



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

## Informe 4

---

**Máximización de la satisfacción de usuarios de  
cargadores de vehículos eléctricos en el marco de  
la transición hacia la electromovilidad**

**Grupo 25**

Sofía Aguilera V.	2262371J	Sección 4
Micaela Blanco A.	22205454	Sección 2
Vicente Cordero P.	22638911	Sección 2
Gaspar Mosqueira M.	22637842	Sección 3
Gaspar Salas M.	22624945	Sección 4
Belén Urbina B.	22642706	Sección 4

Fecha entrega: 21 de junio de 2024

# Índice

<b>1. Descripción del problema</b>	<b>3</b>
1.1. Contexto . . . . .	3
1.2. Desarrollo del problema . . . . .	3
1.3. Objetivos . . . . .	4
<b>2. Modelación del problema</b>	<b>5</b>
2.1. Supuestos . . . . .	5
2.2. Conjuntos . . . . .	5
2.3. Parámetros . . . . .	5
2.4. Variables de decisión . . . . .	6
2.5. Variables auxiliares . . . . .	6
2.6. Función objetivo . . . . .	6
2.7. Restricciones . . . . .	6
2.8. Naturaleza de variables . . . . .	7
<b>3. Definición de datos</b>	<b>7</b>
<b>4. Resolución del Problema</b>	<b>9</b>
<b>5. Validación de resultados</b>	<b>9</b>
<b>6. Análisis de Sensibilidad</b>	<b>10</b>
6.0.1. Variación de costos . . . . .	10
6.0.2. Variación de Recursos . . . . .	12
<b>7. Conclusión</b>	<b>14</b>
<b>8. Anexos</b>	<b>15</b>

# 1. Descripción del problema

## 1.1. Contexto

En los últimos años, la demanda de automóviles eléctricos ha aumentado progresivamente en todo el mundo. Este crecimiento significativo se debe, en parte, al alza en los precios del petróleo y sus derivados, pero también a la gran preocupación por el medio ambiente y la necesidad de reducir las emisiones de  $CO_2$ . Esto último ha llevado a pensar en soluciones con múltiples beneficios que aseguren una vida más sostenible y práctica.

Como una forma de abordar estos desafíos, en Chile se empezaron a implementar los vehículos eléctricos alrededor del año 2018, ofreciendo una alternativa a los automóviles tradicionales que dependen de combustibles. Una de las principales ventajas de los automóviles eléctricos es que no generan emisiones durante su uso, contribuyendo significativamente a mitigar la contaminación atmosférica, además de mejorar la contaminación acústica, generar una eficiente gestión de residuos, entre otros. Este cambio hacia la movilidad eléctrica ha sido notable en nuestro país. Según cifras de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC) en 2023 se vendieron 1.588 autos eléctricos, lo que evidencia un aumento en comparación al período 2022, dado que hasta diciembre de ese año se vendieron 1.295 vehículos cero emisiones (AutoFact, 2024)[1].

Sin embargo, existe una desventaja que se evidencia en el uso de los vehículos eléctricos, la cual radica en la dependencia a la infraestructura de carga disponible y la poca disponibilidad de puntos de recarga de fácil acceso. De acuerdo con los datos entregados por la superintendencia de electricidad y combustibles (SEC), aportados por la ANAC (Centra UAI)[2], hasta la fecha en la capital solo el 25 % de los 546 cargadores disponibles son rápidos. En el país hay 1.200 puntos de carga, la mayoría en Santiago, sin embargo, se espera que para el año 2024 habrá 81.000 automóviles eléctricos, lo que demandará cerca de 2.300 puntos de carga según Enel Chile[3].

Considerando lo expuesto, es notable que la disponibilidad de cargadores de vehículos eléctricos en edificios es un problema necesario de abordar y de suma relevancia, especialmente dado el aumento en la demanda de vehículos eléctricos. Este problema adquiere una importancia aún mayor considerando que Chile ha implementado el lanzamiento de la Estrategia Nacional de electromovilidad en octubre de 2021, la cual establece que a contar del año 2035 solo se comercializarán vehículos eléctricos (AutoFact, 2024)[1], resaltando la urgencia de contar con una infraestructura adecuada de carga para satisfacer las necesidades de los conductores.

## 1.2. Desarrollo del problema

El problema principal se encuentra en la falta de infraestructura de carga apropiada para vehículos eléctricos en lugares de fácil acceso como edificios residenciales. Esta limitación se ve exacerbada por la capacidad eléctrica limitada y las costosas inversiones requeridas en la red eléctrica para expandir la disponibilidad de cargadores.

Una forma potencial de solucionar el problema es mediante la creación de un modelo que permita maximizar la satisfacción del consumidor considerando los costos de construcción y operación de los cargadores eléctricos. Este enfoque da paso a utilizar nuevos tipos de tecnología, como sistemas de carga inteligente y compartida, así como la optimización de la infraestructura existente.

Sobre los beneficios de esta idea, se encuentra la capacidad de lograr que la mayor cantidad de personas se sientan satisfechas con el uso de los vehículos eléctricos para así masificar su uso y reducir las emisiones de  $CO_2$ , además de disminuir la dependencia actual de los combustibles fósiles.

