



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y SISTEMAS  
ICS1113-OPTIMIZACIÓN

# Informe 1

---

## Minimización de costos asociados a requerimientos energéticos en Chile para la Agenda 2030

### Grupo 04

Eugenio Javier Irrázaval Riesco 2063790J sección 1  
Felipe Alejandro Díaz Soto 20640498 sección 3  
Juan José Del Campo Santa Cruz 20641915 sección 1  
Kieran Conradie De La Maza 20626045 sección 4  
Martín Andrés Jara Fuentes 20640455 sección 1  
Tomás Altermatt Leisewitz 20640145 sección 2

Fecha entrega: 09 de abril de 2024

# 1. Descripción del Problema

## 1.1. Contextualización del problema

Durante los últimos años, una de las principales preocupaciones, tanto de la comunidad científica como de los gobiernos de todo el mundo, es la contaminación ambiental y el cambio climático asociado a esta. Uno de los principales factores a los cuales se le atribuye dicha contaminación es la quema de combustibles fósiles para la obtención de energía. Para el año 2015, se reportó que, del 100 % de las emisiones de  $CO_2$ , 45 % de estas provienen de la quema de carbón, 35 % de la quema de combustible y 20 % de la quema de gas natural (Al-Ghussain, 2019). En esta línea, la comunidad científica, en conjunto con varios gobiernos alrededor del mundo, han centrado sus esfuerzos en la búsqueda, desarrollo e implementación de fuentes de energía limpias y renovables, las cuales, hasta el año 2019, representaban solo un 11,41 % del total de energía consumida en el mundo, versus un 84,32 % de origen no renovable (Mufutau Opeyemi, 2021).

Actualmente, Chile cuenta con tres sistemas eléctricos para el abastecimiento del país: el Sistema Eléctrico Nacional (SEN), el Sistema de Aysén (SEA) y el Sistema de Magallanes (SEM). El SEN poseía una capacidad instalada de 33.218 MW en diciembre del 2022, lo que corresponde a más de un 99 % de la capacidad instalada a nivel nacional. El 62 % de dicha capacidad instalada correspondía a fuentes renovables (22,3 % hidráulica; 24,1 % solar; 13,0 % eólica; 2,3 % biomasa y 0,3 % geotérmica), mientras que el 38 % restante corresponde a fuentes térmicas (13,0 % carbón; 15,1 % gas natural y 9,8 % petróleo), vale decir, combustibles fósiles. Es importante notar que capacidad instalada no es lo mismo que energía generada, pues esta última corresponde a la energía efectivamente generada por una tecnología en específico. La energía generada por fuentes renovables correspondía a un 55,6 % del total de energía generada por el país para el año 2022 (Generadoras de Chile, s.f.).

Adicionalmente, Chile posee un gran potencial para el desarrollo de la energía solar en el desierto de Atacama y el desarrollo de la energía eólica en la Patagonia (lo que a su vez, es ideal para la producción de hidrógeno verde) (León et al., 2023). Lo anterior queda en evidencia cuando se ve el drástico aumento de la energía generada por el SEN a través de estas dos fuentes de energía la cual paso de representar un 0,5 % en conjunto para el año 2011 a un 28 % en 2022 (Generadoras de Chile, s.f.).

Con todos los datos presentados, queda en evidencia que Chile ha hecho un esfuerzo constante a través de los años para transformar su matriz eléctrica dándole mayor protagonismo a las fuentes de energía renovables por sobre las no renovables, y es importante que dicha transición sea realizada de la forma más eficiente y al menor costo posible. Es por esto que se propone minimizar el costo asociado a la transición energética de los próximos 5 años, con el Gobierno como principal tomador de decisiones, al tener el monopolio para entregar permisos de construcción de generadoras (por medio de licitaciones), o por el contrario prohibir aquellas que no considere beneficiosas para la sociedad.

## 1.2. Impacto del problema

La resolución de esta problemática energética y ambiental le entrega valor directamente al gobierno (en especial al Ministerio de Energía y al de Medio Ambiente) y a la vez a las empresas productoras de energía del país. También se le entrega valor a todos los proyectos de inversiones de energía renovables. Pero el mayor alcance que tiene en cuanto a personas son los beneficios para los habitantes de Chile que mes a mes deben pagar las cuentas de electricidad.

