

# Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

Sebastián de la Torre Fazio  
Universidad de Málaga



12/11/2019  
Santiago, Chile





# Índice General

1. Introducción y Motivación
2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad
  - Comportamiento de baterías
3. Planificación de la Transmisión
4. Planificación de la Generación
5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)
6. Conclusiones y Lecciones Aprendidas



# I. Introducción y Motivación

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



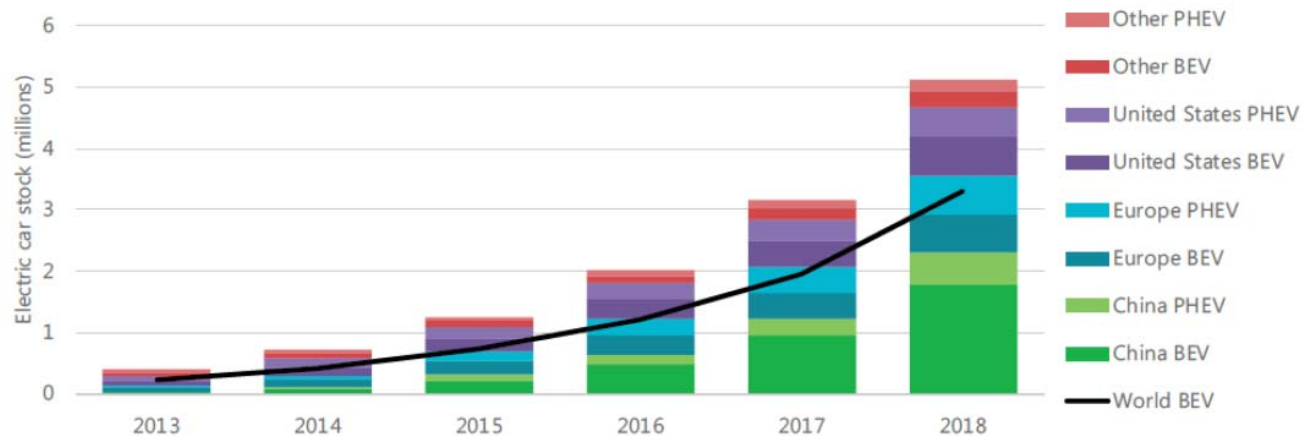
# I. Introducción y Motivación

- Movilidad Eléctrica

- El transporte es el responsable del 25% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero.
- De ese 25%, el 74% se debe al transporte terrestre.
- Los VEs tienen nulas emisiones *locales*
- Coste operativo menor
- Más silencioso
  
- Coste de adquisición mayor
- Rango más limitado

# I. Introducción y Motivación

- Movilidad Eléctrica
  - Implantación global de los VEs



Fuente: (International Energy Agency, 2019)



# I. Introducción y Motivación

- Efectos locales sobre la red de distribución



# I. Introducción y Motivación

- Efectos globales sobre la red de transporte
  - Cambia la *cantidad* de la demanda eléctrica
    - Aumento neto de demanda, parte del consumo pasa desde los combustibles fósiles hacia la energía eléctrica
  - Cambia el *patrón* de comportamiento de la demanda
    - La demanda eléctrica pasa a ser menos previsible
  - Cambia la *estacionariedad* de la demanda
    - La demanda pasa a ser móvil.
    - 1 - Móvil porque puede desplazarse *para* cargar
    - 2 - Móvil porque puede desplazarse *mientras* carga
  - Cambia la *direccionalidad* de la demanda
    - El sistema tiene que estar en condiciones de absorber energía inyectada por algunos usuarios. Sistema más flexible.





## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA





## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- **Bidireccionalidad localizada y gestionable (?)**
  - **Sistemas de Almacenamiento de cualquier tipo**
    - Centrales de Bombeo
    - Volantes de Inercia
    - Aire comprimido
    - Sales Fundidas
    - Sistemas Electroquímicos (Baterías)
    - Sistemas alternativos...
  - **Prosumidores**
  - **Sistemas Ferroviarios con frenada regenerativa**



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- **Movilidad Eléctrica: Nueva Bidireccionalidad**
  - Condicionantes de las baterías de los VEs
    - Envejecimiento.
    - Ciclado.
    - Comportamiento no lineal
  - Posibilidad de V2G (o V1G, más sencillo)

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)



### **Effect of electromobility on the power system and the integration of RES** S13 Report

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-I

Negative impacts resulting from uncoordinated charging while electric vehicle penetration increases can be avoided by introducing time-varying tariffs like time-of-use or real-time prices. This recommendation is fully in line with Article 11 of the proposed recast of the Electricity Market Directive (COM(2016) 864 final/2, [16]), enabling consumers direct participation in the market via dynamic electricity pricing contracts. These schemes are recommended to be established as insurance policy that the system can cope when the electric passenger cars are deployed on large scale.

**Negative impacts resulting from uncoordinated charging while electric vehicle penetration increases can be avoided by introducing time-varying tariffs like time-of-use or real-time prices.**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-I

Negative impacts resulting from uncoordinated charging while electric vehicle penetration increases can be avoided by introducing time-varying tariffs like time-of-use or real-time prices. This recommendation is fully in line with Article 11 of the proposed recast of the Electricity Market Directive (COM(2016) 864 final/2, [16]), enabling consumers direct participation in the market via dynamic electricity pricing contracts. These schemes are recommended to be established as insurance policy that the system can cope when the electric passenger cars are deployed on large scale.

**Es posible evitar el impacto negativo de la carga no-coordinada de VEs, mediante el uso de una adecuada tarificación.  
(time-of-use / real-time prices)**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-2

To capture the full benefits of additional system flexibility created by electric vehicles and ensure a fully system-compliant integration, place should be given to new actors, such as aggregators that can bundle the shiftable load of all flexible consumers and/or to establish real-time pricing for final costumers themselves. This echoes the relevance of paving the way for aggregators, as required by Member States through Article 17 of the proposed recast of the Electricity Market Directive [16].

**(...) place should be given to new actors, such as aggregators that can bundle the shiftable load of all flexible consumers.**



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-2

To capture the full benefits of additional system flexibility created by electric vehicles and ensure a fully system-compliant integration, place should be given to new actors, such as aggregators that can bundle the shiftable load of all flexible consumers and/or to establish real-time pricing for final costumers themselves. This echoes the relevance of paving the way for aggregators, as required by Member States through Article 17 of the proposed recast of the Electricity Market Directive [16].

**Se debe tener en cuenta a los nuevos agentes, como a los agregadores, que reúnen la demanda flexible de los consumidores.**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-4

Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential. Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services. The proposed recast of the Electricity Regulation (COM(2016) 861 final/2, [17]) backs this development by calling for enhanced investments in infrastructure supporting the integration of variable and distributed generation. It further calls for effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.

**Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential.**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-4

Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential. Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services. The proposed recast of the Electricity Regulation (COM(2016) 861 final/2, [17]) backs this development by calling for enhanced investments in infrastructure supporting the integration of variable and distributed generation. It further calls for effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.

**La carga inteligente de VEs no solo debe ser una forma de integrar los VE en el Sistema de Energía Eléctrica, sino también debe considerarse como un recurso que aporta flexibilidad al Sistema (por ejemplo, para integrar renovables), haciendo uso de las baterías instaladas en los VEs como potencial Sistema de almacenamiento distribuido.**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-4

Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential. Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services. The proposed recast of the Electricity Regulation (COM(2016) 861 final/2, [17]) backs this development by calling for enhanced investments in infrastructure supporting the integration of variable and distributed generation. It further calls for effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.

**Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services.**



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-4

Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential. Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services. The proposed recast of the Electricity Regulation (COM(2016) 861 final/2, [17]) backs this development by calling for enhanced investments in infrastructure supporting the integration of variable and distributed generation. It further calls for effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.

**Para facilitar que las baterías de los VEs puedan usarse para dar servicios a la red mediante V2G se requiere de tecnologías novedosas de comunicación y gestión y también es necesario poder conectar a los usuarios o sus agregadores con los mercados relacionados con el apoyo a la red eléctrica.**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-4

Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential. Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services. The proposed recast of the Electricity Regulation (COM(2016) 861 final/2, [17]) backs this development by calling for enhanced investments in infrastructure supporting the integration of variable and distributed generation. It further calls for effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.

**(...) effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.**



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de la Comisión Europea con “POLICY RECOMMENDATIONS” (junio 2018)

PR-4

Electric vehicle smart charging should finally not only be considered as a means of reasonable integration of electric vehicles in the power system, but as a resource of system flexibility (e.g. for RES integration) by making use of the batteries installed in electric vehicles as important system storage potential. Paving the way for battery utilisation for system services via vehicle-to-grid technology requires dedicated IT-based communication and management solutions as well as access for electric vehicle owners or intermediary entities to the respective markets for system services. The proposed recast of the Electricity Regulation (COM(2016) 861 final/2, [17]) backs this development by calling for enhanced investments in infrastructure supporting the integration of variable and distributed generation. It further calls for effective scarcity prices that encourage market participants to be available when flexibility is most needed in the power system.