Ahora, en cuanto al impacto cuantitativo, la implementación de esta idea aumentará en un 50 %

la cantidad de cargadores rápidos en el país, así también habrá un aumento de los cargadores a nivel nacional que generará que un 80 % de los vehículos en Chile sean eléctricos. También esto tendrá como consecuencia la disminución en un 40 % de las emisiones de  $CO_2$  considerando que los vehículos eléctricos disminuyen en un 50 % las emisiones en comparación a los vehículos de combustión interna.

Es así como la resolución del problema afectará en varios aspectos de la vida cotidiana. Por un lado, permitirá al administrador aumentar los beneficios monetarios del edificio, además de interesar a los compradores en su producto. De igual manera los departamentos podrían resultar más atractivos para posibles compradores o inquilinos, generando así una mayor demanda en el mercado. Por último, la construcción de estacionamientos con carga para automóviles eléctricos incentivará la compra de autos eléctricos, ayudando a la neutralidad de carbono que se quiere alcanzar en el país.

### 1.3. Objetivos

Considerando lo anterior, se propone un modelo que permita a los administradores de un edificio residencial tomar decisiones para maximizar la satisfacción de los consumidores al usar cargadores eléctricos para sus vehículos, con un presupuesto máximo de la constructora y operación, asociados a los mismos cargadores durante un horizonte de tiempo de 10 años. El tomador de decisiones es el administrador del edificio, que inicialmente se encargará de instalar los cargadores dentro de este, además de pagar las cuentas de electricidad y ofrecer el uso de los estacionamientos. Este modelo generará valor para las personas que tienen un automóvil eléctrico en un edificio residencial, que tiene la disponibilidad de cargadores cuando lo necesite.

En el modelo planteado se consideran cuatro variables. En primer lugar, se encuentra una variable que representa el número de estacionamientos con cargadores de cierto tipo (carga lenta, mediana y rápida) que se instalarán en el edificio. Notar que no necesariamente se llenará el estacionamiento de cargadores eléctricos. A continuación, se incluyen dos variables binarias: una que representa si a un automóvil se le asigna un tipo de cargador en un día, mientras que la otra representa si un automóvil se encuentra utilizando un tipo de cargador en cierta hora de un día. Por último, se cuenta con una variable auxiliar que considera el tiempo que necesita un automóvil para cargar.

Además, se considerarán diversos supuestos para hacer más simple el análisis y los respectivos cálculos del modelo. Entre los supuestos se define que solo existen tres tipos de cargadores y solo existirá uno por estacionamiento, también se despreciará el consumo de potencia del vehículo en reposo, esto significa que nunca se descargan. De igual manera se hablará con respecto a que cada vehículo es compatible con cada tipo de cargador presente en los estacionamientos, y con respecto a la instalación de los cargadores, en esta se incluye el precio del cargador con el costo de mano de obra utilizada. También se considerará que cada automóvil se cargará solo una vez en la noche por al menos una hora, se contempla que la jornada nocturna dura aproximadamente 10 horas. Por otra parte, la cantidad de automóviles promedio que desean un tipo específico de cargador es conocido y fiel a la realidad. Por último, un vehículo eléctrico se considerará cargado cuando está al 75 % de su capacidad máxima pero su carga máxima permitida será del 80 %, esto debido a que con una carga mayor que disminuye la vida útil de la batería. [4]

Finalmente, es importante notar que se necesitará un análisis de mercado para determinar diversos aspectos del modelo. Para comenzar, se debe estimar una cantidad fija de vehículos que circularán en el recinto, para poder modelar el comportamiento de cada uno. También, se pueden realizar modelos probabilísticos para aproximar, por ejemplo, la carga media con que los automóviles llegan o la satisfacción que genera en los consumidores el uso de un determinado cargador. Todo lo anterior, con el fin de implementar un modelo fiel a la realidad.

## 2. Modelación del problema

### 2.1. Supuestos

Se proponen los siguientes supuestos:

- Existen tres tipos de cargadores para los automóviles eléctricos, siendo el tipo 1 el de carga lenta, el tipo 2 de carga intermedia y el de tipo 3 de carga rápida.
- Se supondrá que el consumo de potencia del automóvil mientras está en reposo es insignificante.
- Cada cargador suministra una cantidad constante de potencia durante el proceso de carga.
- Se supondrá que todos los automóviles son compatibles con los tres tipos de cargadores disponibles.
- En cada estacionamiento se instalará un único tipo de cargador.
- El costo de instalación de los cargadores considerará el precio asociado al cargador como también los costos de mano de obra para instalarlos.
- Se supondrá que cada automóvil llegará sólo una vez por noche, considerando que la noche tiene 10 horas.
- La cantidad de automóviles promedio que desean un tipo específico de cargador en una hora es conocida y fiel a la realidad.
- Un vehículo eléctrico se considera cargado cuando está al 75 % de su capacidad máxima, pero la carga máxima permitida será al 80 %.

### 2.2. Conjuntos

Se consideraran los siguientes conjuntos:

- $i \in \{1, 2, 3\}$ , tipos de cargadores.
- $h \in \{1, \dots, 10\}$ , horas del día consideradas.
- $m \in \{1, \dots, M\}$ , automóviles que llegan al edificio.
- $d \in \{1, \dots, 3653\}$ , días.

