



Systep

Electrificación del Transportes y sus Efectos en el Sistema Distribución



Alejandro Navarro, PhD.
anavarro@centroenergia.cl, anavarro@systep.cl

Director Asociado
Systep – Ingeniería y Diseños
Investigador Senior
Centro de Energía de la Universidad de Chile
Profesor Sistemas de Distribución y Redes inteligentes
Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile



Tabla de Contenidos



- Motivación
- Electrificación del transporte privado
- Electrificación del transporte público
- Consideraciones finales

Sobre el Expositor



- **Doctor en Ingeniería Eléctrica**, Universidad de Manchester, Inglaterra.
- **Magíster en Sistemas de Potencia**, Universidad de Manchester, Inglaterra.
- **Magíster en Ciencias de la Ingeniería**, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- **Diplomado en Políticas de Competencia**, Facultad de Economía y Negocios de la Universidad de Chile.
Curso de especialización en Regulación, Escuela de Regulación de Florencia, Italia.
- **Ingeniero Civil Industrial con Diploma en Ingeniería Eléctrica**, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- **Profesor Modelos Avanzados de Sistemas de Distribución y Redes Inteligentes Ingeniería Eléctrica**, Universidad de Chile.
- Me dedico a la **consultoría aplicada y a la investigación** en mercados eléctricos

Sobre mis lugares de trabajo



Consultoría líder en toda la cadena de valor de los mercados energéticos, realizando estudios de financiamiento y compra y venta de activos de energía, realizando estudios eléctricos estáticos y dinámicos para la conexión de nuevas centrales o equipos a la red, y asesoramiento regulatorio integral, apoyo en la creación de normas y reglamentos.

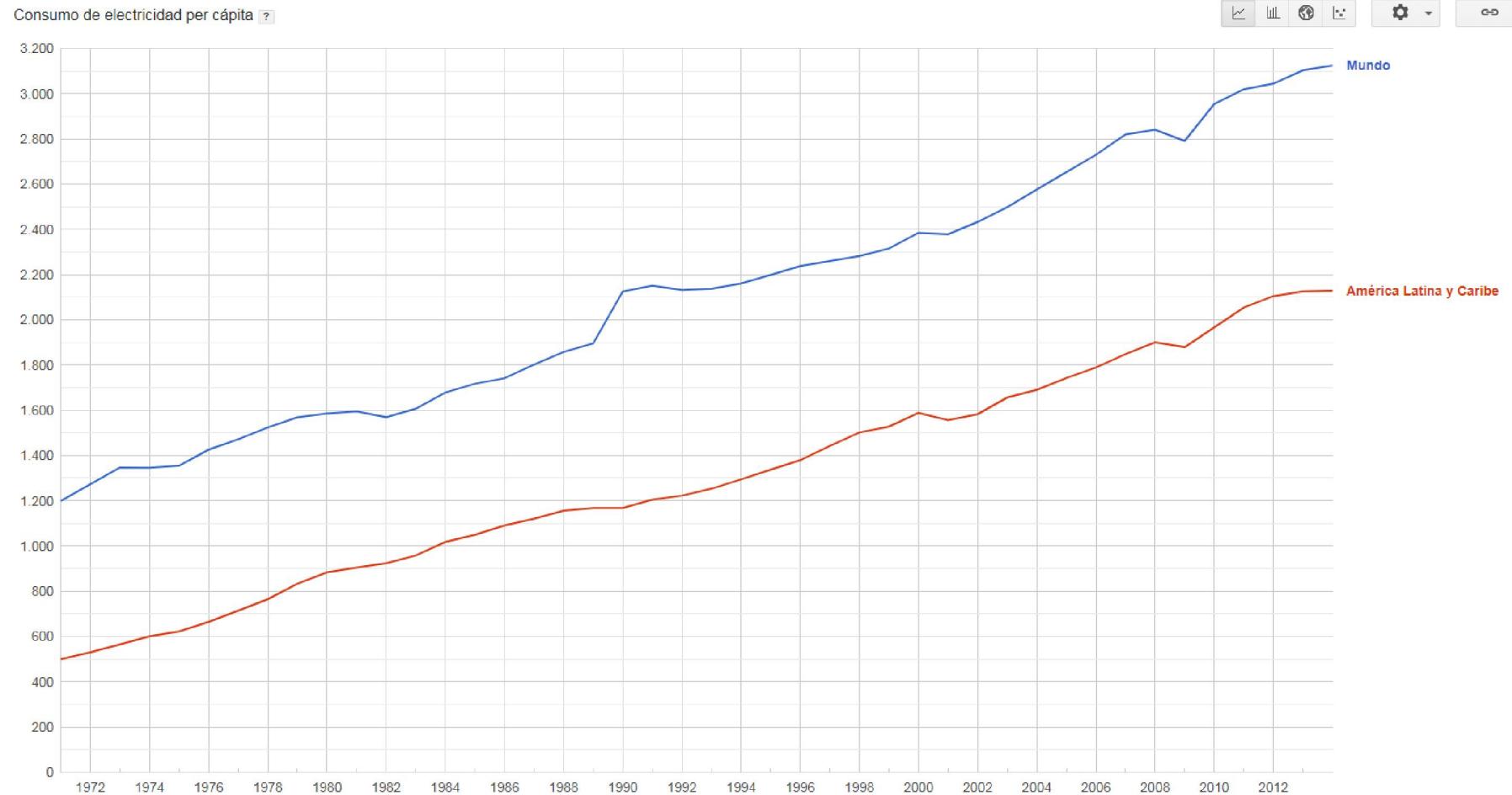
www.systep.cl



Su misión es crear y liderar soluciones I+D en energía de carácter interdisciplinario, colaborativo, innovador e inclusivo que aseguren un desarrollo sostenible. Ha encauzado la investigación, innovación y desarrollo en asociaciones con la industria y el sector público, además de colaboraciones académicas estratégicas nacionales e internacionales.

www.centroenergia.cl

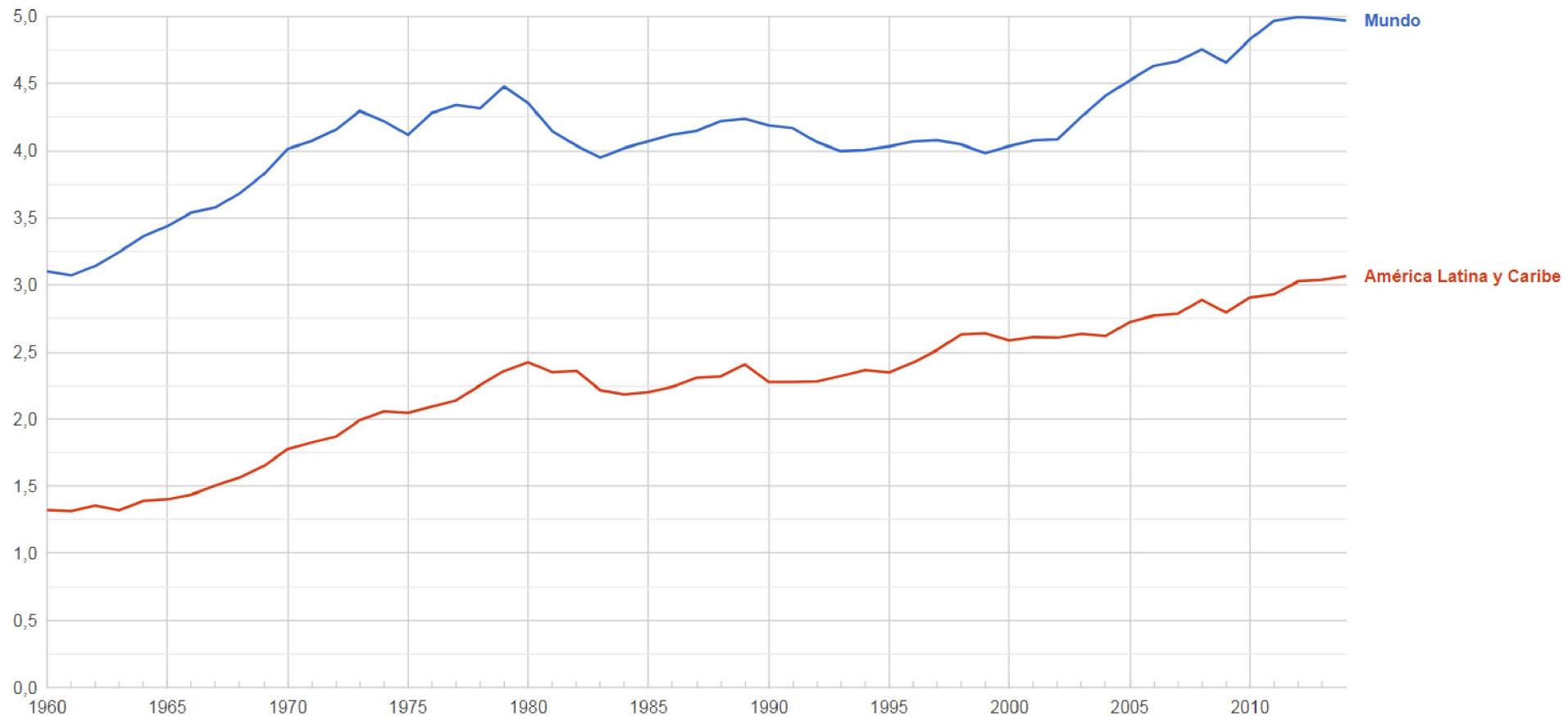
.... Consumo Energético en Crecimiento



.... Emisiones en Crecimiento

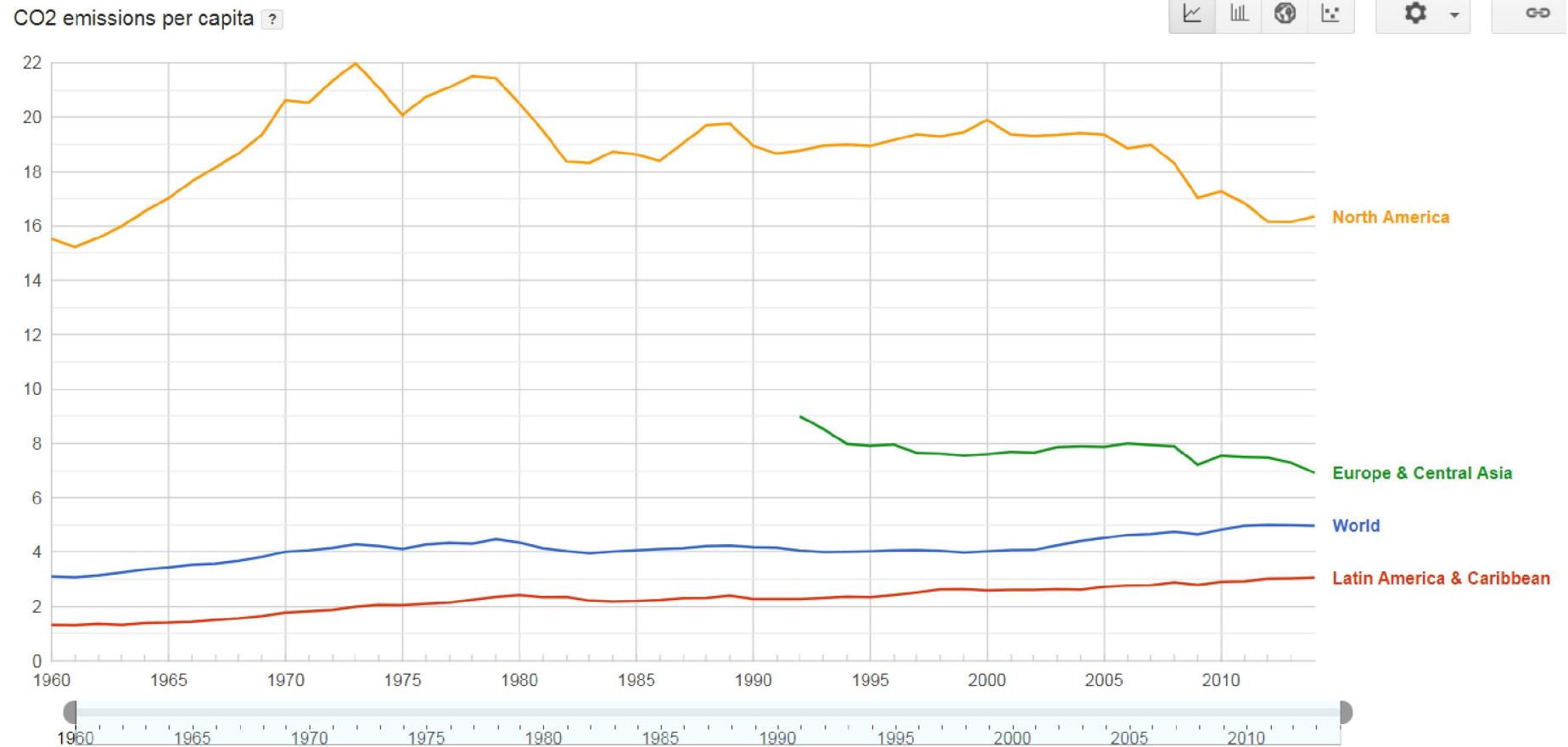


Emisiones de CO2 per cápita ?



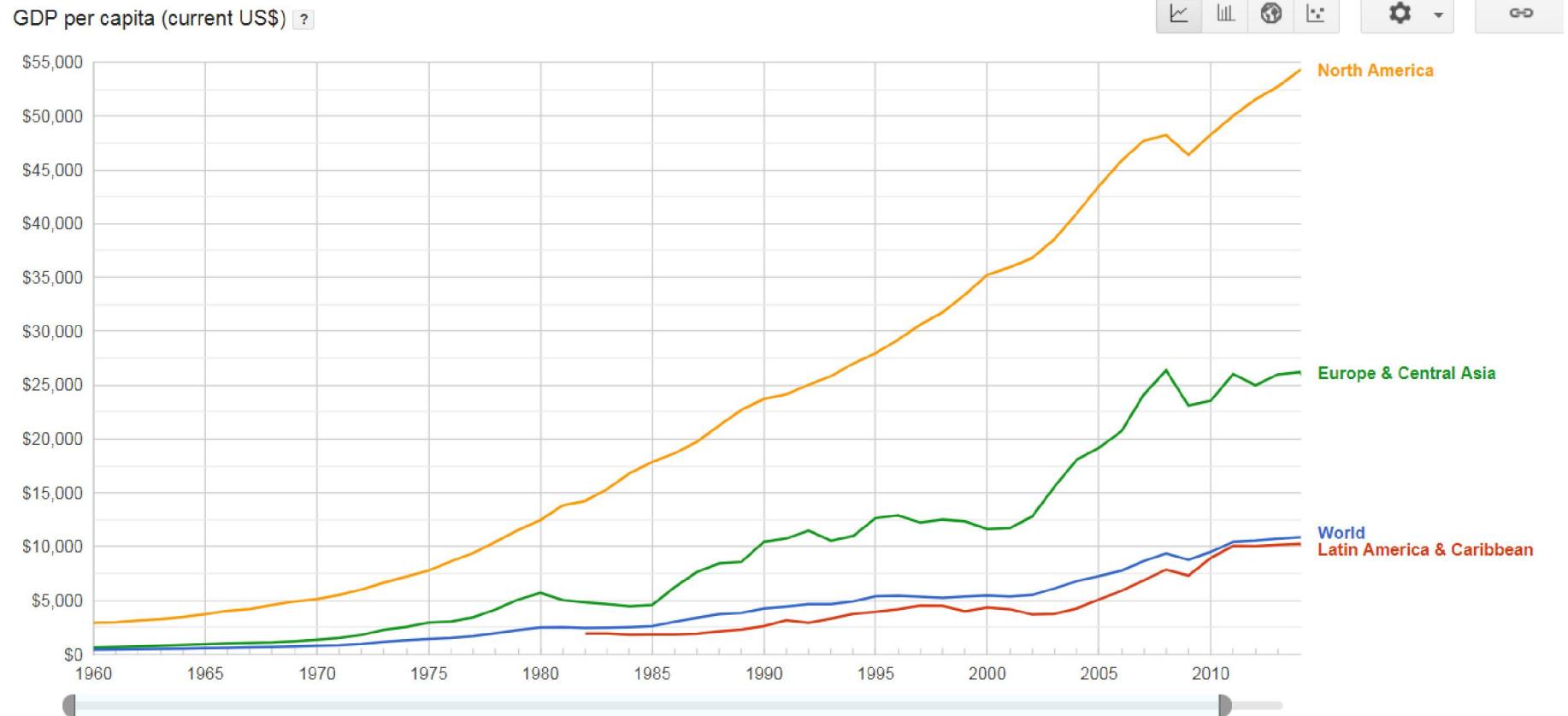
Y seguimos contaminando 😞 (datos hasta el 2014)

.... Emisiones en Crecimiento



Pero algunos contaminan más que otros 😞

.... GDP per cápita



Y algunos tienen más que otros 😞

Pero tenemos que hacer nuestra parte!!!



- Movernos a una economía baja en emisiones de carbono es fundamental para enfrentar el cambio climático

We have the means of stopping this devastation!!!

The world is now watching, we ask you to protect it!!!

