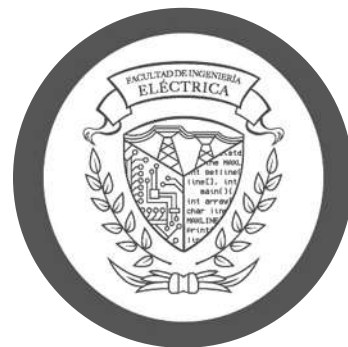




UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

“IMPACTO ECONÓMICO EN LA INTEGRACIÓN DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS A LA RED ELÉCTRICA DE
DISTRIBUCIÓN”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIATURA EN
INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA

JORGE MIGUEL AVENDAÑO GÜITRON

ASESOR

DR. JUAN CARLOS SILVA CHÁVEZ

Morelia, Michoacán, junio de 2022

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación va dedicado a mis padres, mis hermanos, mis abuelos que desde el cielo sé que están orgullosos de mí, mi esposa, y mi familia en general. Gracias a que, sin sus ánimos, sin su apoyo moral, espiritual y físico, no se hubiera dado la posibilidad de concretar este momento en mi vida, por ello, las horas, los momentos y las experiencias que han contribuido a llevar a su final algo tan simple, pero con un muy gran significado como lo es esta investigación, forman parte de esta dedicatoria.

AGRADECIMIENTOS

Es de agradecer en primera instancia a Dios, por haber dado la oportunidad de presenciar a todos los que testifican la conclusión de un trabajo de investigación que hace referencia a todas las situaciones, experiencias, vivencias y momentos que a lo largo del tiempo que ha significado concluir una etapa tan importante como lo es el estudio de una licenciatura, me han acompañado, sostenido, y han estirado sus brazos por completo para ayudarme a salir de los momentos en los que me he encontrado en el fondo de un océano llamado vida.

Es gracias a mis padres, mis hermanos, mis abuelos, mi esposa, mis tíos, primos y demás familia, que hoy, podemos disfrutar de un triunfo como este, y en agradecimiento a todos ellos también, es que nace la intención de llevar a su conclusión un proceso tan complejo como este.

Así mismo es de suma importancia extender un gran agradecimiento a mi asesor y maestro, el Dr. Juan Carlos Silva Chávez, ya que, sin su extenso apoyo, motivación y “jalones de orejas” durante todas las materias que me impartió y por supuesto en este trabajo, no hubiera sido posible la culminación de esta etapa tan importante y significativa en mi vida.

“Gracias por siempre mantener la frente en alto ante la adversidad, y gracias por presionar tus límites como una analogía de un reto que siempre estarás dispuesto a vencer.”

RESUMEN

En el entendido de la creciente necesidad por disminuir la huella tan grande que va dejando el ser humano en la única casa que nos es prestada y cuyas condiciones cada día son más deplorables, aún existen vestigios de esperanza en los que la humanidad puede intentar corregir el gran daño que ha causado y de esta manera poder dejar condiciones dignas y aptas a las siguientes generaciones, para su propia supervivencia y coexistencia.

Uno de los principales factores responsables del cambio climático es el uso de los combustibles fósiles, ya que, para generar energía eléctrica, o la combustión de los mismos para llevar a cabo un proceso, han provocado desde su implementación cambios drásticos en el medio ambiente de nuestro planeta, debido a esto el ser humano se ha visto en la necesidad de buscar alternativas que ayuden a frenar dichos fenómenos.

Por tal motivo, se han desarrollado métodos para generar distintos tipos de energía a partir de recursos naturales y renovables como el agua, el sol, el aire, el vapor natural, etc.

Este trabajo de investigación tiene como fin dar un punto de referencia en la problemática que supondría la utilización de la energía eléctrica para la carga de las baterías de los vehículos que la usan como una alternativa en la movilidad para el autotransporte. Aunque el porcentaje de vehículos que funcionan con energía eléctrica es muy pequeño a diferencia de los de combustión interna, cabe destacar que la aplicación de los motores eléctricos en los vehículos da como resultado un proceso más eficiente, más controlado y por supuesto, libre de emisiones contaminantes durante su uso.

Pero no todo puede ser perfecto ya que, con este modo de utilización de la energía se derivarían problemas como sobrecarga de la red, inestabilidad del sistema, interrupciones en el suministro, entre otros, que de manera directa e indirecta, afectarían a la sociedad sin que siquiera estén conscientes de ello.

Por lo tanto, este trabajo de investigación busca simular una problemática real que se tendría al interconectar vehículos eléctricos a la red eléctrica para realizar sus ciclos de carga, la cual, al no estar preparada para una demanda repentina de energía, supondría problemas como los anteriormente mencionados.

Así mismo, se busca obtener un resultado que pueda ayudar a corregir dichos problemas, para que cualquier persona no tenga que preocuparse más que por llegar a su casa y conectar su automóvil para que éste se recargue.

ABSTRACT

In the understanding of the growing need to reduce the large footprint that human beings are making in the only house that is loaned to us and whose conditions are more deplorable every day, there are still pulses of hope in which humanity can try to correct the problem, the great damage that it has caused and, in this way, to be able to leave decent and suitable conditions to the following generations for their own survival and coexistence.

One of the main factors responsible for climate change is the use of fossil fuels, to generate electricity, or their combustion to carry out a process, they have caused drastic changes in the environment since their implementation in our planet, due to this the human has seen the need to look for alternatives that help to stop these phenomena.

For this reason, ways have been developed to generate different types of energy from natural and renewable resources such as water, sun, air, natural steam, etc.

The purpose of this research work is to provide a point of reference in the problems that the use of electrical energy would supposed to charge the batteries of the vehicles that use it as an alternative in mobility for motor transport. Although the percentage of vehicles that run on electricity is very small, unlike those with internal combustion, it should be noted that the application of electric motors in vehicles results in a more efficient, more controlled and, of course, emission-free process. contaminants during use.

But not everything can be perfect since, with this way of using energy, problems such as network overload, system instability, interruptions in supply, among others, would arise directly and indirectly, affecting society without that we are still aware of it.

Therefore, this research work seeks to simulate a real problem that arises when interconnecting electric vehicles to the electrical network to carry out their charging cycles, which, not being prepared for a sudden demand for energy, would cause problems such as the previous ones. taken away.

Likewise, it seeks to obtain a result that can help correct these problems, so that anyone does not have to worry more than getting home and connecting their car so that it can be recharged.

PALABRAS CLAVE

- Sistema eléctrico de distribución. Baterías. Energías renovables. Vehículos eléctricos. Red eléctrica. Optimización numérica

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
PALABRAS CLAVE.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIII
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	14
1.1. INTRODUCCIÓN	14
1.2. CONTEXTO	14
1.3. ENFOQUES DE GESTIÓN DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ...	17
.....	
1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.5. OBJETIVOS.....	18
1.5.1. OBJETIVOS GENERALES.....	18
1.5.2. OBJETIVOS PARTICULARES	19
1.6. JUSTIFICACIÓN	20
1.7. METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	21
1.8. CONFORMACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	21
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	22
2.1. INTRODUCCIÓN	22
2.2. LAS BATERÍAS RECARGABLES PROPICIARON EL AUGE DEL	
VEHÍCULO ELÉCTRICO	22
2.3. EL “ONE HUNDRED MILE FRITCHLE” O EL TESLA MODEL S DE 1908..	
.....	23
2.4. EL COCHE DE GASOLINA LE GANA LA BATALLA AL COCHE	
ELÉCTRICO	23
2.5. LA “TRAVESÍA DEL DESIERTO”.....	23
2.6. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO REGRESÓ PARA QUEDARSE	24
2.7. ANATOMÍA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO.....	24

2.7.1.	ELEMENTOS UN AUTO ELÉCTRICO	24
2.7.2.	TOMA DE CORRIENTE O PUERTO DE CARGA.....	25
2.7.3.	CARGADOR DE A BORDO (O POWER ELECTRONIC CONVERTER)	25
2.7.4.	PACK DE BATERÍA O BATERÍA DE TRACCIÓN	26
2.7.5.	INVERSOR DE CORRIENTE	29
2.7.6.	UNIDAD DE CONTROL DEL MOTOR	29
2.7.7.	MOTOR ELÉCTRICO.....	29
2.7.8.	TRANSMISIÓN.....	31
2.7.9.	BATERÍA AUXILIAR	31
2.7.10.	UNIDAD CENTRAL DE CONTROL O ECU	31
2.7.11.	FLUJO DE ENERGÍA.....	32
2.7.12.	CANBUS	32
2.7.13.	SGB (SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS)	33
2.8.	CARGADORES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	33
2.8.1.	CARGA DE NIVEL 1 - CA DE 120 V	33
2.8.2.	CARGA DE NIVEL 2 - CA DE 240 V	34
2.8.3.	CARGA DE NIVEL 3 O CARGA RÁPIDA DE CC.....	34
2.8.4.	TIPOS DE CONECTORES PARA AUTOS ELÉCTRICOS.....	34
2.8.5.	TIPOS DE CABLES DE CARGA PARA AUTOS ELÉCTRICOS	36
2.9.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	36
2.9.1.	VENTAJAS DE ADQUIRIR UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	37
2.9.2.	DESVENTAJAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	38
2.10.	“INVERSIÓN” A MEDIANO PLAZO: COMBUSTIÓN VS ELÉCTRICIDAD	39
2.10.1.	VEHÍCULOS EXISTENTES EN MÉXICO	39
2.10.2.	DIFERENTES MECÁNICAS, DIFERENTES ENFOQUES.....	39
2.10.3.	BENEFICIO ECONÓMICO A MEDIANO PLAZO	40
2.11.	NECESIDAD DE LA GESTIÓN DE CARGA DE LAS BATERÍAS.....	41
2.12.	IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN	42
CAPÍTULO 3. ENFOQUE CENTRALIZADO		44
3.1.	INTRODUCCIÓN	44

3.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	45
3.2.1.	RESTRICCIONES EN EL CARGADOR	45
3.2.2.	RESTRICCIONES EN LOS ESTADOS DE CARGA PARCIAL Y FINAL	46
3.2.3.	RESTRICCIONES EN LOS NIVELES DE VOLTAJE	47
3.3.	DETALLES SOBRE EL ENFOQUE DE MODELADO DEL NIVEL DE VOLTAJE.....	48
3.3.1.	MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y DE LA CARGA RESIDENCIAL COMO FUENTES DE CORRIENTE	53
3.4.	EJEMPLO ILUSTRATIVO CON TOPOLOGÍA RADIAL EN UNA RED DE 8 NODOS.....	57
3.4.1.	CASO DE RED 1 – VEHÍCULO ELÉCTRICO ENCHUFABLE SIN GESTIÓN DE CARGA	60
3.4.2.	CASO DE RED 1 – GESTIÓN DE CARGA – TARIFA ÚNICA.....	62
3.4.3.	CASO DE RED 1 – GESTIÓN DE CARGA – ESCENARIO DE DOS TARIFAS	64
3.4.4.	CASO DE RED 2 – GESTIÓN DE CARGA	66
	CAPÍTULO 4. EJEMPLIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	69
4.1.	CONTEXTO	69
4.2.	INTRODUCCIÓN	69
4.3.	CASO DE ESTUDIO DE 10 NODOS Y TARIFA ÚNICA.....	70
4.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL CASO.....	71
4.3.2.	RESULTADOS	73
4.4.	CASO DE ESTUDIO DE 10 NODOS Y TARIFA DOBLE.....	73
4.4.1.	RESULTADOS	75
4.5.	CASO DE ESTUDIO DE 12 NODOS Y TARIFA ÚNICA	75
4.5.1.	DESCRIPCIÓN DEL CASO.....	76
4.5.2.	RESULTADOS	78
4.6.	CASO DE ESTUDIO DE 12 NODOS Y TARIFA DOBLE	78
4.6.1.	RESULTADOS	80
4.7.	CASO DE ESTUDIO DE 16 NODOS Y TARIFA ÚNICA	80
4.7.1.	DESCRIPCIÓN DEL CASO.....	81
4.7.2.	RESULTADOS	83
4.8.	CASO DE ESTUDIO DE 16 NODOS Y TARIFA DOBLE	83

4.8.1. RESULTADOS	85
4.9. CASO DE ESTUDIO DE 24 NODOS Y TARIFA ÚNICA	85
4.9.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO	86
4.9.2. RESULTADOS	88
4.10. CASO DE ESTUDIO DE 24 NODOS Y TARIFA DOBLE	90
4.10.1. RESULTADOS	91
CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN A FUTURO	92
5.1. CONCLUSIONES.....	92
5.2. PROYECCIÓN A FUTURO	92
BIBLIOGRAFÍA	94
ANEXOS	96
ANEXO A.....	96
ANEXO B.....	98
ANEXO C.....	107
ANEXO D.....	115
ANEXO E.....	118
ANEXO F.....	121
ANEXO G	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. 1 Sistema de potencia convencional	15
Fig. 1. 2 Sistemas de potencia inteligente (Smart Grid).	16
Fig. 2. 1 Anatomía de un vehículo eléctrico	25
Fig. 2. 2 Flujo de energía del vehículo eléctrico	32
Fig. 2. 3 Tipos de enchufes para autos eléctricos	36
Fig. 3. 1 (a) Topología radial de una línea de baja tensión. (b) Aproximación lineal para transformadores, líneas y elementos de carga.	49
Fig. 3. 2 Diagrama representativo de las corrientes que fluyen a través de un nodo en el modelo aproximado de la red.	50
Fig. 3. 3 Diagrama representativo de las corrientes que fluyen a través de un nodo en el modelo aproximado de la red. Representación alternativa de la carga residencial como fuente de corriente.....	54
Fig. 3. 4 Tabla de las interacciones y el flujo de información en el enfoque centralizado propuesto para la administración de carga para VEE.	56
Fig. 3. 5 Red radial propuesta para probar el método. © [2017] IEEE.	57
Fig. 3. 6 Ejemplo de un perfil de carga de una residencia. El segmento continuo corresponde al periodo de carga para VEE.	58
Fig. 3. 7 Perfiles de voltaje para el caso 1 de la red de prueba sin VEE conectados. Los perfiles no evidencian problemas de voltaje. El límite inferior de voltaje (208 V.) está representado por una línea discontinua.....	59
Fig. 3. 8 Perfiles de voltaje para el caso 2 de la red de prueba sin VEE conectados. Ciertos perfiles exceden los límites establecidos. El límite inferior de voltaje (208 V.) está representado por una línea discontinua.....	60
Fig. 3. 9 Caso 1 sin gestión de carga. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.	62
Fig. 3. 10 Caso 1 con gestión de carga y tarifa única. a) Perfiles de potencia, b) Perfiles de estados de carga, c) Perfiles de voltaje	63
Fig. 3. 11 Caso 1 con gestión de carga y dos tarifas. a) Perfiles de potencia, b) Perfiles de estados de carga, c) Perfiles de voltaje.....	65
Fig. 3. 12 Caso 2 con gestión de carga y tarifa única. a) Perfiles de potencia, b) Perfiles de estados de carga, c) Perfiles de voltaje.....	67
Fig. 4. 1 Red de 10 nodos.	70
Fig. 4. 2 Caso de 10 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.....	72
Fig. 4. 3 Caso de 10 nodos y doble tarifa. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.	74
Fig. 4. 4 Red de 12 nodos	75
Fig. 4. 5 Caso de 12 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.....	77
Fig. 4. 6 Caso de 12 nodos y tarifa doble. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.	79
Fig. 4. 7 Red de 16 nodos	81

Fig. 4. 8 Caso de 16 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.....	83
Fig. 4. 9 Caso de 16 nodos y tarifa doble. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje	84
Fig. 4. 10 Red de 24 nodos	86
Fig. 4. 11 Caso de 24 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.....	88
Fig. 4. 12.1 Carga base y Carga total de VE'S	89
Fig. 4. 13 Caso de 24 nodos y tarifa doble. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1 Parámetros de línea de la red ($0.78(\Omega)/\text{km}$).	59
Tabla 4. 1 Datos de caso de 10 nodos	71
Tabla 4. 2 Datos de caso de 12 nodos.....	76
Tabla 4. 3 Datos de caso de 16 nodos.....	81
Tabla 4. 4 Datos de caso de 24 nodos.....	86

LISTA DE ABREVIATURAS

- VE: Vehículo eléctrico
- VEE: Vehículo eléctrico enchufable
- VEHE: Vehículo eléctrico híbrido enchufable
- VECC: Vehículo eléctrico de celda de combustible
- SOC: Estado de carga
- SGB: Sistema de gestión de batería
- CA: Corriente alterna
- CC: Corriente continua
- kW: Kilowatt
- Wh: Watt-hora
- kWh: Kilowatt-hora
- IVE: Iniciativa de vehículos eléctricos
- GEI: Gases de efecto invernadero

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

A partir del aprovechamiento de los recursos naturales que existen, el ser humano ha creado o modificado los medios necesarios para su utilización. Haciendo referencia a la generación de energía eléctrica a partir de la conversión de la propia energía proveniente de los recursos naturales, se ha logrado desarrollar nuevas tecnologías, nuevos dispositivos que facilitan la vida del ser humano día a día. Y una de las formas en las que ayuda la utilización y conversión de los recursos naturales en energía, ha sido en la manera en que las personas se mueven, más específico, en los automóviles que desarrolló el ser humano para poder llegar en menor tiempo de un punto A al punto B.

Los vehículos eléctricos han existido desde hace ya bastante tiempo, por lo que no es nuevo el hecho de que el ser humano desee utilizar la energía eléctrica como una alternativa a la combustión interna para poder trasladarse de un lugar a otro. Por lo que tal cuál sucede con los vehículos a combustión interna, en el caso de los eléctricos también se tienen ciertas desventajas que entran en juego a la hora de utilizarlos de manera cotidiana.

Por lo que este capítulo tiene como objetivo proporcionar una descripción general del contexto sobre el que se han desarrollado los algoritmos que ayudarán a resolver la problemática planteada en este trabajo de investigación. También se ofrece una descripción de los elementos que participan en el funcionamiento para la gestión de la carga de los vehículos eléctricos y la manera en que se integran a los sistemas de distribución de energía eléctrica. Además, se evalúan posibles impactos y beneficios que los vehículos eléctricos enchufables (VEE) interconectados puedan aportar a la red. Y finalmente se describe la contribución del mismo.

1.2. CONTEXTO

Los sistemas eléctricos de potencia están constantemente relacionados con el desarrollo e implementación de las tecnologías que han evolucionado para facilitar actividades, ahorrar tiempo, dinero e incluso disminuir la complejidad de los trabajos que realiza el ser humano. Por lo que ahora, el realizar un trabajo como generar electricidad, moverse de un lugar a otro, construir un vehículo, o manufacturar

cualquier objeto de uso cotidiano, se ha vuelto más eficiente, eficaz, seguro y confiable. Y esto se debe gracias al uso de la energía eléctrica, a los recursos naturales y a la forma en que se utilizan.

Los centros de consumo requieren grandes cantidades de energía, la cual es producida en plantas de generación, usualmente, las plantas de generación se localizan cerca de las fuentes de energía disponibles para su utilización, como pueden ser el agua, el viento, o el sol, pero también, se utilizan otras fuentes de energía para la conversión a energía eléctrica, como lo son, combustibles nucleares y combustibles fósiles. Estas plantas de energía deben cumplir de manera óptima los criterios técnicos y económicos, para equilibrar los requerimientos de demanda de energía del sistema [1].

La energía producida es transportada a través de infraestructura de transmisión de alta tensión y baja corriente hasta los centros de consumo. Al llegar a estos centros de consumo se transforma a media y baja tensión para que se pueda distribuir a los usuarios finales. Este proceso se muestra en la Fig. 1.1.

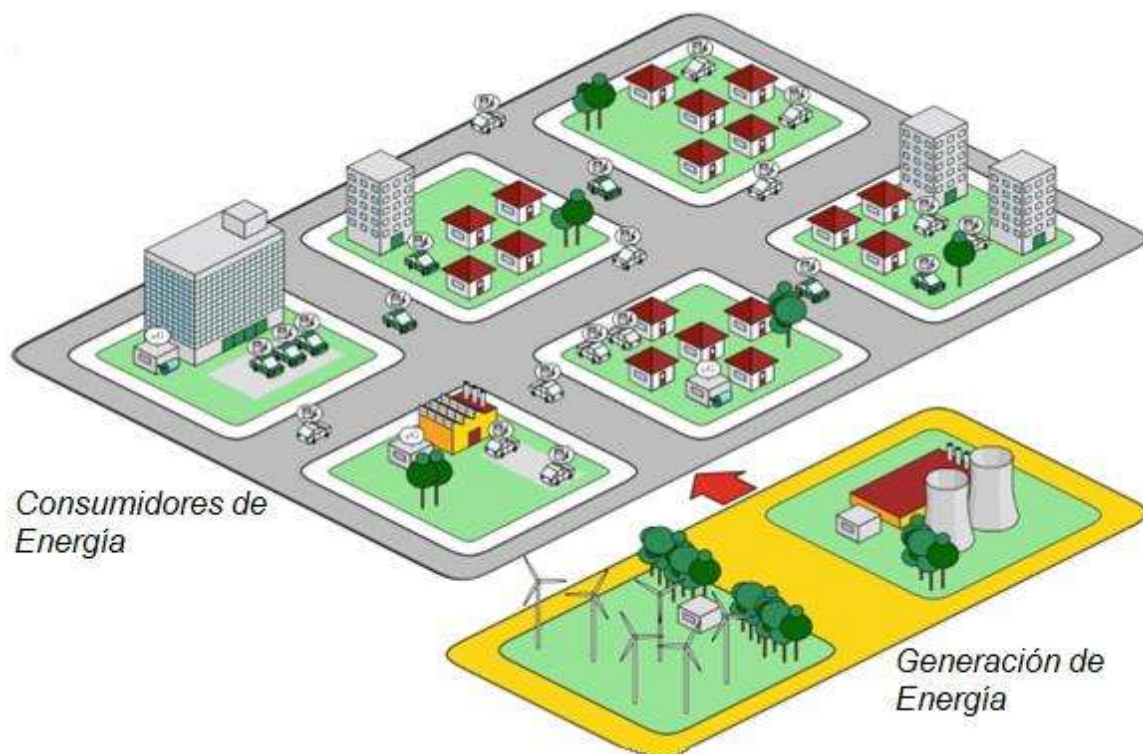


Fig. 1. 1 Sistema de potencia convencional

Los avances tecnológicos han permitido que en los sistemas de energía modernos se integren sistemas de micro generación. La instalación de micro fuentes de energías renovables dispersas a lo largo de los sistemas de distribución de

electricidad se ha incentivado por las políticas de energía sustentable de los gobiernos que buscan reducir la huella de carbono. Además de las micro fuentes de energía como los paneles fotovoltaicos, pequeñas turbinas eólicas, generadores a gasolina, etc., otros nuevos elementos incluyen sistemas de almacenamiento de energía como baterías y super condensadores, infraestructuras rápidas y robustas, y sistemas de comunicación con o sin capacidades integradas de almacenamiento de energía, por ejemplo: los vehículos eléctricos e híbridos enchufables o los trenes eléctricos (Fig. 1.2) [1].