### 2.3. Parámetros

Establecemos los siguientes parámetros:

- $WC_i$ : Potencia (kW) requerida por un cargador de tipo  $i$ .
- $WT$ : Potencia total máxima (kW) suministrada por el edificio en un día cualquiera.
- $c_i$ : Costo de instalación del cargador tipo  $i$ .
- $nET$ : Número de estacionamientos totales.
- $P$ : Presupuesto.
- $CB_m$ : Capacidad de carga (kWh) de la batería del automóvil  $m$ .
- $W_{m,d}$ : Carga (kWh) del automóvil  $m$  al inicio de la carga en el día  $d$ .
- $H_i$ : Puntos de Satisfacción por la utilización de un cargador de tipo  $i$ ,

## 2.4. Variables de decisión

- $nE_i$ : número de estacionamientos con cargador de tipo  $i$  a instalar.
- $X_{m,i,d} = \begin{cases} 1 & \text{Si al auto } m \text{ se le asigna un cargador de tipo } i \text{ en el día } d \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$
- $CAR_{m,h,d,i} = \begin{cases} 1 & \text{Si el auto } m \text{ se está cargando en la hora } h \text{ del día } d, \text{ con un cargador de tipo } i \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$

## 2.5. Variables auxiliares

- $T_{m,d,i}$ : cantidad de horas que el automóvil  $m$  se carga en la noche correspondiente al día  $d$ , respecto al cargador  $i$ .

## 2.6. Función objetivo

La función objetivo planteada para este problema busca en un horizonte de 10 años maximizar la satisfacción del consumidor al utilizar cargadores para los automóviles eléctricos. Los cargadores a instalar se diferenciarán en la rapidez para cargar el automóvil, relacionado esto con la satisfacción del usuario. De esta forma, se buscará maximizar la cantidad de usuarios satisfechos a lo largo de 10 años:

$$\max \sum_d \sum_m \sum_i H_i \cdot X_{m,i,d}$$

## 2.7. Restricciones

Se cuentan con las siguientes restricciones:

1. La cantidad de estacionamientos en los que se instaló un cargador debe ser menor o igual al total disponible:

$$\sum_i nE_i \leq nET$$

2. Los costos de instalación no pueden superar el presupuesto:

$$P \geq \sum_i c_i \cdot nE_i$$

3. La potencia total consumida en cada hora por los estacionamientos no puede ser mayor a la capacidad máxima del edificio:

$$WT \geq \sum_m \sum_i (CAR_{m,h,d,i} \cdot WC_i) \quad \forall h \in \{1, \dots, 10\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

4. Cada vehículo debe cargarse hasta al menos el 80 % de su capacidad máxima (Carga estándar):

$$\sum_i (T_{m,d,i} \cdot WC_i) + W_{m,d} \geq 0,8 \cdot CB_m \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

5. Si el automóvil  $m$  ingresa al estacionamiento con más del 80 % de su capacidad máxima, entonces no se le asigna estacionamiento con cargador (o no se considera disponible para cargar):

$$\sum_i X_{m,i,d} \leq \frac{0,8 \cdot CB_m}{W_{m,d}} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

6. El tiempo de carga del automóvil  $m$  en el día  $d$  depende del cargador en el estacionamiento en que se encuentre, la capacidad máxima de su batería y de la carga con la que llegue ese día:

$$T_{m,d,i} = \frac{0,8 \cdot CB_m - W_{m,d}}{WC_i} \cdot X_{m,i,d} \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

7. El tiempo que un automóvil  $m$  se encuentra cargando cada día es al menos el necesario para que cargue hasta una carga estándar:

$$\sum_h \sum_i CAR_{m,h,d,i} \geq \sum_i T_{m,d,i} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

8. El tiempo que pasa un automóvil  $m$  cargando es el mínimo necesario para que cargue una carga estándar:

$$\sum_i T_{m,d,i} + 1 \geq \sum_h \sum_i CAR_{m,h,d,i} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

9. Para que un automóvil  $m$  se encuentre cargando por un cargador de tipo  $i$ , este tiene que estar en un estacionamiento con este tipo de cargador:

$$X_{m,i,d} \geq CAR_{m,h,d,i} \quad \forall h \in \{1, \dots, 10\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\} \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\}$$

10. A un automóvil se le puede asignar a lo más a un solo estacionamiento por día:

$$1 \geq \sum_i X_{m,i,d} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

11. La cantidad de automóviles que se cargan en estacionamientos con cargadores de tipo  $i$  en cualquier día  $d$  no puede superar la cantidad instalada de estos cargadores:

$$nE_i \geq \sum_m X_{m,i,d} \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

## 2.8. Naturaleza de variables

La naturaleza de las variables son:

$$nE_i \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in \{1, 2, 3\}$$

$$X_{m,i,d} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall i \in \{1, 2, 3\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\}$$

$$CAR_{m,h,d,i} \in \{0, 1\} \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall h \in \{1, \dots, 10\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\} \quad \forall i \in \{1, 2, 3\}$$

$$T_{m,d,i} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall m \in \{1, \dots, M\} \quad \forall d \in \{1, \dots, 3653\} \quad \forall i \in \{1, 2, 3\}$$

## 3. Definición de datos

- $WC_i$ : Potencia requerida por un cargador [5].