**Son necesarias señales claras de precio, que animen a los participantes en el mercado a estar disponibles cuando la red eléctrica tenga más necesidad de flexibilidad.**

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe del McKinsey Center for Future Mobility (julio 2018)

McKinsey&Company



Hauke Engel,  
Russell Hensley,  
Stefan Knupfer,  
Shivika Sahdev

# THE POTENTIAL IMPACT OF ELECTRIC VEHICLES ON GLOBAL ENERGY SYSTEMS

July 2018

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

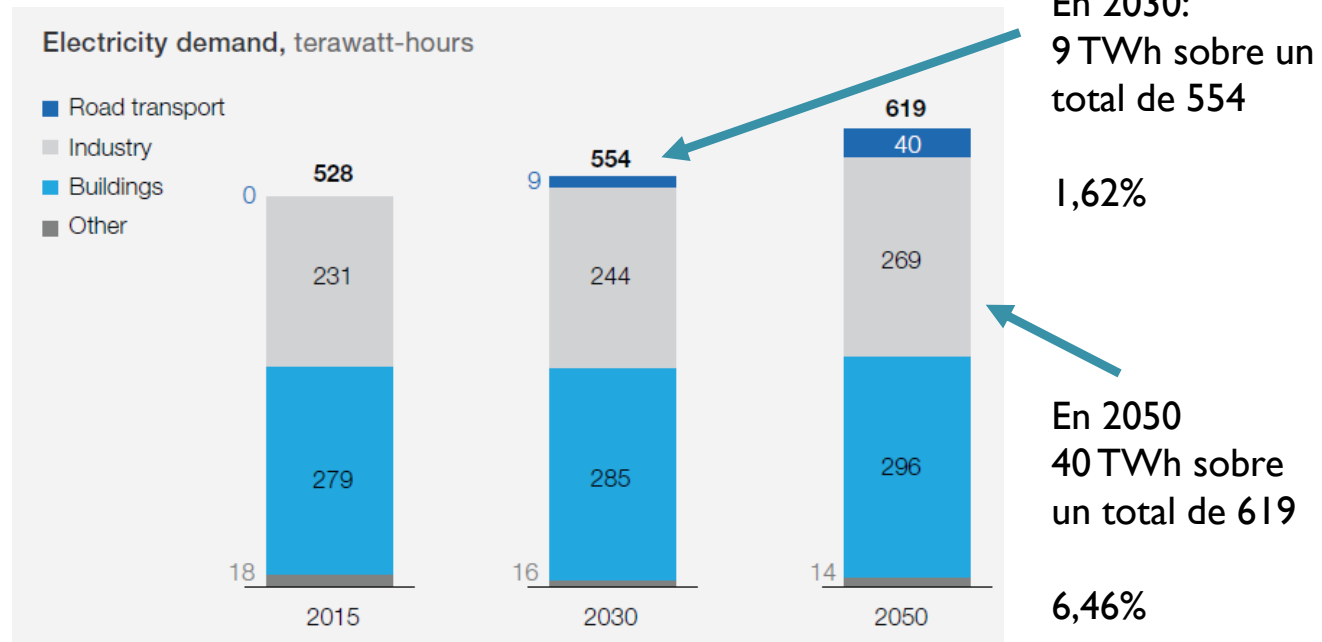
- Informe de McKinsey Center for Future Mobility (julio 2018)

Electric vehicles are unlikely to create a power-demand crisis but could reshape the load curve.

- No es probable una “demand crisis”
- Pero sí es probable una importante influencia sobre la curva de demanda.

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

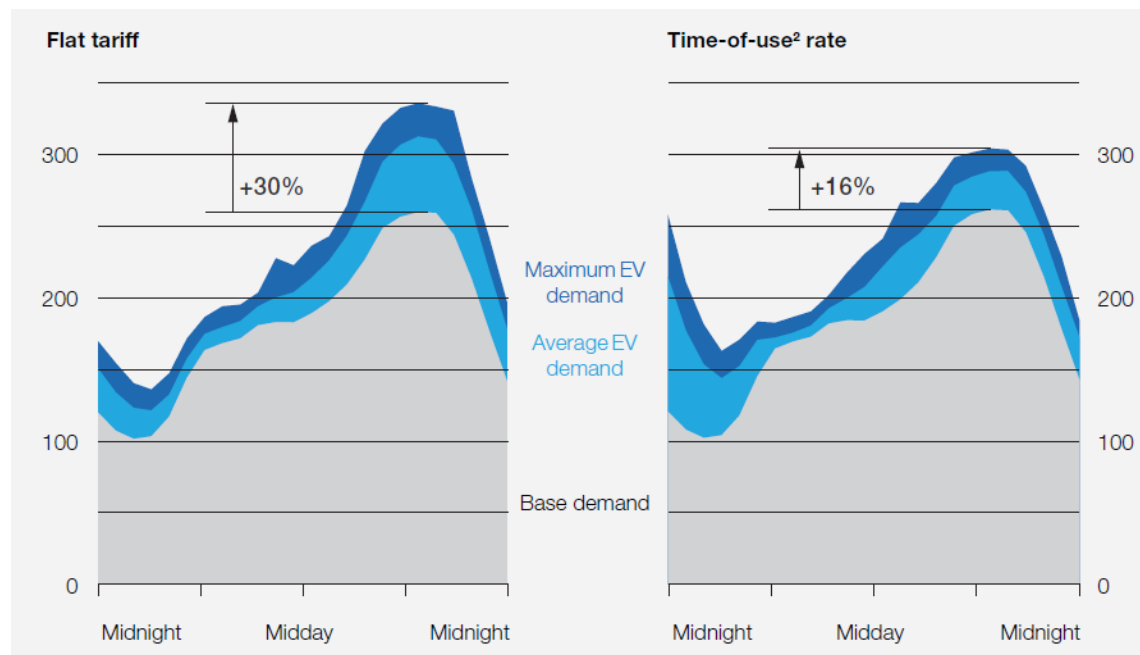
- Informe de McKinsey Center for Future Mobility (julio 2018)



Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Informe de McKinsey Center for Future Mobility (julio 2018)



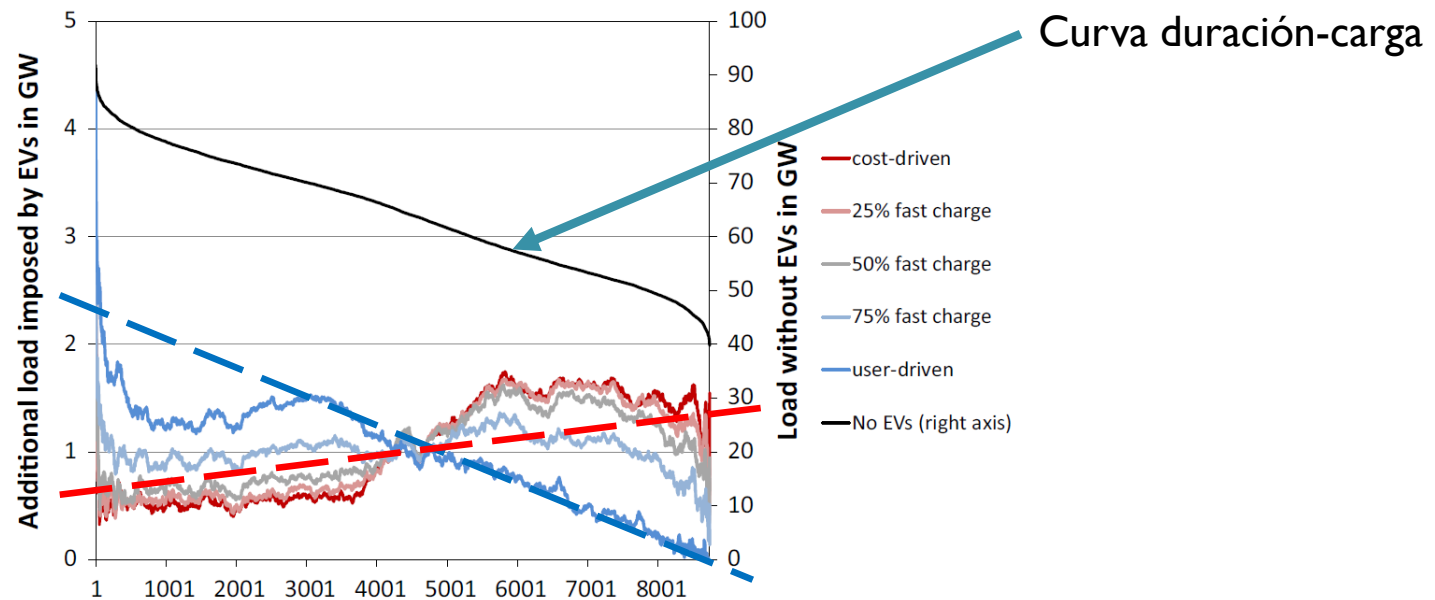
Time-of-Use Tariffs: Energía más barata durante las horas de baja demanda.

El incremento del pico de demanda pasa del 30% al 16%

**Peligro:**  
“Timer peaks”

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- **Artículo de Investigación:**



*Power system impacts of electric vehicles in Germany: Charging with coal or renewables?*  
W-P. Schill & C. Gerbaulet Revista: **Applied Energy** (Previsión 2030)

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA





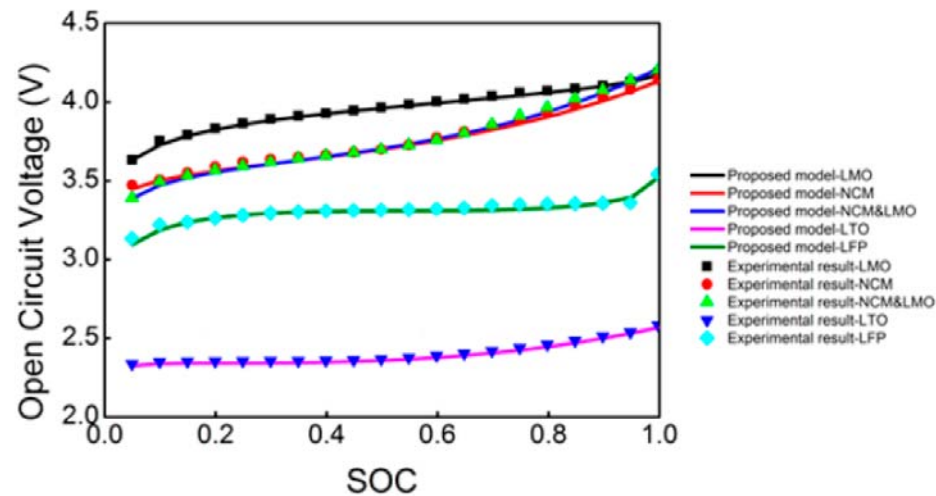
## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Elemento Clave: El Sistema de Almacenamiento del VE
  - Baterías de ión-litio
  - Baterías de plomo-ácido
  - Baterías de níquel-metal-hidruro
  - *Supercondensadores (?)*
  - *Tecnología híbrida supercondensador-batería. (?????)*