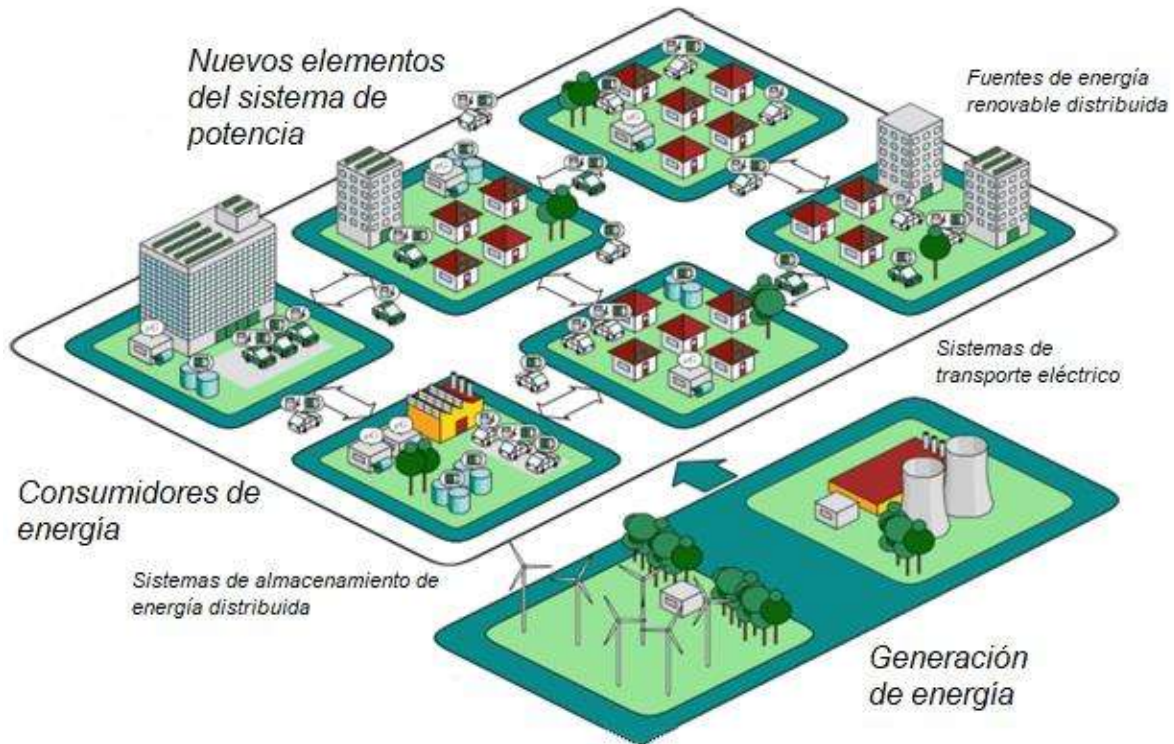


Fig. 1. 2 Sistemas de potencia inteligente (Smart Grid).

Estos dispositivos generan, suministran y consumen energía dentro de los centros de consumo. Consecuentemente, en el control y modelado de los dispositivos aparecen varios retos en la infraestructura de distribución eléctrica. El primer reto consiste en el control de dichos dispositivos distribuidos con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y obtener costos más óptimos. El segundo reto se refiere al modelado de estos dispositivos y su sinergia con el sistema de distribución de energía [2, 3, 4, 5].

En el presente trabajo se aprovechará la inclusión de los sistemas de almacenamiento de energía de los vehículos eléctricos en los sistemas de distribución para estudiar formas de optimizar la eficiencia y costos en dichas redes,

y que también pudiera aplicarse a sistemas de almacenamiento de energía de otros conjuntos como sistemas de generación fotovoltaica.

Este concepto de sistema de distribución inteligente de energía implica que la energía se moverá de un sentido a otro en las diferentes regiones del sistema, de una manera eficaz que resulta en que colateralmente los dispositivos que se benefician de dicho sistema, ven incrementados sus valores sociales, técnicos y económicos [1, 2].

Para enfrentar estos retos, la previsión, la medición inteligente y las infraestructuras de comunicación sólidas son las herramientas más importantes que los ingenieros y los investigadores tienen hoy en día para llevar a cabo el correcto control y monitoreo de funcionamiento de la red [6, 7].

1.3. ENFOQUES DE GESTIÓN DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El problema de gestión de carga de los vehículos eléctricos enchufables se ha modelado empleando varios enfoques y metodologías en los últimos años. Los enfoques más populares se describen brevemente a continuación, es posible identificar y clasificar estos enfoques con las siguientes etiquetas descriptivas, cada metodología cae en al menos una de estas categorías que se encuentran comúnmente en la literatura [1].

- Centralizado: Es el enfoque principal que se aborda en este trabajo de investigación, y en el que se basa la gestión de carga de las baterías de los VE.
- Vehículo a red (Vehicle to grid, V2G): Algunos autores clasifican las metodologías como V2G si los VEE se emplean como dispositivos dinámicos de almacenamiento de energía móviles, suministrando servicios auxiliares a la red. Esta etiqueta se suele dar si los VEE descargan sus baterías para proporcionar energía a la red.
- Vehículo a edificio (Vehicle to building, V2B): Se otorga esta etiqueta si la metodología presta servicios a la infraestructura eléctrica de un edificio.
- Unidireccional – bidireccional: Dependiendo de la posibilidad de descarga de las baterías del vehículo eléctrico (VE), la metodología se puede clasificar en unidireccional o bidireccional.

- Encendido – apagado – inactivo: Esta etiqueta se proporciona si la metodología considera sólo las tasas de carga y descarga completas definidas por el tipo de cargador.
- Basado en reglas heurísticas: Esta etiqueta se le da a la metodología si se aplica un enfoque sin garantía de llegar a una solución óptima.
- Impacto – evaluación económica: Se le da esta etiqueta a la metodología si se considera el análisis de los impactos en la infraestructura eléctrica, o si se incluye la evaluación económica de los servicios prestados a la red.

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema principal es obtener un balance óptimo entre el mejor costo y beneficio, tanto para la empresa suministradora de la energía eléctrica como para los usuarios que suministran y/o consumen energía desde la red hasta sus baterías, las cuales conforman el sistema de alimentación principal de los VEE que se van a interconectar al sistema. También se pretende que la actividad eléctrica causada por la interacción de los usuarios en la red del sistema eléctrico no origine fallas ni contribuya a causar más problemas en términos de calidad de la energía.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVOS GENERALES

- ❖ Conocer de qué manera afectaría la conexión de una cantidad determinada de vehículos eléctricos a la red del sistema eléctrico nacional para recargar sus baterías, así como desarrollar las posibles soluciones y alternativas que ayuden a mantener en equilibrio la red y lograr un costo tarifario por utilización de la energía lo más eficiente posible.
- ❖ Proponer una herramienta de análisis que permita la gestión económica de las baterías de un VE, manteniendo la estabilidad de tensión en el nodo de interconexión.
- ❖ Determinar el costo mínimo posible por medio de una metodología para resolución del problema.

1.5.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Observar el comportamiento de manera gráfica y para ello se utilizarán la herramienta computacional MATLAB®.
- ❖ Describir los beneficios de la integración de la gestión de carga de los vehículos a la red.
- ❖ Que este trabajo de investigación funcione como punto de referencia para el aumento en la utilización de los vehículos impulsados por energía eléctrica que se tendrá en los años siguientes.
- ❖ Tener una estimación aproximada a datos reales que puedan servir como una solución real de algún problema relacionado a esta temática.
- ❖ Verificar qué tan factible es el uso de baterías en este caso de vehículos eléctricos como un soporte auxiliar de la red para un sistema de una cierta cantidad de nodos.

1.6. JUSTIFICACIÓN

Las preocupaciones recientes sobre la contaminación ambiental y el aumento del consumo de energía, junto con los avances en la tecnología de las baterías, han iniciado la electrificación del sector del transporte. Los vehículos eléctricos (VE) son una solución destacada para los problemas de sustentabilidad que requieren una atención extrema, como el calentamiento global, el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Con el resurgimiento generalizado de los vehículos eléctricos (VE), se ha notado el impacto adverso de la carga de los vehículos eléctricos en los parámetros operativos del sistema de energía. El impacto perjudicial de la demanda de energía en las estaciones de carga de vehículos eléctricos en la red de distribución de electricidad no puede pasarse por alto. Los altos consumos de las estaciones de carga rápida dan como resultado una mayor demanda de carga máxima, márgenes de reserva reducidos, inestabilidad de voltaje y problemas de confiabilidad. Además, la multa pagada por la empresa de servicios públicos y usuarios de baja tensión originados por la degradación del rendimiento del sistema de energía no puede ignorarse [27]. Considerando que los vehículos eléctricos pueden actuar como un sistema de almacenamiento de energía, es posible considerarlos como un medio para mitigar los desafíos asociados con las energías renovables y para proporcionar a la red servicios auxiliares, como regulación de voltaje, regulación de frecuencia, reserva de energía, etc; la red de distribución requiere de un modelado de la integración óptima de los vehículos eléctricos en la red y los costos asociados al consumo y posible venta de la energía almacenada. Este trabajo de tesis implementa una forma de calcular los costos asociados al consumo y venta de la energía contenida en el banco de baterías del vehículo eléctrico considerando la estabilidad de voltaje, las pérdidas de potencia activa, los índices de confiabilidad, así como las pérdidas económicas de la red de distribución y al mismo tiempo proporcionar el mejor costo beneficio al usuario.

1.7. METODOLOGÍA PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Enfoque lineal centralizado: El enfoque de esta metodología se basa en la linealización de los resultados obtenidos a partir de la gestión de energía en las baterías de los VE, haciendo un modelo de sistema de distribución bajo ciertas suposiciones. El objetivo es incluir expresiones linealizadas para los voltajes con la intención de conocer la variabilidad en sus magnitudes de la red, así como restricciones de una optimización lineal y por ende, minimizar el costo de la energía empleada para cargar VEE, y de manera análoga utilizar las capacidades de almacenamiento de energía para proporcionar un servicio de soporte de tensión a la red [1].

1.8. CONFORMACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La intención de realizar esta tesis es que sea sencilla, práctica y de fácil comprensión para quien desee leerla. Tomando en cuenta lo antes mencionado, el trabajo se realizó incluyendo imágenes, diagramas, tablas, y como apoyo adicional a la comprensión, se desarrolla una pequeña introducción al inicio de cada capítulo.

En el Capítulo 1 se desarrolla el contexto principal en donde se explican los temas base (una red eléctrica de distribución, un banco de baterías y los tipos de vehículos eléctricos), se presenta el problema, y los métodos más utilizados para la gestión de una carga.

En el Capítulo 2 se tiene una descripción completa acerca de los vehículos eléctricos, su historia, y los elementos que conforman las partes del vehículo eléctrico, que ayudarán a entender su funcionamiento.

En el Capítulo 3 se describe el problema de optimización, el método de solución de enfoque centralizado, a partir de los modelos matemáticos que denotan las restricciones que se tomarán en cuenta para la solución del problema.

En el Capítulo 4 se presentan los casos de estudio, se muestran las soluciones con ayuda del algoritmo desarrollado en MATLAB, y el comportamiento de la red antes, durante y después de la interconexión de los vehículos eléctricos enchufables. Todo esto con la intención de conocer y resolver los inconvenientes que pudieran surgir a partir de la conexión en un determinado momento de los vehículos.

Por último, en el Capítulo 5 se podrán encontrar las conclusiones, además de un espacio para sugerencias y trabajos futuros.

CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN AL VEHÍCULO ELÉCTRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Lo primero que alguien se imagina cuando escucha la palabra vehículo eléctrico, lo relaciona con algo futurista, algo que, dada la situación socioeconómica del lado occidental del planeta, vemos como algo muy lejano a la realidad. Sin embargo, lo cierto es que el concepto de auto eléctrico, surgió en el año 1834, mientras que el motor de combustión interna, más complejo que un motor eléctrico, no llegó hasta 1861 [9].

Con los avances tecnológicos, este viejo concepto ha resurgido con mucha más fuerza que la primera vez debido a que dicho proyecto ha recibido más apoyo y más transcendencia ahora, debido a la necesidad de disminuir la huella de carbono que el ser humano está dejando en el planeta.

2.2. LAS BATERÍAS RECARGABLES PROPICIARON EL AUGUE DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

En 1852, Gaston Planté inventó la batería recargable de plomo y ácido. Pero su fabricación a nivel industrial no era posible. Fue hasta 1880 que Camille Fauré inventó un procedimiento electroquímico llamado “masa activa” que aumentaba la capacidad de carga de la batería de Planté. La fabricación a nivel industrial de la batería recargable de plomo y ácido sería a partir de entonces, una realidad comercial. El poder recargar la batería hizo que el coche eléctrico se impusiera como el automóvil por excelencia a principios del siglo XX.

En la década de 1890 en Europa, el fabricante austriaco de carruajes Jacob Lohner estaba convencido que la era de los carruajes tirados por caballos llegaba a su fin. Pues al volver de un viaje a Estados Unidos tuvo la intención de convertir su empresa en fabricante de automóviles, tanto eléctricos como de motores de combustión interna. Así que, le encargó a un joven ingeniero que trabajaba en Viena, cuyo nombre era Ferdinand Porsche, la creación de lo que sería esencialmente un coche eléctrico. [10]

En 1898, Ferdinand Porsche desveló lo que sería su primer coche, el “Egger-Lohner P1”. El cual era capaz de alcanzar 34 km/h y recorrer hasta 79 km con una carga, lo que representó todo un éxito para Lohner.

2.3. EL “ONE HUNDRED MILE FRITCHLE” O EL TESLA MODEL S DE 1908

Jacob Lohner observó que, en el otro lado del Atlántico, el auge de los coches eléctricos era imparable. El primero de ellos, se vendió en 1890 por William Morrison of Des Moines, en Iowa. Pero el líder indiscutible del mercado de la época era Fritchle, fundada por Oliver O. Fritchle, un químico instalado en Denver. Fritchle ganó fama al arreglar las baterías de los automóviles de la zona, pero también se dio cuenta que podría mejorar las baterías que le traían y por tanto crear un mejor coche.

Fritchle vendió su primer coche en 1906 y aseguraba que su coche podía recorrer hasta 100 millas (160 km) en llano tras recargar su batería toda la noche. Eso sí, los Fritchle eran coches de lujo. Mientras que un Ford con motor de combustión de la época costaba el equivalente a \$14.000 dólares actuales, un Fritchle costaba el equivalente de unos \$105.000 dólares actuales.

Hacia los 1900, de los 4192 vehículos que se produjeron en Estados Unidos, el 28% fueron eléctricos. Para 1906 los automóviles eléctricos representaban un tercio del parque vehicular de grandes ciudades como Nueva York, Boston o Chicago. [10, 26].

2.4. EL COCHE DE GASOLINA LE GANA LA BATALLA AL COCHE ELÉCTRICO

Pero en 1908 Ford presentó su “Model T” fabricado en serie y eso lo cambió todo, pues la fabricación en serie permite bajar el precio de venta de forma notable de cualquier producto, y fue el caso del Model T.

Hacia la década de los años 20, los coches de gasolina eran más asequibles y, sobre todo, superaban con creces en autonomía práctica a los eléctricos. Se podían reabastecer en cualquier sitio y en pocos minutos, y para colmo, el precio de la gasolina bajó drásticamente tras descubrir petróleo en Texas. Por lo que todo esto fue la tormenta perfecta para que el coche de gasolina terminase por imponerse. [2]

2.5. LA “TRAVESÍA DEL DESIERTO”

Salvo contadas y anecdóticas excepciones, el coche eléctrico cayó en el olvido. En los años 50 y 60 algunos fabricantes, como Renault, BMW, Nissan u Opel desarrollaron algunos vehículos eléctricos a modo de prototipos.

De todos modos, de los años 20 hasta los años 90, el coche eléctrico experimentó su particular “travesía del desierto”. Y no fue hasta los años 90 que el coche eléctrico volvería a cobrar protagonismo, primero de forma tímida y más recientemente de forma más duradera (aunque con una cuota de mercado todavía muy lejos de la que tuvo a principios del siglo XX). [10]

2.6. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO REGRESÓ PARA QUEDARSE

Hoy, casi todos los fabricantes de automóviles tienen o tendrán en breve un vehículo eléctrico. La razón no es otra que política y la necesidad de cumplir con las normas anticontaminación en Asia, Europa y América.

La Unión Europea es así otra impulsora de la movilidad eléctrica. Si los fabricantes quieren lograr un promedio de 95 g/km de CO₂ para sus vehículos en 2021, acordada por la UE, no les queda otra que apostar por el coche eléctrico. Y es que 95 g/km de CO₂ para un turismo supone un consumo medio aproximado de 4.1 l/100 km en un vehículo a gasolina y 3,5 l/100 km en uno a diésel.

O el motor de combustión interna se vuelve de golpe ultra eficiente, cosa que ni el esperado Skyactiv-X de Mazda está cerca de lograr, o bien, apuestan por una electrificación a marchas forzadas de sus modelos. Y eso es lo que se está viendo. También es por esa razón que la industria está tan convencida de que el futuro del automóvil es el coche eléctrico. [10]

2.7. ANATOMÍA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

Aunque todavía queda camino por recorrer para que se imponga realmente, cada vez son más y es imprescindible saber cómo son y cómo funcionan.

Frente a un coche con motor de combustión interna o un híbrido, un coche eléctrico es en teoría, mucho más sencillo, especialmente si hablamos de los motores. Sin embargo, la complejidad de un eléctrico está en los detalles (eficiencia de los motores, gestión de la batería, gestión térmica, etc.) y son los que marcan la diferencia. [21]

2.7.1. ELEMENTOS UN AUTO ELÉCTRICO

A grandes rasgos, el sistema de propulsión de un coche eléctrico se compone de una toma de corriente, un cargador, el paquete de baterías, del convertidor de corriente, de una transmisión (casi siempre de un solo engrane), una unidad de

control del motor, el CANBUS y finalmente, de uno o varios motores eléctricos. Además, cuenta con una batería tradicional de 12 V y de una unidad electrónica de control que gestiona todos los sistemas del coche anteriormente mencionados, así como el funcionamiento del coche en general. (Fig. 2.1)

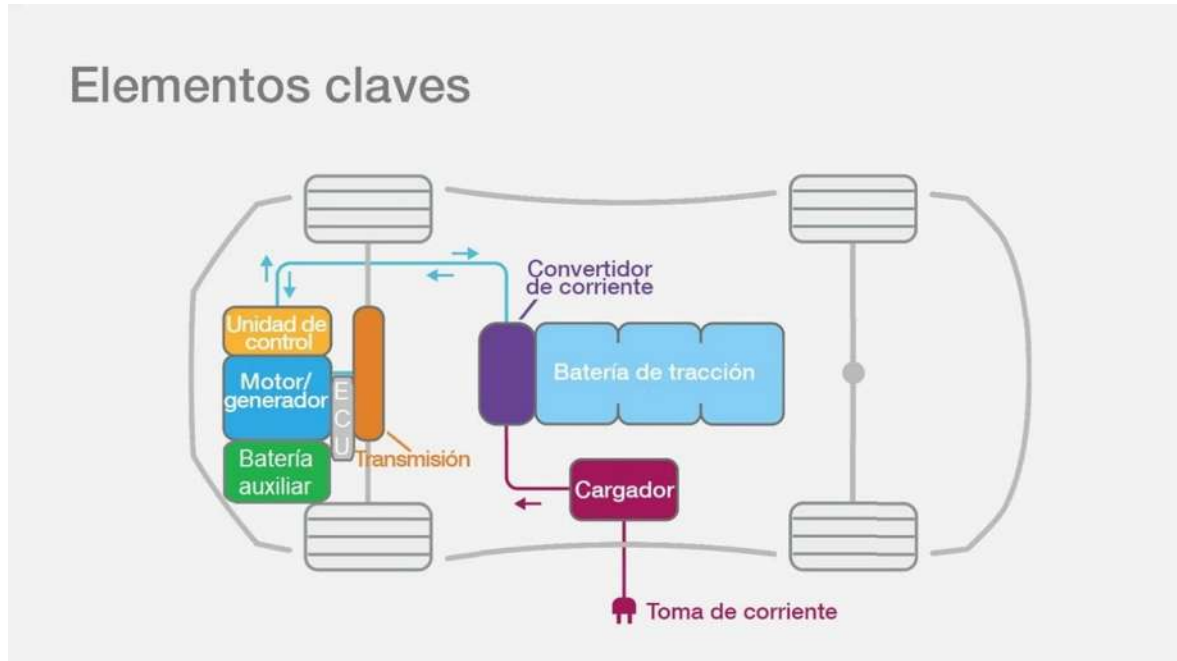


Fig. 2. 1 Anatomía de un vehículo eléctrico

2.7.2. TOMA DE CORRIENTE O PUERTO DE CARGA

Es el elemento que permite la conexión del coche a un punto de carga, ya sea una toma de corriente doméstica, una wallbox o un cargador rápido público. [21]

2.7.3. CARGADOR DE A BORDO (O POWER ELECTRONIC CONVERTER)

Cuando se carga la batería por medio de una toma de corriente doméstica, es necesario que la energía pase por el cargador. Éste es un convertidor que a la salida dará una corriente y un voltaje de diferente magnitud y forma con respecto a la que entró. Básicamente, convierte la corriente alterna (CA) de entrada en corriente continua (CC), que necesita la batería. Es como el cargador de un teléfono móvil, pero que soporta potencias y voltajes muy superiores.