El dato de  $WC_i$  indica la potencia en kW que necesita cada tipo de cargador para su funcionamiento. La fuente de esta información es el Ministerio de Energía de Chile, la cual utiliza rangos para definir estos valores, por lo que se considera el valor medio de cada uno. Para la implementación en Gurobi, se utilizaron los siguientes valores:

- Cargadores tipo 1, con potencia de entre 1.1 kW y 3.3 kW: 2.2 kW
- Cargadores tipo 2, con potencia de entre 6 kW y 44 kW: 25 kW

- Cargadores tipo 3, con potencia de entre 50 kW y 200 kW: 125 kW
- $WT$ : Potencia total suministrada por el edificio.

El dato  $WT$  representa la potencia total, medida en kW, que un edificio puede suministrar cada hora. Según el ministerio de energía, la infraestructura de un edificio puede otorgar típicamente 12200 kW.[6]

- $c_i$  (\$): Costo de instalación del cargador tipo  $i$ .

El dato  $c_i$  denota el costo asociado a la instalación de un tipo de cargador, el cual incluye la compra del dispositivo y los costos de instalación y mantención. Para efecto de la simulación en Gurobi, sólo se consideraron los costos asociados a la compra del dispositivo. Haciendo un análisis de mercado para cargadores de libre venta [7][8][9], se extrajeron los siguientes valores para los distintos cargadores:

- Cargadores tipo 1: \$197.990
- Cargadores tipo 2: \$756.990
- Cargadores tipo 3: \$6.300.000
- $nET$ : Número de estacionamientos totales.

El dato  $nET$  se refiere a la cantidad total de estacionamientos en el edificio. Este dato será definido por el administrador del edificio. Para esta instancia se considerará un total de 100 estacionamientos. Es importante agregar que el valor de  $M$  es de 100.

- $P$  (\$): Presupuesto.

El dato  $P$  representa el presupuesto total disponible para el proyecto de instalación de cargadores de vehículos eléctricos. Este está pensado para los costos relacionados a la mano de obra de la instalación, los cargadores y la electricidad requerida. Este valor se extrae del 10 % del presupuesto promedio calculado para construir 100 estacionamientos en un edificio residencial. El valor utilizado es de \$ 93.845.000.

- $CB_m$ : Capacidad de potencia de la batería del automóvil.

El dato  $CB_m$  denota la capacidad de potencia medida en kWh de la batería de un vehículo. Para ello se tendrá en cuenta un valor promedio definido por Electric Vehicle Database. [10]

- $W_{m,d}$ : Carga energética del automóvil al inicio de cada período de carga.

El dato  $W_{m,d}$  define la carga disponible en kWh de la la batería del vehículo al comienzo del proceso de carga en un cierto día. Este se modelará con una distribución normal para obtener valores aleatorios con una media de 30 kWh.

- $H_i$ : Puntos de satisfacción por la utilización de un cargador.

El dato  $H_i$  representa el nivel de satisfacción de los usuarios al utilizar un cierto tipo de cargador. Este dato será determinado dentro del proyecto.



Para obtener la diferencia de satisfacción de un cargador y de otra, se consideraron variables que un consumidor promedio puede requerir y valorar.

Por ejemplo, un cargador de tipo 1 tendrá una satisfacción baja, pues no permite al usuario utilizar su automóvil en cualquier caso de emergencia, pues podría no estar cargado completamente. Sin embargo, es importante que se diferencia del caso en que no hay ningún cargador eléctrico.

Además, uno de tipo 2 tendrá ligeramente más satisfacción que el de tipo 1, pero tendrá una cantidad considerable menos que uno de tipo 3, ya que este último permite cargar el automóvil en minutos y así no tener que preocuparse de si está cargado o no.

Considerando que un cargador de tipo 2 cargará 10 veces más rápido que un cargador de tipo 1, y un cargador de tipo 3 cargará 40 veces más rápido que uno de tipo 1, se determinan los siguientes valores arbitrarios como la satisfacción asociada a cada tipo de cargador:

- Cargadores tipo 1: 200
- Cargadores tipo 2: 2000
- Cargadores tipo 3: 8000

## 4. Resolución del Problema

La solución óptima encontrada por el programa corresponde a 0 cargadores de tipo 1 instalados, 97 cargadores de tipo 2 y 3 cargadores de tipo 3, considerando 100 estacionamientos disponibles para 100 vehículos. Esta solución es factible gracias a que cumple todas las restricciones propuestas en el modelo y por ende, se logra maximizar la satisfacción de las personas que utilizaron los estacionamientos.

Notar que el cálculo en Gurobi se realizó con un total de 10 días, a diferencia del modelo presentado anteriormente. Esto se realizó ya que se considera que es una muestra representativa y extendible a cada uno de los posteriores meses, pues el modelo no hace diferenciación entre fines de semana, días de vacaciones, entre otros. Además, esto entrega tiempos de ejecución menores y permite visualizar los datos de mejor forma.

La satisfacción total en esta solución es de 2.180.000

## 5. Validación de resultados

El modelo busca poder otorgar una solución a la problemática de la disponibilidad de cargadores eléctricos, implementando estacionamientos con diferentes tipos de cargadores en donde cada uno dará puntos de satisfacción al consumidor. Se busca poder maximizar esta satisfacción teniendo un presupuesto de \$93.845.000 CLP. A la solución que se llegó fue de 0 cargadores de tipo 1, 97 cargadores de tipo 2 y 3 cargadores de tipo 3. Esta solución se justifica debido a la gran diferencia de precio del cargador tipo 3 con los otros cargadores, por lo que es óptimo no incluirlos en la construcción de los estacionamientos. También se puede considerar los casos en donde al consumidor no le importa el hecho de que se carguen extremadamente rápido, siendo esta otra explicación para que no hayan cargadores de tipo 3.