There is no Plan B, because we do not have a Planet B (Ban Ki-moon)



Motivación

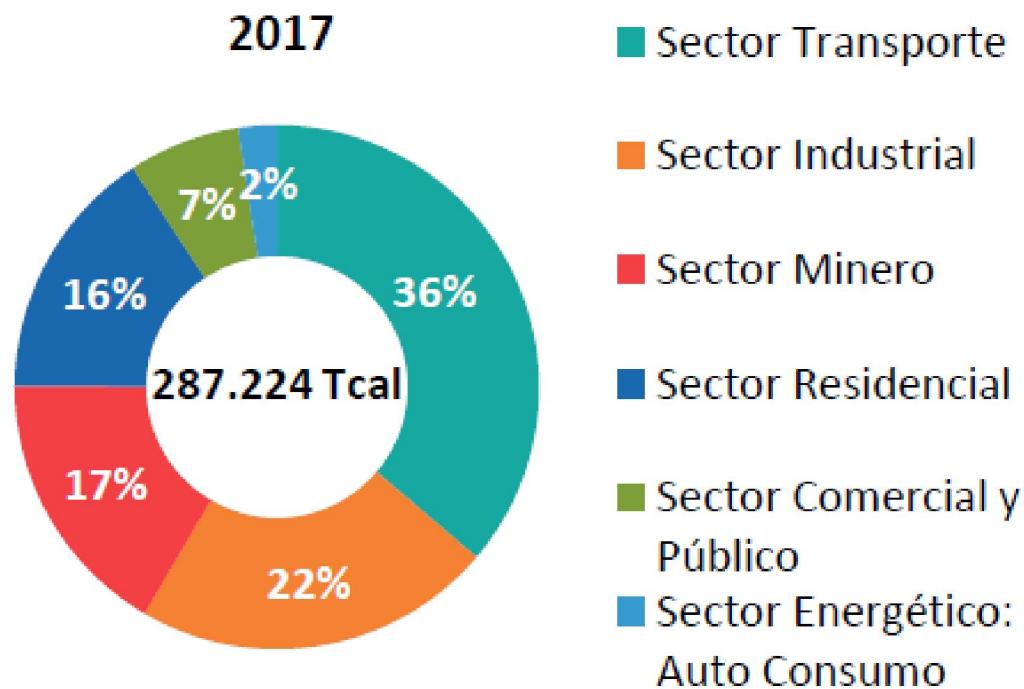


- Movernos a una economía baja en carbono es fundamental para enfrentar la emergencia climática.
- La adopción residencial de tecnologías bajas en emisiones de carbono (LCTs, i.e., paneles solares, vehículos eléctricos, etc.) puede ayudar a alcanzar este objetivo.
- Estas LCTs pueden producir impactos técnicos en las redes de distribución.
- Para facilitar la adopción de estas tecnologías en las redes de distribución se requiere entender detalladamente sus impactos, de manera que sea posible conocer sus límites y las posibles acciones de mitigación a través de redes inteligentes

EV =



Consumo de Energía por sector



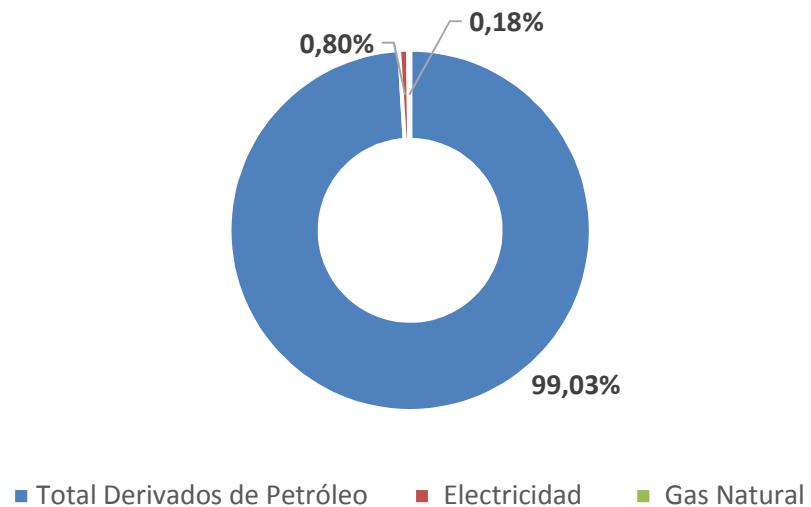
Más de 1/3 de nuestro consumo de energía está asociado a satisfacer nuestros requerimientos de transporte

Informe Balance Nacional de Energía 2017, Ministerio de Energía

Consumo de Energía por sector



Distribución del recurso energético secundario en el sector de transporte

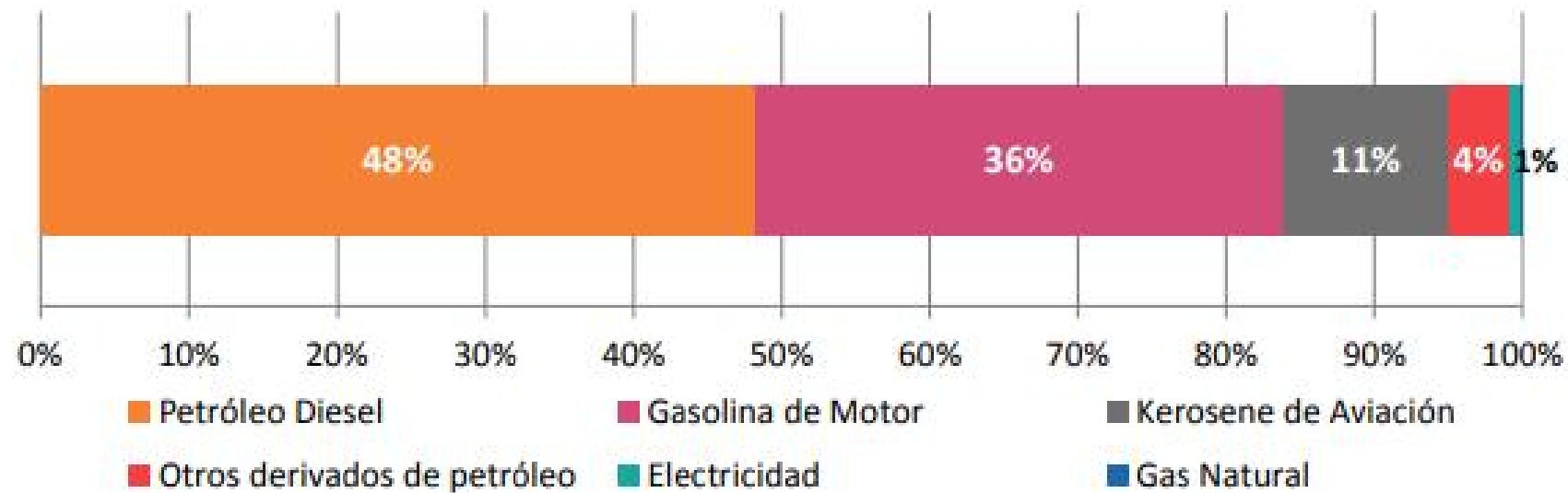


99% de los requerimientos de energía del sector transporte son suministrados a través de combustibles fósiles

Sector Transporte



Distribución del consumo final del sector transporte según fuente de energía



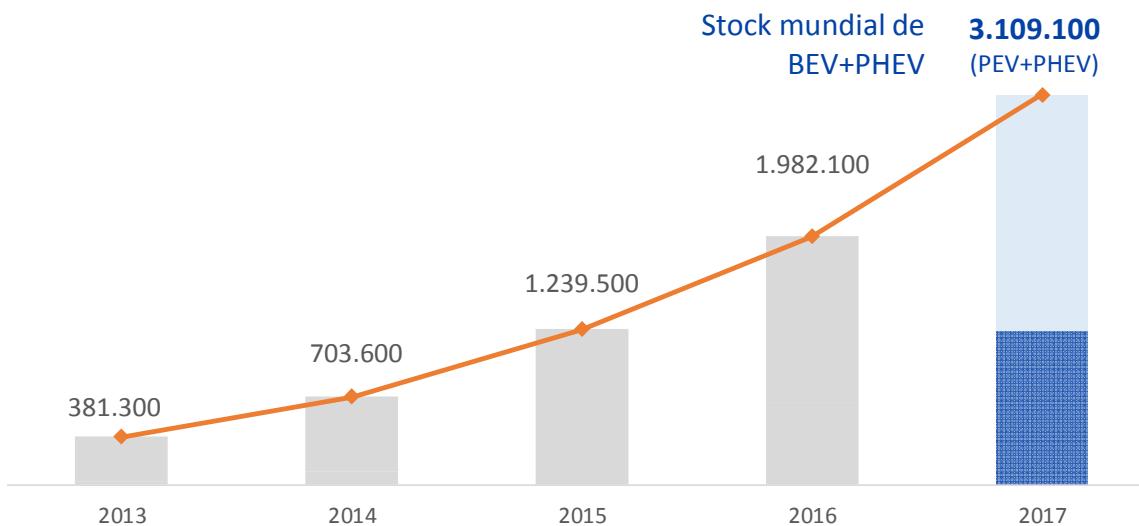
Informe Balance Nacional de Energía 2017, Ministerio de Energía

83% del consumo energético en transporte corresponde al transporte terrestre

Disrupción en Dx – Nuevas Tecnologías



- Vehículos Eléctricos: comenzando



56% crecimiento (2016 a 2017)

40% stock mundial está en China

El 2018 esta cifra llegó a cerca de 5 millones de vehículos, siendo 3.3 millones full eléctricos (no híbridos)

Cifra en contexto: En Chile al 2017 había 140 EV de un total de 5.000.000 de vehículos ☺ (aproximadamente)

Cifra en contexto: En Chile al 2018 hay cerca de 800 EV (entrevista al Ministro de Energía)

Fuente: Global EV Outlook 2018, IEA

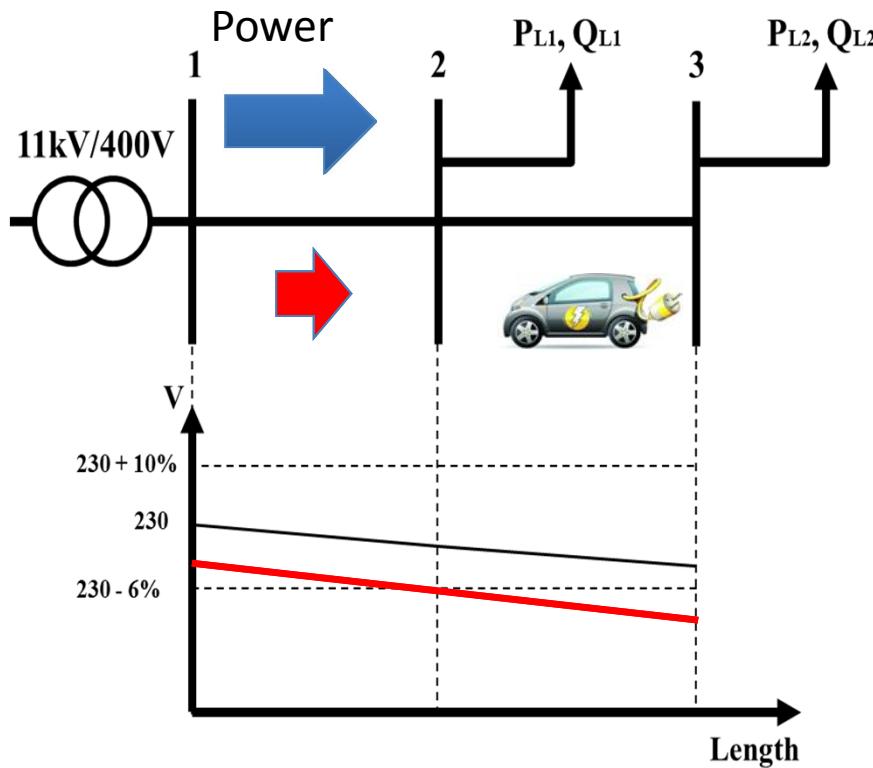


Vehículos Eléctricos y su relación con el Sistema de Distribución

Electric Vehicles and distribution networks



- Distribution networks were not designed to host electric vehicles (EV)



Podrían ser incorporadas por clientes residenciales sin conocimiento explícito por parte de la distribuidora (**localización aleatoria en la red de distribución**).

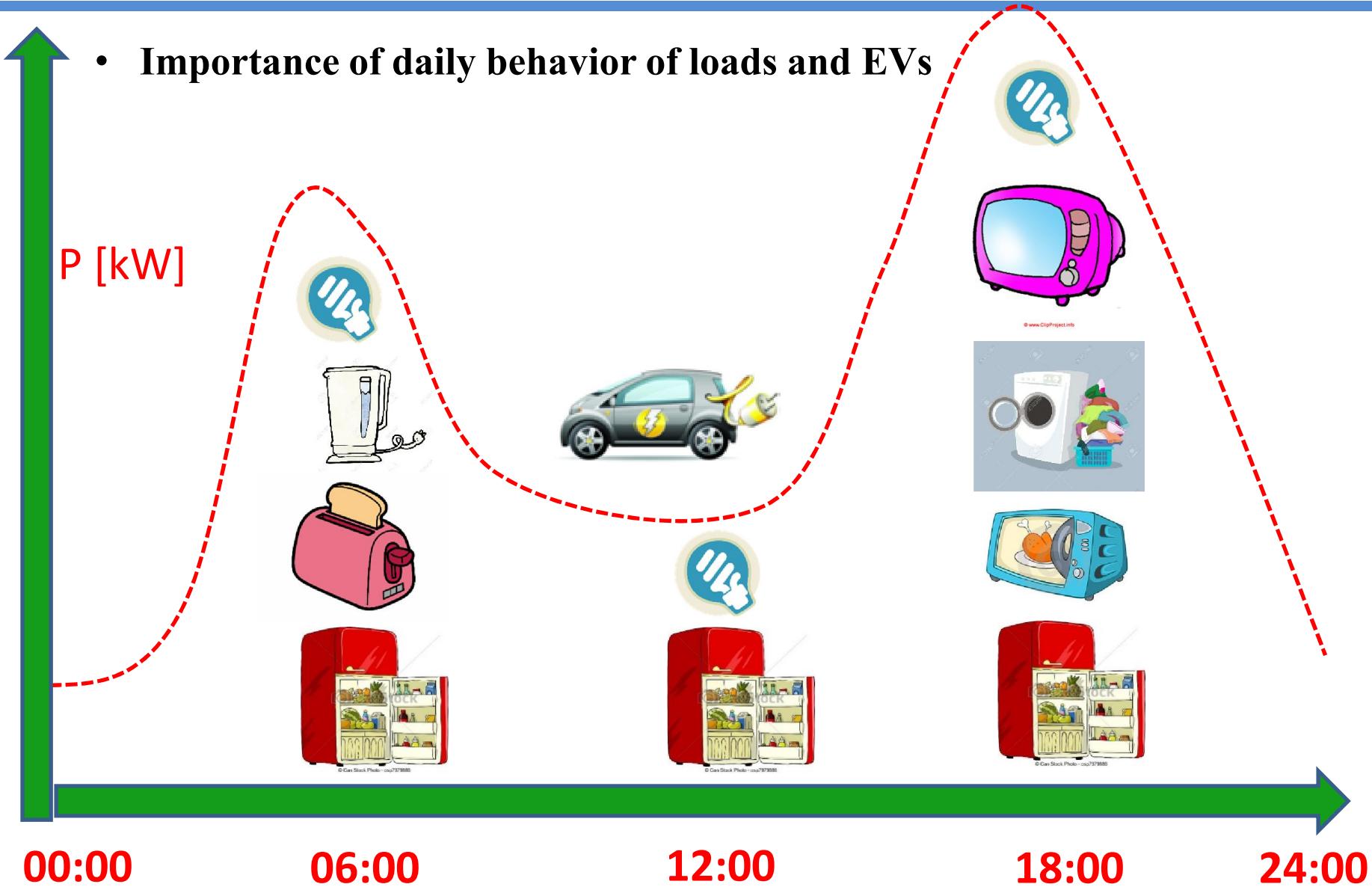
Los tamaños de la tecnología serán diversos en función de las elecciones y necesidades de los clientes (**tamaños aleatorios de la tecnología**).

Los efectos de estas tecnologías dependerán de su variación durante el día y de su coincidencia con la demanda (**dimensión temporal**).

EV and loads: Daily Interaction



- Importance of daily behavior of loads and EVs

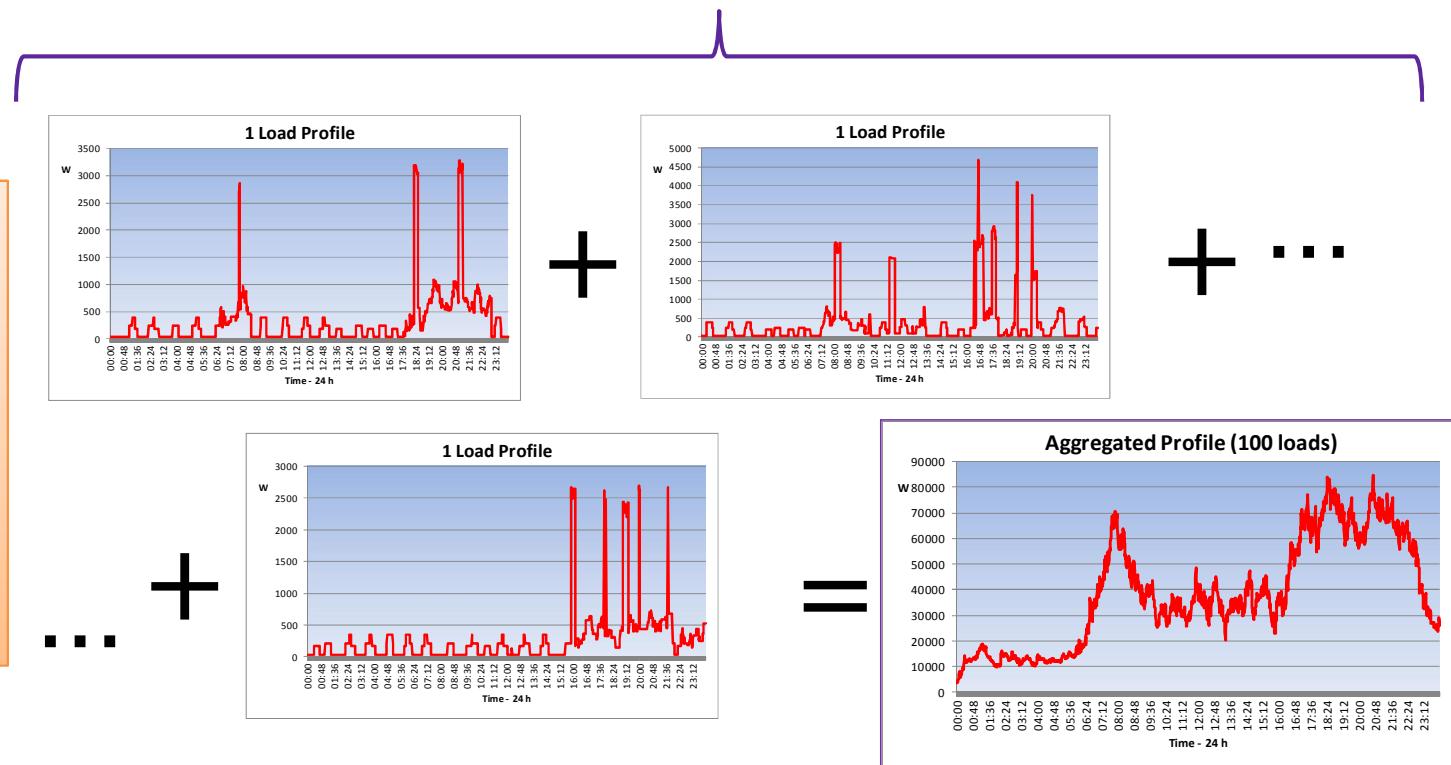


Profile Creation: Loads



- Synthetic data from: “Domestic electricity use: A high – resolution energy demand model” (Richardson et al, 2010).
 - Making an automatic process, it is possible to create N individuals profiles (probabilistic model) to be used in the simulations.