Desde la perspectiva ambiental, el ministerio respectivo lleva años ideando planes para que el país pueda hacer frente al cambio climático por medio de distintas políticas públicas, de modo que cada año ha ido creciendo la concientización de esta área. Además el ministerio es responsable de proponer y formular planes de acción en materia de cambio climático por medio de la Oficina de Cambio Climático (“Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente”, 1994), la cual, dentro

de sus funciones principales. tiene la tarea de generar y recopilar información técnica y científica en esta materia para apoyar el diseño de planes y programas. Aquí es donde el modelo que se busca desarrollar va a impactar directamente en la creación de planes debido a que se busca que en un periodo de 5 años se reduzcan las energías en base a combustibles fósiles y se incremente la producción en base a energías renovables. Para el año 2050 se espera en promedio un 90 % de producción energética renovable (Ministerio de Energía de Chile, 2022).

En cuanto a la capacidad energética que tiene el país, se debe tener en cuenta que la demanda ha ido aumentando en los últimos años. Este aumento en la demanda debe ser satisfecho por nuevas generadoras de energía, las cuales deben ser renovables. Durante el año 2019 la demanda fue de aproximadamente 80.000 GWh, y se prevee que para el año 2030 habrá una demanda de 100.000 GWh (Ministerio de Energía de Chile, 2022). Para lograr llegar a esta capacidad energética hay que lograr mitigar la pérdida de generación de energía producida por los cierres de plantas termoeléctricas que se producirán. Por ende, será mitigado con la apertura de plantas renovables.

Por el lado económico el mayor beneficiario serán los clientes finales debido a que se busca minimizar los costos de producción de energía en Chile. En los últimos años, a medida que se ha ido implementando energías más renovables, los costos a la vez también se ven aumentados. Un estudio del Ministerio de Energía donde relaciona gastos en edificios muestra que en 2017 en promedio el gasto era de 14 millones al año y para 2023 este valor aumentaba a 33 millones (Ministerio de Energía de Chile, 2023). De acá nace el impacto de reducir este valor para que los consumidores finales se vean beneficiados con el plan energético renovable que propone el gobierno.

Desde un punto de vista social, tendrá un impacto significativo en cuanto a la calidad de vida de las personas. De acuerdo la política energética nacional (**politica-energetica-2050**) se espera que para el año 2050 un 100 % de los hogares tenga acceso a energía limpia de bajas emisiones. Además, al reducir las emisiones de energías no renovables se mejorará la calidad del aire, en especial de las ciudades históricamente más contaminadas del país, lo que se traduce en un impacto positivo en la salud de las personas que habitan las ciudades, en especial para aquellos que colindan con termoeléctricas.

En resumen, la generación de valor que tiene resolver esta problemática es que contribuye de manera sustancial a promover un desarrollo sostenible y garantizar un suministro energético eficiente para todos.

### 1.3. Objetivo

En el siguiente informe, se busca desarrollar un modelo de optimización que minimice los costos asociados a construir plantas de producción de energía de diferentes tipos, así como los costos variables de tenerlas operativas los próximos 5 años. De esta manera, se podrá cumplir con la demanda energética que tiene el país periodo a periodo, a la vez que se busca cumplir con los pactos internacionales firmados por Chile para bajar la producción de gases de efecto invernadero. El gobierno, a través de la Comisión Nacional de Energía (CNE) y la superintendencia de Electricidad y Combustibles, debe buscar una forma de implementar nuestro modelo para lograr el objetivo de bajar las emisiones de carbono. De este modo, el encargado de tomar decisiones es la CNE y la superintendencia, ya que son los principales encargados de vigilar la adecuada operación de los servicios de electricidad, gas y combustibles, en términos de su seguridad, calidad y precio. Las decisiones que se deben tomar son:

1. Qué tipo de planta instalar, y cuándo. (¿solares, eólicas o hidroeléctricas?)
2. Cuántas plantas a base de combustibles fósiles cerrar.
3. Qué plantas tener funcionando en cada periodo.

La construcción de plantas de producción de energía tiene varias consideraciones (restricciones). Las más importantes que se considerarán serán:

1. No se abrirán plantas nuevas de generación no sustentable, sólo se cerrarán ya existentes, mientras que las generadoras de energía renovables no se cerrarán, sólo se abrirán nuevas plantas.
2. La demanda debe ser satisfecha en todo momento.
3. La contaminación total no puede superar los tratados firmados.
4. No se pueden construir más plantas de un tipo si se acabó la superficie disponible para ello.
5. Se debe tener una cierta cantidad de generadoras disponibles pero apagadas, tanto hidroeléctricas como de origen fósil, que sean capaz de activarse rápido y satisfacer algún peak inesperado de demanda.
6. El precio pagado el periodo más caro no puede ser superior a tres veces el precio pagado el periodo más barato.
7. Ninguna planta podrá permanecer abierta 8 periodos seguidos, pues necesitará al menos un mantenimiento.