Por otra parte, la cantidad de cargadores tipo 1 y 2 son muy similares gracias a los precios y la satisfacción de cada uno, sin embargo, a pesar que estos no son los que dan más satisfacción, si

satisfacen de forma óptima el presupuesto y la energía que se requiere para la utilización de estos.

De acuerdo con los datos y resultados obtenidos, se proyecta que la instalación de 11 edificios con 100 estacionamientos equipados con cargadores para vehículos eléctricos cubrirá aproximadamente el 50 % de la demanda estimada por Enel Chile[3] para el año 2024, mejorando la disponibilidad y accesibilidad para los consumidores. Es importante resaltar que esta iniciativa busca maximizar la satisfacción del consumidor, ya que al mejorar la accesibilidad a los cargadores eléctricos, más personas se inclinarán por utilizar automóviles eléctricos.

Por último, los resultados obtenidos por Gurobi se encuentran en el excel `resultados.xlsx`, generado por el mismo archivo `main.py`.

## 6. Análisis de Sensibilidad

Para realizar el análisis de sensibilidad, y así entender los cambios que se hacen a través de los parámetros con la información entregada, se abordan dos aristas distintas: variación de costos y variación de recursos.

### 6.0.1. Variación de costos

- Para analizar cómo varía la solución óptima del problema dada una variación en los costos, el punto más claro que podría cambiar en el tiempo corresponde al costo de compra en instalación de los distintos cargadores.

Precio cargador tipo 3	Cant. cargador tipo 1	Cant. cargador tipo 2	Cant. cargador tipo 3
\$ 2.000.000	85	1	14
\$ 2.600.000	79	11	10
\$ 2.630.000	54	46	0
\$ 5.040.000	0	96	4
\$ 5.670.000	3	93	4
\$ 6.300.000	0	97	3
\$ 6.930.000	1	96	3
\$ 7.560.000	0	98	2

Cuadro 1: Sensibilidad según variación en el precio del cargador tipo 3

Utilizando los valores actuales considerados en la simulación del problema, se destaca que, si bien los cargadores de tipo 3 cargan cuatro veces más rápido que los cargadores de tipo 2, el costo de compra de estos últimos es menos de un octavo de lo que corresponde a los cargadores de mayor potencia. Luego, proyectando a futuro se esperaría observar que con nuevas tecnologías y con un uso más masificado de vehículos eléctricos, el costo de estos baje considerablemente.

Para analizar las variaciones de la solución óptima del problema bajo estos supuestos, tomamos un caso exagerado de la situación asumiendo inicialmente que el costo individual de estos baja de \$6.300.000 a \$2.000.000.

En esta situación, la solución óptima pasa a considerar 85 cargadores de tipo 1, 1 cargador de tipo 2 y 14 cargadores de tipo 3. Este cambio tendría sentido dadas las circunstancias previamente definidas, dado que un mayor acceso a mejores tecnologías que entregan mayor beneficio

eventualmente provocaría que las soluciones graviten a utilizar estas tecnologías.

Es posible analizar la máxima variación del costo de estos cargadores tal que la solución óptima no varíe. Luego de varias iteraciones de estos cambios, se llega a que el mínimo costo que pueden tener los cargadores de tipo 3 tal que la solución óptima siga considerando 54 cargadores de tipo 1, 46 cargadores de tipo 2 y 0 cargadores de tipo 3 es de \$2.630.000. Evidenciando que tanto en condiciones actuales de costo como en condiciones cercanas al valor actual, no resulta conveniente utilizar cargadores de tipo 3 ya que existen restricciones de presupuesto,

Si el costo de estos cargadores bajase a \$2.600.000, entonces la solución sería de 79 cargadores de tipo 1, 11 cargadores de tipo 2 y 10 cargadores de tipo 3.

Por otro lado, la variación en el costo de los cargadores tipo 3 y por ende su utilización en la solución óptima del problema también genera un cambio en el valor obtenido en la función objetivo, como se observa en el siguiente gráfico:

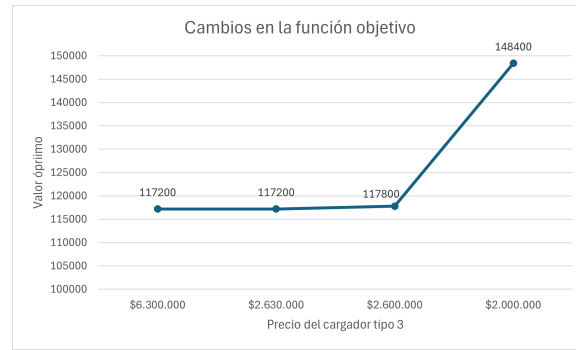


Figura 1: Gráfico de la función objetivo ante la variación del precio del cargador tipo 3

En la figura 1 se puede notar como aumenta el valor óptimo de la función objetivo a medida que disminuye el valor de los cargadores de tipo 3, esto bajo el supuesto que el progresivo aumento de la tecnología los volverá más baratos y accesibles, este aumento es casi despreciable durante gran parte de la disminución del precio de los cargadores tipo 3 y solo se hace relevante cuando se acerca a los dos millones de pesos.