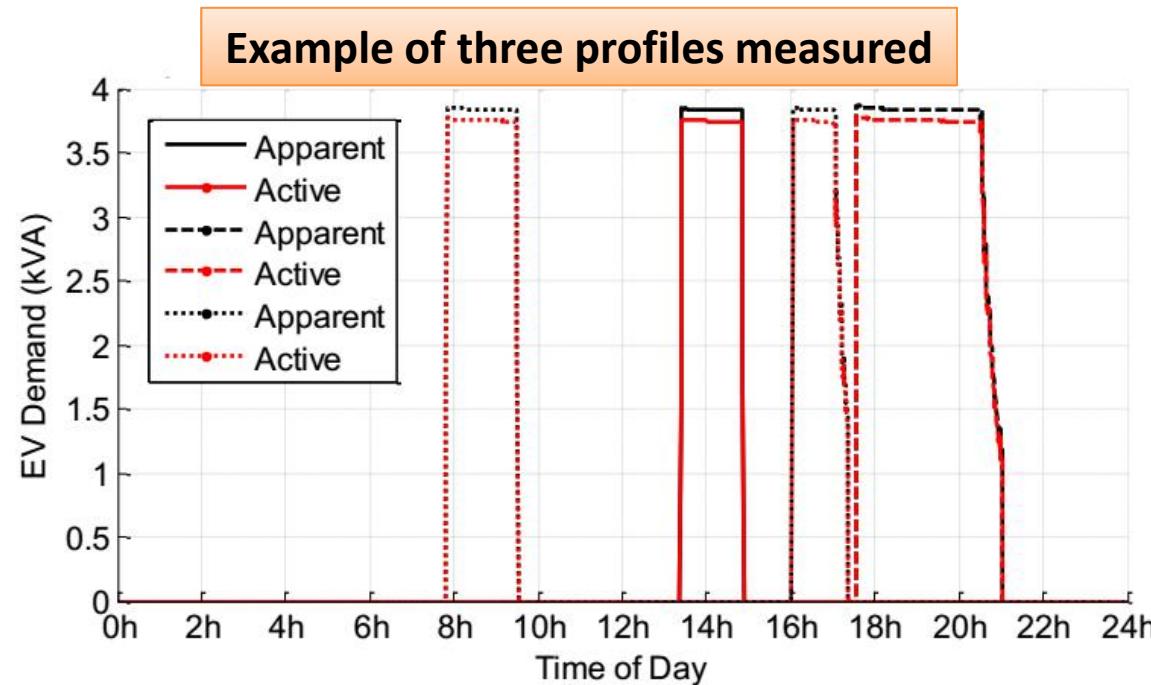
These profiles will be replaced by the load profiles created from the the Real Data monitored



EV Profiles: My Electric Avenue Project



- This work provides a set of results from a statistical analysis of more than 200 Nissan LEAFs used by residential UK customers (i.e., 24 kWh battery capacity, 3.6 kW demand).



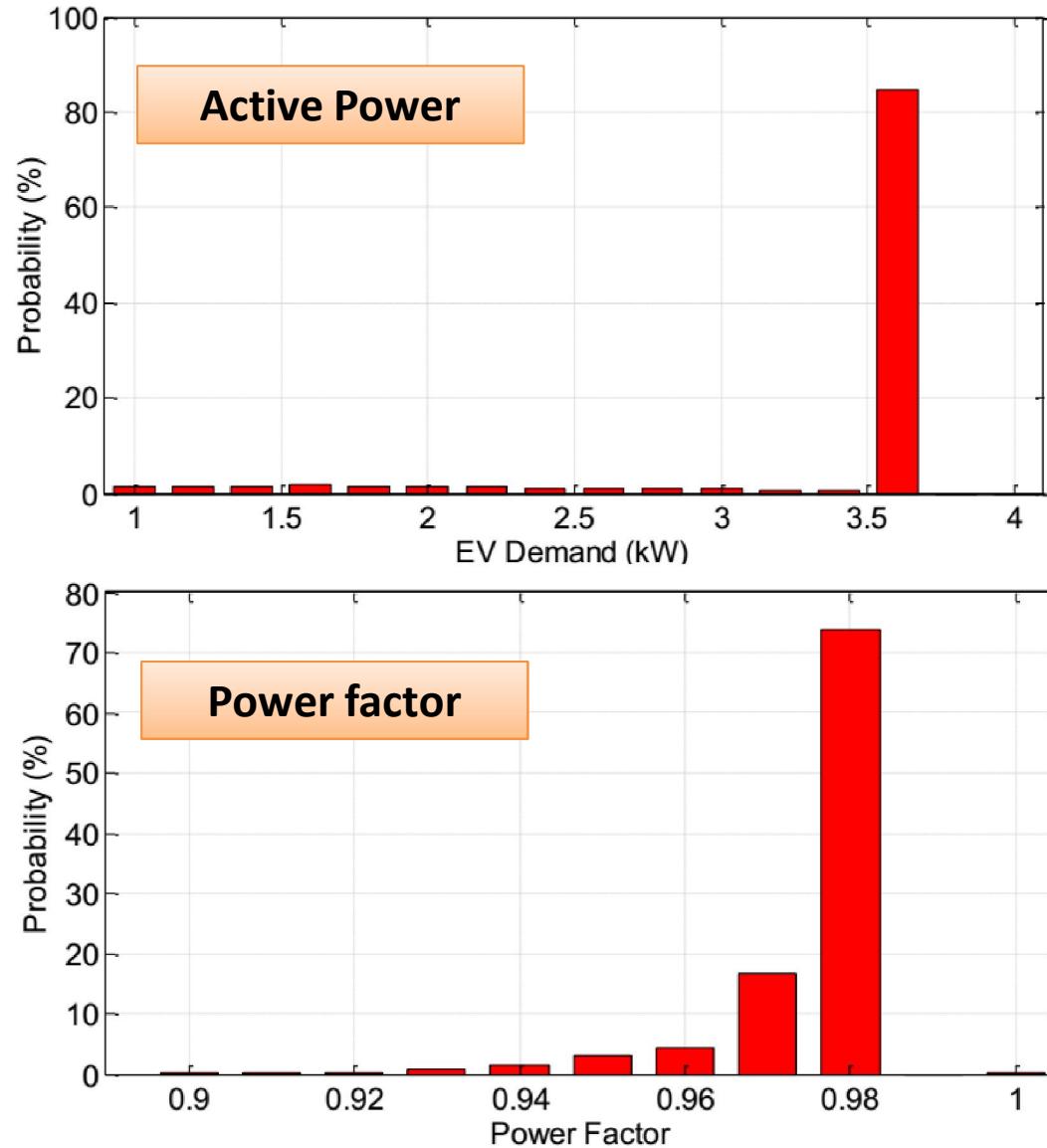
J. Quirós-Tortos, A. Navarro-Espinosa, L. Ochoa, T. Butler, "Statistical Representation of EV Charging: Real Data Analysis and Applications", XX Power Systems Computation Conference, PSCC 2018, Dublin, Ireland, June 2018..

EV Profiles: My Electric Avenue Project



Some results:

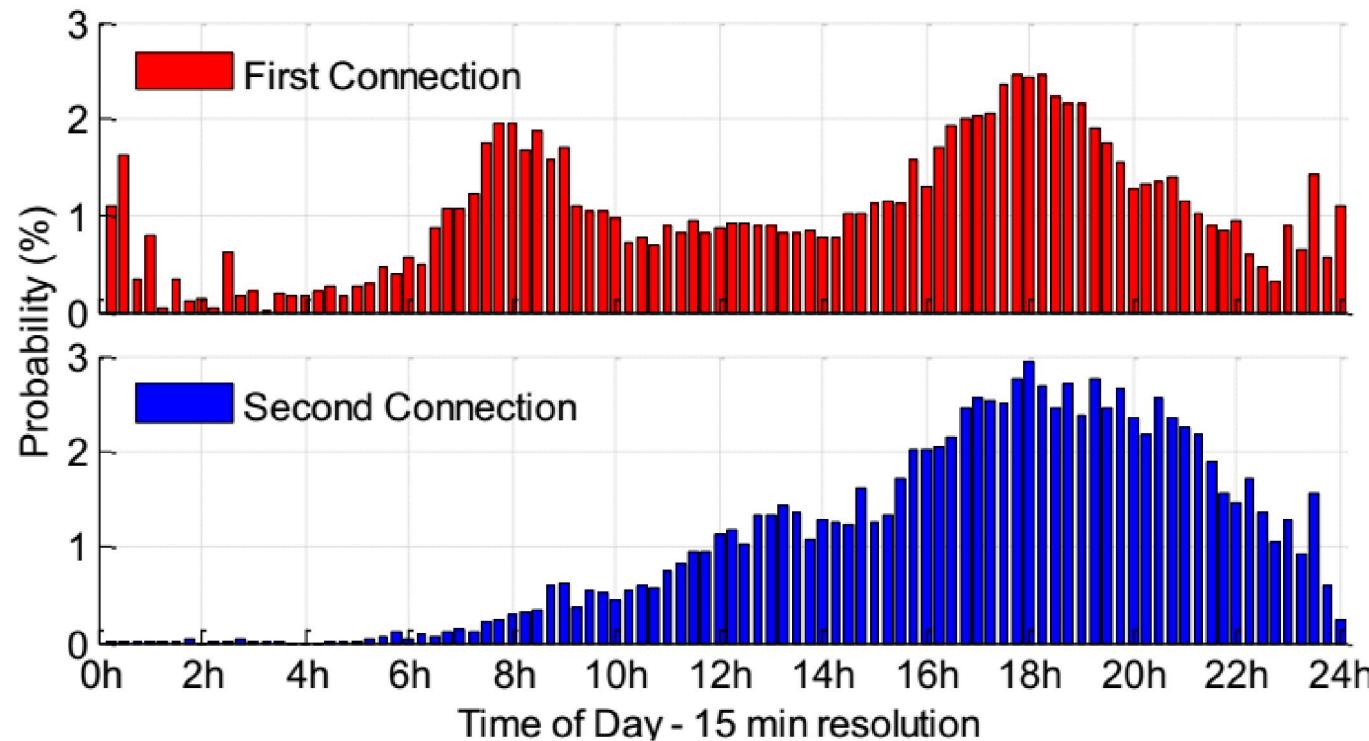
- Most of the time the active power consumption is 3,6 kW.
- Most of the time the power factor is 0,98.



EV Profiles: My Electric Avenue Project



- Probability of Connections



No. Conns	1	2	3	4	5	6	7+
Weekday	71.26	21.15	5.41	1.51	0.44	0.14	0.09
Weekend	68.99	21.51	6.62	1.90	0.63	0.24	0.11

EV Profiles: My Electric Avenue Project



- Energy Consumption (difference between SOC)

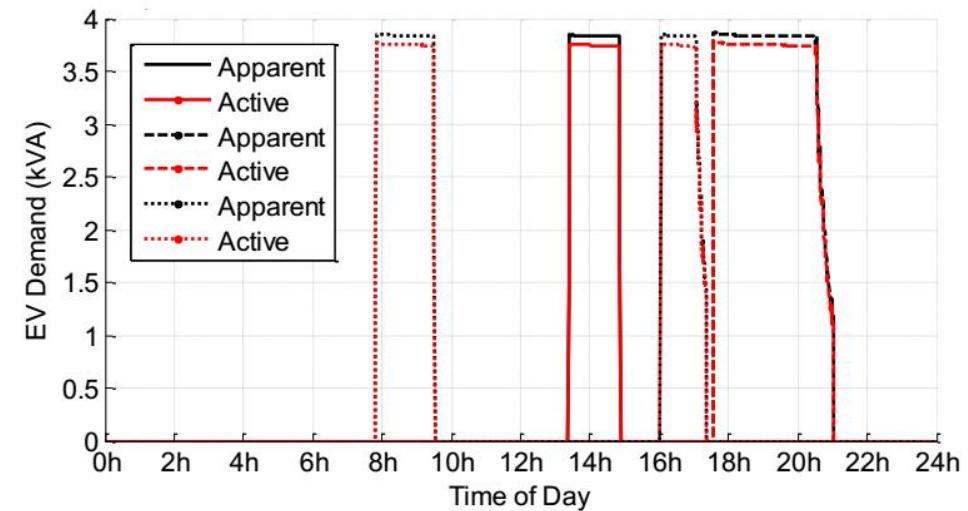
Units	Weekday				Weekend			
	Initial SOC		Final SOC		Initial SOC		Final SOC	
	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
0	0.57	0.91	0.00	0.05	0.67	1.21	0.03	0.02
1	3.52	4.23	0.15	0.28	3.74	5.28	0.10	0.44
2	8.38	7.55	0.39	0.96	7.45	8.68	0.53	0.81
3	11.75	9.59	0.74	0.89	9.45	9.91	0.62	0.79
4	11.86	9.51	0.78	1.21	10.09	9.66	0.84	1.01
5	10.87	9.34	1.27	1.42	10.31	8.93	1.47	1.63
6	11.62	11.17	2.07	2.48	10.99	9.54	1.93	2.56
7	12.21	10.51	2.58	3.18	11.80	9.76	2.65	2.81
8	9.46	8.54	3.55	3.63	9.59	9.59	3.80	3.80
9	6.56	6.79	7.05	6.31	7.63	7.22	7.28	6.53
10	6.08	7.91	7.34	9.48	7.83	7.52	8.75	12.50
11	4.03	6.94	5.16	6.46	5.99	6.51	6.20	8.53
12	3.09	7.01	68.92	63.65	4.46	6.19	65.80	58.57

EV profile creation

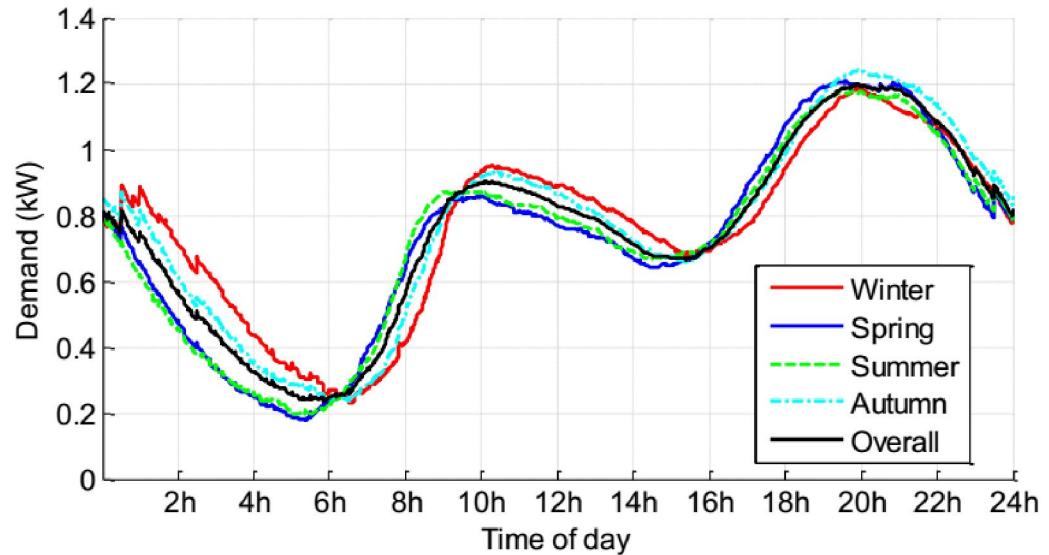


- Random selection of the connection time following the previous distribution.
- The amount of energy required is randomly selected by following the probability distribution.
- This energy is divided by the battery capacity (3,6 kW/24kWh – Nissan Leaf) to calculate the number of periods required.
- The charging time is between the connection time and the (connection time + the periods required)

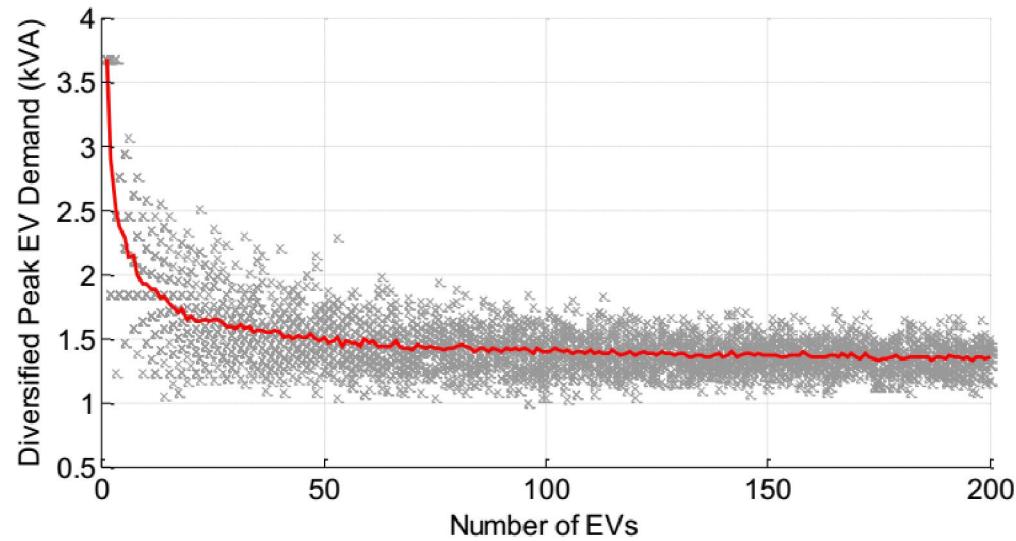
EV profiles



EV Profiles: My Electric Avenue Project



Average
demand 1.2
kW



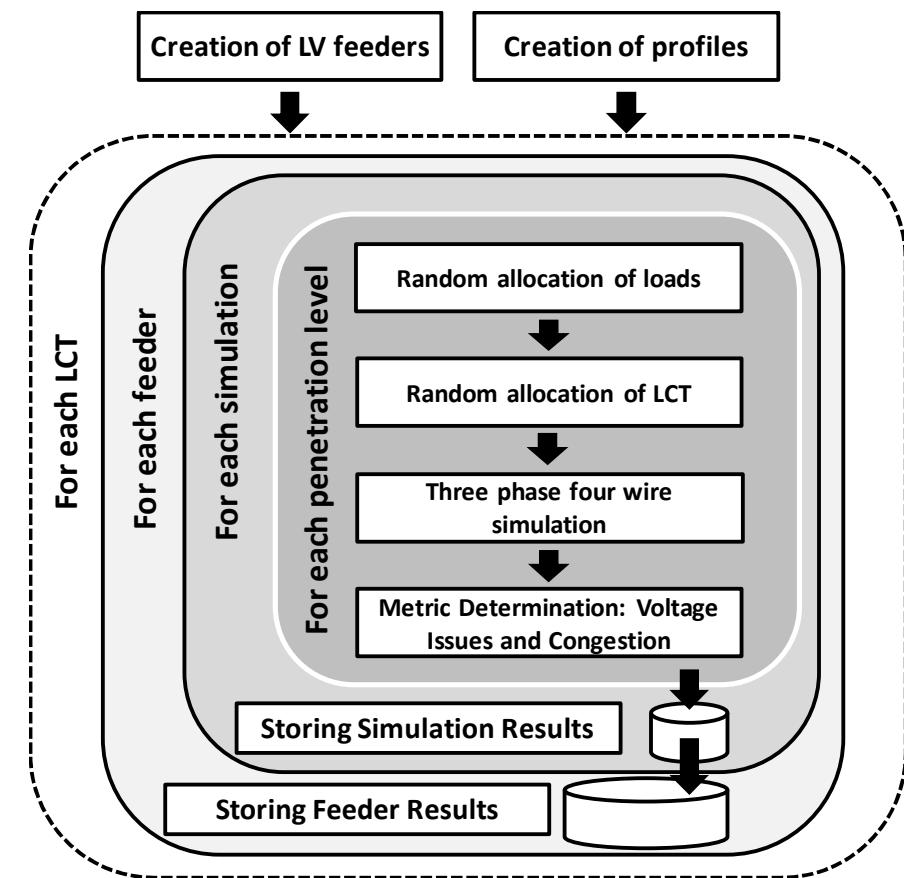
EV Impact Assessment



- Framework to analyze the impacts of EV in LV networks, considering the **time-series behavior** of EV and load, **stochasticity** of location and EV consumption and the **imbalance** nature of LV networks

