.** Por ejemplo, la siguiente figura muestra un extracto de la definición del Escenario Base.

Texto

Descripción generada automáticamente

Figura 13: Ejemplo de definición de escenario base en archivo scenario.js

Asimismo, la siguiente figura muestra un extracto de la definición del Escenario Observatorio Carbono Neutralidad.

Interfaz de usuario gráfica, Texto

Descripción generada automáticamente

Figura 14: Ejemplo de definición de escenario en archivo scenario.js

Al final de cada sección se especifica la ruta donde se encuentras los archivos de salida que contienen los resultados de la simulación[[4]](#footnote-4).

Gráfico de dispersión

Descripción generada automáticamente con confianza media

Figura 15: Definición de ruta donde se encuentran archivos de salida.

La definición del nombre de las medidas que contiene cada escenario se definen en el archivo “EnergeticPolicies.js”. Por ejemplo, la medida de label="Hidrógeno en transporte minero" tiene asociado el id="introduccion\_hidrogeno\_mineria". La siguiente figura muestra un extracto de la página web del modelo PMR con la definición de las medidas que contiene el escenario “Observatorio Carbono Neutralidad”.

Interfaz de usuario gráfica, Aplicación, Teams

Descripción generada automáticamente

Figura 16: Definición de medidas que contiene cada escenario.

Para que haya coherencia entre los resultados de la página web del modelo PMR y la página web del Observatorio se requiere que los primeros años los datos del inventario correspondan a los datos reales o estimados (y no a los datos simulados con el modelo PMR.)

# Ultimas modificaciones

## Datos de entrada

Nuevos datos de entrada:

* **data\_sistema = ?**
* **data\_configuracion = se define año de inicio a partir del cual se aplican ciertas** restricciones que se liberan durante el proceso de calibración
* data\_participacion\_uso = ver capítulo de calibración
* data\_participacion\_uso\_2 = ver capítulo de calibración
* data\_balance\_energia = ver capítulo de calibración
* data\_flujos\_intensidad = ver capítulo de calibración
* data\_fpci = se definen factores de ajuste por PCI

## Modelo

* versión: modelo\_energetico\_PMR\_20230228\_test.gms
* Lectura de nuevos datos de entrada
* Restricciones para representar calibración

## Salidas

* Se actualiza rutina que calcula salidas adicionales: Salidas\_PMR\_NEW\_2

## Rutinas auxiliares

* Generar\_CSV: 1) Crea nuevos datos de entrada; 2) IPMR se lee desde carpeta data\_input
* Entrada\_PMR: Se corrige calculo de factores de emisión por corrección de PCI
* Ejecutar\_Modelo\_PMR: Se actualiza llamada a rutina Salidas\_PMR\_NEW\_2.py

## Modificaciones modelos sectoriales

Fecha: 1 de junio 2023

### Industria varias

* IPMR: IPMR\_Observatorio\_Industrias\_Varias\_Calibracion\_Etapa\_2.xlsx
* Datos modificados: data\_procesos, data\_flujos y nuevas hojas descritas anteriormes en proceso de calibración

### Minas varias

* IPMR: IPMR\_Observatorio\_Minas\_Varias\_Calibracion\_Etapa\_2.xlsx
* Datos modificados: data\_procesos, data\_flujos y nuevas hojas descritas anteriormes en proceso de calibración

### Cobre

* IPMR: IPMR\_Observatorio\_Cobre\_Calibracion\_Etapa\_1.xlsx
* Datos modificados: data\_procesos, data\_flujos

### Generación eléctrica

* Nuevas centrales
* Actualización de factores de planta centrales hidroeléctricas
* Actualización de factores de planta centrales eólicas y solare
* Factor de emisión centrales

1. Se requiere agregar un nuevo indicador que muestra la demanda de energía por tipo de energético: diésel, carbón, etc.

   Se requiere agregar un nuevo indicador que calcula la potencia instalada en generación eléctrica para producir hidrógeno verde. [↑](#footnote-ref-1)
2. Se requiere implementar una rutina que copie los archivos de salida del modelo PMR y los traspase en forma automática a las carpetas “public\datasets\emisiones\_gei”, “public\datasets\emisiones\_netas”, etc. [↑](#footnote-ref-2)
3. Se requiere incorporar a cada uno de los archivos los resultados del Escenario Base. [↑](#footnote-ref-3)
4. Se requiere contar con una rutina que actualice en forma automática el archivo scenarios.json con la definición de los escenarios que se desea visualizar. [↑](#footnote-ref-4)