- Otro análisis que se puede realizar respecto a la variación de costos corresponde a las variaciones que puede tener para los usuarios el uso de cada cargador. Si bien en el modelamiento inicial se considera el beneficio como una variable únicamente dependiente del tiempo en que se demora un cargador en efectuar una carga completa, otros factores como la disponibilidad en situaciones de emergencia o el uso efectivo de los vehículos en la noche podría implicar que la satisfacción de un cargador tipo 3 sea mucho mayor o mucho menor a aquel en la configuración actualmente analizada. Esto posibilitaría situaciones donde utilizar un cargador de tipo 3 sea marginalmente mejor que utilizar un cargador de tipo 1 o 2, como también podría ocurrir que el beneficio entregado por estos sea tan alto que una solución sin utilizar estos cargadores no tendría sentido.

Para analizar esta situación, se realizó un análisis donde a cada cargador se observan variaciones en la satisfacción entregada, entregando las soluciones presentadas en las siguientes tablas:

$\Delta$ Satisfacción al usar cargador tipo 1	Cant. cargadores tipo 1	Cant. cargadores tipo 2	Cant. cargadores tipo 3	Satisfacción total / valor óptimo
-50 %	0	97	3	2.180.000
-25 %	0	97	3	2.180.000
+0 %	0	97	3	2.180.000
+25 %	0	97	3	2.180.000
+50 %	0	97	3	2.180.000

Cuadro 2: Variaciones de solución óptima dados cambios en  $H_1$

$\Delta$ Satisfacción al usar cargador tipo 2	Cant. cargadores tipo 1	Cant. cargadores tipo 2	Cant. cargadores tipo 3	Satisfacción total / valor óptimo
-50 %	8	88	4	1.216.000
-25 %	0	97	3	1.695.000
+0 %	0	97	3	2.180.000
+25 %	0	97	3	2.665.000
+50 %	0	97	3	3.150.000

Cuadro 3: Variaciones de solución óptima dados cambios en  $H_2$

$\Delta$ Satisfacción al usar cargador tipo 3	Cant. cargadores tipo 1	Cant. cargadores tipo 2	Cant. cargadores tipo 3	Satisfacción total / valor óptimo
-50 %	0	97	3	2.060.000
-25 %	0	97	3	2.120.000
+0 %	0	97	3	2.180.000
+25 %	0	97	3	2.240.000
+50 %	0	97	3	2.300.000

Cuadro 4: Variaciones de solución óptima dados cambios en  $H_3$

Como se observa en los Cuadros 2-4, con cambios de -50 % a +50 % no cambia en mayor medida la configuración de la base, sólo en un caso ocurre que se incluyen cargadores de tipo 1 en la solución y es cuando la satisfacción que entregan los cargadores de tipo 2 bajan lo suficiente como para ser comparable con la satisfacción que entregan los cargadores de tipo 1. Luego, se extrae de este análisis que mientras las satisfacciones que entregue cada cargador se mantengan a diferencias considerables, las soluciones no se verán afectadas dado que actualmente y como se comentó en el punto anterior, la restricción del presupuesto se encuentra activa y limita los tipos de cargadores que pueden ser instalados.

### 6.0.2. Variación de Recursos

- Para analizar cómo afecta la variación de recursos a la factibilidad de la solución actual y cómo se ajusta el valor óptimo del problema, pensamos tanto en variaciones en la implementación del problema como de posibles cambios ante nuevas tecnología. Luego, una primera aproximación sería ver qué ocurre al intentar escalar el problema para instalar más estacionamientos dado un presupuesto proporcional, y cómo reacciona la solución si la restricción de potencia máxima suministrable en cada momento se mantiene igual.

Número de vehículos	Presupuesto	Costo total de instalación	Satisfacción promedio por vehículo
100	\$93.845.000	\$92.328.030	21.800
200	\$187.690.000	\$184.656.060	21.800
300	\$281.535.000	\$281.409.100	21.880

Cuadro 5: Presupuesto y costo efectivo con distintas cantidades de vehículos

A partir de este cuadro se observa que a medida que aumenta la cantidad de autos y el presupuesto se mantiene proporcional, siempre se trabaja cercano al límite de costos totales de forma que pareciese ser la cota que define al problema, pero al probar iteraciones del problema donde se consideran 360 o más vehículos y un crecimiento proporcional de presupuesto, la simulación comienza a extenderse y llega a tiempos de ejecución que superan a aquellos definidos como límites para el propósito de este informe. Si bien el código no se logra ejecutar, una explicación de por qué ocurre esto es debido a que comienza a ser necesario limitar la cantidad de cargadores que pueden estar activos simultáneamente en cada hora, lo que implica que el programa tiene que considerar distribuciones de cargadores a los distintos autos, para todas las horas de todos los días considerados. Esto es distinto a antes pues nunca existió una demanda de cargadores lo suficientemente alta para chocar con la cota de potencia máxima suministrada por el edificio, luego, a partir de este punto la solución óptima pasa de ser restringida por el presupuesto a considerar el límite de potencia instantánea del edificio como límite de operación.

- El siguiente punto que resulta evidente de analizar para la variación de recursos, corresponde a cambios en el presupuesto existente. Si bien el problema intenta maximizar el dinero gastado con las soluciones muy cercanas a la cota de presupuesto, el comportamiento de estas soluciones no es lineal debido a la variabilidad y la necesidad de suplir siempre con la carga de todos los autos. A continuación se presenta un gráfico compara las variaciones en la satisfacción óptima obtenida a partir de soluciones óptimas con distintos presupuestos.