## 2. Modelación del Problema

### 2.1. Supuestos

- Se supondrá que existe todo el material, dinero y personal requerido para la construcción/instalación de las plantas.
- No se instalará una planta en un lugar donde no sea conveniente. Se considera que hay cierta cantidad de superficie disponible para cada tipo de planta.
- Se supondrá la no ocurrencia de ciertos eventos catastróficos que causen el cierre o desactivación de una o varias plantas.
- Las plantas nuevas de un periodo a otro comienzan a funcionar de manera inmediata.
- Se supondrá que los periodos máximos de operación consecutivos son los mismos para cada tipo de planta.
- Se supondrá que todas las plantas de un determinado tipo utilizan la misma cantidad de superficie (el promedio).
- Se supondrá que inicialmente existen plantas de cualquier tipo, que concuerden con el panorama real en Chile.
- Se supondrá que cada planta de un cierto tipo tiene la misma producción energética promedio por periodo.
- Cada planta a base de combustible fósil produce un nivel de contaminación igual en cada periodo.
- El costo de cerrar una planta a base de combustible fósil será fijo.
- El costo para reabrir/reactivar una planta tras inactividad será el mismo para todas las plantas del mismo tipo.

## 2.2. Conjuntos

- $i \in \{1, \dots, 4\}$ , los tipos de planta
  - $i = 1$  para plantas a base de energía fósil.
  - $i = 2$  para plantas hidroeléctricas de embalse.
  - $i = 3$  para plantas solares.
  - $i = 4$  para plantas eólicas.
- $t \in \{0, \dots, 20\}$ , los periodos de tiempo. Cada año tiene 4 periodos. Se considera un horizonte temporal de 5 años. El periodo  $t=0$  es el periodo previo a comenzar con la construcción de plantas.
- $n \in \{1, \dots, 1000\}$ , etiquetas para enumerar las plantas.

## 2.3. Parámetros

- $d_t$ : Demanda energética nacional en periodo  $t$ , en  $MWh$ .
- $p_{it}$ : Precio del  $MWh$  de tecnología  $i$  en periodo  $t$ , en  $\$/MWh$ .
- $q_{it}$ : Producción energética de 1 planta de tecnología  $i$  en periodo  $t$ , en  $MWh$ .
- $c$ : Contaminación atmosférica promedio de planta a base de combustibles fósiles, en 3 meses, en  $ppm/planta$ .
- $l_t$ : Cota máxima para periodo  $t$  de contaminación  $ppm$
- $Smax_i$ : Superficie efectiva disponible para instalación de plantas energéticas de tipo  $i$ , en  $m^2$ .
- $s_i$ : Superficie promedio utilizada por 1 planta de tipo  $i$ , en  $m^2$ .
- $b$ : Costo fijo de cerrar una planta a base de combustible fósil, en  $\$$ .
- $e_i$ : Costo de apertura de planta de tipo  $i$ , en  $\$$ .
- $f_i$ : Ganancia de planta tipo  $i$  en caso de estar construida, en  $\$$ .
- $g_i$ : Cantidad de plantas de tipo  $i$  iniciales.
- $a_i$ : Costo fijo de reabrir una planta de tipo  $i$  luego de inactividad, en  $\$$ .

## 2.4. Variables

Variables enteras no negativas:

- $X_{i,t} :=$  Cantidad de plantas de tecnología  $i$ , en periodo  $t$ .
- $Y_{i,t} :=$  Cantidad de plantas de tecnología  $i$  activas en periodo  $t$ .