2.7.4. PACK DE BATERÍA O BATERÍA DE TRACCIÓN

También llamada batería de tracción. La energía que almacena servirá exclusivamente para mover el vehículo. Los coches eléctricos poseen una batería tradicional de 12 V, como los coches térmicos, para alimentar los sistemas auxiliares, como la climatización, la iluminación, etc.

Existen de diferentes tipos, siendo la batería más utilizada en la industria la de iones de litio. Cuenta con una unidad de control que controla y gestiona las principales características de carga, como el voltaje, la corriente, la temperatura o el estado de carga. Esta unidad de control está continuamente comprobando los parámetros de todo el sistema. Si en una comprobación una medición no cumpliera los niveles establecidos, el sistema se desconectaría [21].

A continuación, se describen los principales tipos de baterías.

2.7.4.1. TIPOS DE BATERÍAS

En la actualidad existen diversos tipos de baterías que se emplean en diversos dispositivos, para los vehículos existen varias de distintos materiales y composiciones los cuales determinan la durabilidad, autonomía y aplicación de las mismas.

La batería de un vehículo eléctrico es un acumulador de energía eléctrica, que transforma en energía química la electricidad aportada en una carga (o a través del sistema de regeneración de energía), para liberarla más tarde, de nuevo como electricidad.

Una batería está compuesta por una combinación de celdas que crean una capacidad de voltaje y corriente específica. La batería es un componente clave en un coche eléctrico, ya que determina la autonomía, la entrega de energía al motor y afecta de forma notable al peso y al diseño del vehículo. Además, la batería es el corazón de un sofisticado sistema que además de las propias celdas, incluye su contenedor, refrigeración, cableado y gestión electrónica.

En cualquier caso, cabe destacar que las baterías que montan los vehículos eléctricos actuales son muy diferentes de las que empleaban los primeros modelos eléctricos hace un siglo, y a continuación se enlistan las más usadas actualmente, así como las que están en desarrollo para una implementación a futuro.

- De plomo-ácido. Este tipo de baterías, también denominadas SVRLA y Pb A P. Son baterías de tecnología antigua de coste moderado. Están prácticamente en desuso en los vehículos actuales, aunque sirvieron para

impulsar a uno de los coches eléctricos más célebres de la historia: el GM EV1.

Suelen tener entre 6 y 12 voltios, una autonomía de unos 100 km y se emplean fundamentalmente para funciones de arranque del vehículo, iluminación o soporte eléctrico.

- Características: ciclo de vida limitado entre 500 y 800 ciclos de carga-descarga, densidad baja de 30-40 Wh/Kg y necesidad de mantenimiento periódico.
 - Ventajas: bajo coste y buena respuesta en frío.
 - Desventajas: son pesadas, el plomo es tóxico y capacidad de recarga lenta.
- De iones de litio (Li-ion). Son las baterías más avanzadas, con excelentes características de rendimiento, peso y vida útil. Destacan por la mayor densidad de energía por centímetro cúbico y por la ausencia de «efecto memoria», permitiendo mayor número de ciclos de recarga. Pesan cuatro veces menos que las de plomo y son las que tienen mayor durabilidad. Son las que emplean el 99% de los coches eléctricos actuales. Un tipo de batería de reciente creación con el doble de densidad energética que las de níquel-cadmio, a pesar de tener un tercio de su tamaño.
- Características: ciclo de vida entre las 400 y 1200 cargas y descargas, densidad de 100-250 Wh/Kg y sin necesidad de mantenimiento.
 - Ventajas: alta densidad energética, menor tamaño, peso ligero, alta eficiencia y sin efecto memoria.
 - Desventajas: alto coste de producción, fragilidad, requieren de un circuito de seguridad y de un almacenaje cuidadoso.
- De níquel cadmio (Ni-Cad). Cada vez menos usadas, tienen un alto coste debido a sus elementos y se han usado más en la aviación por su buen rendimiento a baja temperatura. También se utilizaron en menor medida, en coches eléctricos de los años 90, como el Citroën AX électrique. Tienen efecto memoria y su capacidad va disminuyendo en cada recarga.
- Características: ciclo de vida entre las 1500 y 2000 cargas y descargas, densidad de 40-60 Wh/Kg y necesidad de cierto cuidado específico.
 - Ventajas: gran fiabilidad y técnicas de reciclado total.
 - Desventajas: alto coste de adquisición, efecto memoria, contaminante y envejecimiento prematuro con el calor.

- De níquel-hidruro metálico (Ni-MH). Poco tóxicas y tiene un mayor rendimiento que la de ácido de plomo, pero menor que la de litio. No son comunes en coches eléctricos, aunque sí en coches híbridos, como, por ejemplo, algunas versiones del Toyota Prius. Además, durante años este tipo de baterías han sido muy populares en teléfonos móviles.
 - Características: ciclo de vida un poco limitado entre los 300 y 500 ciclos de carga y descarga, densidad de 30-80 Wh/Kg y un elevado mantenimiento.
 - Ventajas: reducción del efecto memoria en relación con las baterías de níquel-cadmio, además de eliminar el cadmio (un metal tóxico).
 - Desventajas: menor fiabilidad, no aguanta fuertes descargas, menor resistencia a altas temperaturas y menor resistencia a altas corrientes de carga.
- Ion-litio con cátodo de LiFePO_4 . Una de las ventajas de estas baterías es que no utilizan cobalto, lo que les da mayor seguridad al ofrecer una mayor estabilidad por su gran cantidad de hierro.
 - Características: ciclo de vida mayor, entorno a las 2000 cargas y descargas, densidad de 90-100 Wh/Kg y sin mantenimiento.
 - Ventajas: son seguras, estables y potentes.
 - Desventajas: menor densidad energética y mayor coste.
- Polímero de litio (LiPo). Entre los tipos de baterías para coches eléctricos, las de polímero de litio (una variación de las de ion-litio) cuentan con una gran densidad energética y potencia, además de ser ligeras, eficientes y sin efecto memoria.
 - Características: ciclo de vida por debajo de las 1000 cargas y descargas, densidad energética de 300 Wh/Kg y sin mantenimiento.
 - Ventajas: ligeras y eficientes.
 - Desventajas: alto precio y ciclo de vida menor.

2.7.4.2. BATERÍAS EN DESARROLLO A FUTURO

Mejorar las capacidades de las baterías son el gran reto de los fabricantes que apuestan por la electro movilidad.

Son muchos los proyectos e ideas en desarrollo, pero hay dos que parecen tener más probabilidades, pero a mediano plazo:

- Batería de aluminio-aire. Pueden multiplicar 10 veces la capacidad de almacenamiento en comparación con las de ión-litio, pero todavía arrojan problemas de recarga y no son del todo fiables.
No se pueden recargar, por lo que habría que sustituirla por otra nueva una vez agotada la reserva de energía. Eso sí, prometen hasta 1.600 kms de autonomía.
- Baterías de estado sólido. Son una evolución de las baterías de litio pues funcionan igual que estas, pero el electrolito en lugar de estar en estado líquido, se ha solidificado. Así, una batería de estado sólido aporta más autonomía, tiempo de recarga muy corto y mayor seguridad.

2.7.5. INVERSOR DE CORRIENTE

Este dispositivo convierte la energía de corriente continua que proviene de las baterías en energía de corriente alterna la cual alimenta el o los motores que mueven el vehículo. Además, existe un convertidor secundario que reduce el voltaje para la batería de 12 V que hace funcionar los sistemas auxiliares.

2.7.6. UNIDAD DE CONTROL DEL MOTOR

La unidad de control del motor regula la velocidad, par y dirección del motor. Es un convertidor que controla el flujo de energía entre la batería de tracción y el motor. En función del motor utilizado, será un convertidor de corriente continua a corriente continua o de corriente continua a corriente alterna. Sin embargo, a diferencia de los otros convertidores del coche este es bidireccional, enviando energía al motor y al mismo tiempo es capaz de extraer energía en los momentos de frenada regenerativa.

2.7.7. MOTOR ELÉCTRICO

El funcionamiento básico de un motor eléctrico está basado en la rotación electromagnética descubierta por Faraday, la cual consiste en el uso de dos imanes que se rechazan o se atraen, dependiendo de la alineación de sus polos. Esa orientación será la que genere un desplazamiento hacia delante o hacia atrás.

Convierte energía eléctrica en movimiento, acciona las ruedas. El motor actúa además como generador de electricidad, tanto en aceleración como en las fases de

desaceleración. La mayoría de fabricantes usan motores de inducción o de imanes permanentes. Se componen principalmente de un estator, un rotor y una bobina.

2.7.7.1. TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS AUTOMOTRICES

Actualmente, la industria automotriz emplea dos familias de motores eléctricos que funcionan con corriente alterna trifásica:

- Síncrono: se caracteriza por una velocidad de rotación directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Esto significa que el rotor gira a la misma velocidad a la que lo hace el campo magnético del estator, lo que provoca el movimiento, es decir, está sincronizado. La cara norte del imán del rotor va a ir siguiendo la cara sur del estator. El rotor utiliza una serie de imanes, generalmente de neodimio, y pueden funcionar como motores o como generadores.
- Asíncrono: denominado también como motor de inducción, está formado por un estator, de concepción similar a la de los motores síncronos; y por un rotor que puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o bobinado. Las bobinas son trifásicas y están desfasadas entre sí 120° en el espacio. Cuando por estas bobinas se aplica una corriente trifásica, se consigue inducir un campo magnético giratorio que envuelve al rotor. Éste, a su vez, va a inducir una tensión eléctrica en el rotor mediante la aplicación variable del campo magnético. El rotor está provisto de unas barras de conducción en todo su largo que asemejan a una jaula, y de ahí su nombre, incrustadas en una serie de ranuras dispuestas de manera equidistante entre ellas y conectadas con anillos a cada extremidad del rotor.

Su funcionamiento práctico se basa en el efecto motor o Laplace que se define como: todo conductor por el que circula una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético, experimenta una fuerza que lo tiende a poner en movimiento. Al mismo tiempo sucede el efecto definido por Faraday que dice que, todo conductor que se mueva en el seno de un campo magnético, induce una tensión y produce un efecto generador. [22, 23]

2.7.7.2. EL MOTOR ELÉCTRICO A UN FUTURO CERCANO

Aunque los motores eléctricos llevan existiendo mucho tiempo, lo cierto es que la industria automotriz no le había prestado tanta atención como ahora, y mucho menos los usuarios. En un periodo relativamente corto de tiempo, esta tendencia cambiará y, donde antes se hablaba de aleaciones mejoradas para los pistones o

de turbos de nueva generación, se abrirá paso a comentar nuevos tipos de bobinados, nuevos cableados o sistemas de gestión de motor.

Por lo tanto, resulta muy llamativo que, partiendo de las dos grandes familias de motores eléctricos, como son el síncrono o el asíncrono, cada marca de coches sea celosa de sus desarrollos y prácticamente cada uno desarrolle el suyo desde cero. Lo cierto es que existen algunas sinergias y acuerdos de colaboración, para que, de manera general, todos los grandes fabricantes como Toyota, GM, grupo VAG, intenten crear ese motor que les permita conseguir un avance significativo, dándoles una ventaja comercial sobre el resto.

Y todo con un objetivo general, reducir el coste, emplear materiales más ligeros en la construcción de los motores, optimizar las prestaciones en función del uso o aprender a gestionar mejor el uso de las baterías, algo en lo que Tesla, parece sacar cierta ventaja. [24]

2.7.8. TRANSMISIÓN

La mayoría de coches eléctricos cuentan con una transmisión de una sola marcha (salvo, de momento, el Porsche Taycan que cuenta con una transmisión de dos marchas). Se debe a que un motor eléctrico entrega la totalidad del par motor en todo momento.

2.7.9. BATERÍA AUXILIAR

Sirve para proveer de electricidad el coche antes de que se encienda la batería de tracción. También da energía a los sistemas auxiliares del coche. Es una clásica batería de 12 V como las que usan los coches de gasolina, diésel o híbridos.

2.7.10. UNIDAD CENTRAL DE CONTROL O ECU

Por sus siglas en inglés (Engine Control Unit). La unidad electrónica de control central gestiona todos los sistemas del coche que se han mencionado, así como el coche en general, como la aceleración, el control de estabilidad y tracción, el reparto de par entre los diferentes ejes y/o ruedas (en función de la configuración del coche y de su o sus motores). Además, controla y monitorea el flujo de energía (entregado de la batería o almacenado vía la frenada regenerativa), el cargador de a bordo y la unidad de gestión de la batería (BMS o Battery Managment System) que vigila el estado de carga, lo limita si es necesario, controla la temperatura de la batería, etc.

2.7.11. FLUJO DE ENERGÍA

La batería es recargada por medio del cargador de a bordo, conectado a la red, y a su vez al convertidor de corriente bidireccional. Cuando el motor necesita energía para mover el coche, la batería envía corriente pasando antes por el convertidor de corriente DC-DC y la unidad de control del motor (convertidor DC-AC). Este último envía la energía al motor para que la transforme en energía mecánica, es decir, en movimiento de las ruedas por medio de la transmisión. Si bien usualmente se sitúan dichos elementos como se muestra en la fig. 2.1. En la fig. 2.2 se puede apreciar la manera en que ocurre este flujo, tanto para cuando se requiere entregar energía, como para cuando se recarga la batería en movimiento mediante el frenado regenerativo, por ejemplo.

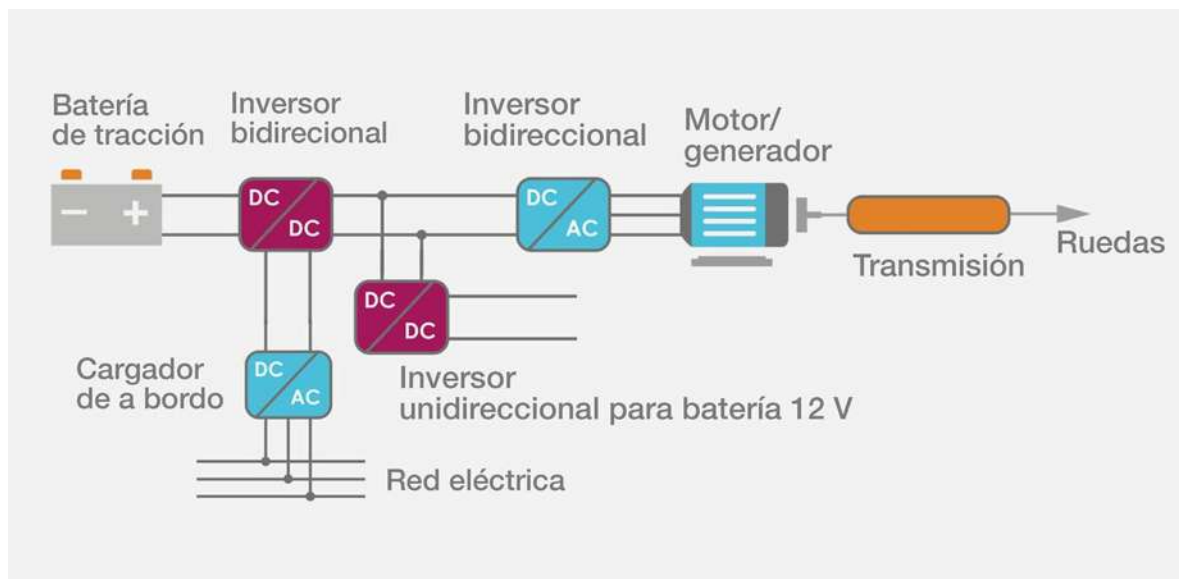


Fig. 2. 2 Flujo de energía del vehículo eléctrico

2.7.12. CANBUS

El CANBUS (Controller Area Network) por sus siglas en inglés, es un bus automotriz que permite que los microcontroladores y dispositivos se comuniquen entre sí dentro de un vehículo sin una computadora host. El CANBUS es un protocolo basado en mensajes, diseñado específicamente para aplicaciones automotrices, pero ahora también se usa en otras áreas como aeroespacial, automatización industrial y equipos médicos.

Conecta los sistemas y sensores individuales como una alternativa a los telares de cables múltiples convencionales. Permite que los componentes automotrices se

comuniquen en un bus de datos en red de uno o dos cables de hasta 1 Mbps. El bus CAN es uno de los cinco protocolos utilizados en el estándar de diagnóstico del vehículo OBD-II.

2.7.13. SGB (SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS)

Por sus siglas en inglés (Battery Management System), es el elemento que gestiona las baterías del vehículo, evita accidentes derivados del uso de la batería, alargando su durabilidad y evitando potenciales peligros tales como chispazos, explosiones, incendios, o emisiones de gases tóxicos. Y también evita que la batería se descargue por debajo de un 20% pero que tampoco se cargue por encima de un 80% según sean las recomendaciones específicas del banco de baterías utilizado. [21]

2.8. CARGADORES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Aunque la acción de recargar las baterías del vehículo eléctrico VE pudiera parecer tan simple como conectar el enchufe al puerto de carga del mismo, lo cierto es que para eso existen distintos tipos de cargadores y enchufes, además de otras circunstancias como la capacidad de la batería, que van a determinar el tiempo y la velocidad de recarga de la misma. Por lo tanto, a continuación, se muestran los tipos de cargadores más utilizados.

La carga de los vehículos eléctricos (VE'S) se puede clasificar en tres niveles diferentes. Estos niveles representan las salidas de potencia que determinan la velocidad de carga para recargar un coche eléctrico. Cada nivel tiene tipos de conectores designados que están diseñados para un uso de baja o alta potencia, y para administrar la carga de CA o CC [25].

2.8.1. CARGA DE NIVEL 1 - CA DE 120 V

Los cargadores de nivel 1 utilizan un enchufe de CA de 120 volts y se pueden conectar simplemente a una toma de corriente estándar. Se puede hacer con un cable EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment) o Estación de carga para vehículo eléctrico de nivel 1 que tiene un enchufe doméstico estándar de tres puntas en un extremo para la toma de corriente y un conector J1722 estándar para el vehículo. Cuando se conecta a un enchufe de CA de 120V, las tasas de carga cubren entre 1.4kW a 3kW y pueden tomar en cualquier lugar de 8 a 12 horas dependiendo de la capacidad de la batería y el estado de carga inicial.

2.8.2. CARGA DE NIVEL 2 - CA DE 240 V

La carga de nivel 2 se conoce principalmente como carga pública. A menos de que se tenga una configuración de equipo de carga de nivel 2 en casa, la mayoría de los cargadores de nivel 2 se encuentran en áreas residenciales, estacionamientos públicos y lugares de trabajo y entornos comerciales. Los cargadores de nivel 2 requieren instalación y ofrecen carga a través de enchufes de CA de 240V. La carga generalmente tarda de 1 a 11 horas (dependiendo de la capacidad de la batería) con una velocidad de carga de 7kW a 22kW con un conector de tipo 2. Por ejemplo, el KIA e-Niro, equipado con una batería de 64 kW, tiene un tiempo de carga estimado de 9 horas a través de un cargador de 7.2 kW a bordo tipo 2.

2.8.3. CARGA DE NIVEL 3 O CARGA RÁPIDA DE CC

La carga de nivel 3 es la forma más rápida de cargar un vehículo eléctrico. Aunque no son tan comunes como los cargadores de nivel 2, los cargadores de nivel 3 también se pueden encontrar en cualquier ubicación densamente poblada. A diferencia de la carga de nivel 2, es posible que algunos vehículos eléctricos no sean compatibles con la carga de nivel 3. Los cargadores de nivel 3 también requieren instalación y ofrecen carga a través de enchufes de CA o CC de 480V. El tiempo de carga va desde los 20 minutos a 1 hora con una velocidad de carga de 43 kW a 100+kW con un conector CHAdeMO o CCS. Tanto los cargadores de nivel 2 como 3 tienen conectores atados a las estaciones de carga. [25]

2.8.4. TIPOS DE CONECTORES PARA AUTOS ELÉCTRICOS

Existen dos tipos de enchufes de CA, y dos tipos también de CC para conectar a los puertos de carga de los VE.

2.8.4.1. CONECTOR TIPO 1 EN CA

El enchufe tipo 1 es un enchufe estándar monofásico para coches eléctricos de América y Asia. Le permite cargar su coche a un nivel de potencia de carga de hasta 7,4 kW.

2.8.4.2. CONECTOR TIPO 2 EN CA

El enchufe tipo 2 es un enchufe de tres fases y se considera el modelo estándar. En espacios privados es común encontrar niveles de potencia de carga de hasta 22 kW, mientras que en estaciones de carga públicas se encuentran niveles de potencia de carga de hasta 43 kW. La mayoría de las estaciones de carga públicas están equipadas con un enchufe tipo 2, y todos los cables de carga de modo 3 se pueden utilizar con éste.

2.8.4.3. SISTEMA DE CARGA COMBINADO “CCS” O COMBO TIPO 2 EN CC

El enchufe CCS es un enchufe de cinco pines, que es una versión mejorada del enchufe tipo 2, con dos contactos de alimentación adicionales para la carga rápida, permite niveles de potencia de carga de CA y CC de hasta 170 kW. En la práctica, el valor suele ser de alrededor de 50 kW.