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Baterías de Ión-Litio

- *Lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)*  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$
- *Lithium Manganese Oxide (LMO)*,  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$
- *Lithium Iron Phosphate (LFP)*,  $\text{LiFePO}_4$



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Baterías de Ión-Litio

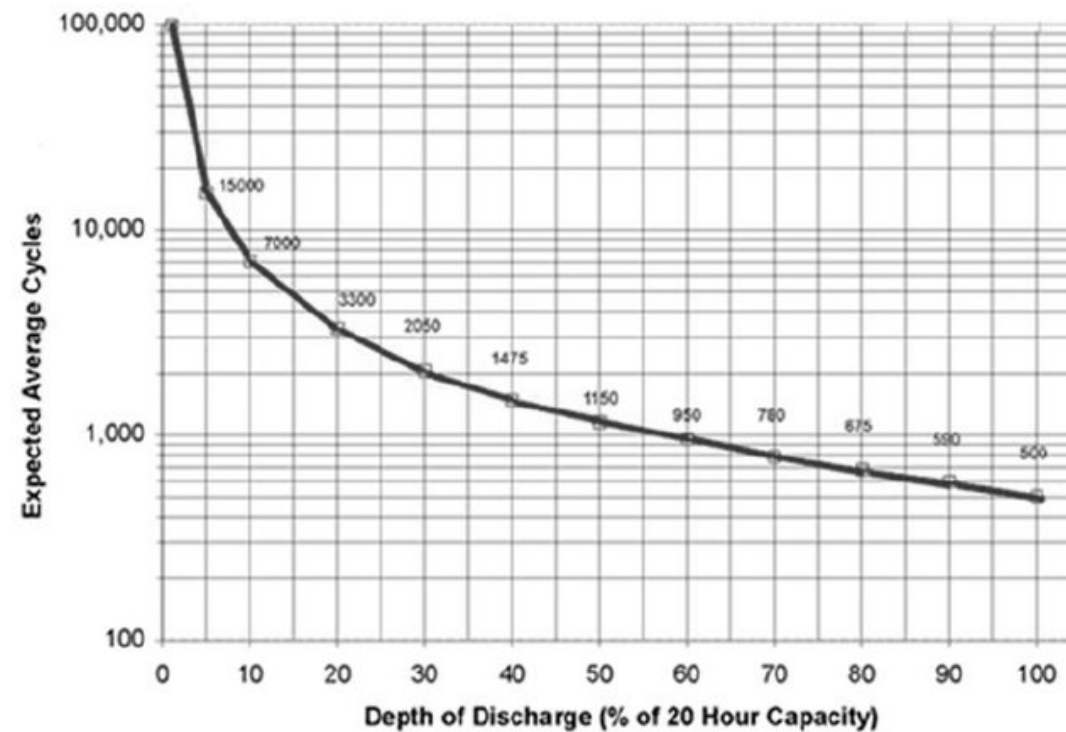
Table 3. Cycle life <sup>1</sup> as a function of Depth of Discharge [114].

Depth of Discharge	Discharge Cycles (NMC/LiPO4)
100%	300–600
80%	400–900
60%	600–900
40%	1000–3000
20%	2000–9000
10%	6000–15,000

<sup>1</sup> Useful lifetime defined as 80% energy performance threshold.

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

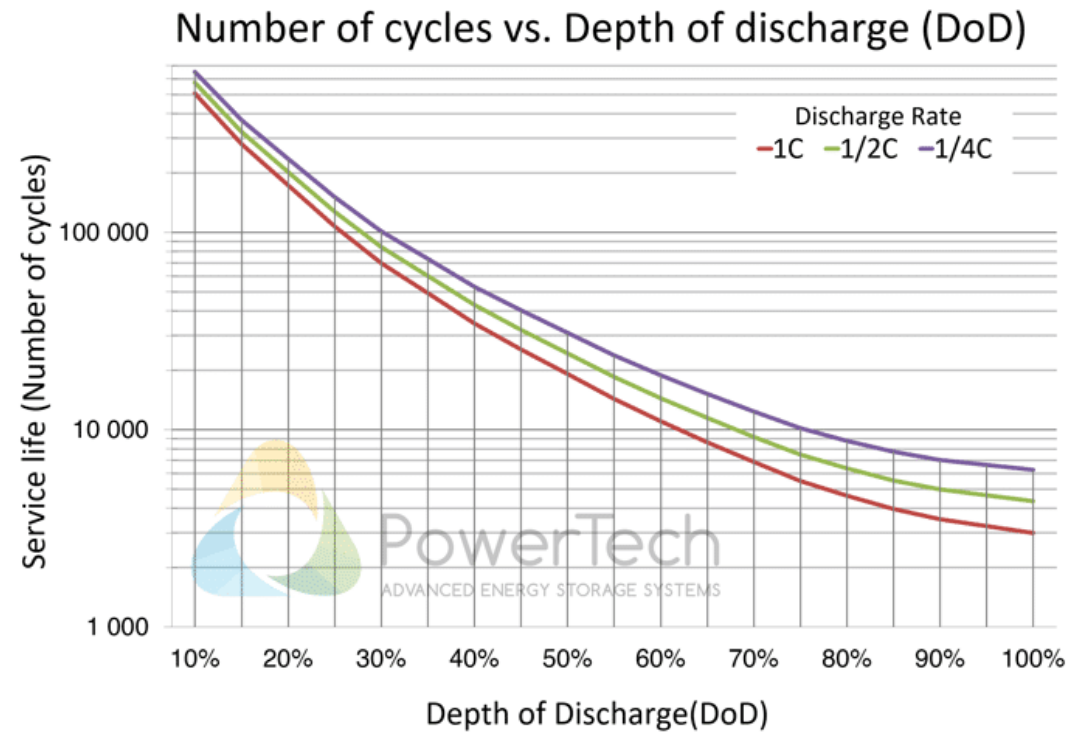
- Modelado del comportamiento de una batería



Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

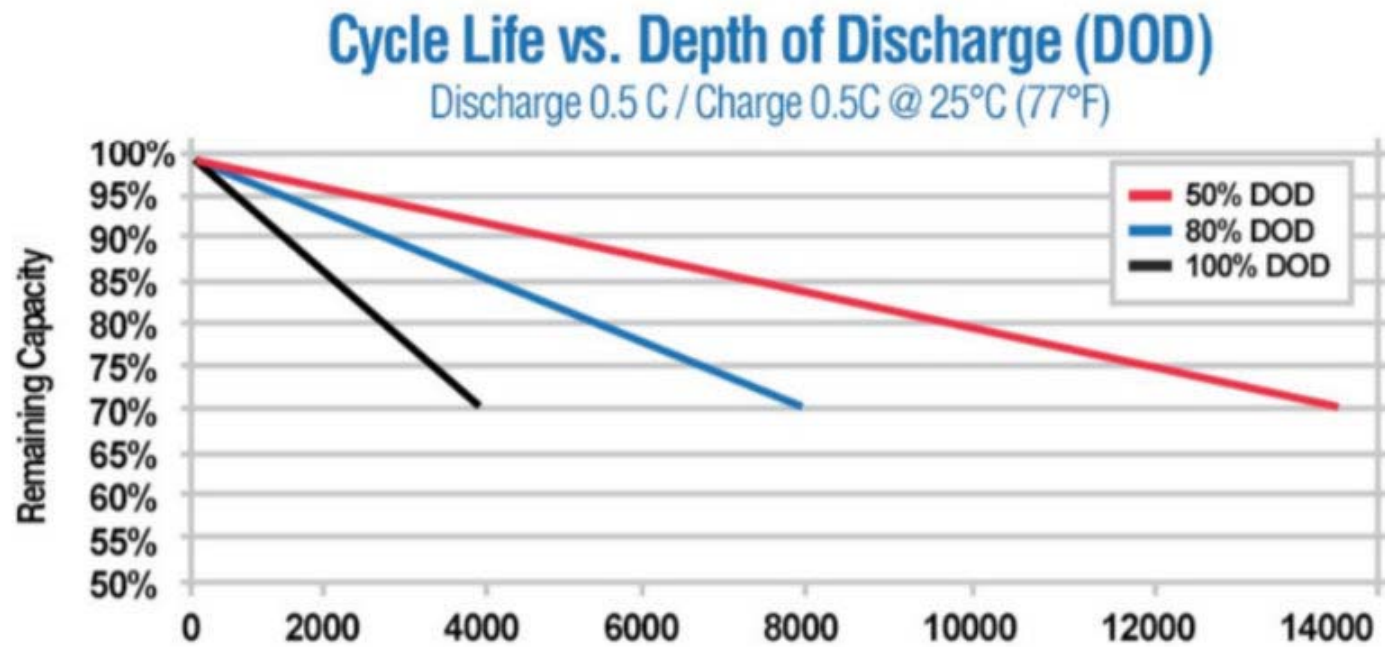
- Modelado del comportamiento de una batería



Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería





## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería

IET Renewable Power Generation

*Research Article*

**IET Journals**  
The Institution of  
Engineering and Technology

### **Optimal battery sizing considering degradation for renewable energy integration**

ISSN 1752-1416  
Received on 26th June 2018  
Revised 5th November 2018  
Accepted on 11th December 2018  
E-First on 17th January 2019  
doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5489  
www.ietdl.org

*Sebastián de la Torre<sup>1</sup> ✉, José M. González-González<sup>1</sup>, José A. Aguado<sup>1</sup>, Sebastián Martín<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Department of Electrical Engineering, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Málaga, Málaga, Spain*