Main Characteristics

Monte Carlo Simulations
Times Series Analysis
3φ unbalance power flow

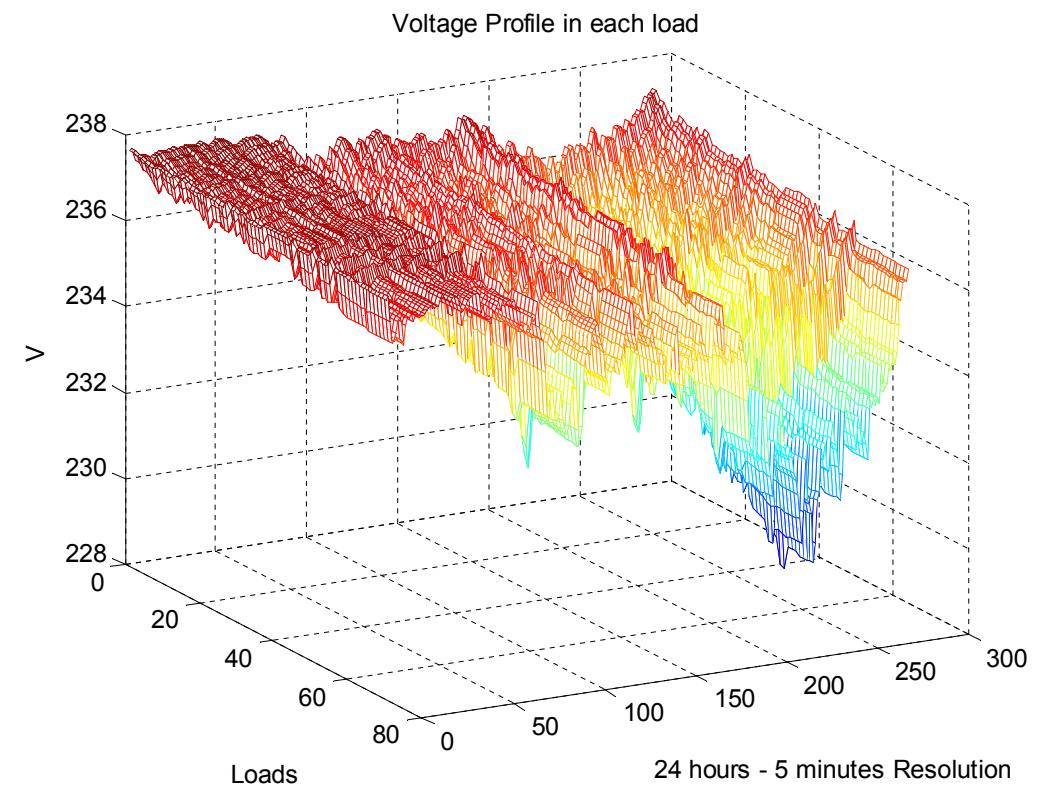
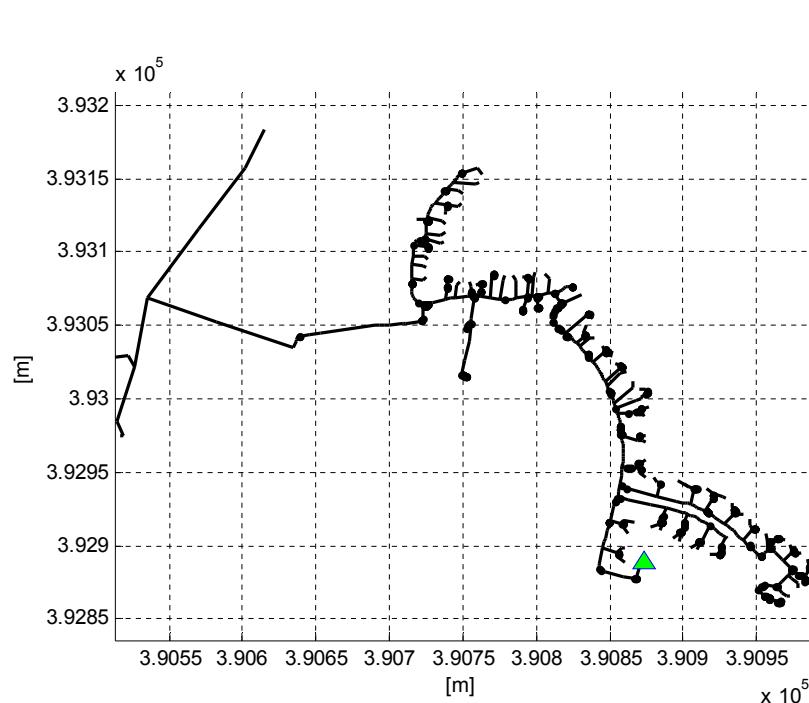


A. Navarro-Espinosa and L.F. Ochoa, "Probabilistic Impact Assessment of Low Carbon Technologies in LV Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 3, pp. 2192-2203, May 2016.

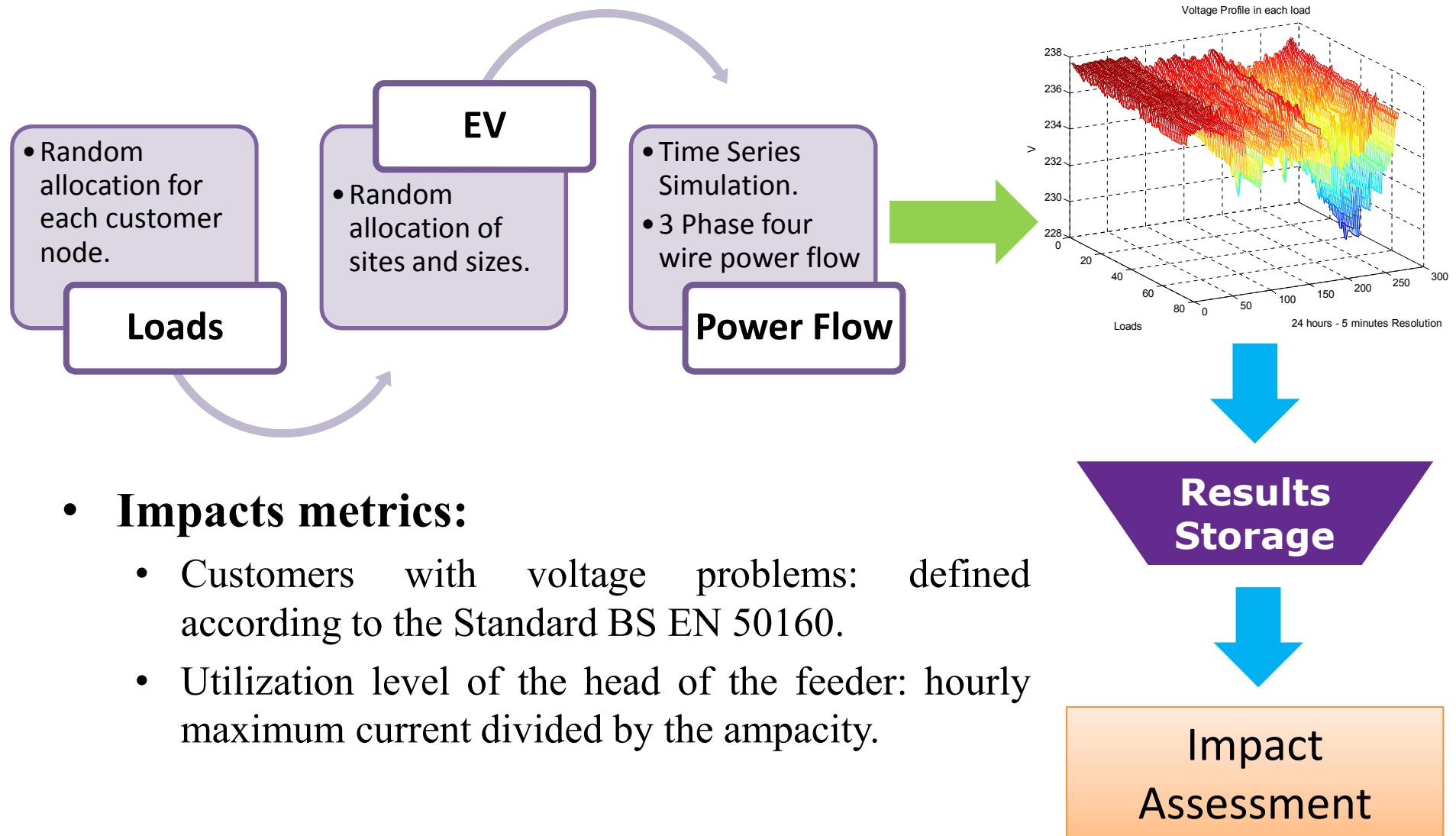
EV Impact Assessment



- Voltages and currents are obtained for each simulation period (288/day) and for each house in the network



EV Impact Assessment



EV Impact Assessment



- **Impacts metrics:**

- Customers with voltage problems: defined according to the Standard BS EN 50160.

Importante para la aplicación a Chile:

Voltaje nominal UK: 230 voltaje fase neutro (Chile es 220 V)

Requerimientos de tensión UK: 95% del tiempo entre +/- 10% de Voltaje nominal (Chile es +/- 7.5%)

2.3 Supply voltage variations

Under normal operating conditions, excluding situations arising from faults or voltage interruptions,

- during each period of one week 95 % of the 10 min mean rms values of the supply voltage shall be within the range of $U_n \pm 10 \%$.

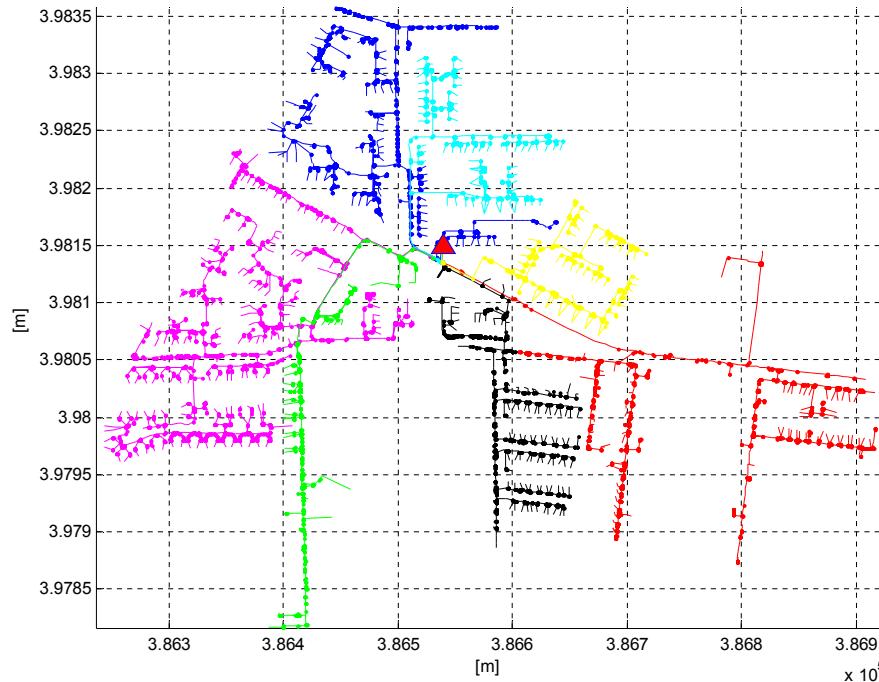
NOTE 1: Until the year 2003 the range of the voltage may differ from these standard values, in accordance with HD 472 S1.

- all 10 minutes mean rms values of the supply voltage shall be within the range of $U_n + 10 \% / - 15 \%$.

EV Impact Assessment



- How different are the results for different feeders in the same network?



Network Example

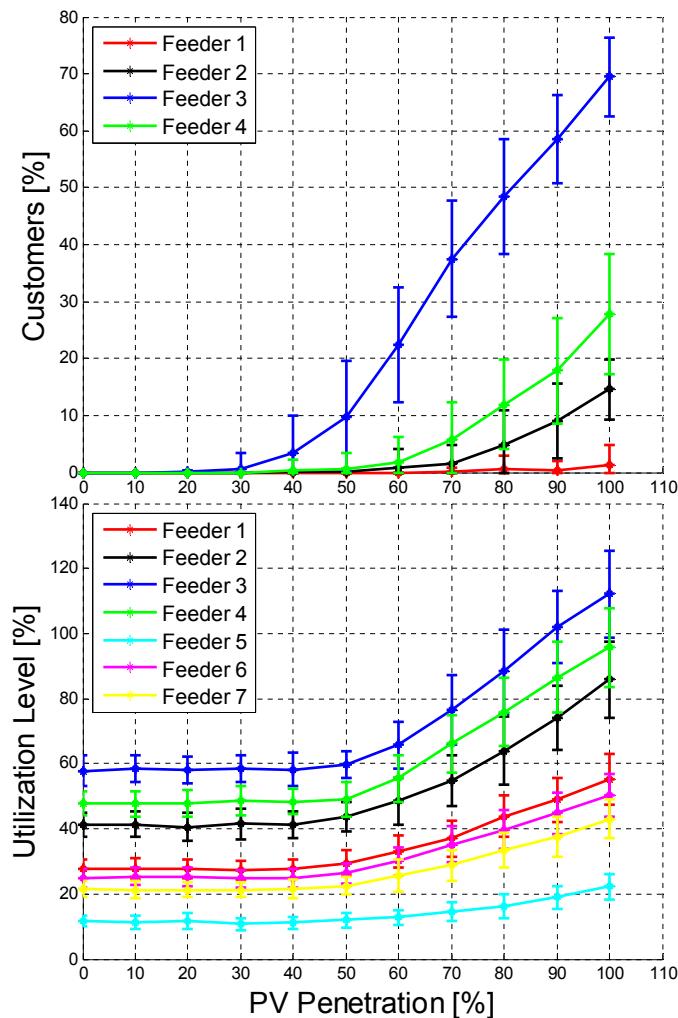
The same methodology is applied for each of the seven feeders (EV and PV are considered independently)