2.8.4.4. CONECTOR CHAdeMO EN CC

El enchufe CHAdeMO es un enchufe de 10 pines que se utiliza en estaciones de carga rápida. Se llaman cargadores de nivel 3 que son capaces de suministrar hasta 50 kW de potencia con una corriente que puede llegar a 125A. Este sistema de carga rápida permite capacidades de carga de hasta 50 kW en las estaciones de carga públicas adecuadas. [25]





Fig. 2. 3 Tipos de conectores para autos eléctricos

2.8.5. TIPOS DE CABLES DE CARGA PARA AUTOS ELÉCTRICOS

2.8.5.1. CABLE DE CARGA DE MODO 2

Los cables de carga de modo 2 son generalmente para la conexión de enchufe doméstico y son suministrados por los fabricantes, y vienen en varias versiones dependiendo de la región. Llamada caja de control en cable (ICCB), se instala una caja para permitir la comunicación entre el conector y el enchufe del vehículo.

2.8.5.2. CABLE DE CARGA DE MODO 3

Los cables de carga de modo 3 también varían según la región, pero conectan la estación de carga directamente a su vehículo eléctrico. Las estaciones de carga están generalmente equipadas con tomas de tipo 2 con el fin de permitir que los coches se carguen a través del uso de enchufes de tipo 1 y tipo 2. Dependiendo de las regiones y los fabricantes, se requiere un cable de carga de modo 3 al tipo 2 o un cable de carga de modo 3 del tipo 2 al tipo 1.

2.9. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

De acuerdo con el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), tan solo en el 2019 se vendieron 23 mil 884 unidades híbridas y 1,339 eran plugin, es decir, autos que combinan el motor de combustión interna, con el motor eléctrico.

Aunque, las ventas de vehículos eléctricos e híbridos aún no se comparan con las de los carros convencionales, el director general de la Asociación Mexicana de Distribuidores de Automotores (AMDA), afirma que México está en una etapa de transición para la denominada electro movilidad.

Y es que los autos eléctricos pueden ser en algunos aspectos grandes aliados para cuidar el medio ambiente y el bolsillo de los mexicanos, pero también presentan algunos inconvenientes que vale la pena reflexionar [11].

2.9.1. VENTAJAS DE ADQUIRIR UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

En los últimos años, estos vehículos han sido considerados como una buena opción para disminuir la huella de carbono derivada de la combustión de gasolina. Por lo que también resultan como una alternativa atractiva para aquellas personas que buscan ahorrar combustible. Además, cuentan con algunos grandes beneficios que hacen de los vehículos eléctricos una opción sustentable:

- No producen contaminantes como el monóxido de carbono al estar en funcionamiento. Son vehículos que no necesitan gasolina, no realizan el proceso de combustión que genera los gases contaminantes en el ambiente, por eso son llamados autos “zero emissions”.
- No producen ruido atmosférico. Estos autos poseen un motor eléctrico, por lo que el ruido que generan es casi imperceptible, lo que es una gran ventaja para las grandes acumulaciones de autos en ciudades como la capital del país, por ejemplo, que además de ser un lugar con alto índice de contaminación atmosférica, también sufre de polución auditiva.
- Mantenimiento económico. Quizá este es uno de los mayores beneficios que se podrían tener en este tipo de carros, pues suelen tener pocas fallas mecánicas debido a que, al ser impulsado por un motor eléctrico, los elementos en funcionamiento son mucho menor en cantidad en comparación con uno de combustión interna. Así que se podrán ahorrar algunos pesos si el motor llegara a averiarse, pues no tiene caja de cambios, filtros de aceite, bujías, filtros de combustible, entre otros componentes que un carro convencional sí tiene y que si suelen fallar significan un alto costo en la reparación del mismo.
- Ahorro en combustible. En México, la oscilación del precio de combustible es bastante impredecible y en los últimos años ha incrementado entre 35 y 40%. Por lo que, si se desea hacer un ahorro de hasta 100% en gasolina, los coches eléctricos son una excelente opción. Además, el costo promedio de una carga total de la batería es de \$80 pesos.
- Mayor eficiencia. Un coche eléctrico necesita menos energía para desempeñarse, en comparación con un carro tradicional. Es decir, un vehículo eléctrico es hasta 90% más eficiente que uno convencional, pues la

relación precio-desempeño es mejor en los autos eléctricos. Por ejemplo, mientras un vehículo de combustión gasta un litro de combustible para recorrer 12 km, uno de motor eléctrico lo hace sin carburante y con menos energía.

- No necesita verificación ambiental. Al ser autos amigables con el ambiente, no requieren del trámite de verificación vial, por lo que también es un ahorro de tiempo y dinero. Sin dejar de mencionar, que no son afectados por el calendario de “Hoy No Circula” que existe en la CDMX, por lo tanto, todos los días pueden transitar.

2.9.2. DESVENTAJAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Sin embargo, no todo es tan bonito como se escucha para los autos eléctricos. Porque aún faltan algunas mejoras en el desempeño del motor y cuestiones de infraestructura en las ciudades como las estaciones de carga, entre otras desventajas que se explican a continuación: [11].

- Menor autonomía. Dependiendo del modelo, un auto eléctrico puede tener una autonomía de hasta 200 km, mientras que, dependiendo de los hábitos de manejo del conductor, un tanque de gasolina puede llegar hasta los 400 km o más.
- Requieren de una estación especial para recargarse. Aunque, los mexicanos a últimos tiempos están apostando por autos híbridos o eléctricos, aún falta la infraestructura para poder recargar las baterías. De acuerdo con datos de la Comisión Federal de Electricidad, para 2017 en la Ciudad de México ya se habían instalado 42 estaciones de recarga y en 2018 había 900 centros de carga distribuidos en las principales ciudades del país; sin embargo, apenas es poco menos del 10% comparado con las 11 mil estaciones de gasolina en el país.
- Precio de compra elevado. Al ser pocos los fabricantes de autos eléctricos, la oferta es mínima y por lo tanto el precio de venta es elevado.
- Pocos talleres especializados. Como este tipo de movilidad es una propuesta “nueva”, son muy contados los espacios que cuentan con las condiciones adecuadas para realizar un diagnóstico ante la necesidad de alguna revisión. Por lo que sería problemático encontrar un especialista certificado, aún.
- La energía que requieren se genera por medio de combustibles fósiles. En México el porcentaje de energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles es del 80%, por lo que el concepto antes mencionado de “zero emissions” no es del todo cierto [12].

2.10. “INVERSIÓN” A MEDIANO PLAZO: COMBUSTIÓN VS ELÉCTRICIDAD

Si bien existe un miedo a comprar un vehículo eléctrico en México por diversos factores. Lo primero a considerar es el conocimiento de la poca infraestructura para soportar este tipo de vehículos, además de un costo elevado y poca oferta en general.

No obstante, hay que tener en cuenta los beneficios que los autos eléctricos pueden ofrecer, entre ellos, ayudar al medio ambiente reduciendo las emisiones contaminantes. Aunque dependiendo de la manera en la que se obtiene la energía eléctrica, las emisiones se generan en otro punto. Y, por lo tanto, es un hecho que el lugar donde vivimos, mejorará en cuanto a la calidad del aire se refiere [13].

2.10.1. VEHÍCULOS EXISTENTES EN MÉXICO

Aunque la lista es muy corta, existen varias marcas que a día de hoy ofrecen dentro de sus productos, unas cuantas opciones a elegir en esta modalidad, ejemplo de ello son NISSAN, CHEVROLET, y recientemente JAC, y en el nivel de los de lujo se encuentran MERCEDES BENZ, BMW, AUDI, JAGUAR, TESLA Y PORSCHE con modelos enfocados incluso en desempeño.

Lo cierto es que la mayoría de las personas no pueden acceder a alguno de los vehículos de las marcas antes mencionadas, por lo que, es de carácter obligatorio, realizar un pequeño ejercicio a manera de estimación, sobre si realmente vale la pena realizar un esfuerzo para hacerse de uno de los vehículos del término *ecofriendly* (amigable con el ambiente) que tanto se ha puesto de moda en los últimos tiempos, en comparación con un vehículo de combustión interna tradicional.

2.10.2. DIFERENTES MECÁNICAS, DIFERENTES ENFOQUES

Es imposible decir que un auto eléctrico se maneja de la misma manera que un auto de combustión interna, lo cual no es malo.

Al contrario, para aquellos amantes de lo “sencillo” un auto eléctrico es una gran opción para manejar cotidianamente en la ciudad, especialmente porque se reducen considerablemente los ruidos y vibraciones debido a la ausencia de transmisión o de un motor de gasolina.

Por otro lado, la capacidad de aceleración de un auto eléctrico, que se caracteriza por tener una entrega de poder inmediata. Se traduce en poder incorporarse a vías rápidas de una manera más segura y poder realizar rebases sin contratiempos.

Y claro, para alguien que no está familiarizado con la propulsión por baterías, existe la posibilidad de que constantemente tendrá la ansiedad del límite de autonomía o rango y el temor de no llegar a sus destinos. Lo cual, en comparación con un vehículo de gasolina es nulo, en el entendido de que existen gasolineras cada 5 minutos en la mayoría de las vialidades del país.

Sin embargo, muchos centros comerciales, plazas, oficinas y demás edificaciones ya cuentan con puntos para carga de vehículos eléctricos, y que en la mayoría de los casos son terminales de carga rápida.

Hoy en día, incluso el auto eléctrico más barato de México supera los 300 km de autonomía por cada carga, por lo que incluso se podrían realizar viajes a ciudades cercanas a la capital del país sin temor a quedarte en el camino [13].

2.10.3. BENEFICIO ECONÓMICO A MEDIANO PLAZO

Contrario a lo que se ve en muchos países, México aún no dispone de incentivos gubernamentales para la compra de autos eléctricos, pero se tiene un lado positivo en temas de impuestos. Primero, al adquirir un auto eléctrico, no se paga ISAN o tenencia vehicular, además de que dichos autos están exentos de la verificación vehicular y los programas del “Hoy No Circula”.

También, existen empresas que, por su parte, otorgan beneficios para este tipo de autos, como por ejemplo TAG, que otorga un 20 por ciento de descuento en sus vías de cuota, si se circula con un auto eléctrico.

En términos generalizados y a corto plazo, un vehículo eléctrico sí resulta más costoso que uno de combustión interna. Sin embargo, analizando a profundidad y a un mediano plazo, como por ejemplo 3 años a futuro, puede que no sea una idea tan descabellada hacerse de un auto eléctrico a pesar de ser más caros.

Ya que, en 36 meses, un vehículo de combustión interna pagará en promedio \$42,000 pesos de impuestos, suponiendo que se trate de una camioneta familiar. Además, cubriendo un promedio de 30 km por día, en tres años se gastará un aproximado de \$35,000 pesos únicamente de combustible.

En un auto eléctrico, no se paga impuestos, y tomando en cuenta un costo de \$2.7 pesos por kW, en 3 años y considerando la misma distancia recorrida que la camioneta familiar, se habrán gastado solamente \$12,000 pesos recargando el vehículo eléctrico.

Así que, siendo un auto que se conservará por más de 3 años, el costo de propiedad estará a la par o por debajo del de una camioneta familiar con motor de combustión interna, además de que se estará ayudando al medio ambiente reduciendo las emisiones contaminantes y propulsando un esquema de movilidad atractivo para el futuro [13].

2.11. NECESIDAD DE LA GESTIÓN DE CARGA DE LAS BATERÍAS

Según un informe realizado por la Agencia Internacional de Energía, en el 2015 se superó el récord de 1.000.000 de vehículos eléctricos en las carreteras, 1.26 millones exactamente, los cuales incluyeron vehículos eléctricos enchufables (VEE), vehículos eléctricos híbridos enchufables (VEHE'S), y vehículos eléctricos de celdas de combustible (VECC).

Este es un dato curioso ya que, la mayoría de las proyecciones que se hicieron en el 2013 sugirieron que este récord no se alcanzaría antes del 2020. La mayoría de los vehículos en circulación en ese año estuvieron localizados en Estados Unidos, China, Japón y países europeos como: los Países Bajos, Noruega, Francia y Alemania. Todos ellos miembros del grupo EVI por sus siglas en inglés Electric Vehicle Initiative.

En general, los países participantes del EVI cumplieron la meta de 20.000.000 de vehículos eléctricos enchufables e híbridos enchufables vendidos para 2020. Por su parte, varios países se establecieron objetivos individuales que en conjunto ascienden a un total de 13.000.000 de vehículos alcanzado en 2020. Incluso si estas proyecciones representan sólo una participación en el mercado de menos del 2% del mercado total de vehículos de pasajeros, después de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en 2015, las naciones se han comprometido con un objetivo de eliminación de vehículos de combustión interna en el mercado y un despliegue global de 100.000.000 de vehículos eléctricos enchufables e híbridos enchufables para el 2030.

En este contexto, las flotas de vehículos eléctricos enchufables (VEE), y de vehículos híbridos enchufables (VEHE) pueden considerarse como estructuras dinámicas de almacenamiento de energía móviles que sirven como portadores de energía tanto en el tiempo como en el espacio. Los impactos esperados pueden ser críticos desde un punto de vista local, como caídas de voltaje, desequilibrios de carga, armónicos, y otros problemas de calidad de la energía. Y desde el punto de vista global, los impactos que se esperan en la red son: regulación de frecuencia, estabilidad, planes de expansión para mejorar la infraestructura y adecuar la oferta

y la demanda. En el mejor de los escenarios se espera que la carga de VEE doméstica se suministre desde el sistema de distribución eléctrica residencial.

Es por ello que es de suma importancia el contar con un sistema que priorice el mantener los niveles de tensión dentro de los límites adecuados de funcionamiento, y de esa manera evitar generar problemas que a la distancia incurran en un efecto dominó y eso provoque un desequilibrio e inestabilidad en la red del sistema eléctrico nacional. Por lo que sin los enfoques adecuados para manejar la carga y descarga de vehículos eléctricos enchufables, el tener una alta tasa de penetración a la red traería varios impactos negativos especialmente en los transformadores de media a baja tensión.

2.12. IMPACTO DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN

La alta incidencia de vehículos eléctricos también plantea problemas de calidad en la red de distribución, en particular la congestión de la red, el desequilibrio de voltaje trifásico y los problemas de desfases en la frecuencia nominal. Los vehículos eléctricos son una carga monofásica en movimiento, por lo que se pueden conectar aleatoriamente en cualquiera de las 3 fases dentro de las redes de distribución, lo que lleva a un escenario en el que los componentes eléctricos de una fase en particular, como el cable de alimentación, la línea aérea o el transformador, pueden estar muy cargados, mientras que las otras dos fases no lo están. La carga trifásica desequilibrada puede provocar una serie de impactos negativos en la calidad de la energía como pueden ser: fallas en el transformador, pérdida de vida de los equipos, mal funcionamiento de los relés, etcétera. Mientras que mantener la confiabilidad y seguridad de la red sería difícil. La coincidencia en el tiempo entre la carga de los vehículos eléctricos en el hogar y los picos de carga residencial puede conducir a picos voltaicos adicionales en el sistema. Además, varios cargadores de vehículos eléctricos en un vecindario pueden introducir armónicos significativos, lo que reduce la calidad de la energía. Por lo tanto, la integración de una cantidad sustancial de vehículos eléctricos en la red de distribución es un área de interés importante en la comunidad de investigación e ingeniería, especialmente controlando de manera óptima la carga de vehículos eléctricos con la intención de minimizar el impacto de los problemas anteriormente descritos [14].

La integración de vehículos eléctricos a las redes de distribución puede reducir eficazmente las fluctuaciones de voltaje en la misma red y mejorar la calidad de la energía y la capacidad para controlar la frecuencia de las generaciones distribuidas, puede reducir en gran medida la pérdida en las líneas de distribución, evitar la caída de voltaje y lograr un funcionamiento adecuado en los dispositivos de protección del relé. Además, también tiene un gran potencial de cambio en la carga máxima y

puede garantizar la seguridad de las redes de distribución y la reducción en los costos de operación. Los vehículos enchufables juegan un papel importante en los sistemas de energía, pues pueden ajustar la potencia activa, compensar la potencia reactiva y la carga de la red y aumentar la tasa de carga. También pueden proporcionar cierta capacidad de reserva para las redes de distribución [15-20].

El desarrollo de esta tecnología tendrá una gran influencia en el futuro modo de operación comercial de los vehículos eléctricos. Las previsiones muestran que los vehículos eléctricos híbridos enchufables (VEHE) y los vehículos eléctricos enchufables (VEE) puros se convertirán en una parte indivisible y muy importante de los sistemas de distribución dentro de 20 años, en conjunto con el desarrollo de vehículos y redes inteligentes. Esto significa que podrán proporcionar almacenamiento de energía, equilibrar la demanda de las redes de distribución y mejorar la capacidad del suministro de energía de emergencia y la estabilidad en las redes de distribución. Esto también infiere que debido a que más del 90% de los vehículos de pasajeros que se conducen en promedio una hora al día se encuentran inactivos un 95% del tiempo restante del día, esto significa que, si el número de vehículos eléctricos detenidos es lo suficientemente grande, se pueden utilizar como dispositivos de almacenamiento de energía distribuida extraíble cuando se encuentren interconectados a la red de distribución. En consecuencia, pueden proporcionar el excedente de electricidad a las redes de distribución sin dejar de satisfacer la demanda de los consumidores de vehículos eléctricos a baterías (VEB).

CAPÍTULO 3. ENFOQUE CENTRALIZADO

3.1. INTRODUCCIÓN

El enfoque lineal centralizado se aplica para flotillas de VEE con una programación de carga óptima. El enfoque propuesto considera diferentes escenarios de integración de VE a la red y tiene en cuenta las restricciones de los cargadores de VE, los límites del estado de carga (soc) y los niveles de voltaje en los diferentes nodos de la red. Para integrar las últimas restricciones en esta lista, bajo ciertas suposiciones, se emplea un modelo lineal aproximado para sistemas de distribución de baja tensión. El objetivo del método de programación es minimizar el costo de energía empleado para cargar VE mientras se utilizan sus capacidades de almacenamiento de energía para el soporte de voltaje a la red. El método en este capítulo funciona como un punto de referencia para identificar los beneficios potenciales de enfoques mejor elaborados. Se analizan varios casos de estudio como los de tarifa sencilla y tarifa doble.

Este capítulo describe un enfoque lineal propuesto para obtener voltajes de nodo de un sistema de distribución de baja tensión, basado en los perfiles de carga en cada uno de sus nodos con la presencia de VEE. Tomando como referencia este modelo lineal aproximado de la red, se propone un enfoque centralizado de programación de carga de VE, de modo que las capacidades de almacenamiento de energía distribuida disponible de los VEE se empleen para proporcionar servicios de soporte de voltaje a la red. Este enfoque proporciona horarios de carga óptimos para cada VE en un esquema centralizado, tomando en cuenta las limitaciones desde la perspectiva de los propietarios de los VEE. Conociendo las previsiones de consumo y los detalles de las tarifas previamente, la función de costo y las restricciones se modelan de manera que el problema de optimización se pueda resolver aplicando técnicas de programación lineal. El enfoque se prueba en múltiples escenarios, y se observa que, con la configuración adecuada de las restricciones de voltaje y las tarifas, el método redistribuye el consumo de energía de los VEE proporcionando un servicio de soporte de voltaje a la red de distribución [1, 8, 9].

La formulación de este capítulo se propone como punto de referencia para la identificación de posibles beneficios y elementos que puedan ser útiles para aplicaciones más realistas.

3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como objetivo inicial de este enfoque, es posible pensar en minimizar el costo de todos los programas de consumo de energía de los VEE, mientras se cumplen las restricciones de las tasas de carga (potencia), los estados de carga y el soporte de voltaje. Primero, la función objetivo se define como la minimización de la suma de los costos del consumo de energía de cada VE conectado etiquetado con el superíndice $i = 1, 2, \dots, J$, en pasos de tiempo discretizados $k = \{1, 2, \dots, K^i\}$,

$$w^i \in W^i, s^i \in S^i \sum_{i=1}^J \sum_{k=1}^{K^i} C_k T (W_k^i - S_k^i). \quad (3.1)$$

Aquí, los parámetros

- c_k representan el costo de energía en cada paso de tiempo k ,
- T representa la duración de los pasos de tiempo (en horas),
- J es el número de VEE conectados,
- K^i es la cantidad de pasos de tiempo del tiempo de conexión para VE i .

Las variables w_k^i y s_k^i son elementos de los vectores auxiliares w^i y s^i , cuya diferencia,

$$X_k^i = W_k^i - S_k^i \forall k, \quad (3.2)$$

representa la tasa de carga-descarga x_k^i de cada VE conectado. Los vectores auxiliares w^i y s^i se emplean exclusivamente para representar las variables de potencia x_k^i para cada VE, en cada paso de tiempo, como la diferencia de dos variables de valor positivo w_k^i y s_k^i . Estos vectores auxiliares se encuentran dentro de los conjuntos W^i y S^i , definidos por ciertos límites, además de las restricciones de positividad, que se explican en los siguientes subcapítulos.

3.2.1. RESTRICCIONES EN EL CARGADOR

Se asume que los cargadores son capaces de manejar el flujo de energía de manera bidireccional. Además, tienen tasas de suministro y consumo limitadas que deben tomarse en cuenta para el problema de programación de la carga. En este enfoque, para cada VE las tasas de suministro y consumo están limitadas por

$$-p^{-i} \leq X_k^i \leq p^{-i}, \forall k = \{1, 2, \dots, K^i\}, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}, \quad (3.3)$$

donde p^{-i} es la potencia nominal del cargador del VE i –ésimo. Si X_k^i se expresa como la diferencia de dos variables positivas $X_k^i = W_k^i - S_k^i$ (como se muestra en la ecuación (3.3), luego la restricción (3.3) se puede separar en las siguientes dos restricciones,

$$0 \leq w_k^i \leq p^{-i}, 0 \leq s_k^i \leq p^{-i}, \forall k = \{1, 2, \dots, K^i\}, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}, \quad (3.4)$$

Los cuales son válidos para todo el tiempo de conexión de cada VE.