✉ *E-mail: storre@uma.es*



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería
- Descomposición del ciclo de uso de la batería en ciclos individuales de carga-descarga.
- 2 Mecanismos de envejecimiento de la batería:
  - 1- *Calendar life*
  - 2- Dependiente del uso concreto
    - Profundidad de Descarga
    - C-rate

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería
  - Relación empírica entre
    - Número de Ciclos al fallo  $CtF$
    - Profundidad de Descarga (DoD)
    - Potencia relative de descarga (C-rate)

$$CtF_c = \frac{2480.5 \cdot DoD_c^{-2.1615}}{C-rate_c^{1.2}}$$

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería
  - Doble mecanismo de envejecimiento:

$$\text{FoL}_c^{\text{OP}} = \frac{1}{\text{CtF}_c} \qquad \text{FoL}_c^{\text{CAL}} = \frac{2 \cdot \Delta_c}{24 \cdot 365 \cdot \text{CalendarLife}}$$

$$\begin{aligned} \text{FoL}(\text{BS}) &= \sum_{c \in \Omega} \left( \max \left\{ \text{FoL}_c^{\text{OP}}, \text{FoL}_c^{\text{CAL}} \right\} \right) \\ &= \sum_{c \in \Omega} \left( \max \left\{ \frac{(D_c / (\Delta_c \cdot \text{BS}))^{k_3}}{k_1 \cdot (D_c / \text{BS})^{-k_2}}, \frac{2 \cdot \Delta_c}{24 \cdot 365 \cdot \text{CL}} \right\} \right) \end{aligned}$$

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

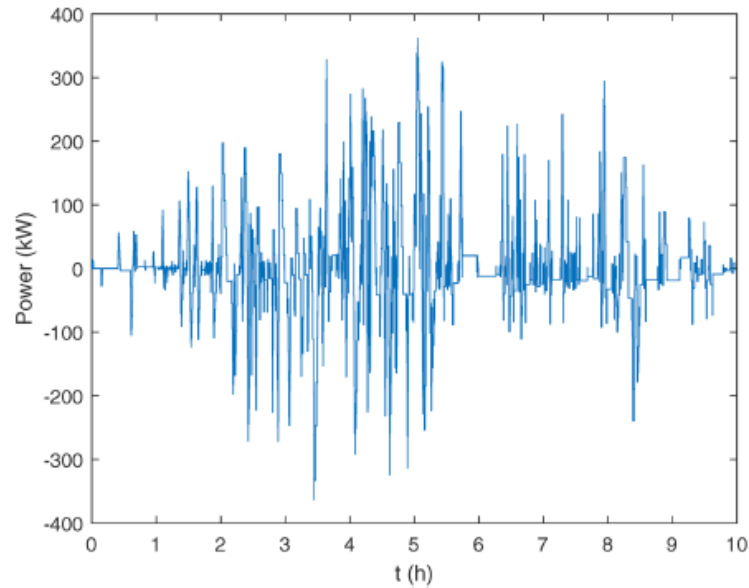
- Modelado del comportamiento de una batería
  - Problema de Optimización:

$$\min_{BS} \{BS \cdot UBC \cdot FoL(BS)\}$$

- Problema con una única variable.
- (Problema muy no-lineal)

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería
  - Caso de estudio ejemplo:
  - PERFIL DE ENTRADA

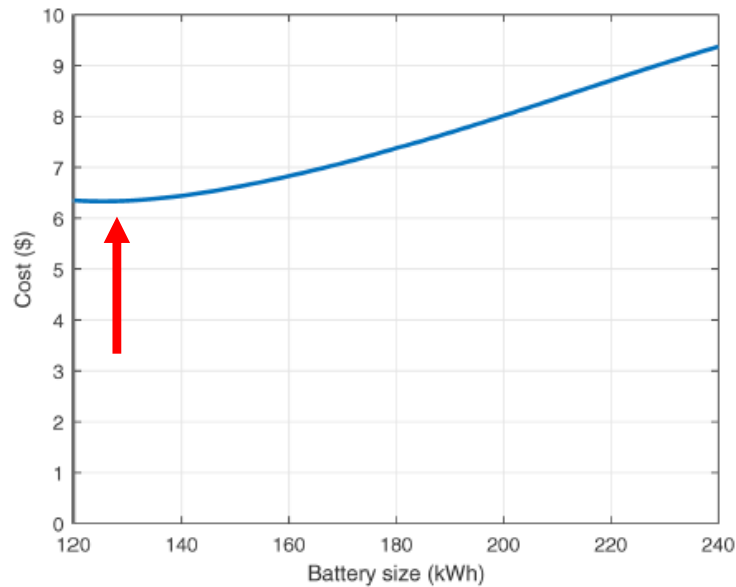


**Fig. 6** *Battery power profile for the first case study*



## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería
  - Caso de estudio ejemplo:
  - FUNCIÓN DE COSTES



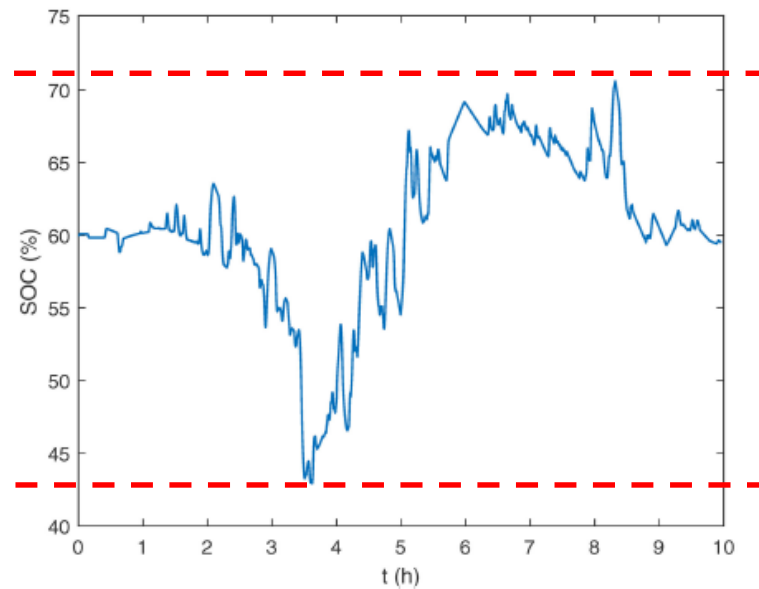
Solución  
Adoptada:  
125 kWh

**Fig. 8** Cost depending on BS in the first case study

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 2. Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

- Modelado del comportamiento de una batería
  - Caso de estudio ejemplo:
  - ESTADO DE CARGA ÓPTIMO



DoD:  
Intervalo  
43%-71%

C-rate máximo  
2.9

**Fig. 7** State of charge for the battery sized in the first case study

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



### 3. Planificación de la Transmisión

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



### 3. Planificación de la Transmisión

- El problema de la Planificación de la Transmisión
- Influencia muy importante del modelo de negocio de las líneas nuevas construidas
- Obtener un plan de ampliación de la capacidad de la red de transporte que resulte óptimo desde el punto de vista económico y que resulte factible desde el punto de vista técnico.
- Problema a largo plazo.
  - Modelado de año en año o en un año objetivo.
- Selección de líneas candidatas a considerar



### 3. Planificación de la Transmisión

- El problema de la Planificación de la Transmisión
- Problema matemáticamente complejo.
  - Problema intrínsecamente entero/mixto. Variables binarias de decisión sobre construcción de nuevas líneas.
  - Restricciones técnicas
  - Costes a largo plazo. Amortizaciones. Tasas de descuento
- Problema computacionalmente costoso.

### 3. Planificación de la Transmisión

- El problema de la Planificación de la Transmisión
- Influencia de la existencia de Sistemas de Almacenamiento de Energía a gran escala.

Energy storage and transmission expansion planning: substitutes or complements?

C. Bustos<sup>1</sup>, E. Sauma<sup>1,\*</sup>, S. de la Torre<sup>2</sup>, J. Aguado<sup>2</sup>, J. Contreras<sup>3</sup>, D. Pozo<sup>4</sup>

- **IET Generation, Transmission & Distribution**

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA





## 4. Planificación de la Generación

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



## 4. Planificación de la Generación

- El problema de la Planificación de la Generación
- Obtener la programación óptima de la instalación de nuevas unidades de generación a lo largo del tiempo.
- Selección de opciones disponibles. Por motivos económicos o estratégicos



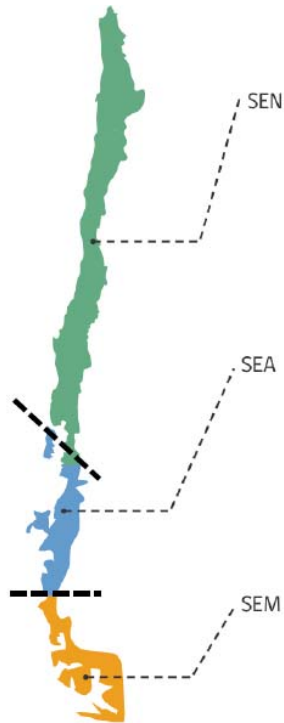
## 4. Planificación de la Generación

- El problema de la Planificación de la Generación
- También es un problema a (muy) largo plazo.
  - Proceso de construcción de una central puede ser muy largo
  - Amortización de la central a muy largo plazo
- Complejo matemáticamente.
  - Variables binarias de decisión.
- Complejo computacionalmente.



## 4. Planificación de la Generación

- Planificación **conjunta** de Transporte y Generación
- Aumenta más la complejidad.
- Beneficios claros de la optimización conjunta. Decisiones acopladas.