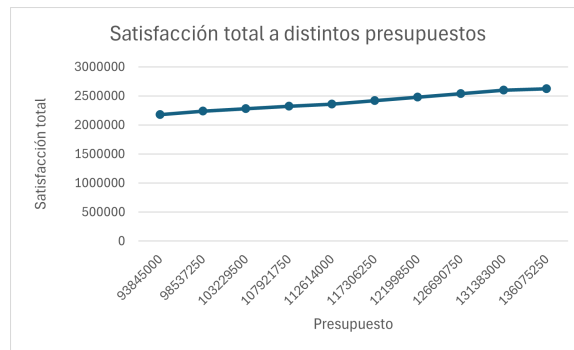


Figura 2: Satisfacción total obtenida vs. presupuesto

Al observar el gráfico, a simple vista se observa que la satisfacción posee un crecimiento proporcional casi lineal que relaciona esta variable con el presupuesto, pero al ver más detalladamente, se observa que la relación no es completamente lineal, y entre los distintos tramos calculados a intervalos fijos de 5% del presupuesto inicial hay distintas pendientes. Es decir, si bien la función objetivo intenta saturar el presupuesto, esto no se obtiene mediante una relación lineal de las variables y existen variabilidades como ocurre al disminuir la satisfacción del cargador de tipo 2 como se muestra en el cuadro 3, tal que empieza a ser menos clara la diferencia entre el uso de un cargador u otro.

Si bien es posible analizar múltiples cambios más como puede ser el porcentaje promedio de carga con el que llegan los autos, las capacidades máximas de energía de las baterías o el tiempo disponible para cargar los vehículos, entre otros; los análisis mencionados consideran cambios que se condicen con el objetivo del proyecto, como lo puede ser la disminución del costo de cargadores de alta gama dado posibles mejoras tecnológicas a futuro, la disminución o aumento de satisfacción que retorna el uso de cada tipo de cargador debido a distintas prácticas o percepciones de los usuarios más allá del tiempo de carga, el aumento de presupuesto para la instalación de cargadores, etc.

## 7. Conclusión

Este modelo de optimización busca poder maximizar la satisfacción de los consumidores al momento de cargar sus vehículos eléctricos, ideando un estacionamiento con diversos cargadores disponibles. Para esta solución se consideraron diversas variables, entre estas se encuentran la cantidad de estacionamientos correspondiente a cada tipo de cargador por instalar, si al auto se le asignó un tipo de cargador específico, si el automóvil está siendo cargado en cierto momento del día y finalmente el tiempo en horas que se demora en cargar el vehículo. Además, se tomaron en cuenta ciertos parámetros, tales como la potencia requerida por cada cargador, la potencia suministrada por el edificio, los costos de instalación, el presupuesto, el número de estacionamientos, entre otros. Todos estos factores hacen que el modelo sea una aproximación de lo que se quiere lograr en la realidad, ya que hay ciertos parámetros que se podrían haber incorporado al modelo para complejizarlo, como el costo de la mano de obra. En sí, medir la satisfacción del cliente de la forma que se plantea es muy complicado, ya que es subjetivo, y por ende la satisfacción varía según el objetivo de cada cliente.

Al implementar el problema del modelo de forma computacional, la solución óptima incluye 54 cargadores de tipo 1, 46 de tipo 2 y ninguno de tipo 3, esto se debe al alto costo de estos cargadores, por lo que no sería óptimo instalarlos considerando el presupuesto de \$ 93.845.000 CLP. Esta solución hace que el modelo sea una representación adecuada a la realidad y sea significativo para la toma de decisiones con respecto al presupuesto establecido y los diferentes parámetros explicados anteriormente.

Con respecto a la calidad de la solución, podemos considerar que puede ser implementable debido a la robustez que presenta al momento de realizar cambios de ciertos parámetros para realizar un análisis de sensibilidad. En primer lugar se realizó una variación de costos, en donde al realizar un cambio exagerado en el valor de los cargadores de tipo 3, la solución óptima incluye 85 cargadores de tipo 1, 1 cargador de tipo 2 y 14 de tipo 3. Si consideramos que en un futuro aumentarán las nuevas tecnologías y la electromovilidad, se puede considerar que eventualmente los cargadores de tipo 3 disminuirán su precio, por lo que el modelo sería realista para la toma de decisiones a futuro. También se puede analizar cambiando el nivel de satisfacción que entrega cada cargador, pero se logra establecer que en la mayoría de los casos, a pesar de los cambios, la cantidad de cargadores requeridos no varía, por lo tanto las soluciones no se verán afectadas. En segundo lugar, al realizar una variación de recursos podemos modificar la cantidad de autos, que al aumentarlos, en el problema se comienza a limitar la cantidad de cargadores activos, y por tanto queda restringido por la potencia de suministrada por el edificio. Por otra parte podemos modificar el presupuesto inicial, que al aumentarlo, hay un crecimiento proporcional de la satisfacción.

En el modelo se pueden identificar algunos errores potenciales, entre estos se han la simplicidad de la satisfacción del consumidor, el no considerar el costo de la mano de obra, la variación de algunos valores variables a futuro, tales como los costos de los cargadores. Todos estos aspectos se deben tener presentes para lograr una solución con datos más representativos y solución más robusta y efectiva.