3.2.2. RESTRICCIONES EN LOS ESTADOS DE CARGA PARCIAL Y FINAL

Para un VE llamado i –ésimo, el estado de carga de la batería al final del paso del tiempo k , está dado por,

$$soc_k^i = soc_0^i + \sum_{k=1}^k (w_k^i - s_k^i), \forall k = \{1, 2, \dots, K^i\}, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}. \quad (3.5)$$

Para evitar afectar el estado de salud de las baterías debido a una descarga profunda, los estados parciales de carga deben restringirse entre ciertos límites,

$$\begin{aligned} \underline{soc}^i \leq soc_k^i \leq \overline{soc}^i, \forall k = \{1, 2, \dots, K^i\}, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}, \\ \underline{soc}^i \leq soc_0^i + T \sum_{k=1}^k (w_k^i - s_k^i) \leq \overline{soc}^i. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Aquí $\overline{soc}^i$ y $\underline{soc}^i$ son las restricciones superior e inferior, impuestas para todos los estados de carga parciales. Por otro lado, el estado de carga final tiene una restricción más restrictiva. Tiene que ser igual al estado de carga deseado soc_d^i impuesto por el propietario del VE. Esta restricción se expresa como,

$$soc_0^i + T \sum_{k=1}^{K^i} (w_k^i - s_k^i) = soc_d^i, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}, \quad (3.7)$$

Como se puede observar, los estados de carga son funciones lineales de las variables de decisión del problema, es decir, las tasas de carga/descarga $x_k^i = w_k^i - s_k^i$. Incluso si alguna de las restricciones antes mencionadas se impone sobre variables como los estados de carga parcial y final, todas las restricciones afectan directamente a estas variables de potencia. De hecho, todas estas restricciones son restricciones lineales impuestas sobre las variables $x_k^i = w_k^i - s_k^i$.

3.2.3. RESTRICCIONES EN LOS NIVELES DE VOLTAJE

La mayoría de las restricciones antes mencionadas usualmente son empleadas en problemas de programación de carga. Sin embargo, a continuación, se propone una aproximación lineal para las topologías de la red de distribución para incluir el efecto de las tasas de carga y descarga instantánea de los VE sobre los niveles de voltaje. Se consideran las siguientes restricciones,

$$v_{min} \leq v_k^n \leq v_{max}, \forall k = \{1, 2, \dots, K\}, \forall n = \{1, 2, \dots, N\}. \quad (3.8)$$

Aquí, v_k^n representa el voltaje en el nodo n de una red con N nodos, con un paso de tiempo k . Este voltaje se limita a estar entre el límite inferior v_{min} y el límite superior v_{max} .

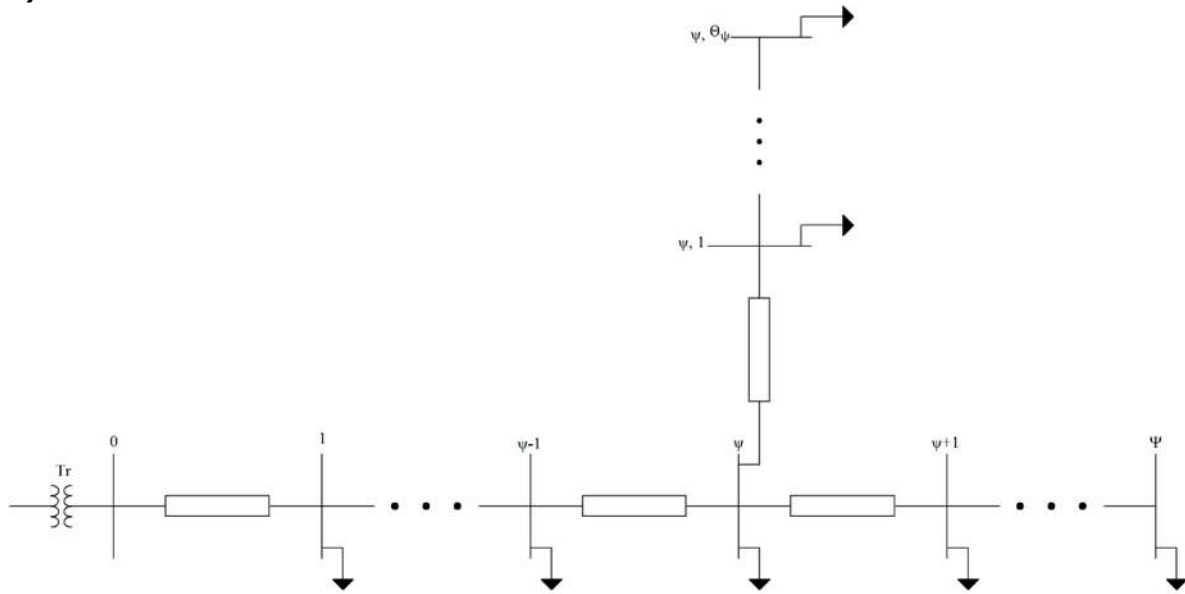
A diferencia de la K^i anteriormente empleada, la variable de horizonte K en esta restricción es fija para el problema centralizado, cubriendo todos los horizontes de cada VE, por ejemplo, $K = 24 h$. Estos voltajes son funciones no lineales de variables con las potencias instantáneas activa y reactiva en cada nodo. Para encontrar valores instantáneos, se pueden emplear modelos de los elementos de la red, y se pueden aplicar técnicas de flujos de carga iterativas. Sin embargo, para mantener la restricción lineal, en el siguiente capítulo se propone una aproximación bajo ciertas suposiciones.

3.3. DETALLES SOBRE EL ENFOQUE DE MODELADO DEL NIVEL DE VOLTAJE

Se considera un modelo de topología radial de una sola línea de un sistema de distribución eléctrica residencial, en la Fig. 3.1a. Esta topología tiene un alimentador básico con una cantidad de nodos Ψ . Además, las ramas pueden divergir de cualquier nodo. Por ejemplo, se muestra una rama con una cantidad θ_ψ de nodos, que difieren del nodo del alimentador básico. En este caso, los nodos del alimentador básico se etiquetan con los índices $\psi = \{1, 2, \dots, \Psi\}$, mientras que los nodos de rama se nombran con los pares (ψ, θ) , donde $\theta = \{1, 2, \dots, \theta_\psi\}$. Tomando en cuenta el total de nodos, se considera en cambio una etiqueta única $n = \{1, 2, \dots, N\}$, donde N es el total de nodos incluido el alimentador básico y las ramas.

Suponiendo una red balanceada de baja tensión, con la topología radial de la Fig. 3.1a para sistemas de energía de alto voltaje, el modelo de líneas de transmisión cortas usualmente ignora la parte resistiva de las impedancias de línea debido a que la parte reactiva es más grande. Por el contrario, en condiciones de baja tensión, la parte resistiva de las impedancias de línea suele ser mayor que la parte reactiva. Para el propósito del enfoque en este capítulo, se asume que la parte resistiva es mucho más grande que la parte reactiva $R \gg X$, por lo tanto, la parte reactiva puede despreciarse. La segunda suposición consiste en considerar sólo las cargas de factor de potencia unitario (incluyendo los VEE), eliminando también la parte reactiva de las cargas. Considerar un factor de potencia unitario para la carga residencial puede ser una suposición sólida, sin embargo, se asume debido a que los factores de potencia bajos usualmente se penalizan con costos en el recibo más altos para los clientes del servicio de electricidad.

a)



b)

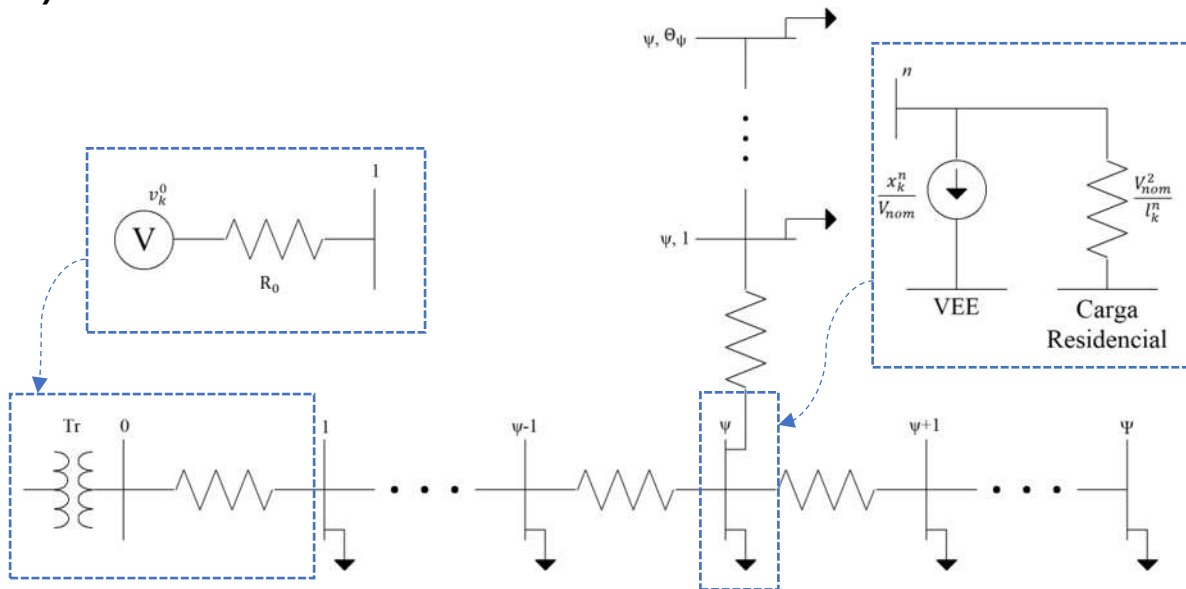


Fig. 3. 1 (a) Topología radial de una línea de baja tensión. (b) Aproximación lineal para transformadores, líneas y elementos de carga.

Para un nodo de red etiquetado con índice n , con potencia activa l_k^n en el momento k , la carga se representa aproximadamente con una resistencia R_k^n dada por,

$$R_k^n := \frac{V_{nom}^2}{l_k^n} \quad (3.9)$$

Donde V_{nom} es el valor nominal de voltaje de la red. Por otro lado, para modelar los efectos de la modulación de las tasas de carga y descarga de los VE, sus baterías se representan como fuentes de corriente con corrientes variables. Dada una referencia de potencia x_k^n para un VE conectado a un nodo n , el valor correspondiente de corriente h_k^n para el modelo, en el momento k , se aproxima como,

$$h_k^n := \frac{x_k^n}{V_{nom}} \quad (3.10)$$

Finalmente, el nodo del transformador se modela como una fuente de voltaje fijo. Después de tomar en cuenta estas suposiciones, el modelo original de topología radial de una sola línea se convierte en un circuito lineal, como se muestra en la Fig. 3.1b. Los valores de los parámetros de resistencia de este circuito lineal cambian de acuerdo a los pronósticos de carga en cada nodo de la red. Además, conociendo los parámetros de resistencia, el voltaje en el nodo del transformador y el valor asignado a las fuentes de corriente, es posible encontrar una aproximación de los voltajes en cada nodo invirtiendo la matriz del sistema.

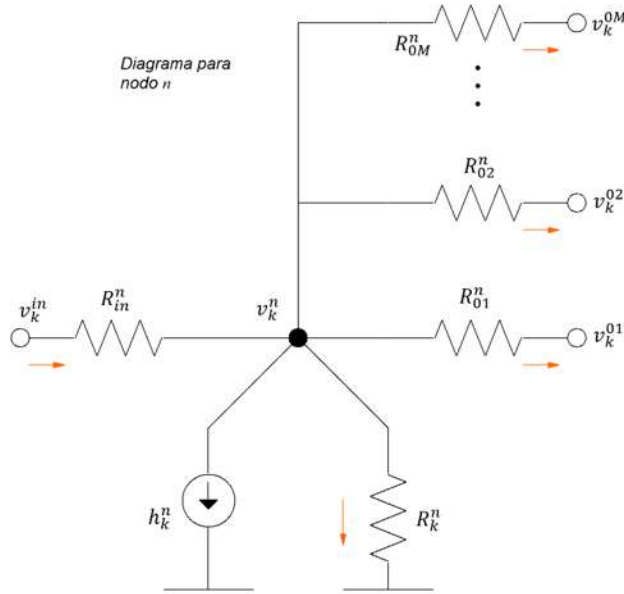


Fig. 3. 2 Diagrama representativo de las corrientes que fluyen a través de un nodo en el modelo aproximado de la red.

Descomponiendo la topología radial del circuito en varios diagramas definidos por nodos. La Fig. 3.2 muestra un diagrama correspondiente al nodo n en el alimentador básico. Según las leyes de circuitos de Kirchhoff, las corrientes en el nodo n definen,

$$h_k^n = v_k^{in} \left(\frac{1}{R_{in}^n} \right) - v_k^n \left(\frac{1}{R_{in}^n} + \frac{1}{R_k^n} + \frac{1}{R_{01}^n} + \frac{1}{R_{02}^n} + \dots + \frac{1}{R_{0M}^n} \right) + v_k^{01} \left(\frac{1}{R_{01}^n} \right) + v_k^{02} \left(\frac{1}{R_{02}^n} \right) + \dots + v_k^{0M} \left(\frac{1}{R_{0M}^n} \right). \quad (3.11)$$

Las variaciones en la topología de un nodo se pueden tomar en cuenta al eliminar los términos en la ecuación (3.11). Por ejemplo, algunas opciones se muestran a continuación:

- Si no hay ningún VE conectado al nodo, la expresión sería la siguiente:

$$0 = v_k^{in} \left(\frac{1}{R_{in}^n} \right) - v_k^n \left(\frac{1}{R_{in}^n} + \frac{1}{R_k^n} + \frac{1}{R_{01}^n} + \frac{1}{R_{02}^n} + \dots + \frac{1}{R_{0M}^n} \right) + v_k^{01} \left(\frac{1}{R_{01}^n} \right) + v_k^{02} \left(\frac{1}{R_{02}^n} \right) + \dots + v_k^{0M} \left(\frac{1}{R_{0M}^n} \right)$$

- Si un nodo es el nodo final de una rama o alimentador, la expresión sería la siguiente:

$$h_k^n = v_k^{in} \left(\frac{1}{R_{in}^n} \right) - v_k^n \left(\frac{1}{R_{in}^n} + \frac{1}{R_k^n} \right)$$

- Finalmente, si un nodo es el primero después del nodo transformador, la expresión sería la siguiente:

$$h_k^n - v_k^0 \left(\frac{1}{R_0} \right) = -v_k^n \left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_k^n} + \frac{1}{R_{01}^n} + \frac{1}{R_{02}^n} + \dots + \frac{1}{R_{0M}^n} \right) + v_k^{01} \left(\frac{1}{R_{01}^n} \right) + v_k^{02} \left(\frac{1}{R_{02}^n} \right) + \dots + v_k^{0M} \left(\frac{1}{R_{0M}^n} \right). \quad (3.12)$$

Donde v_k^0 es el voltaje del transformador en el momento k , y R_0 es la resistencia de la línea conectando el nodo transformador y el nodo n .

Como se puede observar, hay N variables de voltaje desconocidas, y N ecuaciones lineales. Organizando todas las expresiones para cada nodo, como se mencionó antes, una expresión con la siguiente estructura,

$$\tilde{\mathbf{A}}_k \mathbf{v}_k = \mathbf{h}_k + \left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{v}_k^0 \quad (3.13)$$

Puede ser construida. Aquí, la matriz $\tilde{\mathbf{A}}_k$ recopila todos los coeficientes de conductancia multiplicando las incógnitas de voltaje en las ecuaciones lineales (3.11), para cada nodo en el momento k . El vector $\mathbf{v}_k$ es el vector de voltajes desconocidos organizado como se mencionó antes,

$$\mathbf{v}_k = [v_k^1, v_k^2, \dots, v_k^n, \dots, v_k^N]^T \quad (3.14)$$

Por otra parte, el vector $\mathbf{h}_k$ reúne las referencias actuales de los VEE en cada nodo

$$\mathbf{h}_k = [h_k^1, h_k^2, \dots, h_k^n, \dots, h_k^N]^T \quad (3.15)$$

Si no hay un VE conectado en el nodo n , su entrada de corriente es $h_k^n = 0$. Finalmente, el vector $\mathbf{v}_k^0$ es un vector con las mismas dimensiones de $\mathbf{h}_k$, cuyo primer elemento es el voltaje del transformador en el momento k , y todos los demás elementos son cero, es decir,

$$\mathbf{v}_k^0 = [-v_k^0, 0, \dots, 0]^T. \quad (3.16)$$

La suma $\mathbf{h}_k + \left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{v}_k^0$, tiene su origen en la expresión (3.12), y separa la contribución del transformador (la fuente de voltaje), de las contribuciones de las baterías de los VEE (fuentes de corriente). El vector de corrientes puede ser expresado en términos de referencia de potencia en el momento k , como se muestra en la ecuación (3.10), entonces la ecuación (3.13), se convierte en,

$$\tilde{\mathbf{A}}_k \mathbf{v}_k = \left(\frac{1}{V_{nom}}\right) \mathbf{x}_k + \left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{v}_k^0, \quad (3.17)$$

Donde $\mathbf{x}_k = [x_k^1, x_k^2, \dots, x_k^n, \dots, x_k^N]^T$, es el vector de referencia de las tasas de carga y descarga de los VEE. Definiendo $\mathbf{A}_k$ como la matriz inversa de $\tilde{\mathbf{A}}_k$, la siguiente expresión,

$$\mathbf{v}_k = \left(\frac{1}{V_{nom}} \right) \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \left(\frac{1}{R_0} \right) \mathbf{A}_k \mathbf{v}_k^0, \quad (3.18)$$

Proporciona los valores de voltaje desconocidos para todos los momentos $k = \{1, 2, \dots, K\}$, dada la información de la carga residencial pronosticada en la matriz inversa ($\mathbf{A}_k$), y los valores de voltaje y potencia de referencia del transformador y de los VEE (en $\mathbf{v}_k^0$, y $\mathbf{x}_k$). Es importante tomar en cuenta que el voltaje base en cada nodo, sin incluir los VEE, está dado por el segundo término ($\left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{A}_k \mathbf{v}_k^0$), mientras que el primer término ($\left(\frac{1}{V_{nom}}\right) \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k$) proporciona información de las variaciones de voltaje causadas por el suministro y consumo del VEE.

Con esta aproximación lineal de los voltajes en cada nodo de la red de baja tensión, es posible conocer todos los voltajes v_k^n en las restricciones (3.8), dada por los programas de carga de los VEE en un tiempo k . Por lo tanto, estas restricciones de voltaje se convierten en restricciones lineales adicionales sobre la potencia de los VEE.

3.3.1. MODELADO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO Y DE LA CARGA RESIDENCIAL COMO FUENTES DE CORRIENTE

En lugar de modelar las cargas residenciales por resistencias R_k^n aproximadas por la ecuación (3.9), se pueden modelar como fuentes de corriente tal como se hizo para la carga de un VE. De manera similar a la ecuación (3.10), para la carga residencial el valor de corriente es aproximado por,

$$g_k^n := \frac{l_k^n}{V_{nom}}, \quad (3.19)$$

Donde l_k^n es la potencia activa en el nodo n en el momento k . Entonces el diagrama individual del nodo sería el que se muestra en la Fig. 3.3, y la expresión para dicho nodo sería la siguiente,

$$h_k^n + g_k^n = v_k^{in} \left(\frac{1}{R_{in}^n} \right) - v_k^n \left(\frac{1}{R_{in}^n} + \frac{1}{R_{01}^n} + \frac{1}{R_{02}^n} + \cdots + \frac{1}{R_{0M}^n} \right) + v_k^{01} \left(\frac{1}{R_{01}^n} \right) + v_k^{02} \left(\frac{1}{R_{02}^n} \right) + \cdots + v_k^{0M} \left(\frac{1}{R_{0M}^n} \right), \quad (3.20)$$

Donde todas las posibles variaciones en la topología pueden ser consideradas también. Si solo se considerara fuentes de corriente para representar ambas cargas, entonces nuevamente habría N variables de voltaje desconocidas y N ecuaciones lineales, pero la matriz de la topología se vuelve independiente del tiempo k . Esto sucede debido a que sólo se consideran las partes resistivas de las líneas, y éstas son constantes en el tiempo. En otras palabras, el coeficiente correspondiente a v_k^n a la derecha de la ecuación (3.11) depende del tiempo k , mientras que en la ecuación (3.20), es independiente de él.

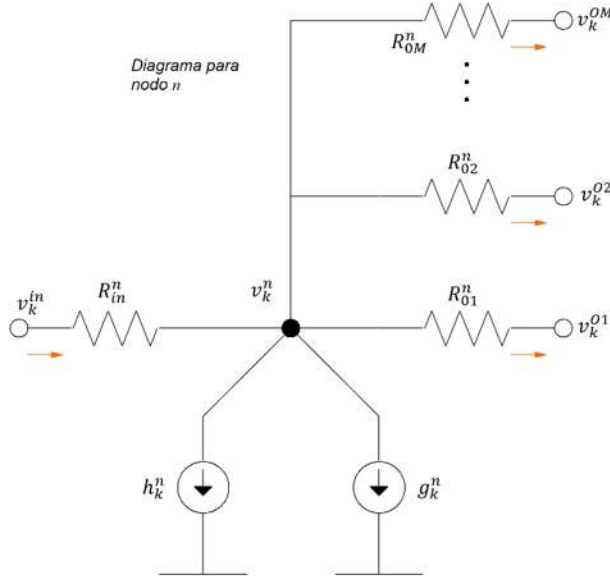


Fig. 3. 3 Diagrama representativo de las corrientes que fluyen a través de un nodo en el modelo aproximado de la red. Representación alternativa de la carga residencial como fuente de corriente.