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

- 1. Introducción
- 2. Objetivo
- 3. Formulación Matemática
- 4. Método de Días Tipo
- 5. Casos Estudiados
- 6. Resultados Obtenidos
- 7. Análisis de Sensibilidad



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.1 Introducción

- 5.1. Introducción

Estudio desarrollado en colaboración entre



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.2 Objetivo

- 5.2. Objetivo

*Analizar el impacto de la presencia de vehículos eléctricos en la expansión de la generación y la transmisión del sistema eléctrico chileno*

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.2 Objetivo

- 5.2. Objetivo
  - Varios tipos de vehículos eléctricos considerados:
    - Taxi
    - Autobuses
    - Vehículo Privado
  - Diversos escenarios de penetración de los vehículos eléctricos
    - Sin VEs
    - Baja Penetración de VEs
    - Alta Penetración de VEs
  - Posibles líneas nuevas candidatas

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.2 Objetivo

- 5.2. Objetivo
  - Múltiples opciones sobre nueva generación
    - Solar
    - Eólica
  - Condiciones temporales incluidas mediante el uso de días tipo. En otro caso, problema intratable.

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.3 Formulación

- 5.3. Formulación matemática
  - Función objetivo
  - Restricciones que se deben cumplir

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.3 Formulación

- 5.3. Formulación matemática

- Función objetivo:

Minimizar el coste total durante todo un año, modelado mediante sus días representativos. Este año objetivo es una previsión para 2030. Se incluyen los siguientes costes:

- **Coste de nuevas líneas**
- **Coste de nueva generación**
- Costes de operación
- Costes asociados al “carbon tax”
- Coste de la energía no suministrada



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.3 Formulación

- 5.3. Formulación matemática
  - Restricciones que se deben cumplir
- Balance de energía en cada nudo del sistema
- Modelado del sistema de transmisión de energía
- Modelado del sistema de generación de energía
- Reserva en el sistema de generación
- Carga inteligente de los vehículos

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.4 Método de los días Tipo

- 5.4. Método de los días Tipo
  - Resulta imposible llevar a cabo un análisis cuidadoso que pueda tener en cuenta cada uno de los días de un año y sus diferentes valores para todos los parámetros de interés.
  - Buscamos algún método que permita seleccionar qué días van a ser suficientes para poder modelar correctamente el comportamiento del sistema durante todo el año.
  - Es importante que los días elegidos sean representativos en cuanto a las características que más nos interesan para nuestro estudio:
    - Factores de planta. Especialmente los de las renovables, muy sometidos a estacionalidad. (2016)
    - Demanda horaria, que también es variable a lo largo del año. (2030)
    - Días laborables o días de fin de semana

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.4 Método de los días Tipo

- 5.4. Método de los días Tipo

- Esta tarea se lleva a cabo en 2 fases:

FASE 1: Emplear algún método para poder elegir el número correcto de días que serán necesarios. (**N**)

*k-means clustering*

*Aplicación de diversas métricas para evaluar el número seleccionado*

*(Calinski Harabaz y Silhouette)*

FASE 2: Elegir los (**N**) días más representativos de todos los posibles.

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.4 Método de los días Tipo

- 5.4. Método de los días Tipo
  - Resultados obtenidos:

**Table 2**

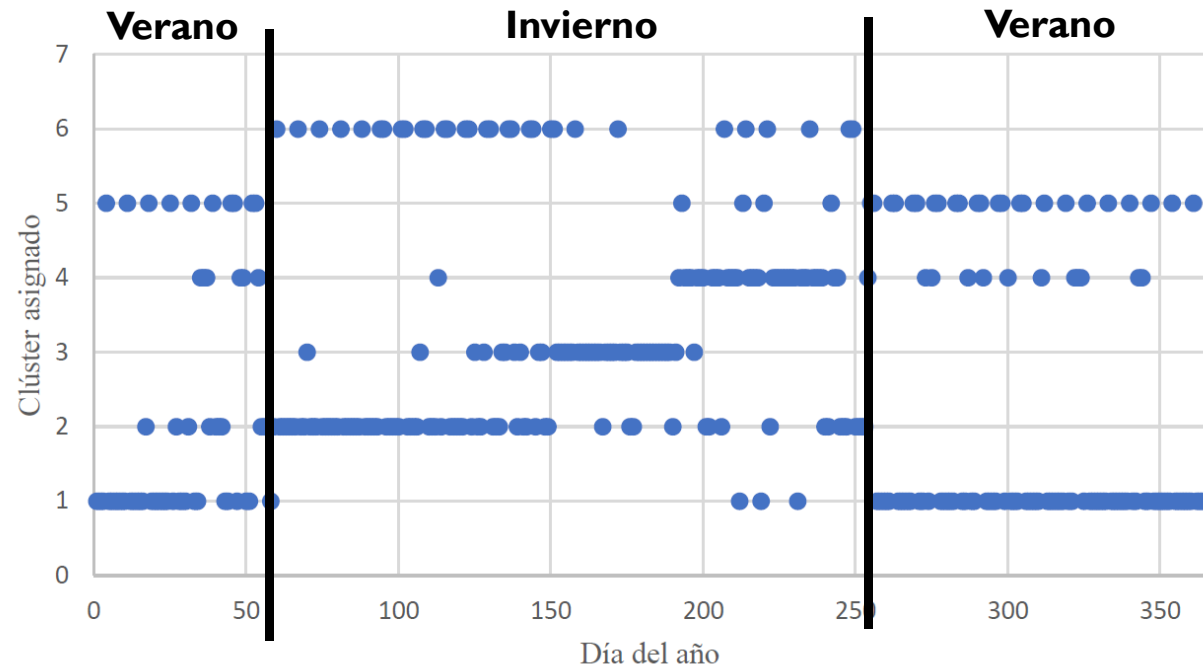
Description of clusters of representative days

Cluster	Centroid	Number of days	Assigned weight	Assigned name
1	Nov. 11	111	0.304	Summer workweek
2	May 5	86	0.236	Autumn
3	Jun. 11	45	0.123	Winter workweek
4	Aug. 12	54	0.148	Spring
5	Oct. 9	38	0.104	Summer weekend
6	May 1	31	0.085	Winter weekend

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.4 Método de los días Tipo

- 5.4. Método de los días Tipo
  - Asignación de días a cada clúster:



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.4 Método de los días Tipo

- 5.4. Método de los días Tipo
  - Factores de capacidad de algunas tecnologías

**Tabla 3-10:** Factores de capacidad por día representativo para tecnologías renovables

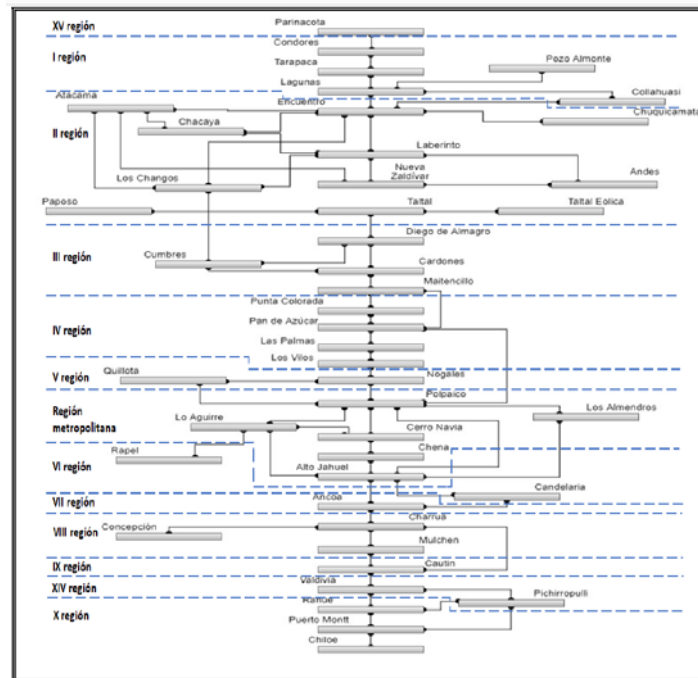
<b>Día representativo</b>	<b>Solar</b>	<b>Eólica</b>	<b>Hidráulica de pasada</b>
Verano laboral	0,37	0,31	0,38
Otoño	0,27	0,24	0,35
Invierno laboral	0,22	0,4	0,31
Primavera	0,36	0,39	0,44
Verano no laboral	0,36	0,3	0,42
Invierno no laboral	0,25	0,28	0,3



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados
  - Modelo del Sistema Eléctrico chileno

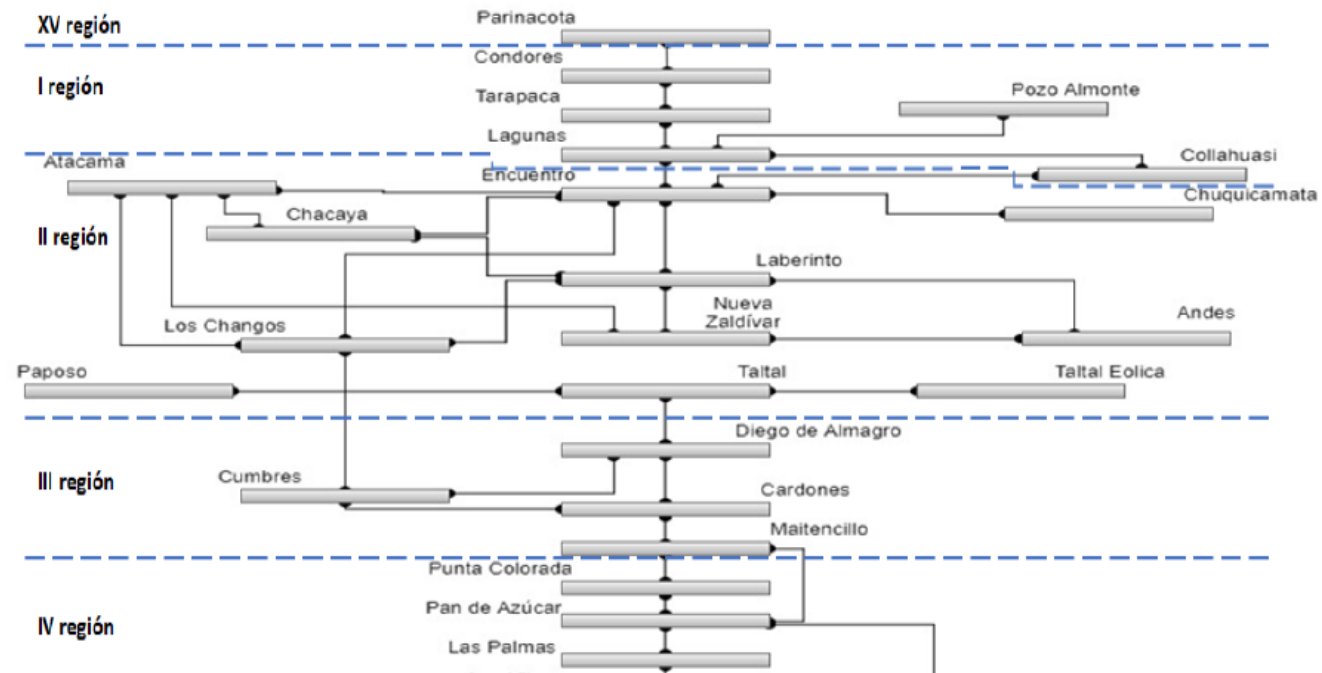


Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados
  - Modelo del Sistema Eléctrico chileno