EV Impact Assessment

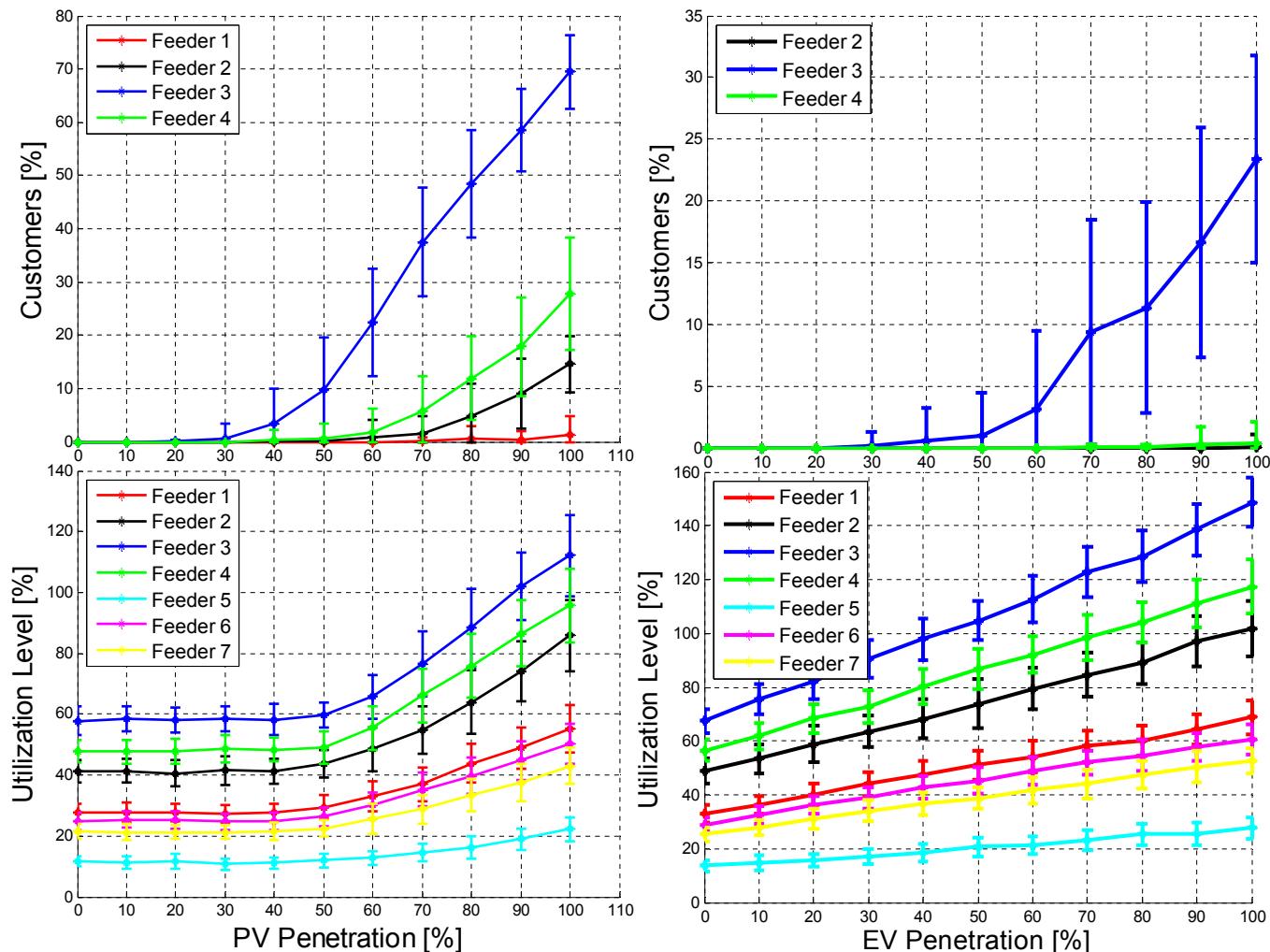


Different feeders have different problems

% of Customers with Voltage Problems



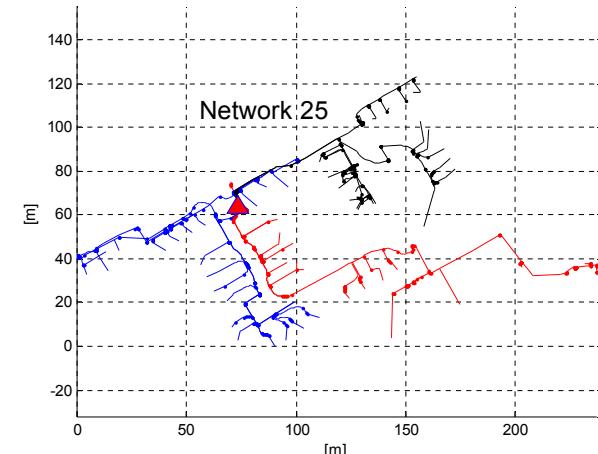
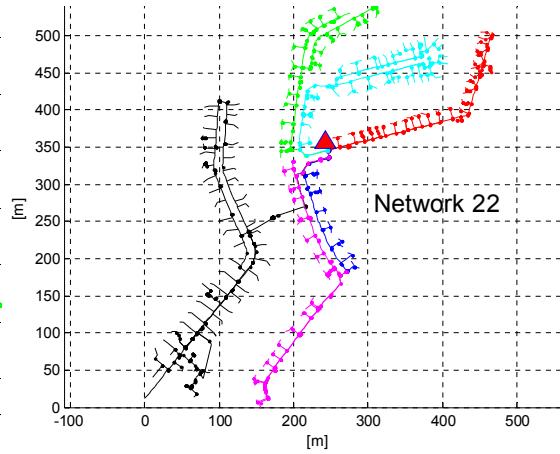
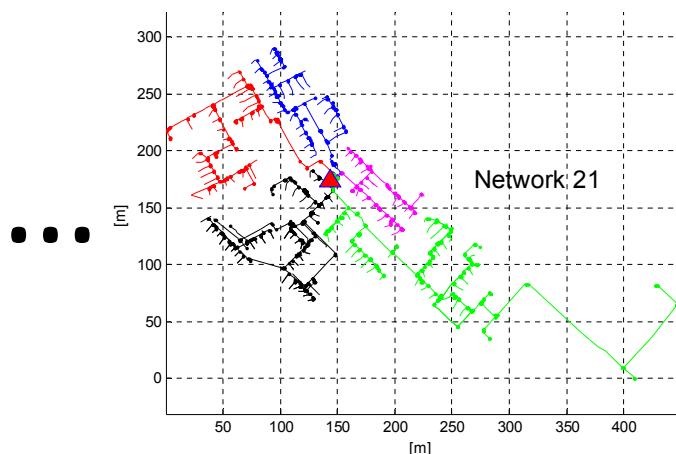
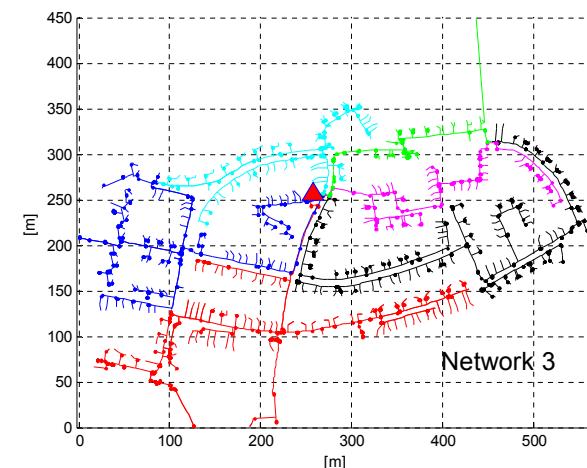
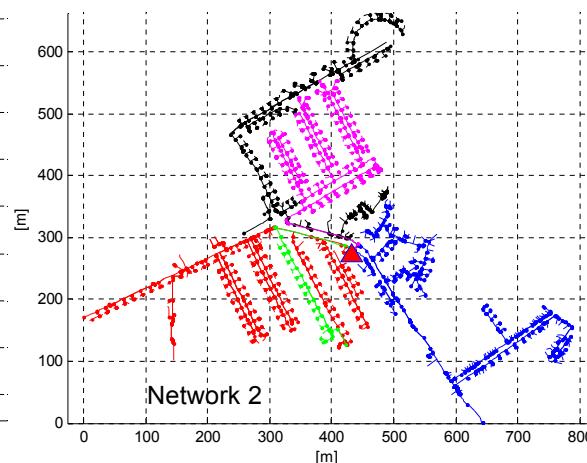
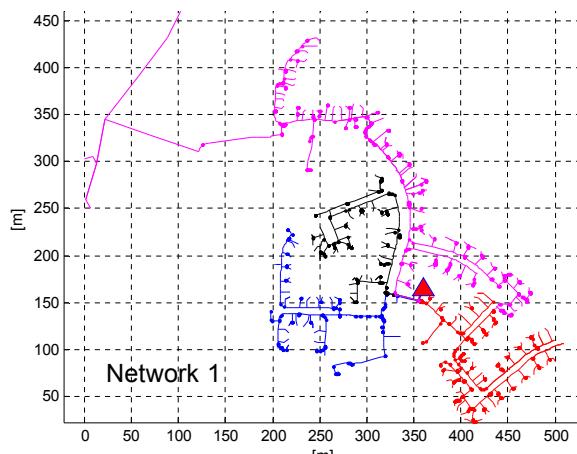
Utilization Level at the head of the feeder



Multi – Feeder Assessment



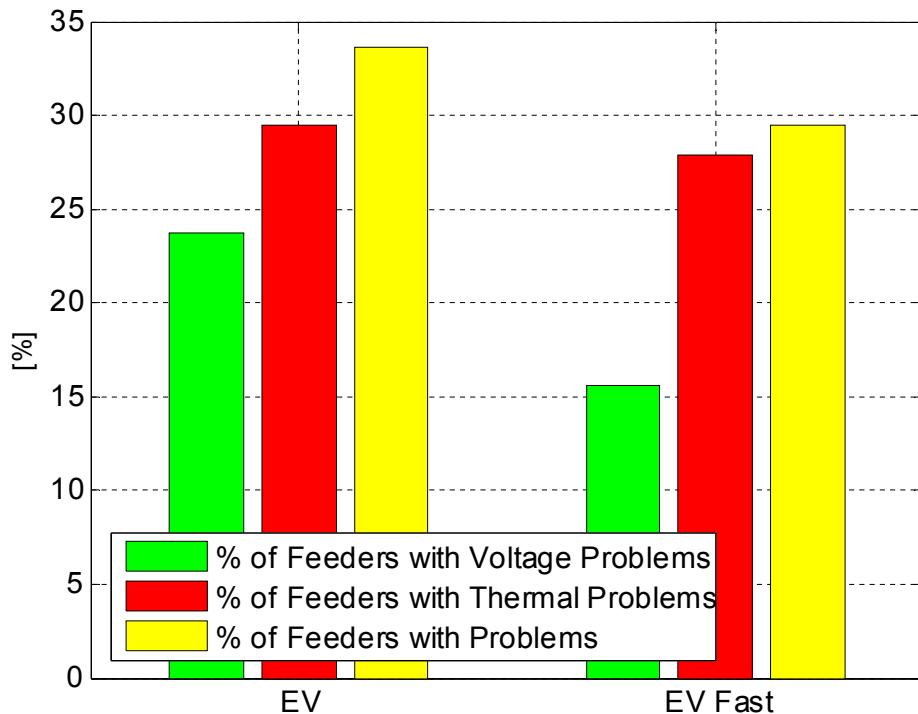
So, different networks can face different problems magnitud,to get a better understanding 125 LV feeders are studied.



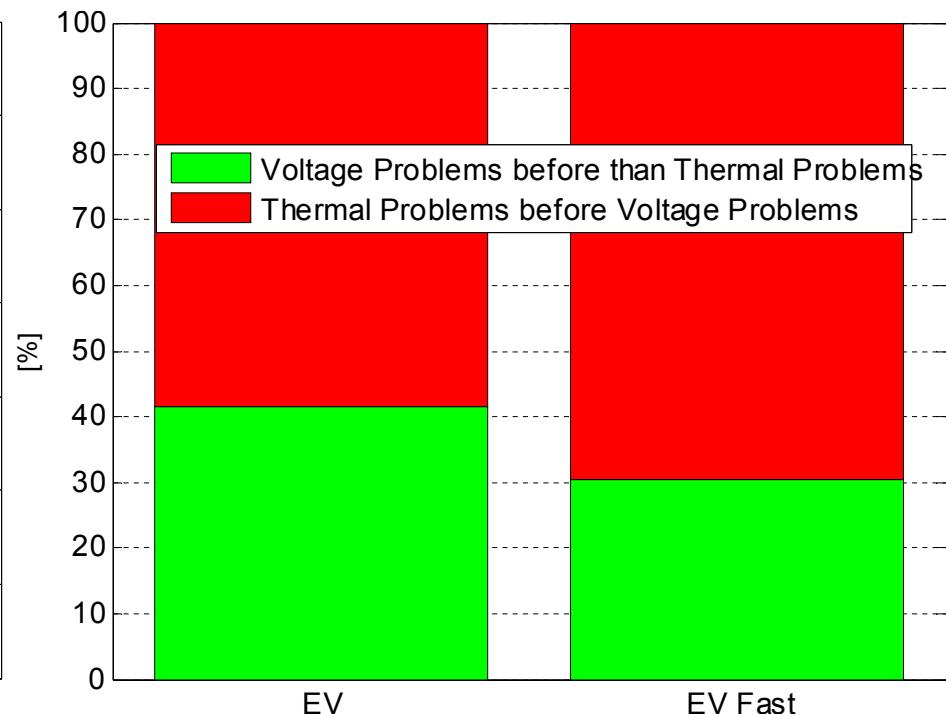
Impact Analysis



■ Multi-feeder Assessment – Results:



% of feeders with technical problems

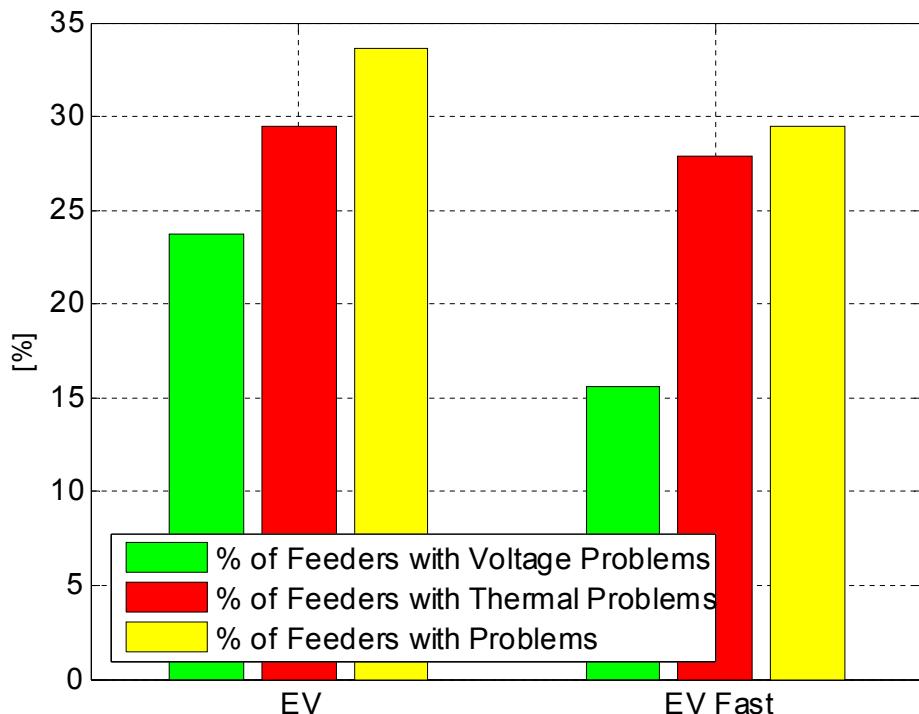


First problem to occur

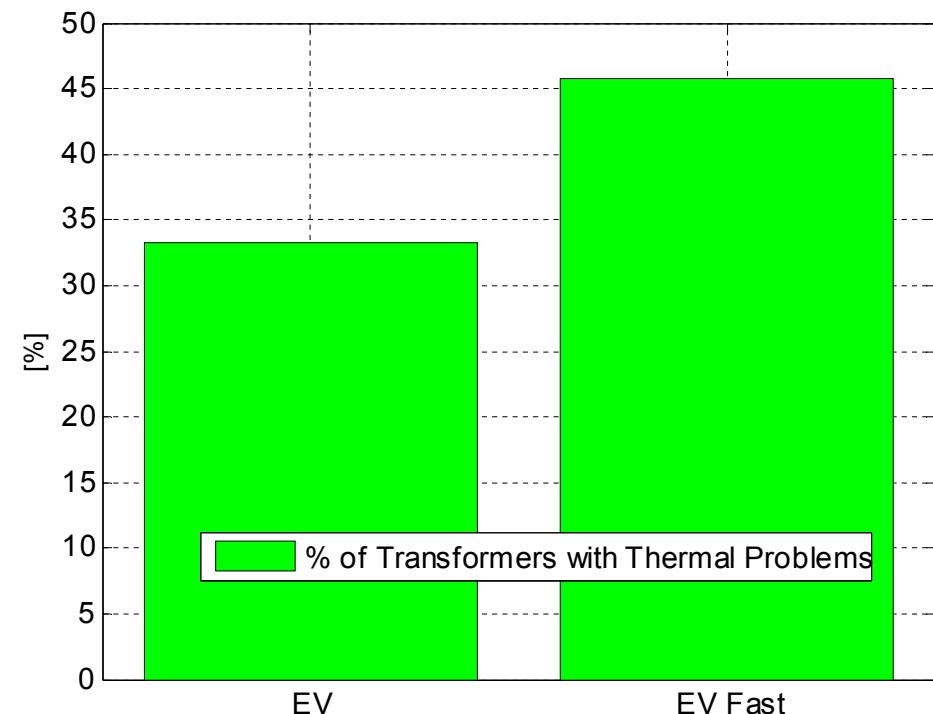
Impact Analysis



■ Multi-feeder Assessment – Results:



Feeders with technical problems

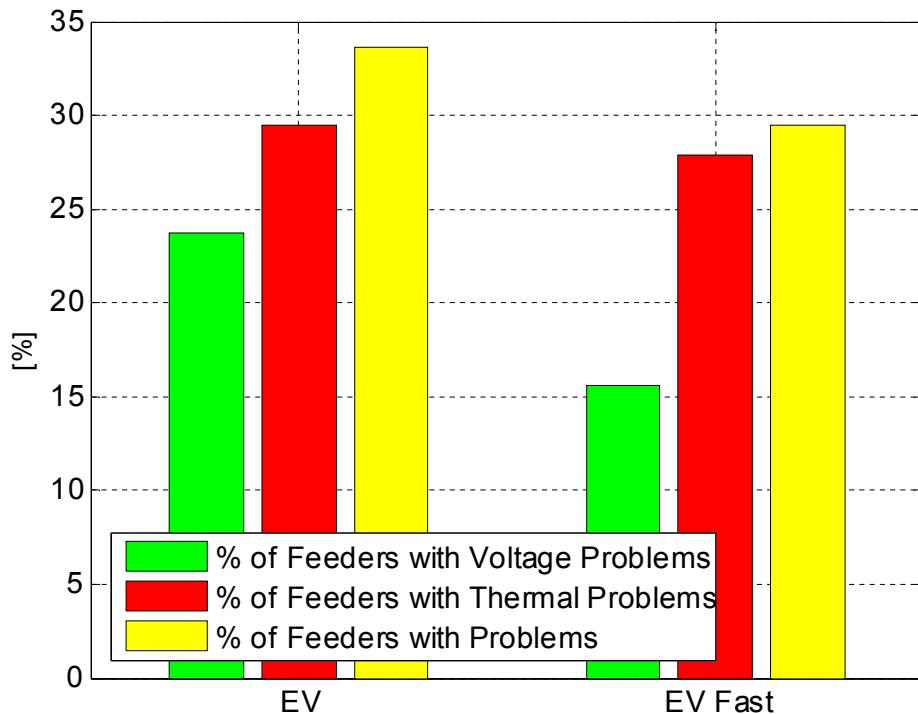


Transformers with technical problems

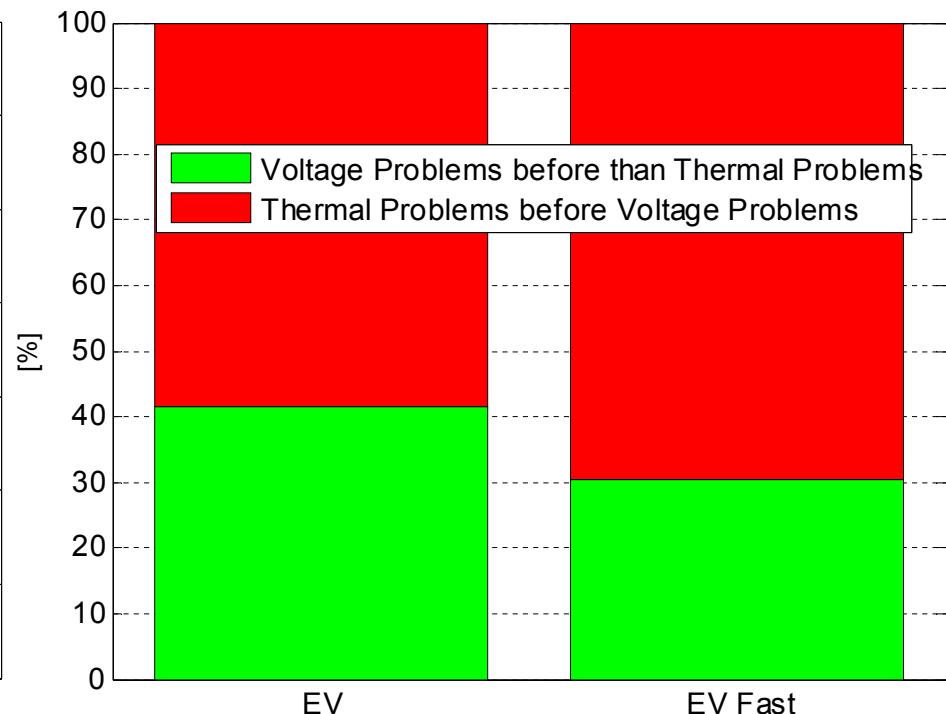
Impact Analysis



■ Multi-feeder Assessment – Results:



% of feeders with technical problems



First problem to occur

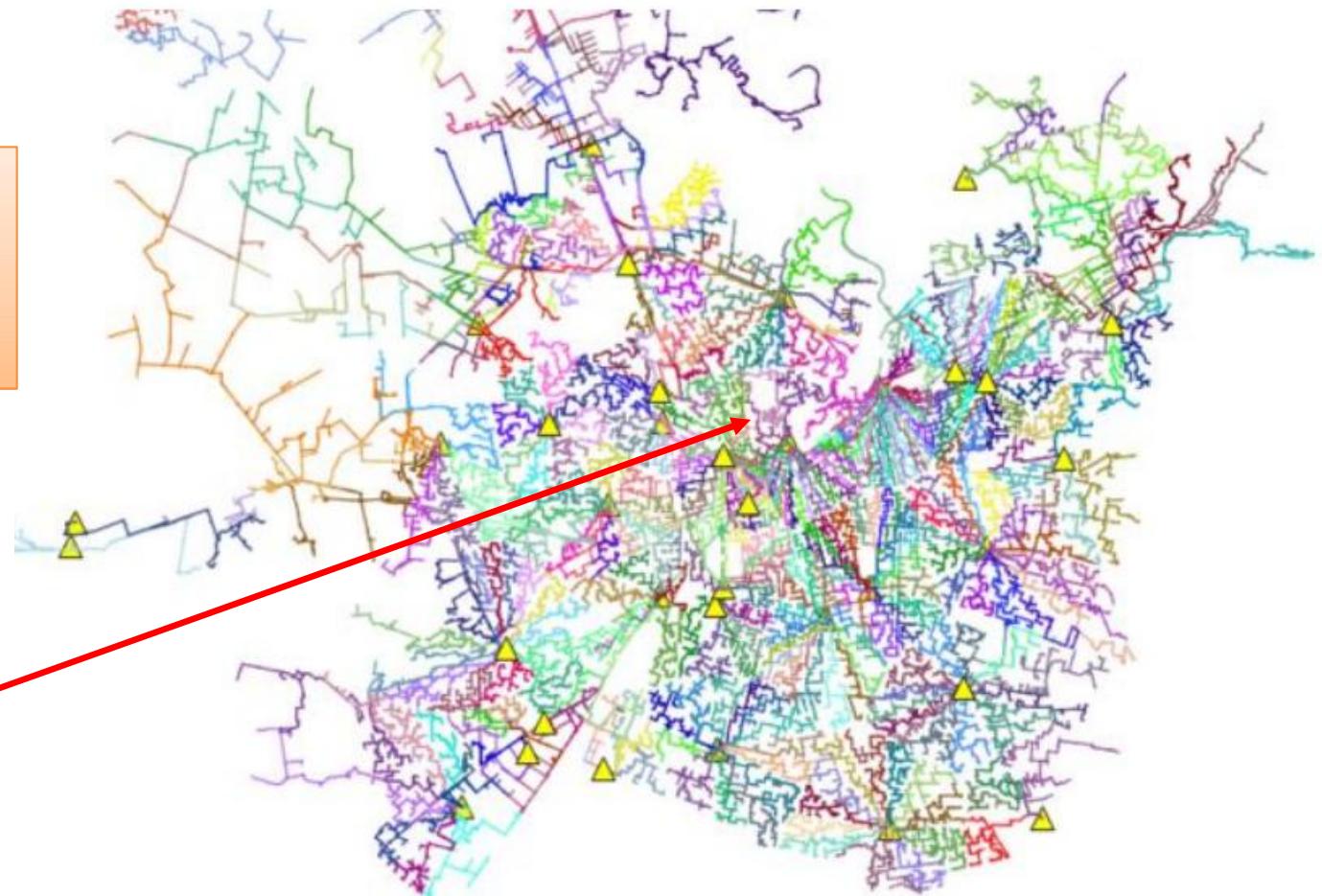
What about Santiago? – Work in progress



- Next steps: EV in real chilean distribution networks

Large scale problem:
30.000 networks
1.800.000 nodes

We are here





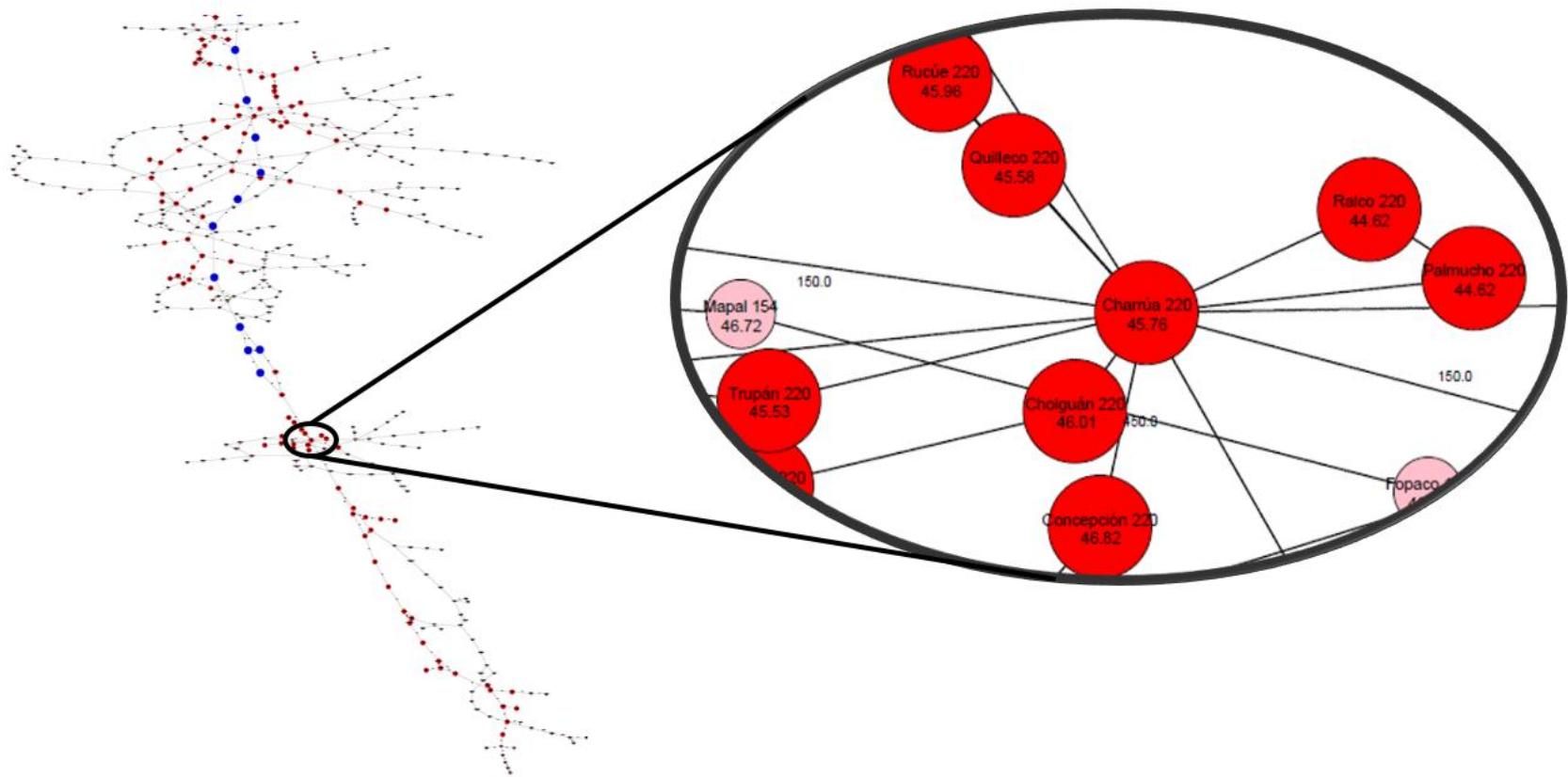
Vehículos Eléctricos y su relación con el Sistema de Generación

Trabajo de Miguel Díaz y Alejandro Navarro

Impactos en el Sistema de Generación



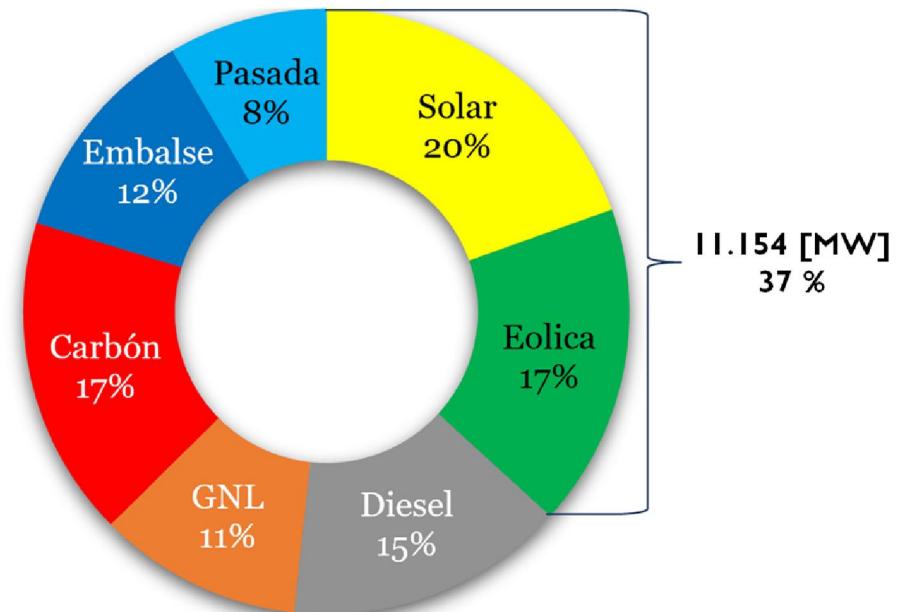
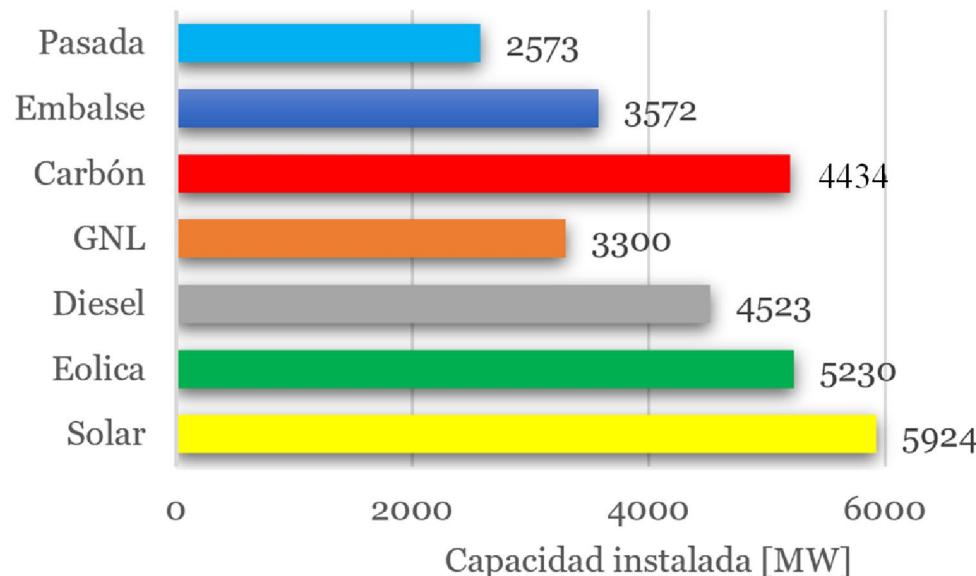
- Simulación año 2027 del despacho horario anual del sistema eléctrico nacional.



Impactos en el Sistema de Generación



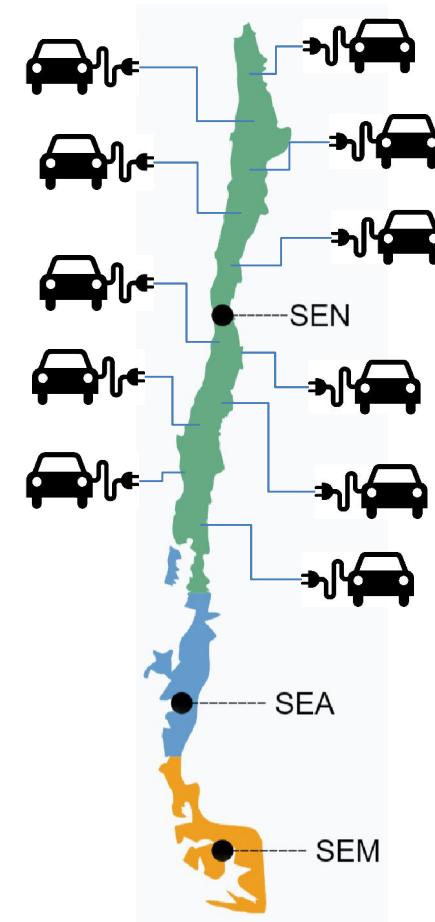
- Simulación año 2027 del despacho horario (estos resultados no consideran el plan de descarbonización)
- Se consideran dos escenarios con y sin gestión de la flota.



Datos de Entrada EV



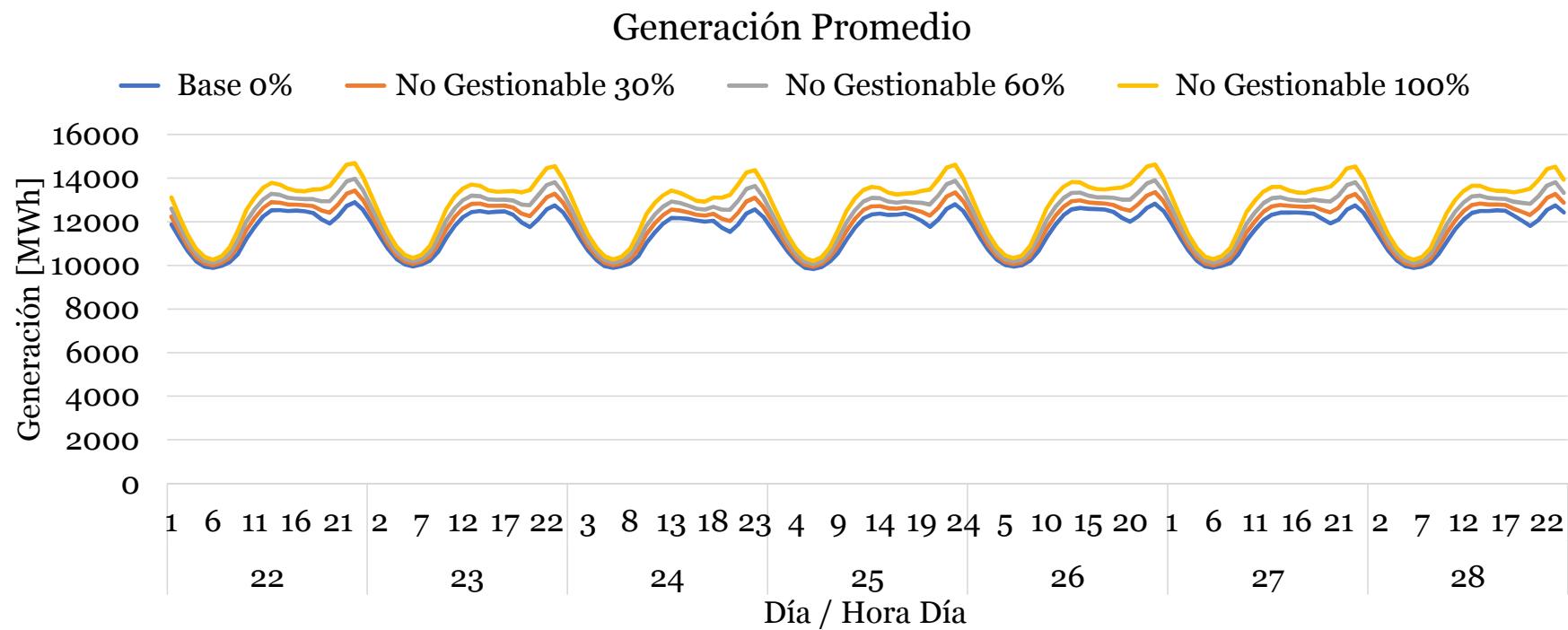
- Datos disponibles de UK, se corrigen para acercarse al comportamiento nacional.



Resultados Preliminares



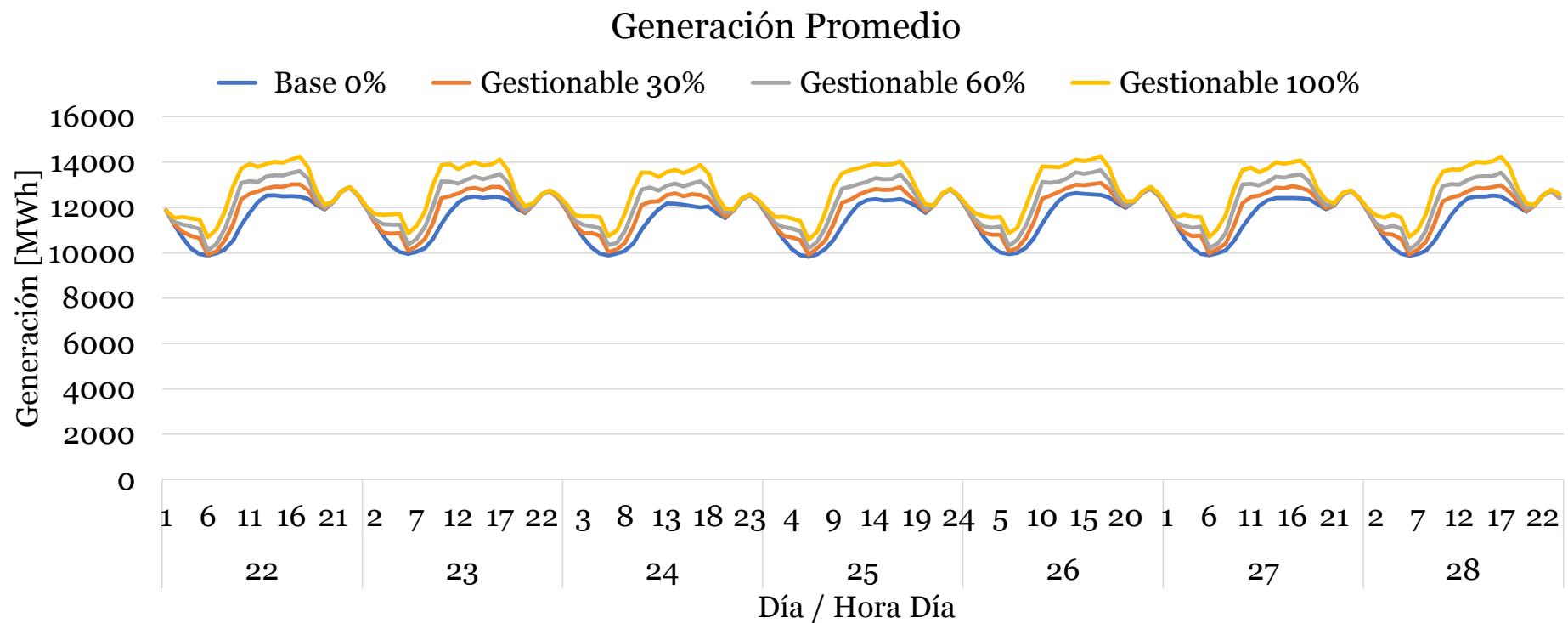
- Caso no gestionable:



Resultados Preliminares



- Caso gestionable:

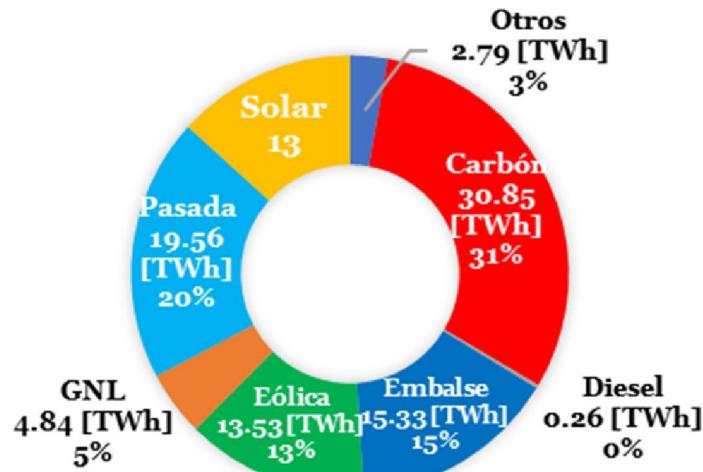


Resultados Preliminares

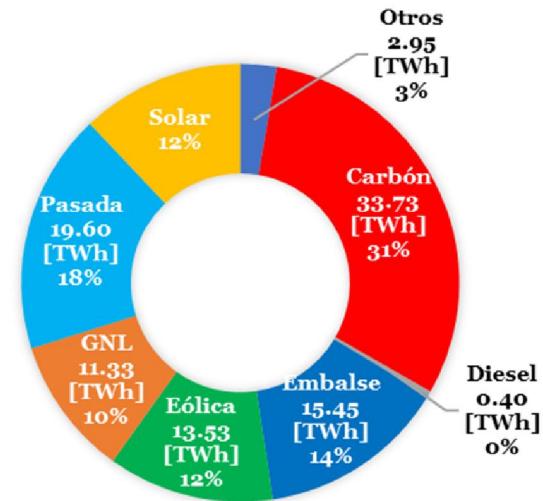


- Comparación matriz de generación:

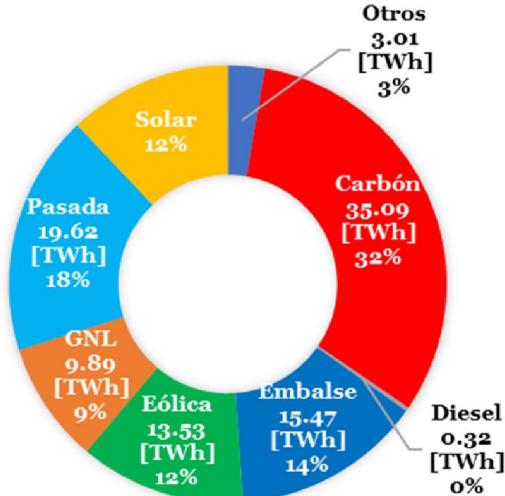
Caso Base



NO GESTIONABLE 100 %



GESTIONABLE 100 %



Es importante que la electrificación del transporte venga acompañado de un aumento en la adopción renovable (y/o asociado a una descarbonización de la matriz)



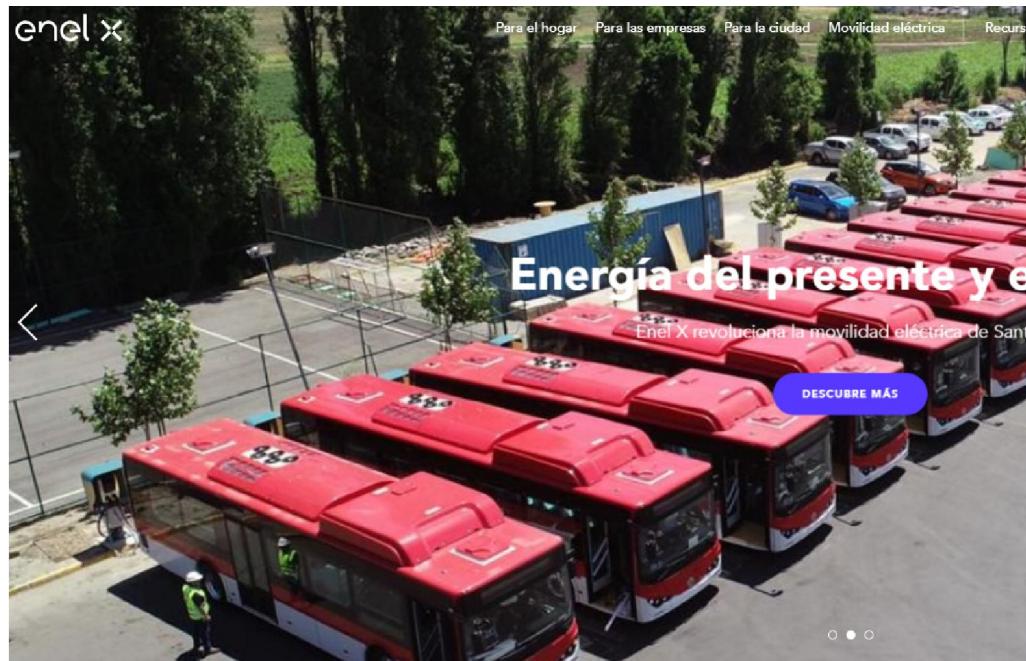
Electrificación del Transporte público: ¿Cuánta potencia y energía se requiere?

Trabajo de Juan Pedro Arnés, Marcela Munizaga y Alejandro Navarro

Electrificación del Transporte Público



- Desafío Actual que debe ser realizado en forma eficiente !!!



enel x

Para el hogar Para las empresas Para la ciudad Movilidad eléctrica Recursos Quienes somos Contacto

Energía del presente y el futuro

Enel X revoluciona la movilidad eléctrica de Santiago

DESCUBRE MÁS

Hoy ya existen 200 buses eléctricos en nuestro país

Otros 100 nuevos buses eléctricos se suman a la flota de Transantiago

Autor: Francisca Labarca SAB 19 ENE 2019 | 12:21 PM



Los nuevos buses comenzarán a funcionar en marzo y conectará la

Electrificación del Transporte Público



Primer Bus eléctrico interurbano en Chile

Chile posee el primer bus interurbano 100% eléctrico de América

Su autonomía de 250 kilómetros le permite realizar el trayecto entre las ciudades de Santiago y Rancagua, ida y vuelta, con sólo una carga.



Publicado el 18 de enero del 2019

250 km de autonomía
314 kWh de almacenamiento

Electrificación del Transporte Público



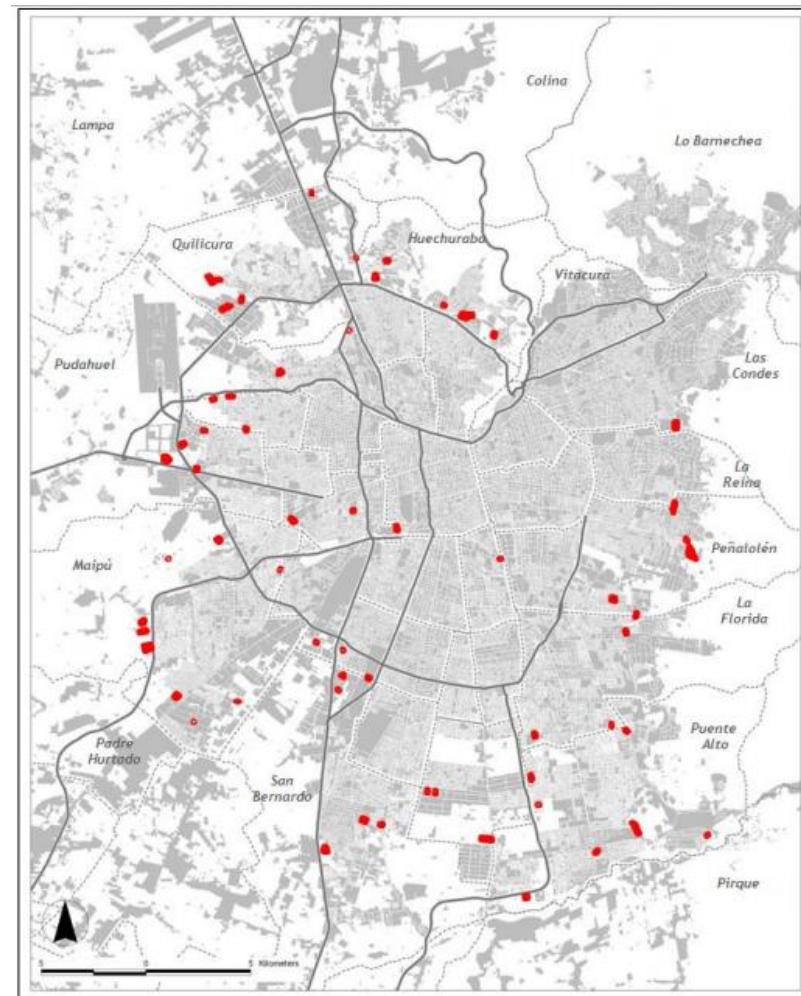
- ¿Cuál será el efecto de la electrificación del transporte público en el sistema eléctrico?

6681 Buses y 377 servicios al 2017

Operador	Servicios
Buses Vule S.A.	Unidad de Negocio 3 y responsable de los servicios 300, E, H e I.
Subus Chile S.A.	Unidad de Negocio 2 y responsable de los servicios 200 y G.
Express de Santiago Uno S.A.	Unidad de Negocio 4 y responsable de los servicios 400 y D.
Metbus S.A.	Unidad de Negocio 5 y responsable de los servicios 500 y J.
Redbus Urbano S.A.	Unidad de Negocio 6 y responsable de los servicios B y C.
Servicio de Transporte de Personas S.A.	Unidad de Negocio 7 y responsable de los servicios F.

Dirección de Transporte Público Metropolitano www.dtpm.cl

Reporte Terminales Transantiago. Atisba (2015)



Electrificación del Transporte Público



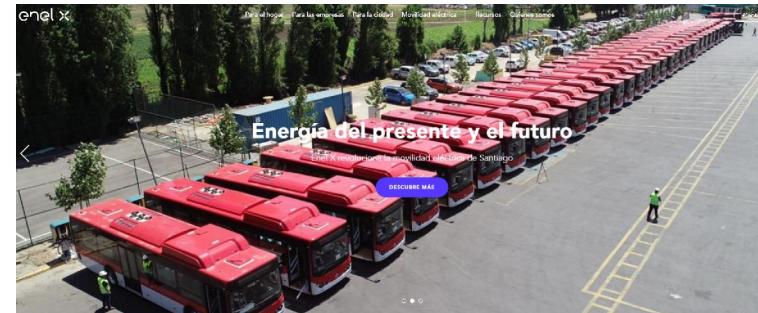
• Requerimientos Actuales

Otros 100 nuevos buses eléctricos se suman a la flota de Transantiago

Author: Francisca Labarca



Los nuevos buses comenzarán a funcionar en marzo y conectarán a



	Metbus	Vule	STP
Número de buses eléctricos	100	75	25
Numero Electro terminales	2	1	1
Número de cargadores	61 x 80 kW + 1x 350 kW 35 x 80 kW	37 x 150 kW	13 x 150 kW
Potencia de electroterminal	4,88 MW 2,8 MW	5,55 MW	1,95 MW

Hoy ya existen 200 buses eléctricos: se observa 1 cargador de 80 kW por bus o 1 cargador de 150 kW cada dos buses (valores unitarios similares)

Electrificación del Transporte Público



- ¿Cuál será el efecto de la electrificación del transporte público en el sistema eléctrico?

6681 Buses y 377 servicios al 2017

Operador	Servicios
Buses Vule S.A.	Unidad de Negocio 3 y responsable de los servicios 300, E, H e I.
Subus Chile S.A.	Unidad de Negocio 2 y responsable de los servicios 200 y G.
Express de Santiago Uno S.A.	Unidad de Negocio 4 y responsable de los servicios 400 y D.
Metbus S.A.	Unidad de Negocio 5 y responsable de los servicios 500 y J.
Redbus Urbano S.A.	Unidad de Negocio 6 y responsable de los servicios B y C.
Servicio de Transporte de Personas S.A.	Unidad de Negocio 7 y responsable de los servicios F.

Dirección de Transporte Público Metropolitano www.dtpm.cl

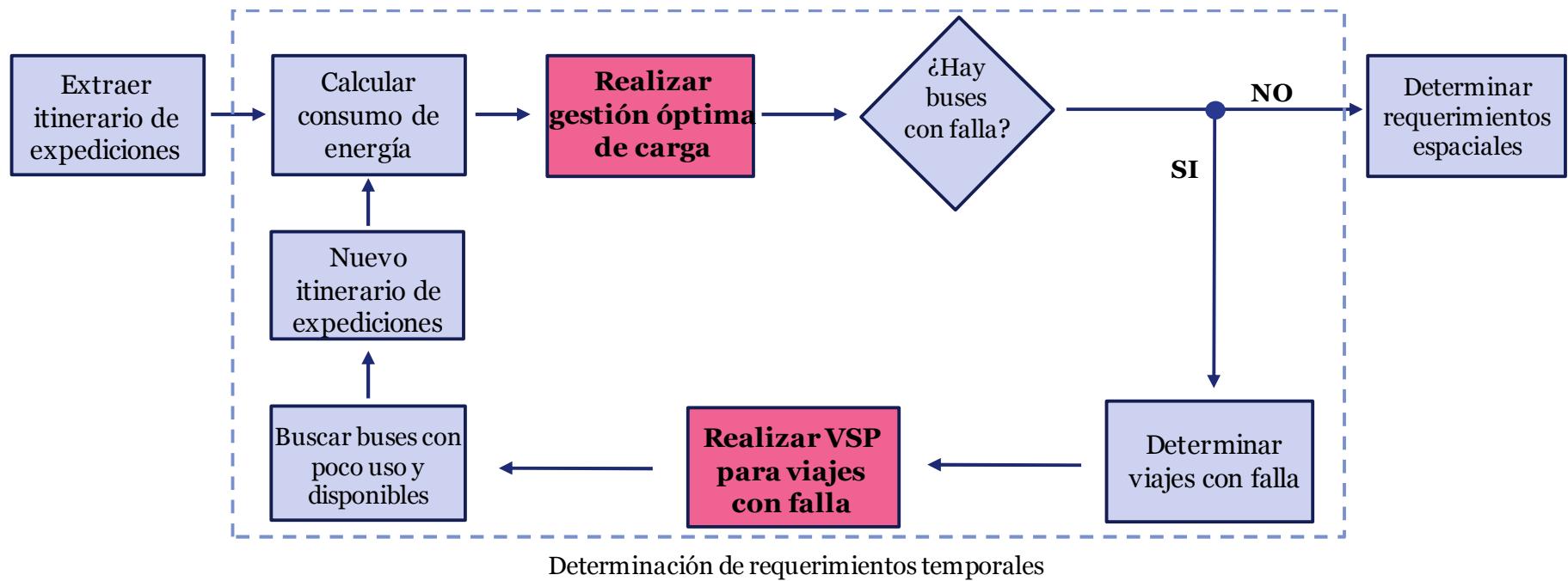
Aplicando Fuerza Bruta

- Considerando 1 cargador cada dos buses (práctica actual en Chile)
- Cargador de Tamaño 150 kW
- Potencia máxima esperada (si todo el parque se electrifica y es necesario durante un mismo día): **501 MW**

Electrificación del Transporte Público



- **Objetivo:** Determinar los requerimientos temporales y espaciales, de potencia y energía, producto de la electrificación del Transantiago a través del uso de información GPS de la flota actual



Modelo de Gestión de Carga



- Se minimizan las compras de energía y potencia

$$\min \sum_b \sum_t C_e \cdot P_{ch,b,t} + C_1 \cdot P_{punta} + \sum_b \sum_t C_3 \cdot P_{falla,b,t} + C_4 \cdot P_{suministrada}$$

$$P_{ch,b,t} \leq P_{máx} \cdot BusEstacionado_{b,t} \quad \forall b, t$$

$$SOC_{b,t=t_0} = SOC_{máx} \quad \forall b$$

$$SOC_{b,t=t_{ini}} = SOC_{b,t=t_{fin}} \quad \forall b$$

$$SOC_{b,t} \leq SOC_{máx} \quad \forall b$$

$$SOC_{b,t} = SOC_{b,t-1} - consumo_{b,t} + P_{ch,b,t} + P_{falla,b,t} \quad \forall b, t$$

$$\sum_b P_{ch,b,t} \leq P_{punta} \quad \forall t \in T_{punta}$$

$$\sum_b P_{ch,b,t} \leq P_{suministrada} \quad \forall t$$

Modelo de Gestión de Carga



- Se determinan los viajes que tienen problemas y se resuelve el “**Vehicle Scheduling Problem**”, minimizando la cantidad de buses para cumplir con los viajes con problemas.

$$\min \sum_{ij \in A} c_{ij} x_{ij}$$

(1)

$$\text{s.t. } \sum_{i \in S} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in T$$

(2)

$$\sum_{j \in T} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in S$$

(3)

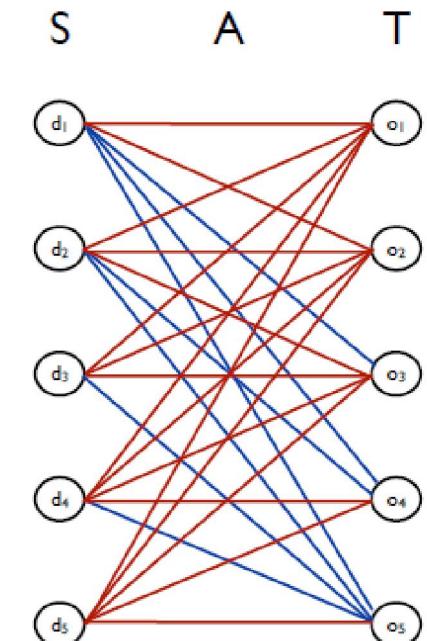
$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A.$$

(4)

To minimize the fleet size we set:

① $c_{ij} = 0$ for each $(i, j) \in A_1$

② $c_{ij} = 1$ for each $(i, j) \in A_2$



Modelo de Gestión de Carga



Supuestos del análisis:

Homologación preliminar
de buses con su par
eléctrico aproximado

Alternativa de bus eléctrico	Tipo de bus	Rendimiento [kWh/km]	Capacidad de almacenamiento [kWh]
BYD K7	A1	0,82	180
BYD K9S	A2	1,02	232
BYD K9	B1	1,29	324
	B2		
BYD K11	C2	1,63	578

TIPOLOGÍA DE BUSES SEGÚN LONGITUD Y CARACTERÍSTICAS DE SU CARROZERÍA



Clases de buses, según DS 122/1991

Subclases de buses

Longitud en Metros (m)

CLASE A $\geq 8 \text{ m y } < 11 \text{ m}$	A1	$< 9 \text{ m}$
	A2	$\geq 9 \text{ m y } < 11 \text{ m}$