Como resultado, se obtiene la siguiente ecuación organizando todas las expresiones para cada nodo,

$$\tilde{\mathbf{A}} \mathbf{v}_k = \mathbf{h}_k + \mathbf{g}_k + \left(\frac{1}{R_0} \right) \mathbf{v}_k^0, \quad (3.21)$$

Donde $\mathbf{v}_k$, $\mathbf{h}_k$, y $\mathbf{v}_k^0$, tienen la misma estructura, y $\mathbf{g}_k$,

$$\mathbf{g}_k = [g_k^1, g_k^2, \dots, g_k^n, \dots, g_k^N]^T. \quad (3.22)$$

Es el vector de las corrientes correspondiente a la carga residencial. Después de encontrar $\mathbf{A}$ (la inversa de $\tilde{\mathbf{A}}$), la cual es válida para todos los pasos de tiempo k , y aplicando las ecuaciones (3.10) y (3.19), la siguiente expresión,

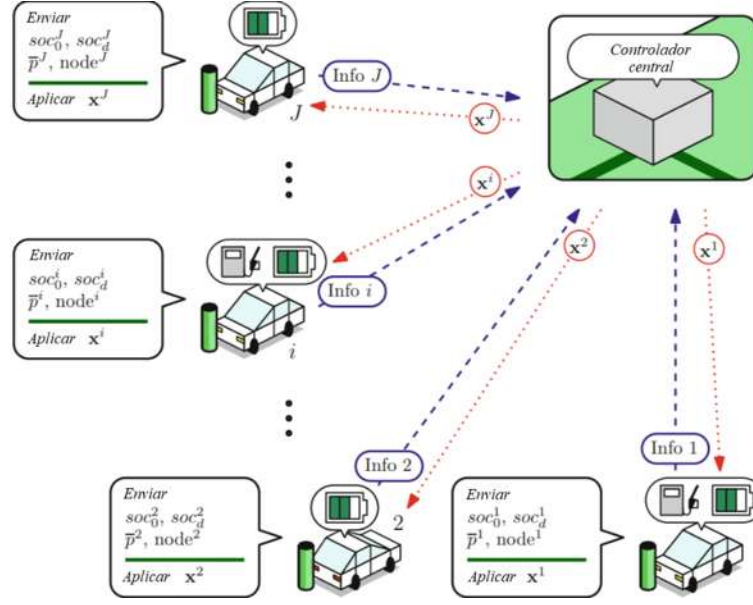
$$\mathbf{v}_k = \left(\frac{1}{V_{nom}}\right) \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \left(\frac{1}{V_{nom}}\right) \mathbf{A} \mathbf{l}_k + \left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{A} \mathbf{v}_k^0, \quad (3.23)$$

Proporciona los valores desconocidos de voltaje para todos los tiempos $k = \{1, 2, \dots, K\}$, dada la información de la carga residencial pronosticada en el vector de corriente en cada paso de tiempo ($\mathbf{l}_k$), el voltaje y potencia de referencia del transformador y de los VEE (en $\mathbf{v}_k^0$, y $\mathbf{x}_k$). Es importante recalcar que ahora, el voltaje base en cada nodo sin incluir los VEE, está dado por los términos $\left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{A} \mathbf{l}_k + \left(\frac{1}{R_0}\right) \mathbf{A} \mathbf{v}_k^0$, mientras que el primer término $\left(\frac{1}{V_{nom}}\right) \mathbf{A} \mathbf{x}_k$ proporciona información en las variaciones de voltaje introducidas por el suministro y consumo de energía del VE.

Esta aproximación alternativa es más flexible que la primera, especialmente cuando la cantidad de nodos y de líneas es muy grande. En el siguiente subcapítulo se aborda un pequeño ejemplo para aclarar el enfoque centralizado propuesto en este capítulo. Posterior al ejemplo ilustrativo, se consideran escenarios reales con un número más grande de nodos tomando en cuenta la carga residencial y de los VEE.

Y antes de continuar con la siguiente sección, se describirá la manera en que el enfoque propuesto funciona. La Fig. 3.4 muestra un diagrama ilustrativo del método propuesto para la operación de los programas de carga de VEE. Este esquema centraliza la optimización de horarios de carga para minimizar los costos del consumo de energía como ya se explicó. En un tiempo dado k , un controlador central (CC) se encarga de reunir toda la información recibida de los VEE recién llegados. Esta información incluye los estados de carga inicial y deseados, potencia nominal del cargador, el nodo de la red donde está conectado el VE, y un tiempo estimado o deseado de salida. El CC se encarga también de recolectar la información de los pronósticos de carga en cada nodo de la red donde existe carga residencial. Una vez que se ha recolectado toda la información, el CC ejecuta la rutina de optimización y envía los horarios de suministro y consumo a cada uno de los VEE servidos.

En el siguiente paso de tiempo k , es probable que haya VEE recién llegados, por lo que el procedimiento se repite sólo con los recién llegados (los VE anteriores ya tienen sus horarios fijos).



Controlador central: Minimizar el costo de la energía

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^J \sum_{k=1}^{K^i} c_k T(w_k^i - s_k^i).$$

Sujeto a:

Restricciones de potencia

$$\begin{aligned} 0 \leq w_k^i &\leq \bar{p}^i & \forall i = \{1, 2, \dots, J\} \\ 0 \leq s_k^i &\leq \bar{p}^i & \forall k = \{1, 2, \dots, K^i\} \end{aligned}$$

Restricciones del estado de carga

$$\begin{aligned} \underline{soc}^i &\leq soc_k^i \leq \overline{soc}^i, \forall k = \{1, 2, \dots, K^i\}, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}, \\ \underline{soc}^i &\leq soc_0^i + T \sum_{k=1}^k (w_k^i - s_k^i) \leq \overline{soc}^i. \end{aligned}$$

Restricciones de los estados de carga deseados

$$soc_0^i + T \sum_{k=1}^{K^i} (w_k^i - s_k^i) = soc_d^i, \forall i = \{1, 2, \dots, J\}$$

Restricciones de voltaje

$$\begin{aligned} v_{min} &\leq v_k^n \leq v_{max} \\ \forall k &= \{1, 2, \dots, K\} \\ \forall n &= \{1, 2, \dots, N\} \end{aligned}$$

Fig. 3. 4 Tabla de las interacciones y el flujo de información en el enfoque centralizado propuesto para la administración de carga para VEE.

3.4. EJEMPLO ILUSTRATIVO CON TOPOLOGÍA RADIAL EN UNA RED DE 8 NODOS

En la Fig. 3.5 se muestra una red de prueba. Es una red residencial de ocho nodos, cada una alimentando una casa. Se asume que hay tres VEE conectados a la red a las 18 hrs y durante diferentes periodos de carga (se desconectan a las 06 hrs, 04 hrs y 04:30 hrs respectivamente a la mañana siguiente). Están conectados en los nodos señalados con los puntos rojos en la red. (Ver ANEXO A).

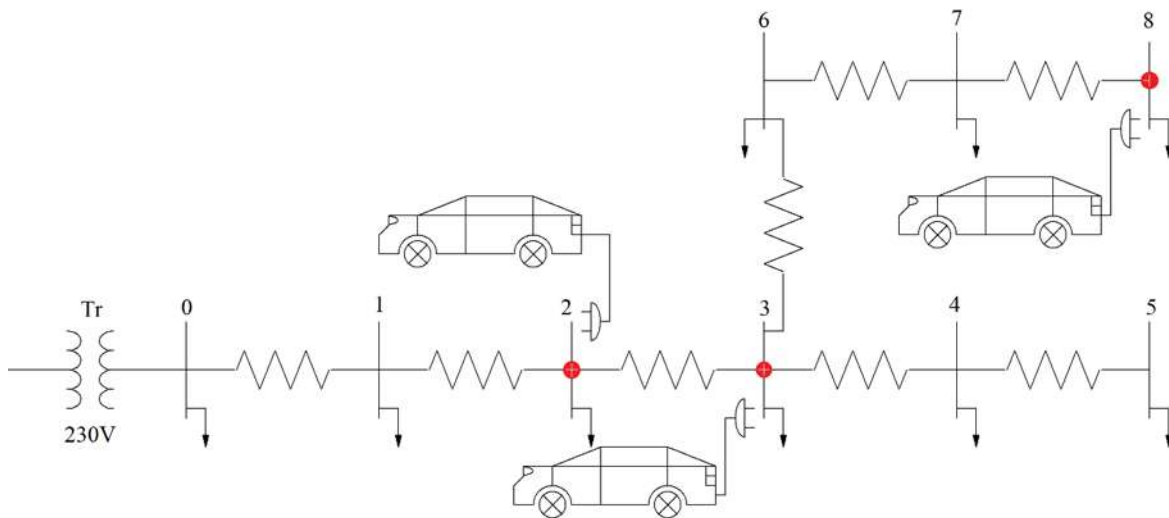


Fig. 3. 5 Red radial propuesta para probar el método. © [2017] IEEE.

El pronóstico de 24 horas del perfil de carga total para el transformador se muestra en la figura 3.6. El voltaje en el nodo del transformador se fija a 230V. Los cargadores se restringen a los niveles máximos de carga y descarga de 3 kW, y las baterías tienen una capacidad nominal de 20 kWh. No obstante, sólo el 80% de la capacidad está disponible, es decir, 16 kWh, para reducir el impacto en la vida útil de la batería.

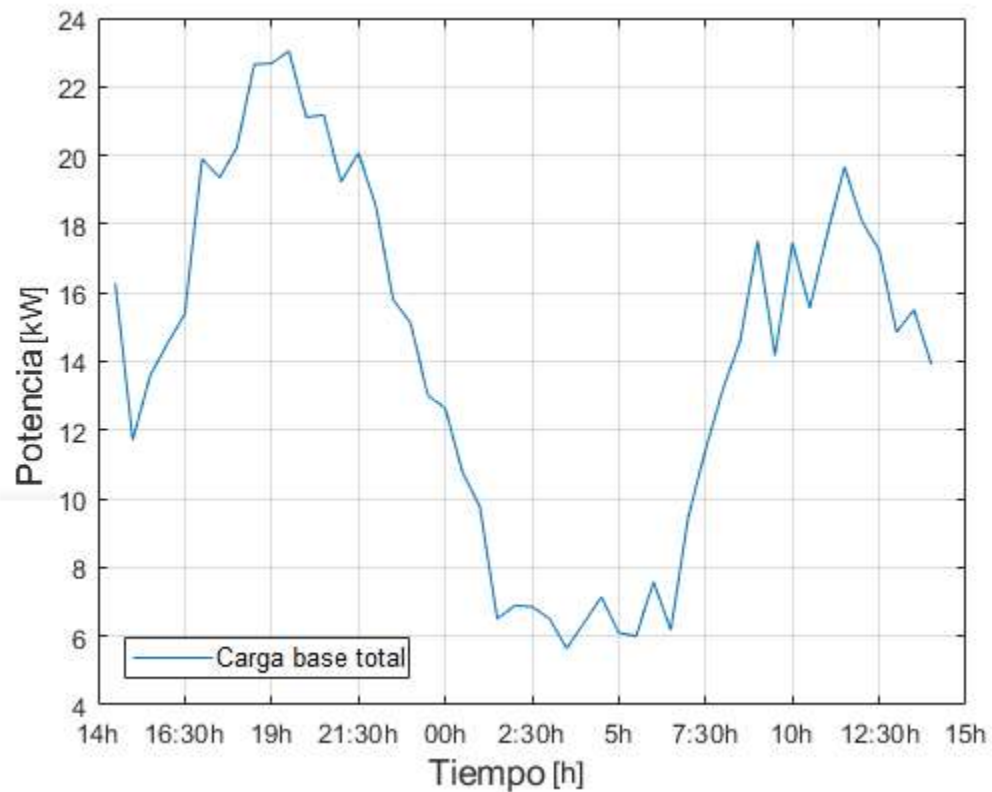


Fig. 3. 6 Ejemplo de un perfil de carga de una residencia. El segmento continuo corresponde al periodo de carga para VEE. © IEEE [2017].

Los parámetros de las líneas se enumeran en la tabla 3.1. En estas líneas se emplea un cable de baja tensión estándar (sección de 25mm^2 , $0.78 \Omega/\text{km}$). Se evalúan dos casos. En el primer caso, sin considerar los VEE conectados a la red, las cargas no causan violaciones a los límites de voltaje como se puede observar en la Fig. 3.7. Esta figura muestra los perfiles de voltaje en cada nodo sin VEE conectados. Es posible ver que cada perfil de voltaje se mantiene entre 208 y 230 V, durante este periodo.

Línea		Caso 1		Caso 2	
Desde	Hasta	Distancia [m]	R [Ω]	Distancia [m]	R [Ω]
0	1	64	0.05	64	0.05
1	2	64	0.05	64	0.05
2	3	128.2	0.10	192.3	0.15
3	4	192.3	0.15	320.5	0.25
4	5	192.3	0.15	192.3	0.15
5	6	128.2	0.10	128.2	0.10
6	7	64	0.05	64	0.05
7	8	128.2	0.10	128.2	0.10

Tabla 3. 1 Parámetros de línea de la red ($0.78(\Omega)/km$).

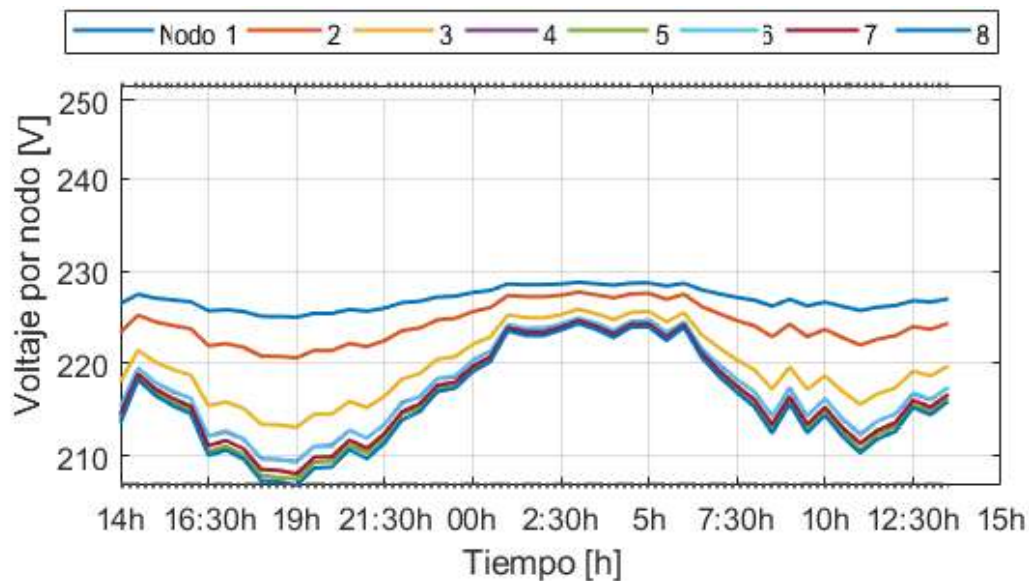


Fig. 3. 7 Perfiles de voltaje para el caso 1 de la red de prueba sin VEE conectados. Los perfiles no evidencian problemas de voltaje. El límite inferior de voltaje (208 V.) está representado por una línea discontinua.

La Fig. 3.7 muestra las gráficas de los comportamientos de voltaje de cada nodo de la red de prueba, tomando como referencia la carga total base mostrada en la Fig. 3.6, se puede apreciar que durante las horas de mayor demanda, es decir, que entre las 14:00 y las 21:00 hrs el consumo de kWh aumenta por lo que el nivel de voltaje disminuye debido a la demanda que se tiene en ese lapso de tiempo, por lo que los

perfiles muestran una variación hacia la parte inferior de la gráfica, regresando a los niveles superiores cuando la demanda disminuye y de igual manera la carga base muestra un consumo de kWh mucho menor con respecto a las horas pico.

El segundo caso presenta una ligera variación en el límite inferior de línea debido a un aumento en la distancia entre los nodos 3 y 4, la cual fue suficiente para causar violaciones al límite de voltaje en ciertos nodos durante las horas pico de demanda, incluso sin VEE conectados. En este caso, los perfiles de voltaje para cada nodo y en cada paso de tiempo se muestran en la Fig. 3.8.

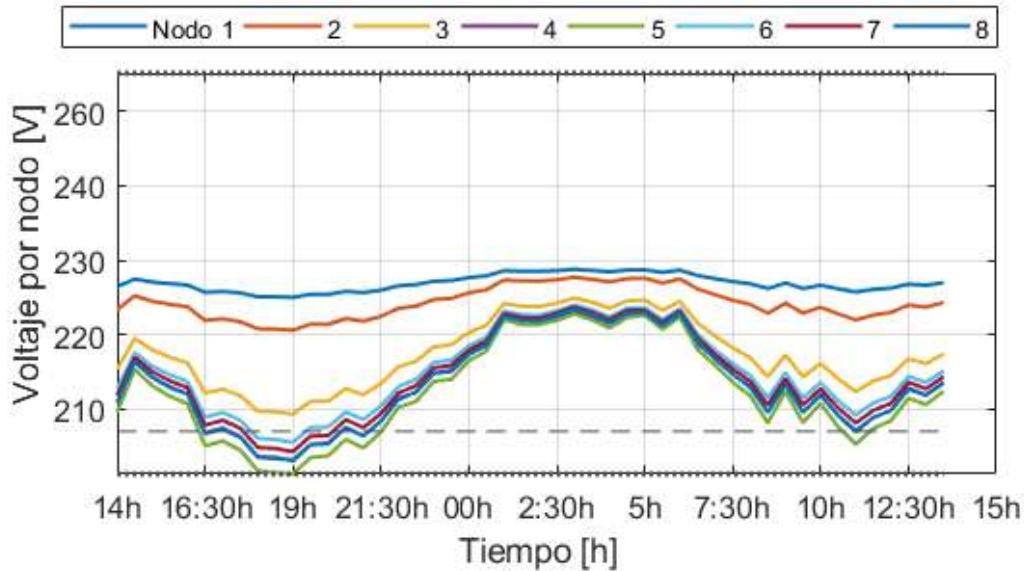


Fig. 3. 8 Perfiles de voltaje para el caso 2 de la red de prueba sin VEE conectados. Ciertos perfiles exceden los límites establecidos. El límite inferior de voltaje (208 V.) está representado por una línea discontinua.

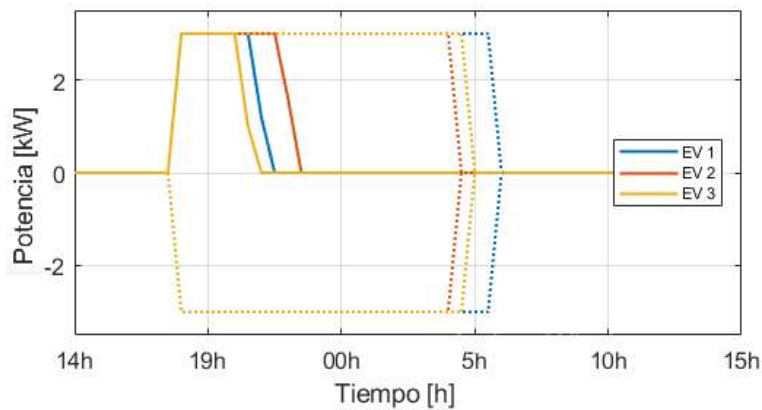
3.4.1. CASO DE RED 1 – VEHÍCULO ELÉCTRICO ENCHUFABLE SIN GESTIÓN DE CARGA

Cuando existe una conexión de VEE sin ningún enfoque que gestione la carga, se supone que los cargadores se sitúan en el régimen del rango de carga máxima para recargar las baterías lo más rápido posible. Cuando las baterías están completamente cargadas, sus cargadores detienen el consumo de energía. La Fig. 3.9a) muestra los perfiles de potencia cuando no se tiene gestión en la carga de las baterías. En este escenario, la energía consumida para cargar los tres VEE, es decir, 3 kW durante 3.2 hrs para el primer VE, 4.27 hrs para el segundo y 2.67 hrs para el tercero, donde dichos tiempos se eligieron arbitrariamente, coincide con las horas pico residenciales. Y la Fig. 3.9b) muestra los perfiles correspondientes al estado de carga. Como puede observarse, las baterías están completamente cargadas en aproximadamente un tercio del tiempo disponible para el período de

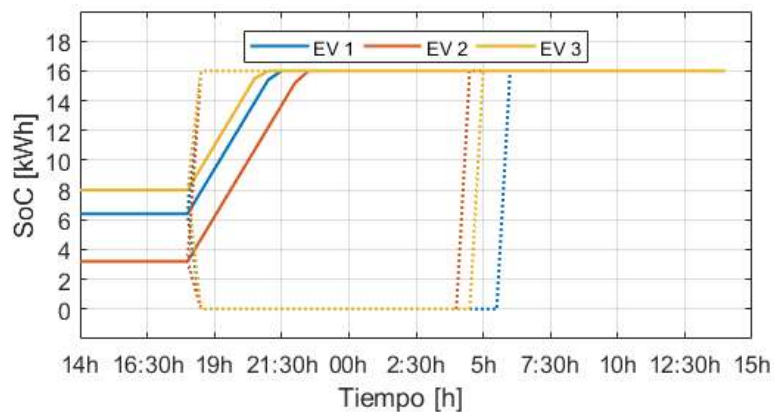
carga. Para cada nodo, los perfiles de voltajes resultantes se pueden ver en la Fig. 3.9c).