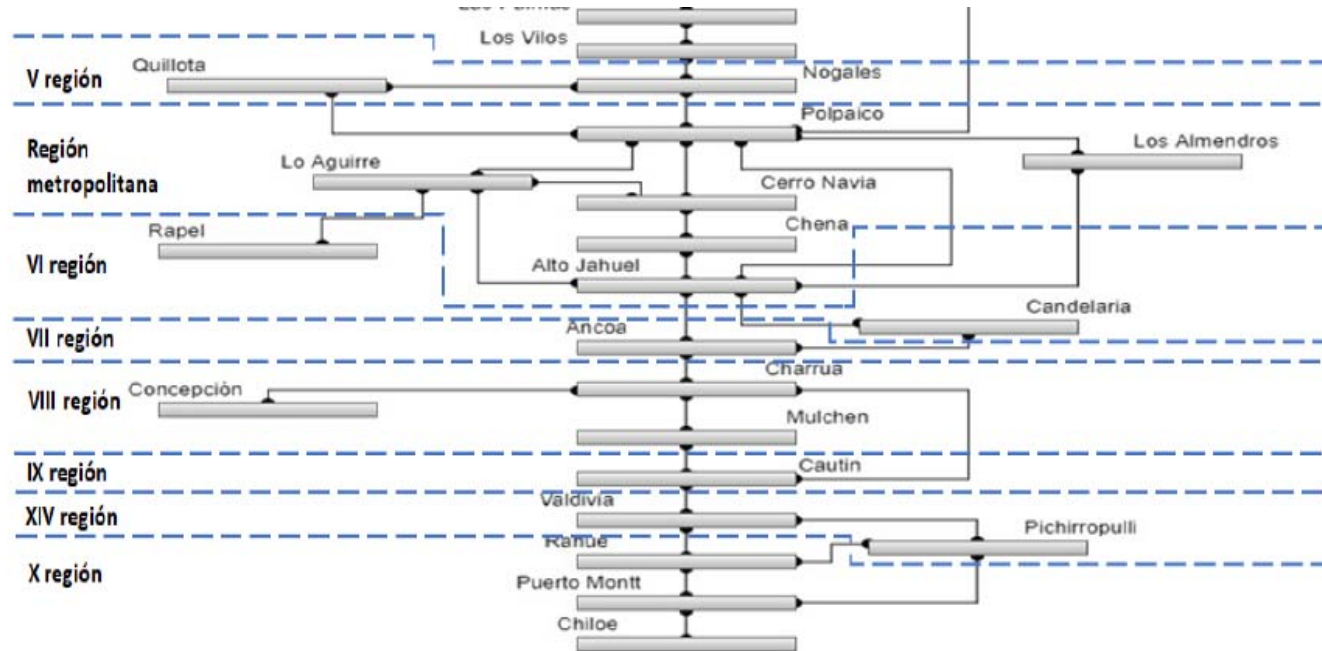


Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados
  - Modelo del Sistema Eléctrico chileno



Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados

- Se consideran 5 casos de estudio principales para llevar a cabo análisis y comparación

Caso	Nivel de Penetración de los Vehículos Eléctricos	Disponibilidad de Carga Inteligente
Caso 1 (BASE)	No hay Vehículos Eléctricos	
Caso 2 (BP)	Baja Penetración	NO
Caso 3 (BPC)	Baja Penetración	SÍ
Caso 4 (AP)	Alta Penetración	NO
Caso 5 (APC)	Alta Penetración	SÍ

#### Carga Inteligente:

50% de los VE modifican su patrón de comportamiento para realizar su consumo de energía en horario más favorable para el sistema

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados
  - Nivel de Penetración de los Vehículos Eléctricos:
  - Basados en un modelo de Norton-Bass y en estudios de mercado especializados

	Nivel Bajo	Nivel Alto
Vehículos Eléctricos Privados	150.000	500.000
Taxis Eléctricos	28.000	53.000
Buses Eléctricos	360	3.550

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados

- Taxis eléctricos:

- Modelo e6 de BYD
    - Batería de 80 kWh
    - $\text{LiFePO}_4$  (Litio ferrofosfato)
    - Rango de 400 Km
    - 1 Km/KW (aprox)

- Promedio del taxi chileno:

- 250 Km al día
    - 50 kWh diarios





## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados

- Buses eléctricos:

- Modelo k9 de BYD
    - Batería de 324 kWh
    - LiFePO<sub>4</sub> (Litio ferrofosfato)
    - Rango de 250 Km
    - 5 Km/KW (aprox)



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados
  - Carga Inteligente:
  - Sólo se puede desplazar el consumo de los Vehículos Eléctricos Privados y los Taxis. (No el de los buses, debido a su falta de flexibilidad)
  - Un VE puede desplazar su consumo de energía dentro del mismo día y manteniéndolo en el mismo nudo eléctrico
  - Sólo participan en sistemas de carga inteligente un cierto % de los VEs.
    - 50% en este estudio

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.5 Casos Estudiados

- 5.5. Casos Estudiados

- Es importante establecer el momento de la llegada de los vehículos eléctricos a su destino, puesto que esto fija el momento en que pueden comenzar a cargar energía de la red.

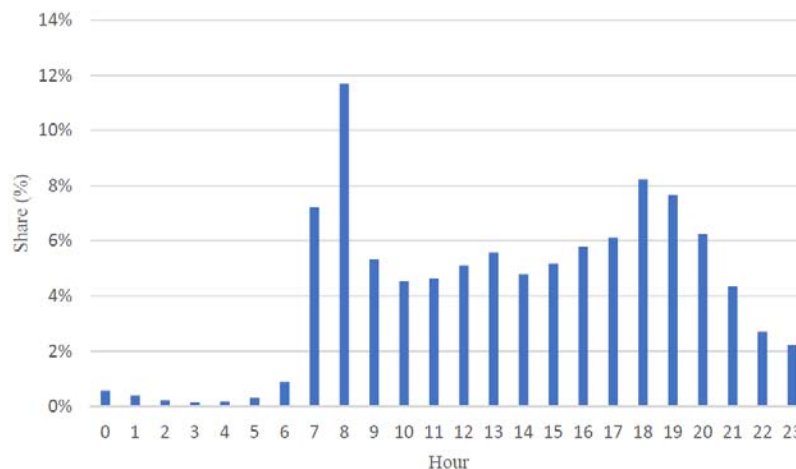


Fig. 2. Pattern of arrival time for a private vehicle trip

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos

**Table 3**

Total costs for each scenario (million US\$)

	No EVs	LP	LPS	HP	HPS
Generation investments	627	645	649	676	683
Transmission investments	12	12	12	12	12
Operational costs	1,637	1,655	1,647	1,687	1,673
Carbon taxes	118	119	118	122	120
Non – supplied energy	0	0	0	0	0
Total	2,394	2,430	2,426	2,496	2,487

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos

**Table 4**

Energy generation per technology in each scenario (GWh)

Technology	No EVs	LP	LPS	HP	HPS
Coal	17,927.0	18,027.3	17,917.7	18,219.4	17,963.7
Natural gas	20,282.9	20,743.7	20,756.4	21,538.0	21,301.9
Oil	0.6	1.1	0.6	1.7	0.6
Total thermal	38,210.5	38,772.0	38,674.7	39,759.2	39,266.3
(%)	(36.5%)	(36.4%)	(36.3%)	(36.8%)	(36.3%)
Hydro	29,517.9	29,665.5	29,354.5	30,025.6	29,990.4
Hydro – RoR	12,293.8	12,293.8	12,293.8	12,293.8	12,293.8
Wind	3,629.8	3,629.8	3,629.8	3,629.8	3,629.8
Solar	20,579.3	20,767.0	21,163.1	21,011.9	21,517.4
Biomass	968.2	966.7	977.4	962.9	983.5
Geothermal	395.3	394.4	395.9	393.2	395.3
Total renewable	66,417.0	67,717.2	67,814.5	68,317.2	68,810.1
(%)	(63.5%)	(63.6%)	(63.7%)	(63.2%)	(63.7%)
Total	104,627.5	106,489.2	106,489.2	108,076.4	108,076.4

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos
  - Capacidad Adicional para el caso sin VEs

**Tabla 4-1:** Capacidad adicional instalada en MW por región y tecnología en Caso sin VE

Región	Biomasa	Carbón	Ciclo Combinado	Diésel	Solar FV	Eólica	Hidro	Hidro de pasada	Geotermia
XV	0	0	0	0	20	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	0	0	2.419	200	0	0	0
III	0	0	0	0	1.316	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	209	0	0	0	0
V	0	0	0	0	300	0	0	0	0
RM	0	0	325	0	150	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	5	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	268	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IX	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XIV	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	0	0	126	0	0
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>325</b>	<b>0</b>	<b>4.420</b>	<b>200</b>	<b>394</b>	<b>0</b>	<b>0</b>