Variables binarias:

- $I_{i,t,n} = \begin{cases} 1 & \text{si planta } n, \text{ de tecnología } i, \text{ está prendida en periodo } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$
- $Z_{i,t,n} = \begin{cases} 1 & \text{Si planta } n \text{ de tipo } i \text{ pasa de estar apagada en } (t-1) \text{ a prendida en } t \\ 0 & \text{e.o.c.} \end{cases}$

## 2.5. Función objetivo

La función objetivo para este problema consiste en minimizar los costos asociados a construir plantas de distintos tipos. Para estos se consideró un costo fijo de indemnización por cada planta de energía fósil cerrada, un costo fijo por activación de las nuevas plantas renovables, un costo variable por generación de cierta cantidad de energía de un determinado tipo de planta, y finalmente un costo variable por reactivar alguna planta que se haya dejado de usar algún periodo. Todo lo anterior considerando un horizonte temporal de 5 años, con 4 periodos cada uno.

$$\min \quad \text{Costos Fijos} + \text{Costos Variables} \quad (1)$$

$$\text{Costos Fijos} = (g_1 - X_{1,20}) \cdot b + \sum_{i=2}^4 (X_{i,20} - g_i) \cdot e_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^{20} X_{i,t} \cdot f_i \quad (2)$$

$$\text{Costos Variables} = \sum_{t=1}^{20} \sum_{i=1}^4 Y_{i,t} \cdot p_{i,t} \cdot q_{i,t} + \sum_{i=1}^4 \sum_{t=1}^{20} \sum_{n=1}^{1000} Z_{i,t,n} \cdot a_i \quad (3)$$

## 2.6. Restricciones

1. La cantidad de plantas activas en un periodo  $t$  no pueden superar la cantidad de plantas ya construidas en el mismo periodo.

$$X_{it} \geq Y_{it} \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall t \in \{0, \dots, 20\} \quad (4)$$

2. La suma de todas las plantas individuales activas de un tipo, es igual a la cantidad total de plantas activas de ese tipo en ese periodo.

$$\sum_{n=1}^{1000} I_{itn} = Y_{i,t} \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall t \in \{0, \dots, 20\} \quad (5)$$

3. Relación ente variables  $Z_{itn}$  e  $I_{itn}$ . Si  $I_{itn}$  es 0 para algún valor de  $t$ , y luego para el siguiente vale 1, entonces  $Z_{itn}$  valdrá 1, en otro caso valdrá 0. En otras palabras, si alguna planta  $n$  de algún tipo  $i$ , pasa de estar apagada en algún  $t$  a estar prendida en  $t+1$ , entonces  $Z_{itn}$  valdrá 1. Para poder llevar a cabo la programación lineal que represente esta restricción, se hizo la siguiente tabla de verdad

$I_{i,t-1,n}$	$I_{i,t,n}$	$Z_{i,t,n}$
0	0	0
0	1	1
1	0	0
1	1	0

De clases obtuvimos dos desigualdades que permitían restringir que si una variable ( $I_{i,t,n}$ ) es verdad, entonces una de las otras dos será verdad, pero no ambas. Las otras dos serían  $Z_{i,t,n}$  e  $I_{i,t-1,n}$ . Luego, se agregó una tercera desigualdad para forzar  $Z_{i,t,n}$  a cero en el caso de que  $I_{i,t,n}$  sea cero. Las tres desigualdades que finalmente modelan la restricción son:

$$Z_{i,t,n} + I_{i,t-1,n} \geq I_{i,t,n}, \quad \forall t \in \{1, \dots, 20\}, \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall n \in \{1, \dots, 1000\} \quad (6)$$

$$Z_{i,t,n} + I_{i,t-1,n} \leq 2 - I_{i,t,n}, \quad \forall t \in \{1, \dots, 20\}, \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall n \in \{1, \dots, 1000\} \quad (7)$$

$$I_{i,t,n} \geq Z_{i,t,n}, \quad \forall t \in \{1, \dots, 20\}, \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall n \in \{1, \dots, 1000\} \quad (8)$$

4. Condiciones iniciales: La cantidad de plantas construidas, así como las activas para el periodo  $t=0$ , es igual a la cantidad inicial de plantas.

$$Y_{i0} = g_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\} \quad (9)$$

$$X_{i0} = g_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\} \quad (10)$$

5. La cantidad de plantas a base de combustibles fósiles no puede superar la cantidad inicial de éstas. Adicionalmente la cantidad de plantas de una tecnología renovable (solar, eólica, hidroeléctrica) debe ser al menos la cantidad inicial de plantas del mismo tipo.

$$X_{1t} \leq g_1 \quad \forall t \in \{0, \dots, 20\} \quad (11)$$

$$X_{it} \geq g_i \quad \forall i \in \{2, \dots, 4\}, \forall t \in \{0, \dots, 20\} \quad (12)$$

6. No se abrirán nuevas plantas de energías fósiles, mientras que no se cerrarán plantas ya existentes de energías renovables.