En comparación con los perfiles de voltaje sin VEE, que se muestran en la Fig. 3.7, se puede observar que los voltajes en los nodos 3–8 caen por debajo del límite establecido de 208 V., entre las 18 y las 21:30 h debido al pico de consumo. Si estas condiciones se aplican en el caso 2 de la red, el consumo de los VEE hará que los perfiles de voltaje caigan aún más que los de las Figs. 3.8 y 3.9c). En este caso, se considera una tarifa ficticia única de: \$1/kWh. El costo resultante de cargar los tres VEE es \$30.4. Esto es proporcional a la cantidad total de energía requerida para cargar las baterías, es decir, 30.4 kWh, correspondientes a 60, 80 y 50% de 16 kWh.

a)



b)



c)

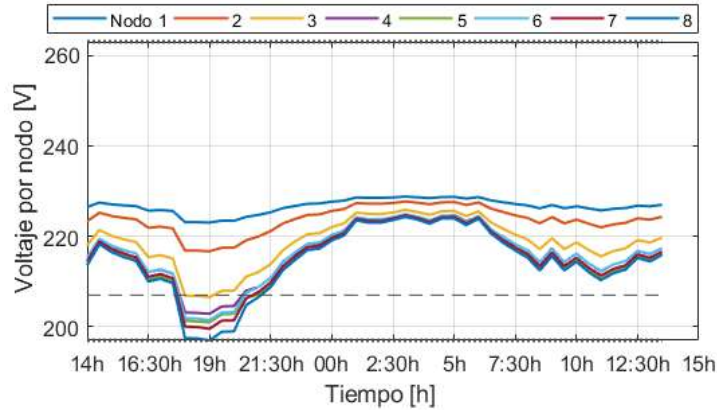


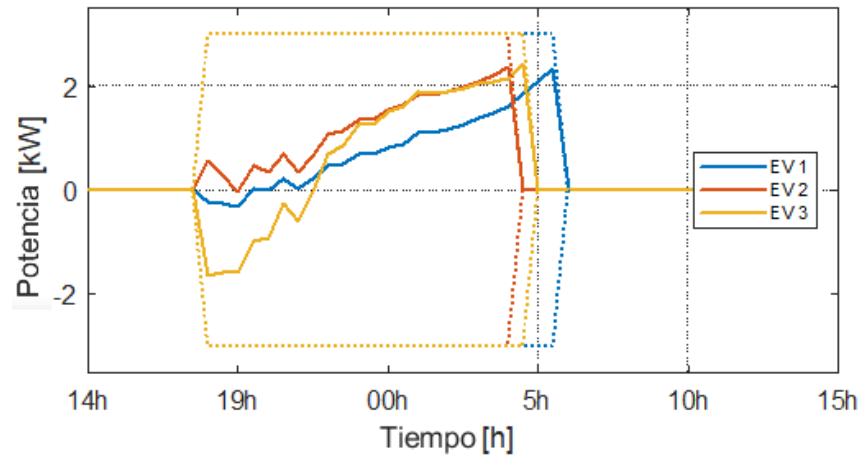
Fig. 3. 9 Caso 1 sin gestión de carga. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje. Donde las líneas punteadas en las gráficas a) determinan la potencia máxima y mínima de carga y descarga de las baterías, y b) la capacidad máxima y mínima de las mismas.

3.4.2. CASO DE RED 1 – GESTIÓN DE CARGA – TARIFA ÚNICA

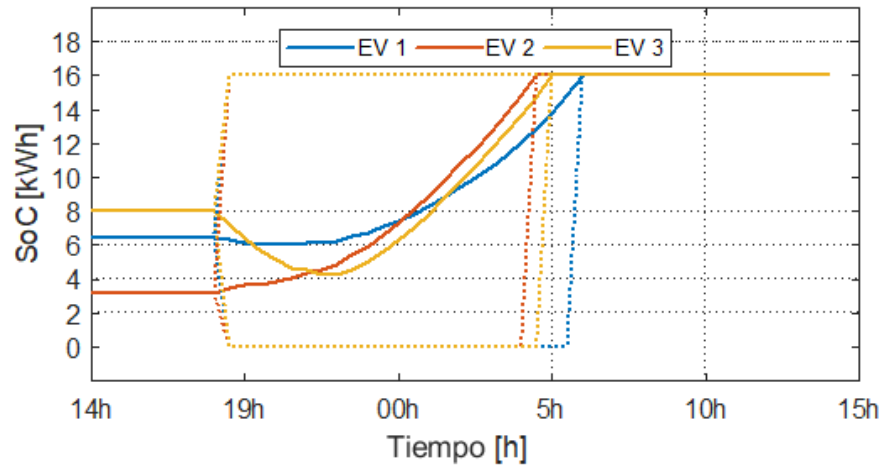
Aplicando el enfoque de gestión de carga para VEE propuesto al primer escenario de la red, se obtienen los perfiles de potencia mostrados en la Fig. 3.10a). Se puede observar que el consumo de los VEE se redistribuye durante todo el período de carga. Es importante tener en cuenta que el pico de consumo de los VEE se produce durante las horas de baja demanda. Además, es importante notar que durante las horas pico de carga base, el VE con el estado de carga inicial más alto inyecta energía a la red para compensar el consumo de los otros VEE y de esa manera mantener los voltajes dentro de los límites.

Los perfiles de estado de carga resultantes se muestran en la Fig. 3.10b). Se puede ver que al final del período de carga, las baterías están completamente cargadas. Los voltajes en todos los nodos se mantienen dentro de los límites deseados, incluso durante las horas pico de demanda, como se muestra en la Fig. 3.10c). En este caso, se considera la misma tarifa ficticia única: \$1/kWh. Dado que la cantidad total de energía requerida para cargar completamente los VEE es de 30.4 kWh, el costo óptimo de cargar los VEE también es de \$30.4, como lo fue para el caso subóptimo.

a)



b)



c)

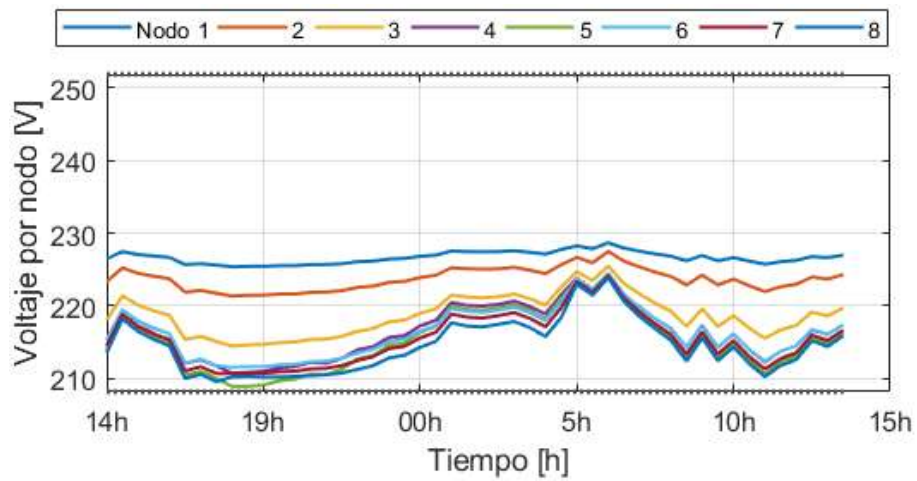


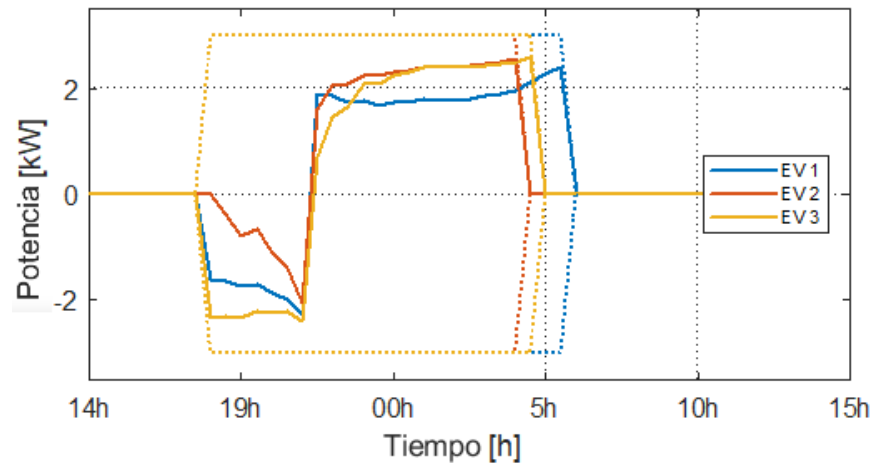
Fig. 3. 10 Caso 1 con gestión de carga y tarifa única. a) Perfiles de potencia, b) Perfiles de estados de carga, c) Perfiles de voltaje

3.4.3. CASO DE RED 1 – GESTIÓN DE CARGA – ESCENARIO DE DOS TARIFAS

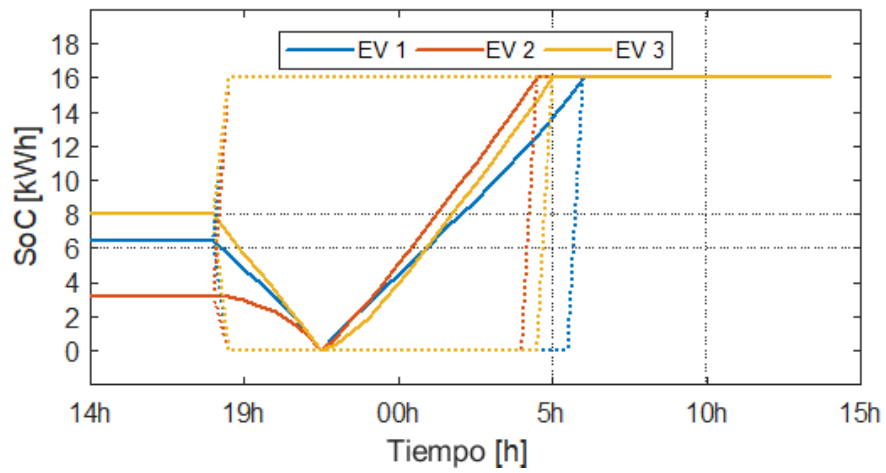
Ahora se considera un escenario de dos tarifas: \$1/kWh entre las 22 y 06 hrs, y \$1.5/kWh de las 06:01 hrs hasta las 21:59 hrs. En el caso subóptimo, el consumo se concentra durante el intervalo de precio alto, por lo que el costo de la carga total de un VE sin administración es de \$45.6. La aplicación del enfoque de gestión de carga de VE propuesto para el escenario de dos tarifas, da como resultado los perfiles de potencia de la Fig. 3.11a). El consumo también se redistribuye durante todo el periodo de carga. Sin embargo, los VEE ahora intentan vender la mayor cantidad posible de su energía almacenada inicial durante las horas de precio alto, con la intención de reducir el costo de recargar sus baterías. Los perfiles de estado de carga en la Fig. 3.11b) son útiles para verificar este comportamiento.

Al final de las horas de precio alto, los tres VE están completamente descargados. Venden su energía inicialmente almacenada y durante las horas de tarifa baja, cargan completamente sus baterías. Según sea requerido, los perfiles de voltaje correspondientes a cada nodo se mantienen dentro de los límites deseados, incluso durante las horas pico de demanda como se muestra en la Fig. 3.11c). El costo óptimo de cargar los VE ahora se reduce a \$21.6. Este costo corresponde al costo de cargar completamente las baterías durante las horas de precio bajo ($3 \times 16\text{kWh} \times \$1/\text{kWh} = \$48.0$) menos la ganancia obtenida de la venta de la energía almacenada inicialmente durante las horas de tarifa alta ($16\text{kWh} \times (0.4 + 0.2 + 0.5) \times \$1.5/\text{kWh} = \$26.4$).

a)



b)



c)

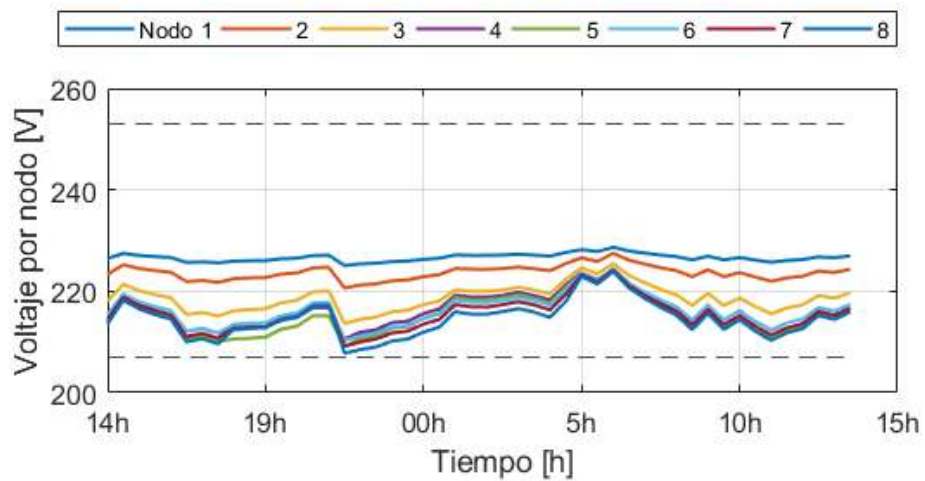
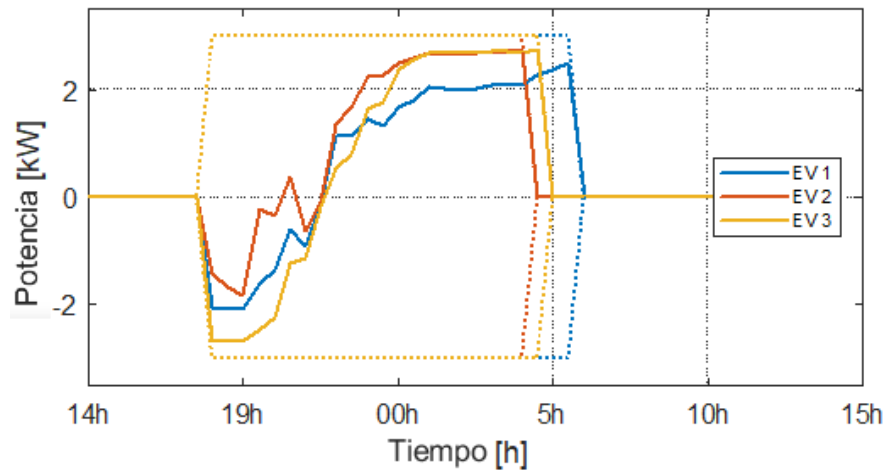


Fig. 3. 11 Caso 1 con gestión de carga y dos tarifas. a) Perfiles de potencia, b) Perfiles de estados de carga, c) Perfiles de voltaje.

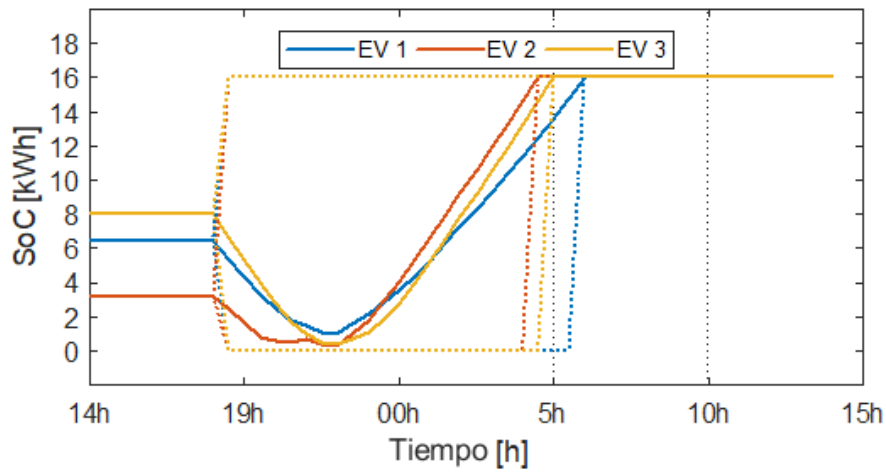
3.4.4. CASO DE RED 2 – GESTIÓN DE CARGA

Suponiendo nuevamente una tarifa única, el enfoque propuesto se prueba bajo las condiciones del caso 2 de red. En este caso, los perfiles de voltaje no respetan las restricciones durante las horas pico, incluso sin VEE. Dado que las horas pico coinciden con el inicio del período de carga, si los VE no tienen energía almacenada inicialmente en sus baterías, no se pueden satisfacer las restricciones de soporte de voltaje y no hay una solución viable. Si la cantidad inicial de energía almacenada es suficiente, los VE pueden proporcionar servicios de soporte de voltaje a la red inyectando esta energía y compensando la carga base. La Fig. 3.8 muestra que, sin los VE, los nodos 4-8 van por debajo de los límites establecidos. La aplicación de la estrategia de programación centralizada propuesta resulta en los perfiles de potencia de la Fig. 3.12a), y en los perfiles de estado de carga de la Fig. 3.12b). Aquí, los tres VE inyectan energía a la red durante las horas pico, casi hasta que están completamente descargados. Después de las 22 hrs, cuando la demanda base disminuye, los VE comienzan a consumir hasta que están completamente cargados. Es importante notar que el problema de voltaje inicial de la red se resuelve con el servicio de soporte provisto en cada nodo de la red, como se puede ver en la Fig. 3.12c). En este caso, el costo sigue siendo \$30.4 como en el caso 1, porque la cantidad total de energía requerida para cargar completamente las baterías es de 30.4 kWh. Es importante destacar que estos horarios óptimos se eligen cuando el solucionador alcanza el criterio de detención. Sin embargo, dado el amplio rango de libertad para las variables de voltaje cuando la demanda base comienza a disminuir (especialmente entre las 01 hrs y 05 hrs), existen múltiples planes óptimos, que obviamente tienen el mismo costo.

a)



b)



c)

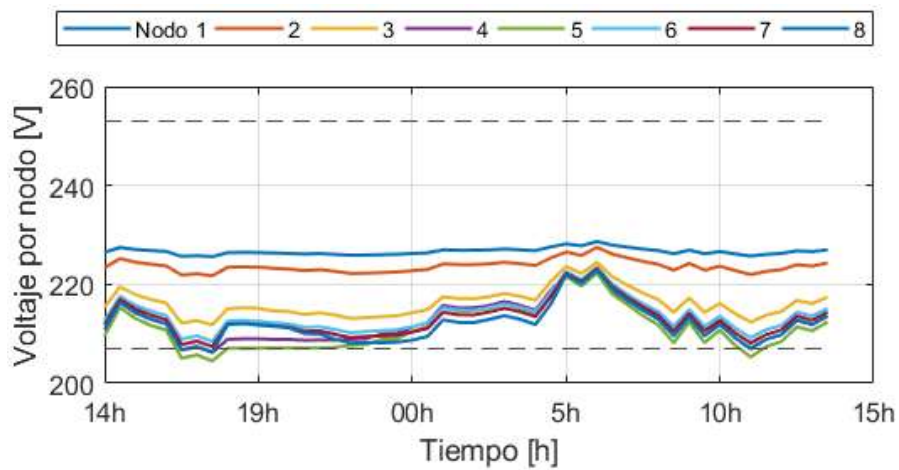


Fig. 3. 12 Caso 2 con gestión de carga y tarifa única. a) Perfiles de potencia, b) Perfiles de estados de carga, c) Perfiles de voltaje.

La gestión de carga demuestra tener un efecto clave en el comportamiento de los perfiles de carga de los diferentes nodos de la red, ya que en el momento en que se interconectan los VEE en el caso sin gestión de carga, éstos proceden a solicitar toda la energía disponible y necesaria para llevar a cabo la recarga de sus baterías, sin importar qué y cuántas afectaciones provoquen a la red, consecuentemente se producen violaciones en los límites de voltaje que a su vez deriva en inestabilidad en el sistema e incluso interrupciones temporales (Fig. 3.9).

Ahora, en el caso 1 con doble tarifa, se tiene como objetivo vender la energía almacenada en las baterías de los VEE cuando se encuentre activa la tarifa más elevada, y cuando se cambia a la tarifa económica los VEE proceden a recargarse, por lo que de manera colateral contribuyen al balance entre demanda y consumo evitando que se sobrepasen los límites de voltaje.

En el caso de cuando la gestión está activa y no existe algún escenario de doble tarifa, la programación de dicha gestión obliga a que los vehículos suministren toda la energía que tengan disponible en sus baterías, con la intención de contrarrestar las violaciones en los límites de voltaje debido a la demanda de energía durante el día, procediendo a recargarse cuando la carga base se estabiliza, es decir en las horas de poca demanda o durante la noche (Fig. 3.12).

Sin embargo, para el caso 2 con una única tarifa, aún existen pequeñas violaciones en los límites de voltaje de la red, esto se debe a que hubo un aumento en la distancia de los nodos 2 a 3, y 3 a 4, provocando una caída de tensión por distancia.

CAPÍTULO 4. EJEMPLIFICACIÓN DE LA PROPUESTA

4.1. CONTEXTO

Ahora, se consideran escenarios adicionales para probar el método de programación de carga de VEE bajo condiciones reales. Para ello se emplean varias redes de distribución de baja tensión ficticias, las cuales cuentan con ubicación y cantidades distintas de nodos, así como de vehículos interconectados a la misma, pero en diferentes sitios, cabe destacar que, debido a los resultados favorables, el ejercicio se pudiera realizar para cualquier cantidad tanto de nodos como de vehículos que existan en algún determinado lugar.

La red presenta un voltaje entre fases de 230 V, y de fase a neutro de 127 V aproximadamente, en cada uno de los ejercicios se realizará un análisis con respecto a los valores que vayan resultando del efecto que representen la cantidad de nodos y vehículos dispuestos en cada ejemplo.

4.2. INTRODUCCIÓN

Los casos de prueba actuales se centran en sistemas de estilo norteamericano; sin embargo, fuera de América del Norte es común ver sistemas de distribución de bajo voltaje, tanto radiales como mallados. Es importante asegurarse de que las herramientas admitan ambos estilos dominantes de configuración del sistema de distribución. Este caso de prueba busca llenar un vacío de referencia al presentar una serie de configuraciones comunes de bajo voltaje.