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos
  - Capacidad Adicional para el caso sin VEs

**Tabla 4-1:** Capacidad adicional instalada en MW por región y tecnología en Caso sin VE

Región	Biomasa	Carbón	Ciclo Combinado	Diésel	Solar FV	Eólica	Hidro	Hidro de pasada	Geotermia
XV			0		20	0	0		
I			0		0	0	0		
II			0		2.419	200	0		
III			0		1.316	0	0		
IV			0		209	0	0		
V			0		300	0	0		
RM			325		150	0	0		
VI			0		5	0	0		
VII			0		0	0	268		
VIII			0		0	0	0		
IX			0		0	0	0		
XIV			0		0	0	0		
X			0		0	0	126		
<b>Total</b>			<b>325</b>		<b>4.420</b>	<b>200</b>	<b>394</b>		

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos
  - Capacidad Adicional para el caso BP

**Tabla 4-4:** Capacidad adicional instalada en MW por región y tecnología en Caso BP

Región	Biomasa	Carbón	Ciclo Combinado	Diésel	Solar FV	Eólica	Hidro	Hidro de pasada	Geoterma
XV	0	0	0	0	28	0	0	0	0
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	0	0	2.424	200	0	0	0
III	0	0	0	0	1.359	0	0	0	0
IV	0	0	0	0	213	0	0	0	0
V	0	0	0	0	300	0	0	0	0
RM	0	0	384	0	150	0	0	0	0
VI	0	0	0	0	8	0	0	0	0
VII	0	0	0	0	0	0	277	0	0
VIII	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IX	0	0	0	0	0	0	0	0	0
XIV	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X	0	0	0	0	0	0	136	0	0
Total	0	0	384	0	4.484	200	413	0	0

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos
  - Capacidad Adicional para el caso BP

**Tabla 4-4:** Capacidad adicional instalada en MW por región y tecnología en Caso BP

Región	Biomasa	Carbón	Ciclo Combinado	Diésel	Solar FV	Eólica	Hidro	Hidro de pasada	Geoterma
XV			0		28	0	0		
I			0		0	0	0		
II			0		2.424	200	0		
III			0		1.359	0	0		
IV			0		213	0	0		
V			0		300	0	0		
RM			384		150	0	0		
VI			0		8	0	0		
VII			0		0	0	277		
VIII			0		0	0	0		
IX			0		0	0	0		
XIV			0		0	0	0		
X			0		0	0	136		
<b>Total</b>			<b>384</b>		<b>4.484</b>	<b>200</b>	<b>413</b>		

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos
  - Capacidad Adicional instalada en cada caso

Caso	Biomasa	Carbón	Ciclo Comb	Diesel	Solar FV	Eólica	Hidro	Hidro de Pasada	Geotérmica
Caso 1 (BASE)	0	0	325	0	4420	200	394	0	0
Caso 2 (LP)	0	0	384	0	4484	200	413	0	0
Caso 3 (LPS)	0	0	412	0	4609	200	357	0	0
Caso 4 (HP)	0	0	477	0	4568	200	464	0	0
Caso 5 (HPS)	0	0	440	0	4721	200	439	0	0

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos
  - Capacidad Adicional instalada en cada caso

Caso	Ciclo Comb	Solar FV	Eólica	Hidro
Caso 1 (BASE)	325	4420	200	394
Caso 2 (AP)	384	4484	200	413
Caso 3 (APC)	412	4609	200	357
Caso 4 (BP)	477	4568	200	464
Caso 5 (BPC)	440	4721	200	439

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos

- Capacidad Adicional instalada en cada caso
- Observaciones:
  - Aumentar los vehículos eléctricos, en general, hace que aumente la necesidad de generación de energía. BP: 140 MW.AP: 370 MW.
  - Introducir esquemas de movilidad de la demanda permite aprovechar mejor al energía solar disponible, y ahorra inversiones en centrales hidráulicas.



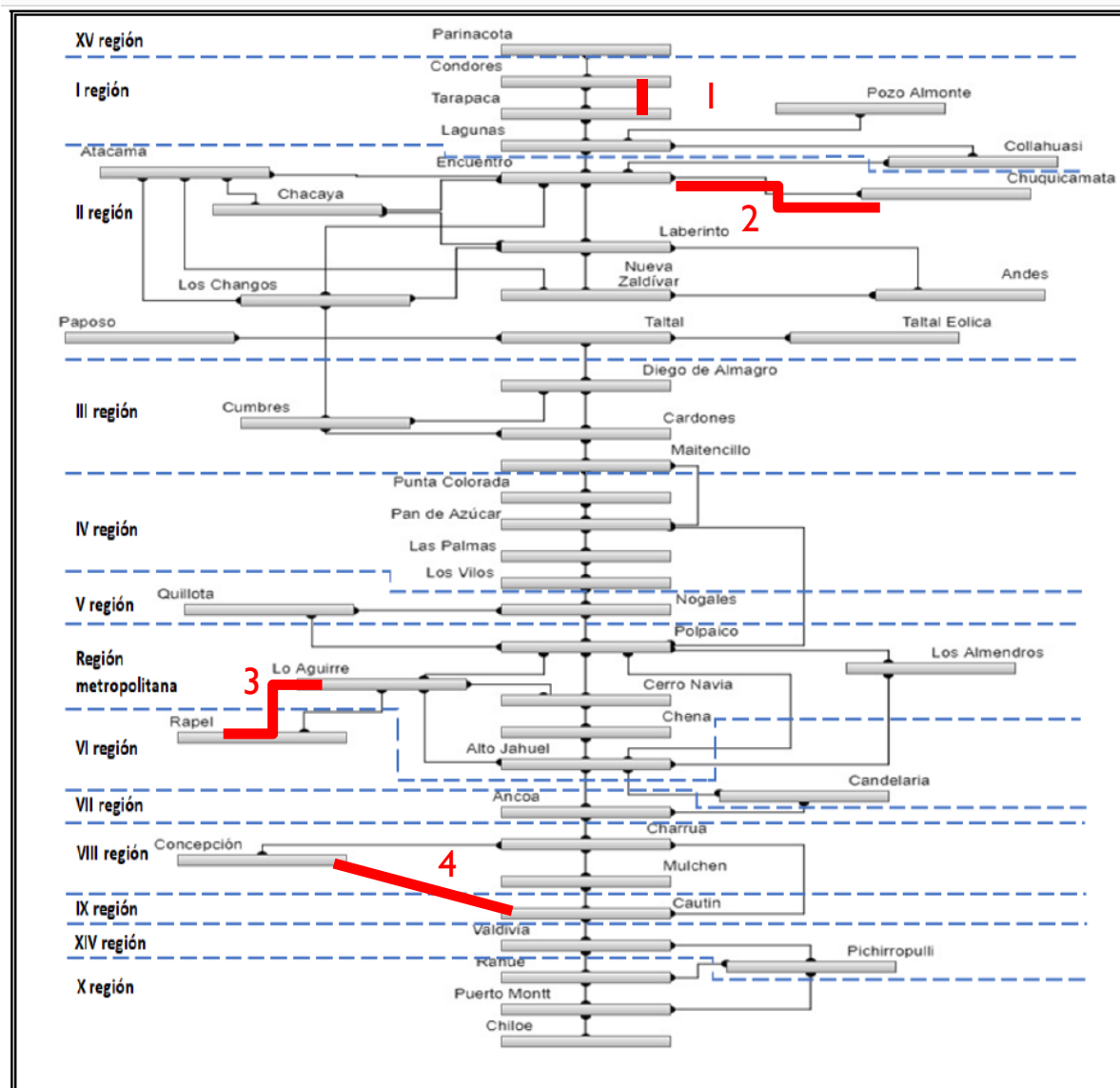
## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.6 Resultados

- 5.6. Resultados Obtenidos

- Líneas Construidas en cada caso:
- En todos los casos se construyen las mismas líneas nuevas:

<b>Línea</b>	<b>Barra Inicio</b>	<b>Barra Fin</b>	<b>Región</b>
1	Tarapacá	Cóndores	I
3	Encuentro	Chuquicamata	II
8	Rapel	Lo Aguirre	VI – RM
9	Concepción	Cautín	VIII – IX





## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- 5.7. Análisis de Sensibilidad
  - Modificación del importe del impuesto al carbono
  - Flota completamente eléctrica
  - Limitaciones a la potencia solar instalada
  - Implementación de V2G



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- **Modificación del importe del impuesto al carbono**
  - En los casos anteriores: 5\$/ton CO<sub>2</sub>
  - Aumentar hasta 50 \$/ ton CO<sub>2</sub>
  - Disminuir a 0\$/ton CO<sub>2</sub>

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- **Modificación del importe del impuesto al carbono**
  - Efecto sobre la capacidad instalada nueva (casos de Alta Penetración)

Caso	Sin VE		AP		APC	
Impuesto al Carbono	\$5	\$50	\$5	\$50	\$5	\$50
Biomasa	0	30	0	30	0	30
Carbón	0	0	0	0	0	0
Ciclo Combinado	325	763	477	795	440	739
Diésel	0	0	0	0	0	0
Solar Fotovoltaica	4.420	5.235	4.568	5.346	4.721	5.534
Eólica	200	694	200	733	200	622
Hidro	394	653	464	858	439	886
Hidro de pasada	0	300	0	300	0	300
Geotermia	0	0	0	0	0	0

Efecto 1:  
Aumenta toda la  
Generación  
Renovable.

Efecto 2:  
Aumenta la  
generación que  
contamina poco.

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- **Modificación del importe del impuesto al carbono**
  - Efecto sobre las líneas de transporte instaladas
  - En el caso de 0\$/ton CO<sub>2</sub> no hay variaciones, por tanto el nivel empleado de 5\$ no tiene un efecto muy relevante
  - En el caso de 50\$/ton CO<sub>2</sub> sí que hay variaciones.