$$X_{1t} \geq X_{1,t+1} \quad \forall t \in \{0, \dots, 19\} \quad (13)$$

$$X_{it} \leq X_{i,t+1} \quad \forall t \in \{0, \dots, 19\}, \forall i \in \{2, \dots, 4\} \quad (14)$$

7. En cada periodo, la demanda energética deber ser satisfecha.

$$d_t \leq \sum_{i=1}^4 Y_{it} \cdot q_{it} \quad \forall t \in \{1, \dots, 20\} \quad (15)$$

8. La contaminación causada por las plantas a base de combustibles fósiles en cada periodo no debe superar la cota permitida para dicho periodo

$$Y_{1t} \cdot c \leq l_t \quad \forall t \in \{1, \dots, 20\} \quad (16)$$

9. Existe un máximo de plantas disponibles para construir, limitado por la superficie máxima disponible para instalación de plantas de cualquier tipo

$$X_{it} \cdot s_i \leq Smax_i \quad \forall t \in \{0, \dots, 20\}, \forall i \in \{1, \dots, 4\} \quad (17)$$

10. En el caso de que haya un peak en la potencia demandada, será necesario que las plantas de origen fósil e hidroeléctricas sean capaces de satisfacer esta demanda extra, pues la potencia recibida desde el viento y el sol no es controlable instantáneamente por el humano. Se considerará que las plantas cerradas de estos dos tipos deben poder satisfacer, potencialmente, el 50 % de la demanda.

$$(X_{1t} - Y_{1t}) \cdot q_{1t} + (X_{2t} - Y_{2t}) \cdot q_{2t} \geq 0,5d_t, \quad \forall t \in \{1, \dots, 20\} \quad (18)$$

11. El costo de la boleta en el periodo que la cuenta salga más cara, no puede superar por el triple ningún otro de los 19 periodos. Se intenta homogeneizar así la inversión entre los distintos periodos.

$$P_{t^*} = (X_{1,t^*-1} - X_{1,t^*}) \cdot b + \sum_{i=2}^4 (X_{i,t^*} - X_{i,t^*-1})e_i + \sum_{i=1}^4 Y_{it^*} \cdot p_{it^*} \quad (19)$$

$$P_{t_1} \leq 3P_{t_2} \quad \forall t_1 \in \{1, \dots, 20\}, t_2 \in \{1, \dots, 20\} \quad (20)$$

12. Ninguna planta puede permanecer activa por más de 7 periodos consecutivos, pues se requiere al menos una mantención cada 2 años.

$$\sum_{t=t'}^{t'+8} I_{itn} \leq 7 \quad \forall t' \in \{1, \dots, 12\}, \forall n \in \{1, \dots, 1000\}, \forall i \in \{1, \dots, 4\} \quad (21)$$

13. Naturaleza de las variables

$$X_{it} \geq 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall t \in \{0, \dots, 20\}, X_{it} \in \mathbb{Z} \quad (22)$$

$$Y_{it} \geq 0, \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall t \in \{0, \dots, 20\}, Y_{it} \in \mathbb{Z} \quad (23)$$

$$I_{itn} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall t \in \{0, \dots, 20\}, \forall n \in \{1, \dots, 1000\} \quad (24)$$

$$Z_{itn} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, 4\}, \forall t \in \{1, \dots, 20\}, \forall n \in \{1, \dots, 1000\} \quad (25)$$



## Referencias

- Al-Ghussain, L. (2019). Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress Sustainable Energy*, 38(1), 13-21.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ep.13041>
- Mufutau Opeyemi, B. (2021). Path to sustainable energy consumption: The possibility of substituting renewable energy for non-renewable energy. *Energy*, 228, 120519.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120519>
- Generadoras de Chile. (s.f.). Generación eléctrica en Chile.  
<https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- León, M., Silva, J., Ortiz-Soto, R., & Carrasco, S. (2023). A Techno-Economic Study for Off-Grid Green Hydrogen Production Plants: The Case of Chile. *Energies*, 16(14), 5327.  
<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/14/5327>
- Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente [Promulgada el 01 de marzo de 1994]. (1994). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Ministerio de Energía de Chile. (2022). *Proyección Energética*. Consultado el 7 de abril de 2024, desde <https://energia.gob.cl/pelp/proyeccion-energetica>
- Ministerio de Energía de Chile. (2023). *Resultados de Gestiona Energía 2023 en el Sector Público*. Consultado el 7 de abril de 2024, desde <https://sectorpublico.gestionaenergia.cl/>