CLASE B

$\geq 11 \text{ m y } < 14 \text{ m}$

B1 $\geq 11 \text{ m y } < 12 \text{ m}$

B2 $\geq 12 \text{ m y } < 14 \text{ m}$

B2P $\geq 12 \text{ m y } < 14 \text{ m, con puertas de servicio a ambos lados de su carrocería.}$

CLASE C $\geq 14 \text{ m y } < 18 \text{ m}$	C1	$\geq 14 \text{ m y } < 16,5 \text{ m}$
	C2	$> 16,5 \text{ m y } < 18 \text{ m}$
	C2P	$> 16,5 \text{ m y } < 18 \text{ m, con puertas de servicio a ambos lados de su carrocería.}$



CLASE D

$\geq 11 \text{ m y } < 13 \text{ m de doble piso}$

D	$\geq 11 \text{ m y } < 13 \text{ m de doble piso}$
---	---

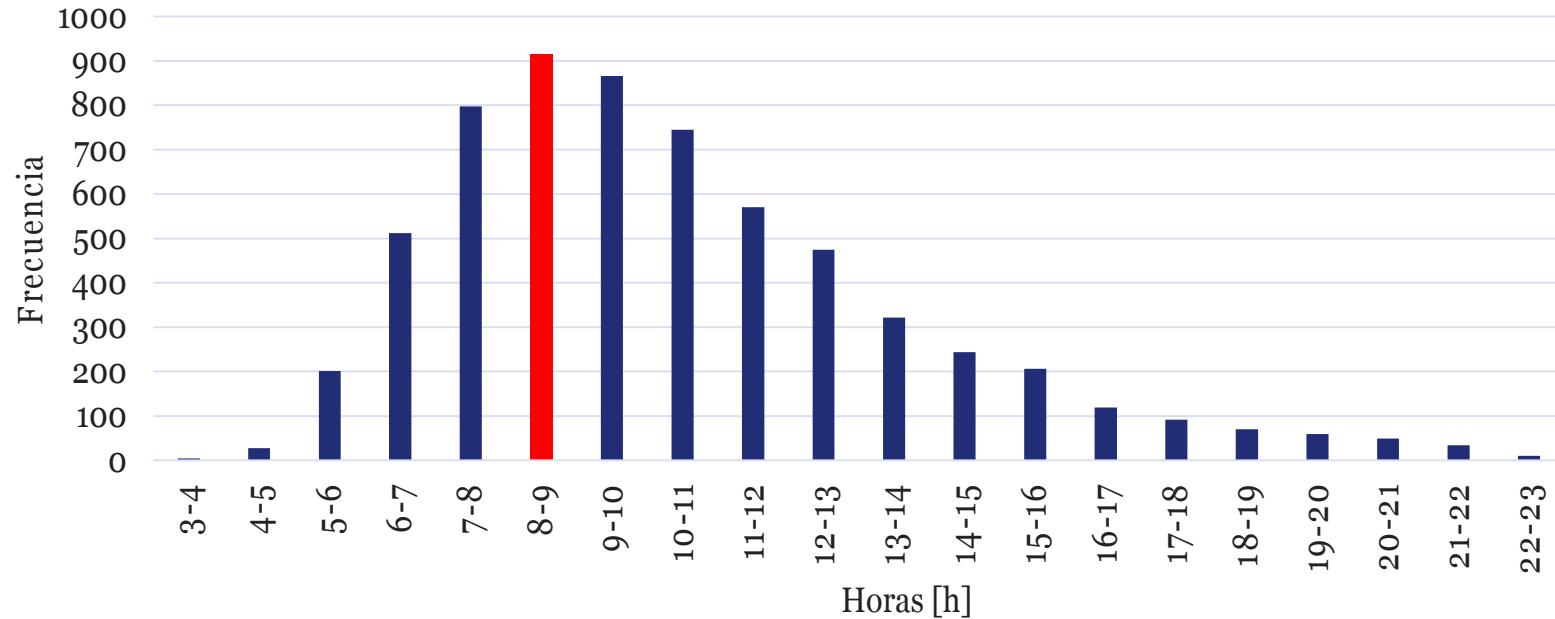
Activar Windows.

Modelo de Gestión de Carga



- Buses Estacionados

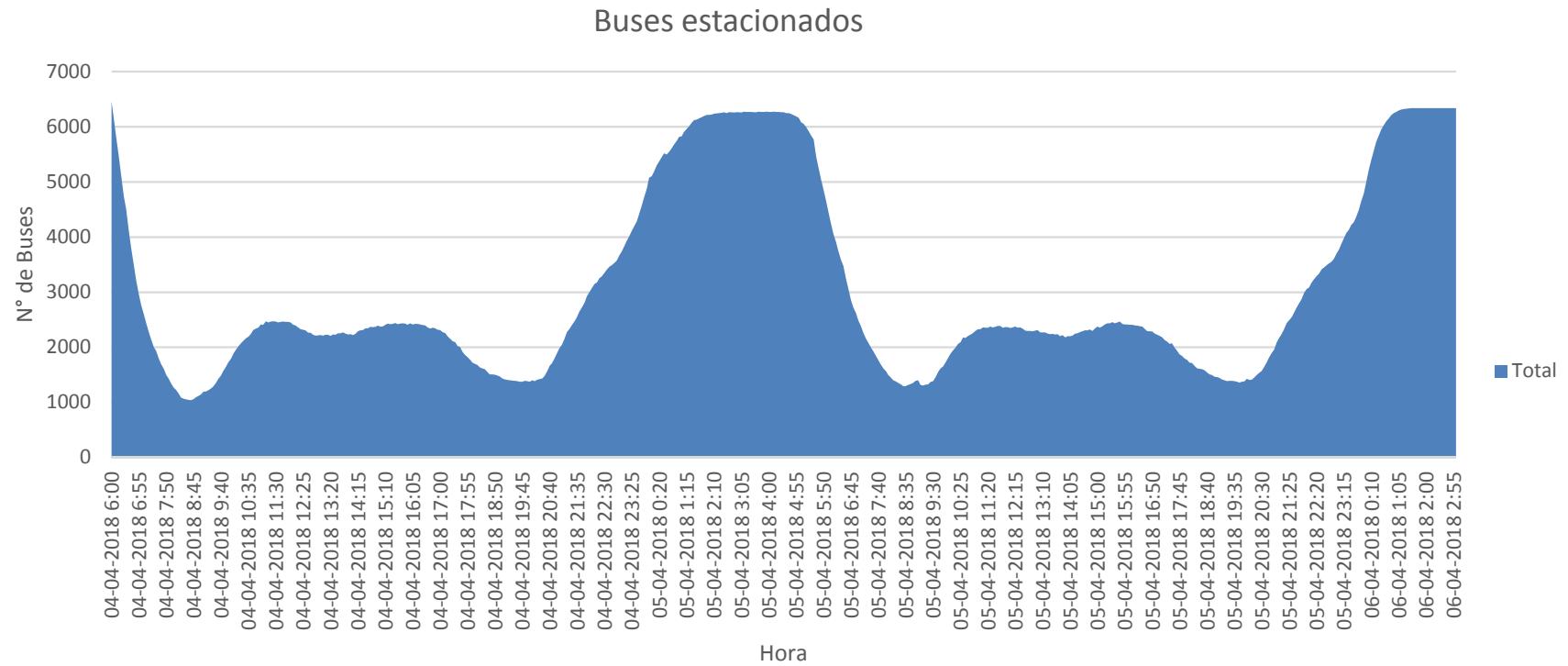
Distribución de horas estacionadas totales de la flota



Modelo de Gestión de Carga



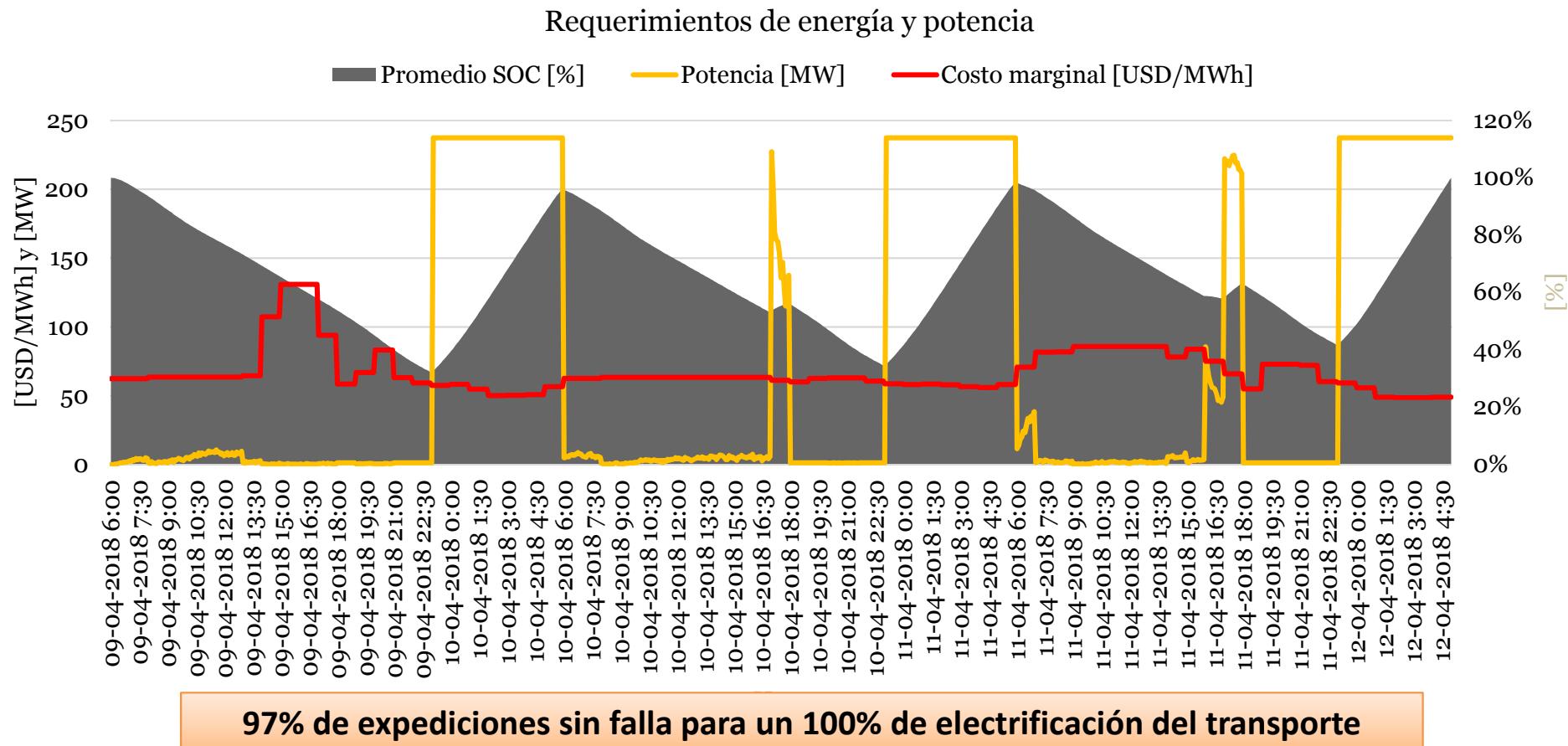
- Buses Estacionados



Resultados Preliminares



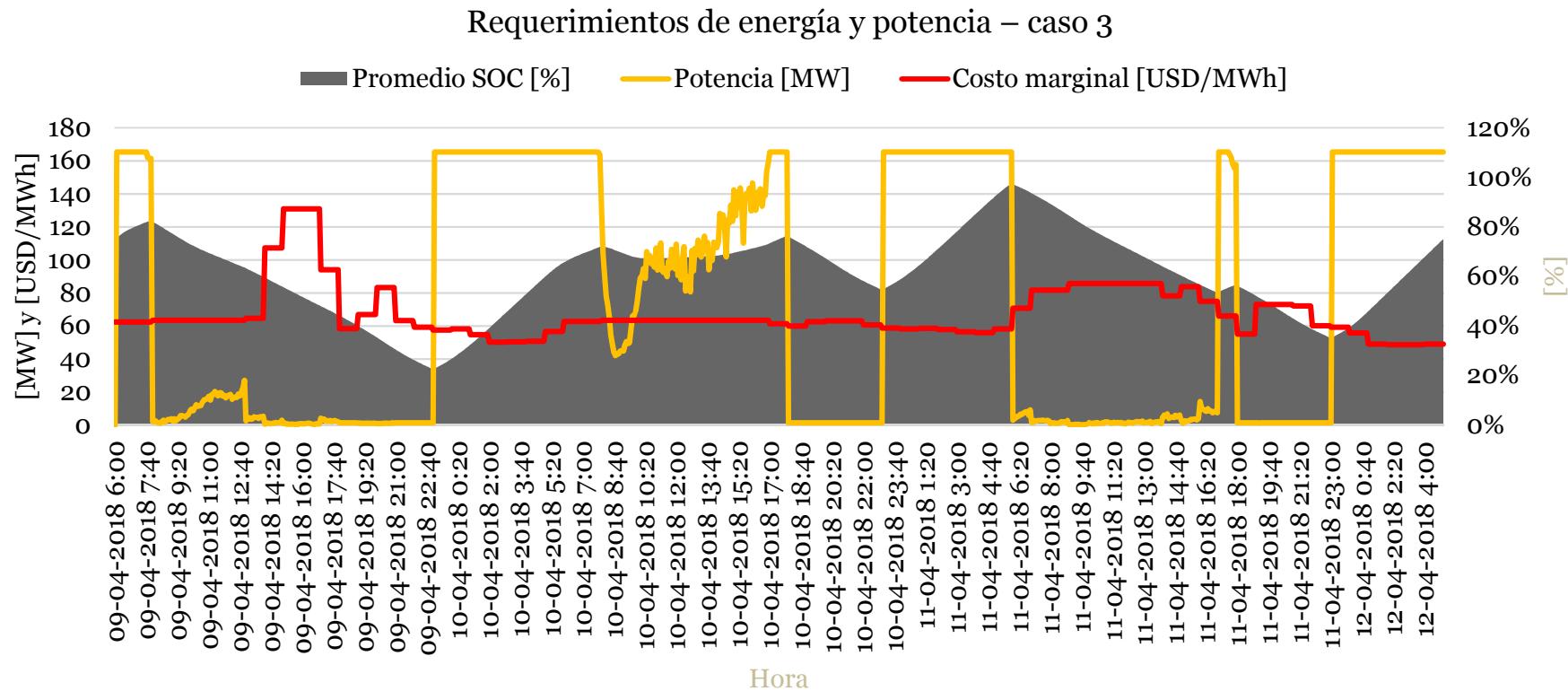
- Consideramos una ventana de tres días y al final del período el estado de carga de la flota completa de 100%



Resultados Preliminares



- Consideramos una ventana de tres días y al final del período el estado de carga de la flota completa de 75%

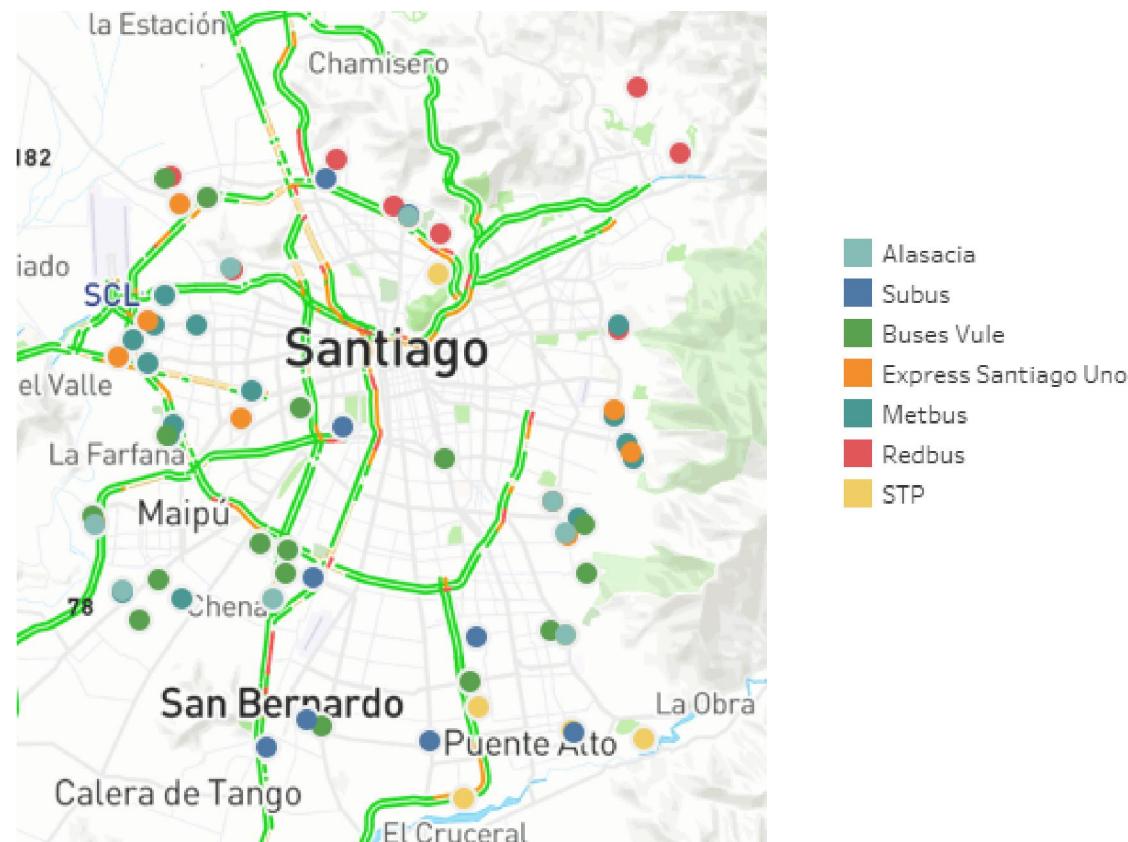


96% de expediciones sin falla para un 100% de electrificación del transporte

Resultados Preliminares



- **Próximo paso:** distribución de la carga en el espacio de Santiago



Determinación de Requerimientos Espaciales en el Sistema de Distribución

Consideraciones Finales



- La electrificación del transporte será pronto una realidad en nuestro país y debemos estar preparados.
- Los sistemas de distribución se verán impactados pero se hace imprescindible cuantificar la extensión de tales impactos (algunas redes tendrán problemas y otras no).
- La electrificación del transporte debe venir acompañada de una descarbonización de la matriz para evitar reemplazar combustibles de ciudad por generación fósil en otro lugar ☹.
- Es fundamental optimizar las estaciones de carga para el transporte público de manera de no sobre invertir en infraestructura, la que debe ser financiada finalmente por todos los usuarios.



Electrificación del Transportes y sus Efectos en el Sistema Distribución



Alejandro Navarro, PhD.
anavarro@centroenergia.cl, anavarro@systep.cl

Director Asociado
Systep – Ingeniería y Diseños
Investigador Senior
Centro de Energía de la Universidad de Chile
Profesor Sistemas de Distribución y Redes inteligentes
Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad de Chile