Línea	Caso sin VE	AP	APC	Barra Inicio	Barra Fin	Región
1	x	x	x	Tarapacá	Cóndores	I
3	x	x	x	Encuentro	Chuquicamata	II
4	-	x	-	Taltal	Taltal Eólica	II
6	-	x	x	Cerro Navia	Los Almendros	RM
8	x	x	x	Rapel	Lo Aguirre	VI – RM
9	x	x	x	Concepción	Cautín	VIII – IX

Nuevas

La carga inteligente ahorra una línea!



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Modificación del importe del impuesto al carbono
  - Efecto sobre las emisiones

**Tabla 4-23:** Millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por caso y por impuesto

Impuesto al carbono [USD/ton CO <sub>2</sub> ]	AP	APC
\$0	26,5	26,5
\$50	14,7	14,5



## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Flota completamente eléctrica
  - Caso poco realista...
  - 5.000.000 de vehículos eléctricos privados
  - 100.000 taxis eléctricos
  - 8.000 buses eléctricos
  - Estudio en el año 2030
  - Casos con / sin carga inteligente

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Flota completamente eléctrica
  - Efecto sobre la construcción de nuevas líneas

Línea	P. Eléctrico	P. Eléctrico Inteligente	Barra Inicio	Barra Fin	Región
1	x	x	Tarapacá	Cóndores	I
3	x	x	Encuentro	Chuquicamata	II
4	x	-	Taltal	Taltal Eólica	II
8	x	x	Rapel	Lo Aguirre	VI – RM
9	x	x	Concepción	Cautín	VIII – IX

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

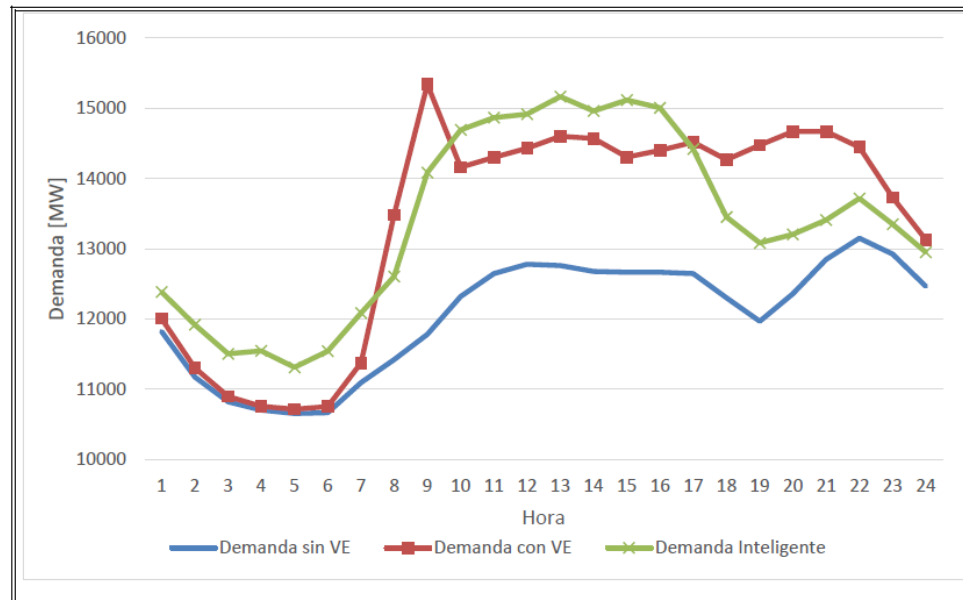
- Flota completamente eléctrica
  - Efecto sobre la construcción de nueva generación

Tecnología	Sin VE [MW]	P. Eléctrico [MW]	P. Eléctrico Inteligente [MW]
Biomasa	0	0	0
Carbón	0	0	0
Ciclo Combinado	325	500	500
Diésel	0	0	0
Solar Fotovoltaica	4.420	5.401	5.822
Eólica	200	200	200
Hidro	394	759	740
Hidro de pasada	0	0	0
Geotermia	0	0	0

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Flota completamente eléctrica
  - Curvas de demanda



Aumento muy significativo de la demanda, puesto que hay 100% de VEs.

Figura 4-24: Curvas de demanda en Caso Parque Eléctrico con carga inteligente

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Flota completamente eléctrica
  - Influencia sobre las emisiones

	<b>P. Eléctrico</b>	<b>P. Eléctrico Inteligente</b>
<b>Millones de ton de CO<sub>2</sub></b>	27,2	26,1
<b>Factor de emisión anual [ton CO<sub>2</sub>/MWh]</b>	0,231	0,222

Notable disminución de las emisiones cuando el parque eléctrico es “inteligente”





## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Limitaciones a la potencia solar instalada
  - Máximo 2 GW solares instalables

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Limitaciones a la potencia solar instalada
  - Efecto en la generación instalada

Tecnología	Sin VE limitada [MW]	APC [MW]	APC limitada [MW]
Biomasa	0	0	0
Carbón	0	0	0
Ciclo Combinado (Gas Natural)	345	440	500
Diésel	4	0	0
Solar Fotovoltaica	2.000	4.721	2.000
Eólica	200	200	200
Hidro	618	439	629
Hidro de pasada	0	0	0
Geotermia	0	0	0

Puede afirmarse que en el caso de potencia solar limitada por algún factor, la presencia de una alta penetración de EVs combinada con la carga inteligente, puede llevar a evitar la construcción de centrales de diesel

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Limitaciones a la potencia solar instalada
  - Efecto en la generación instalada
  - Además, el coste de operación del caso APC aumenta de 2.487 M\$ a 2.551 M\$ si introducimos la limitación en la energía solar instalable. (+3%)

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Implementación de V2G

- Se hace uso de la capacidad completa de la batería del vehículo.
- Eficiencia de cada ciclo del 90%, por tanto, eficiencia global del 81%.

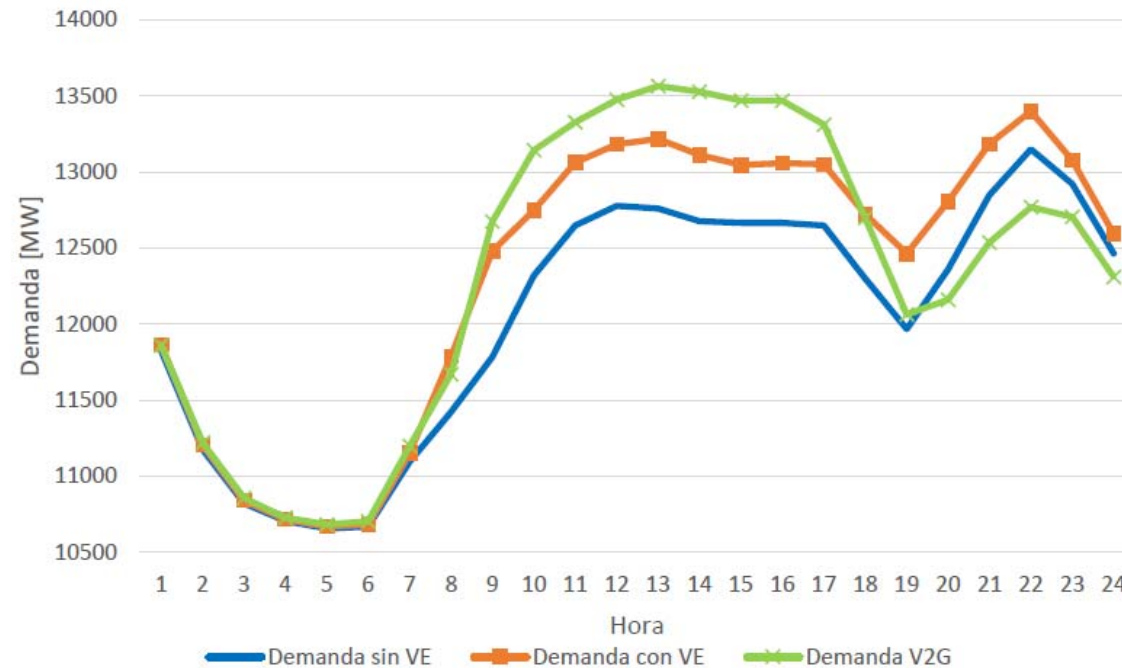
- Conclusiones:

- Mayor flexibilidad de la demanda, y por tanto, mayor cantidad de energía solar que se puede instalar.
- Se reduce la capacidad instalada de centrales de ciclo combinado, puesto que su capacidad de regulación pasa a ser menos importante.

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Implementación de V2G
  - Influencia en la demanda



Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA

## 5. Caso de Estudio (Sistema Chileno)

### 5.7 Análisis de Sensibilidad

- Casos Adicionales de Análisis de Sensibilidad:

- Variación de la proporción de vehículos que participan en esquemas de carga inteligente.

*25%-50%-75%*

- Modificación de los patrones de carga de vehículos eléctricos

*Tendencia a cargar los VE en casa o en el puesto de trabajo*

- Reducción de la capacidad de las nuevas líneas de transmisión

*50% - 0%*





## 6. Conclusiones y Lecciones Aprendidas

Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad. S. de la Torre. UMA



## 6. Conclusiones y Lecciones Aprendidas

- Impacto de la alta penetración de VEs
  - Más demanda de energía eléctrica
  - Necesidad de nuevas líneas de transporte
  - Impacto sobre la nueva generación de energía
- Posibilita y facilita la implantación de nuevas energías renovables
- Impacto moderado en la capacidad para satisfacer la demanda
- Importancia del uso de *Demand Management*
- Posibilidades del V2G



# Planificación de la Transmisión y la Generación Eléctrica Considerando Movilidad Eléctrica y Bidireccionalidad

Muchas Gracias por su atención

Sebastián de la Torre Fazio (storre@uma.es)  
Universidad de Málaga

IX Jornadas de Economía de la Energía  
Santiago de Chile, 12 de noviembre de 2019