Entre las mejoras a realizar para una mejor precisión del modelo se encuentra poder encontrar un valor totalmente realista, a partir de un estudio detallado, por ejemplo, para la satisfacción del cliente. De esta forma, se podría crear una ponderación que tome en cuenta diversos factores a fin de representar de mejor forma las necesidades del usuario. Esto plantea un gran desafío, el cual nos llevará a indagar, a recopilar y analizar datos sobre el comportamiento y preferencias del usuario objetivo, para poder así realizar un modelo que sea completamente fiel a la realidad y capaz de llegar a una solución en donde en todos los casos, ya sea cualquiera el interés del consumidor, se pueda maximizar su satisfacción.

## 8. Anexos

	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	36	39	35	22	15	0	1	1	38	34
Tipo 3	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	34	38	39	27	21	0	1	2	40	28
Tipo 3	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	31	37	36	26	13	0	1	3	40	24
Tipo 3	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	34	37	36	27	18	1	1	2	37	38
Tipo 3	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	39	36	37	25	15	0	0	0	36	36
Tipo 3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	37	37	38	21	8	1	1	1	38	25
Tipo 3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	35	36	37	34	24	0	2	0	24	37
Tipo 3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	30	37	37	38	14	0	3	0	37	32
Tipo 3	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	34	39	38	26	17	0	1	2	38	26
Tipo 3	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
	Hora 1	Hora 2	Hora 3	Hora 4	Hora 5	Hora 6	Hora 7	Hora 8	Hora 9	Hora 10
Tipo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tipo 2	38	40	36	20	16	2	0	0	36	29
Tipo 3	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1

**Anexo 1:** Distribución de vehículos cargados cada hora en 10 días. La carga con que llegan las baterías de los autos cada día corresponde a una variable aleatoria.

## Referencias

- [1] Modelos y precios de autos eléctricos en Chile en 2024. (2024, 19 febrero). Recuperado de <https://www.autofact.cl/blog/noticias/autofact/autoselectricos#:~:text=Seg%C3%BAn%20cifras%20de%20la%20Asociaci%C3%B3n,vendido%201.295%20veh%C3%ADculos%20cero%20emisiones>
- [2] Uai, C. (s. f.). Puntos de carga: el desafío nacional para aumentar la electromovilidad en 2024. Recuperado de <https://centra.uai.cl/puntos-de-carga-el-desafio-nacional-para-aumentar-la-electromovilidad-en-2024>
- [3] 1.200 cargadores para autos eléctricos unirán Chile de norte a sur. (s. f.). Recuperado de <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/electromovilidad-a-fondo/1200-cargadores-para-autos-electricos-uniran-chile-de-norte-a-sur.html>
- [4] ¿Por qué no debes cargar al 100 % la batería de tu vehículo eléctrico? (2023, 26 de enero) Serenovables.com. <https://serenovables.com/se-puede-recargar-bateria-coche-electrico-100/>
- [5] Ministerio de Energía de Chile. <https://energia.gob.cl/electromovilidad/sistemas-de-carga/cargadores-electricos>
- [6] Ministerio de Energía de Chile. (2021, junio). Eficiencia Energética en Edificaciones: Sesión 1. División de Energías Sostenibles.
- [7] Soonplus. (2024). Soonplus CCS2 Connectors Floor Mounted EV Charging Charger Station with Ocpg 1.6j. Made-in-China. [https://es.made-in-china.com/co\\_soonplus/product\\_Soonplus-CCS2-Connectors-Floor-Mounted-EV-Charging-Charger-Station-with-Ocpg-1-6j\\_ysseeohuy.html](https://es.made-in-china.com/co_soonplus/product_Soonplus-CCS2-Connectors-Floor-Mounted-EV-Charging-Charger-Station-with-Ocpg-1-6j_ysseeohuy.html)
- [8] Alibaba. (2024). E V Charging Stations. [https://www.alibaba.com/premium/e\\_v\\_charging\\_stations.html?src=sem\\_ggl&field=UG&from=sem\\_ggl&cmpgn=20778123774&adgrp=161011254692&fditm=&tgt=kwd-453083972078&locintrst=&locphyscl=1003320&mtchtyp=b&ntwrk=g&device=c&dvcmdl=&creative=681334764392&plcmnt=&plcmntcat=&aceid=&position=&gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMIud07yUC\\_hgMVsEhABOQ2A61EAAYBCAAEgJf4PD\\_BwE](https://www.alibaba.com/premium/e_v_charging_stations.html?src=sem_ggl&field=UG&from=sem_ggl&cmpgn=20778123774&adgrp=161011254692&fditm=&tgt=kwd-453083972078&locintrst=&locphyscl=1003320&mtchtyp=b&ntwrk=g&device=c&dvcmdl=&creative=681334764392&plcmnt=&plcmntcat=&aceid=&position=&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIud07yUC_hgMVsEhABOQ2A61EAAYBCAAEgJf4PD_BwE)
- [9] Natura Energy. (2024). Cargador vehículo eléctrico. <https://www.naturaenergy.cl/collection/cargador-vehiculo-electrico>
- [10] EV database. (s.f.). EV Database. <https://ev-database.org/cheatsheet/useable-battery-capacity-electric-car>
- [11] Habitissimo. (2024). Servicios profesionales. <https://www.habitissimo.cl/>