En la investigación y planificación de la distribución, se hace más evidente que se requieran soluciones de series de tiempo, en lugar de soluciones de flujo de energía estática, para capturar el comportamiento dinámico de mediano a largo plazo evidente en muchas tecnologías. La evaluación adecuada de productos o conceptos como optimización de variación de voltaje (OVV), controles coordinados de reguladores y capacitores, almacenamiento de energía o energía fotovoltaica, requieren un tiempo para comprender verdaderamente el comportamiento.

Los casos de prueba que se muestran a continuación se desarrollaron para simular las probables necesidades que se pudieran suscitar en la realidad, y las cuales cuentan con las siguientes características:

1. El alimentador de prueba tiene un nivel de voltaje de 230 V (fase a fase), que es típico en baja tensión del sistema eléctrico nacional.
2. Se proporcionan formas de carga con una resolución de tiempo de un minuto durante 24 horas para la simulación de series de tiempo.

3. Se proporcionan los resultados de la simulación de series de tiempo durante un período de un día y los resultados del cálculo del flujo de potencia estática en algunos momentos clave.
4. Las tarifas para todos los casos de estudio que se presentan corresponden a las mismas tarifas ficticias y arbitrarias que se utilizaron en los ejercicios de prueba del Capítulo anterior, es decir \$1/kWh para los casos con tarifa única, y \$1.5/kWh para los de doble tarifa.
5. Todos los casos de estudio son ficticios y diseñados a partir de la suposición de elementos existentes en una red de baja tensión.

4.3. CASO DE ESTUDIO DE 10 NODOS Y TARIFA ÚNICA.

A continuación, se presenta el primer ejemplo, el cual cuenta con una red de 10 nodos y tres vehículos conectados a la red. (Ver ANEXO D).

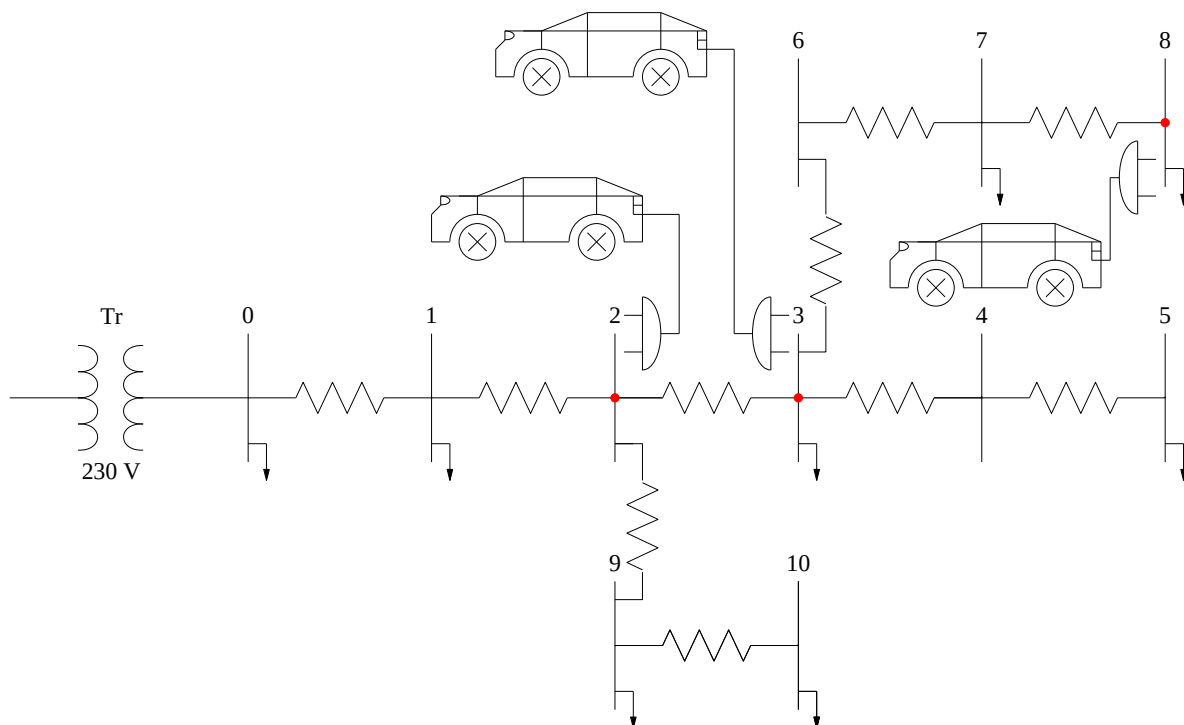


Fig. 4. 1 Red de 10 nodos.

4.3.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO

Se aborda este caso tomando en consideración la misma cantidad de vehículos conectados, y situados en los mismos nodos que en el caso de prueba, con la única diferencia de que, para este ejercicio se añadieron dos nodos más, los cuales simulan la presencia de dos casas extra, por lo que la carga en las líneas aumenta, derivando en una ligera modificación en los perfiles de carga de los nodos.

Los vehículos se encuentran conectados en los mismos nodos 2, 3 y 8 que los casos anteriores, por lo que la diferencia en las cargas se da por la adición de las dos casas, a continuación, se muestran los datos de funcionamiento de esta red

VEE	soc (kWh)	MCR (kWh)	MDR (kWh)	CT (h)	NODO
VE 1	6.4	3	3	12	2
VE 2	3.2	3	3	10.5	3
VE 3	8	3	3	11	8

Tabla 4. 1 Datos de caso de 10 nodos

Donde:

soc = Estado de carga

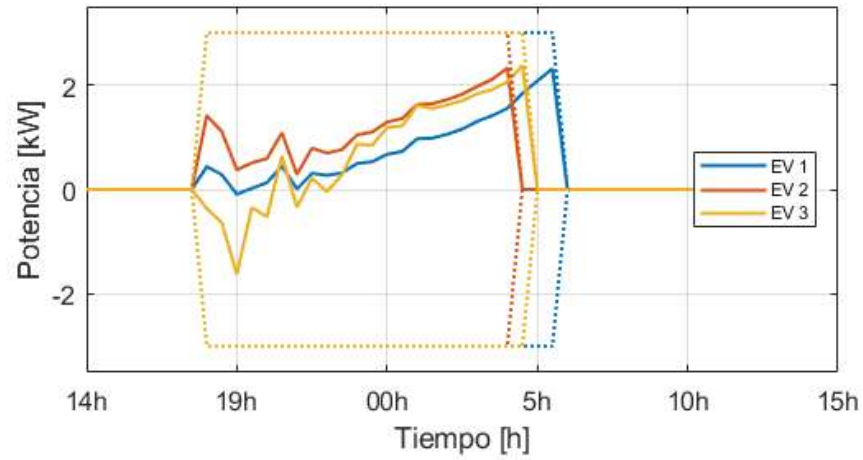
MCR = Tasa de carga máxima

MDR = Tasa de descarga máxima

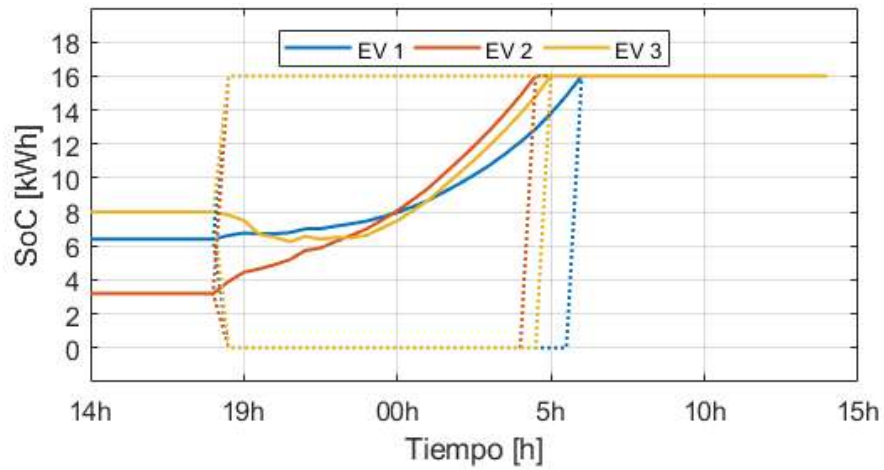
CT = Tiempo de conexión

Se realiza una comparativa en primera instancia de los resultados que se muestran en las gráficas contra los arrojados por las gráficas del ejercicio de prueba, y posteriormente se analizan los propios resultados de este caso de estudio.

a)



b)



c)

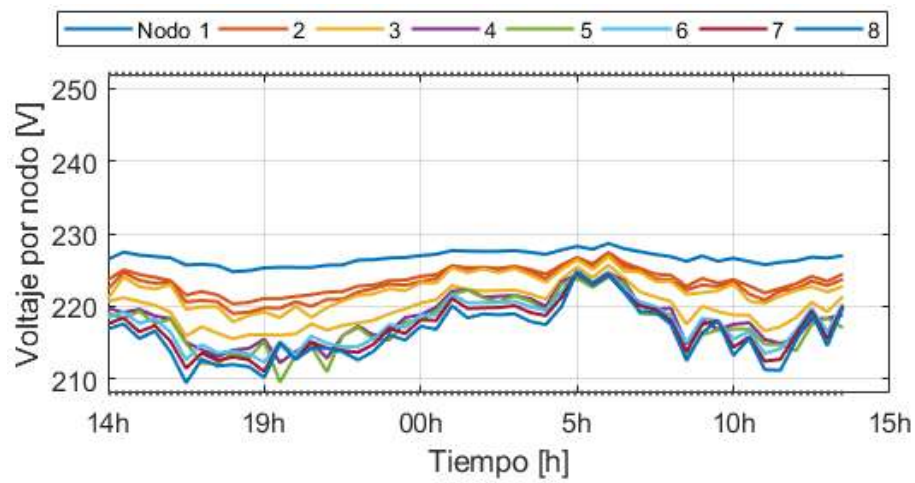


Fig. 4. 2 Caso de 10 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.

4.3.2. RESULTADOS

La gráfica de la Fig. 4.2a), determina la ligera variación que existe con respecto a la del ejemplo, ya que, en la ejemplificada su comportamiento sólo persigue el objetivo que es recargarse en el nodo donde se encuentra interconectado, por lo que se tiene una demanda repentina e instantánea en el momento de interconexión, y de manera similar en el momento de desconexión. Por lo que, al existir gestión, la carga demandada, como se aprecia en la gráfica a) se distribuye durante todo el periodo de carga de las baterías, independientemente de la hora en la que se interconectó, entonces el vehículo con más carga en su batería suministra la energía con la intención de equilibrar la red mientras los otros vehículos la consumen para recargarse.

En la gráfica de la Fig. 4.2b) se muestran los estados de carga de las baterías de los vehículos y cómo se comportan según el porcentaje de energía que traen al momento de la interconexión, por lo que se puede apreciar de mejor manera cómo el vehículo con más carga suministra la energía de su batería mientras que los restantes sólo se recargan.

En el caso de la Fig. 4.2c) que muestra los perfiles de voltaje, se muestra que son los que más variaciones sufren debido al incremento en la carga de la red original, y el constante cambio entre suministro-consumo de los vehículos, respetando, aun así, los límites de voltaje superior e inferior principalmente.

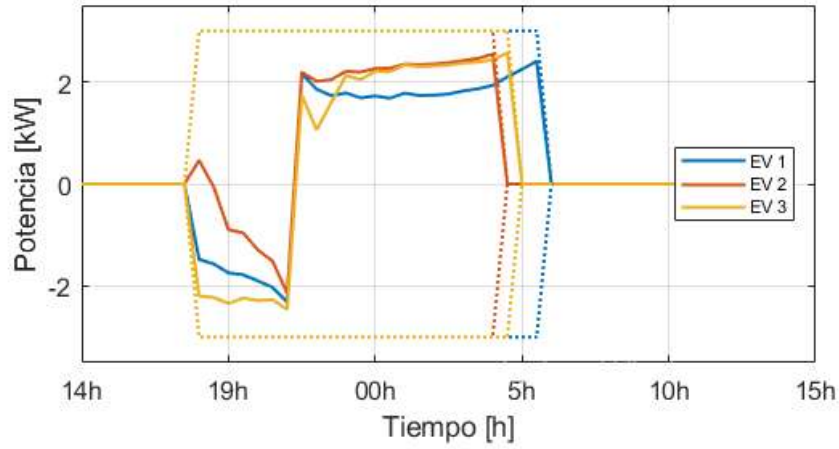
Para este caso el costo por carga es el mismo que en el ejercicio de prueba, debido a que no existe ningún cambio en los estados de carga inicial de las baterías, por lo que la sumatoria de la diferencia de los estados de carga final menos el inicial da como resultado el costo por utilización de la energía, es decir, $9.6 + 12.8 + 8 = \text{\$30.40}$

4.4. CASO DE ESTUDIO DE 10 NODOS Y TARIFA DOBLE

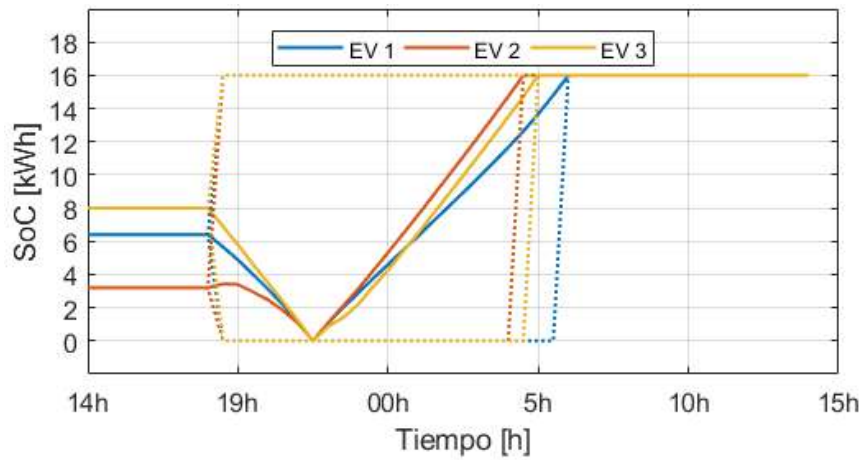
Ahora se analiza el mismo caso de 10 nodos, pero con tarifa doble, por lo que los datos continúan siendo los mismos, pero con un comportamiento ligeramente distinto por la existencia de la doble tarifa.

Los resultados de este caso se obtuvieron utilizando el mismo ANEXO IV pero con ambas tarifas activas. (Ver ANEXO D).

a)



b)



c)

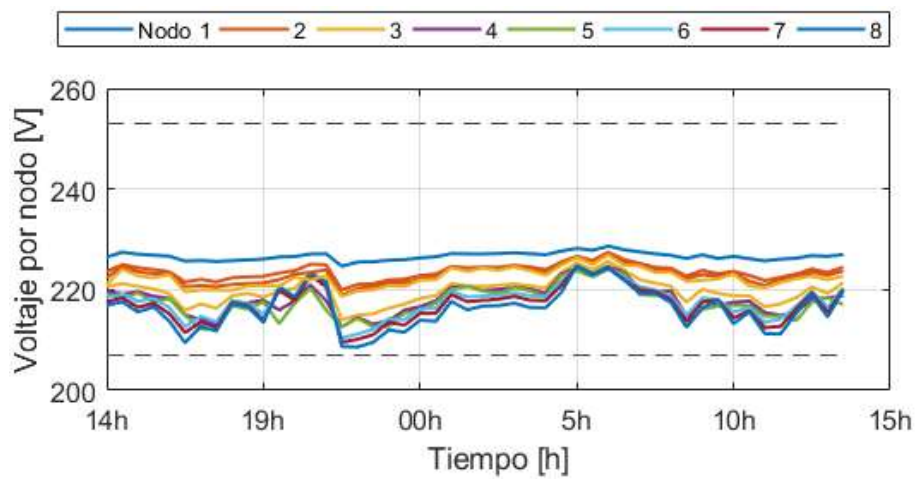


Fig. 4. 3 Caso de 10 nodos y doble tarifa. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.

4.4.1. RESULTADOS

Se puede observar que en este caso el vehículo con menor carga inicial tiende a recargarse ligeramente, mientras los otros dos suministran energía, para que inmediatamente después de que la gestión le da la orden, éste pase a suministrar también hasta el momento en el que la tarifa alcanza el otro precio, y entonces todos los vehículos comienzan a recargarse hasta que finaliza su tiempo de conexión. Teniendo entonces un costo por carga de **\$21.6** el cual es menor en comparación al ejercicio con una sola tarifa. Nuevamente, este costo se obtiene al tener el costo de cargar completamente las baterías durante las horas de precio bajo ($3 \times 16\text{kWh} \times \$1/\text{kWh} = \$48.0$) menos la ganancia obtenida de la venta de la energía almacenada inicialmente durante las horas de tarifa alta ($16\text{kWh} \times (0.4 + 0.2 + 0.5) \times \$1.5/\text{kWh} = \$26.4$).

Esto también pudiera traer consigo un efecto adverso debido al repentino cambio entre carga y descarga, pudiera disminuir los ciclos de carga en la vida de las baterías.

4.5. CASO DE ESTUDIO DE 12 NODOS Y TARIFA ÚNICA

El siguiente ejercicio se llevó a cabo con la inclusión de un vehículo extra, el cual llega a conectarse al nodo 11, sumando también, la cantidad total de nodos a este diagrama de red. Por lo que se espera que exista una mayor variación en los datos que muestran las gráficas que a continuación se analizan. (Ver ANEXO E).

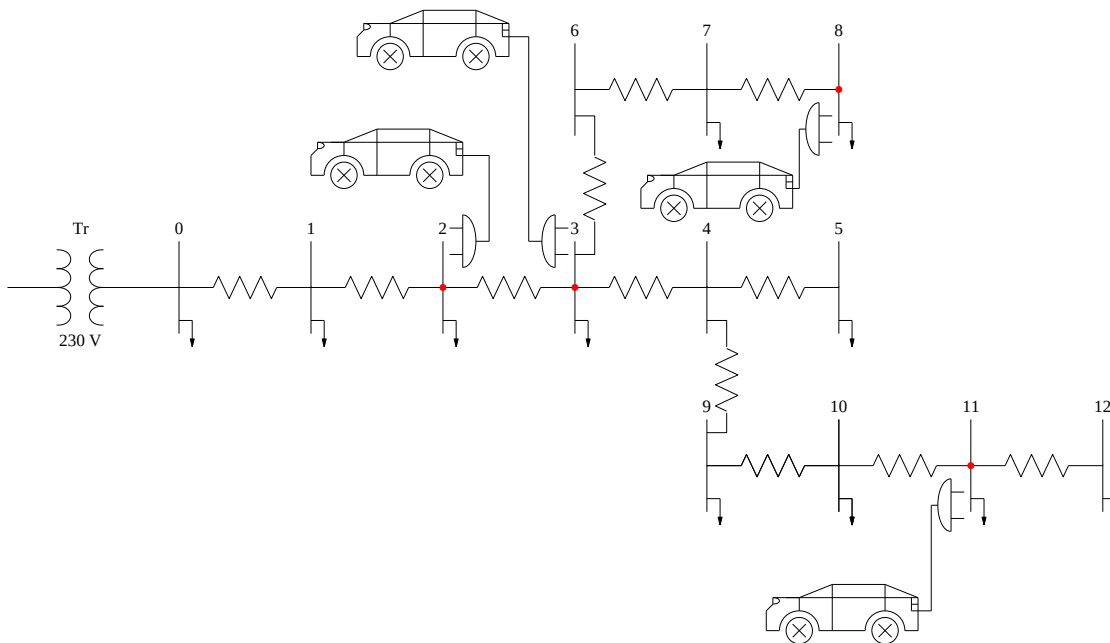


Fig. 4. 4 Red de 12 nodos

4.5.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO

Los vehículos se encuentran interconectados en los nodos 2, 3, 8 y 11, y en ese orden se nombrarán como VE 1, VE 2, VE 3 Y VE 4, los datos sobre sus estados de carga, sus tasas máximas de carga y descarga, así como el tiempo de interconexión de cada uno se muestran a continuación:

VEE	soc (kWh)	MCR (kWh)	MDR (kWh)	CT (h)	NODO
VE 1	6.4	3	3	12	2
VE 2	3.2	2	2	10.5	3
VE 3	8	3	3	11	8
VE 4	5.2	5	5	12	11

Tabla 4. 2 Datos de caso de 12 nodos.

Donde:

soc = Estado de carga

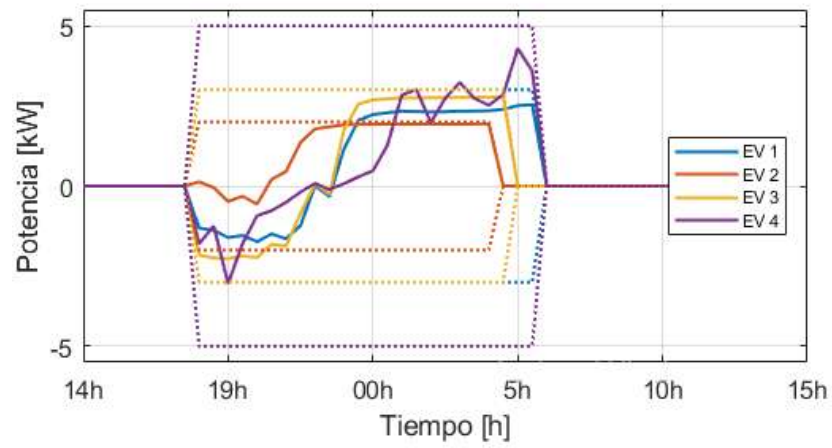
MCR = Tasa de carga máxima

MDR = Tasa de descarga máxima

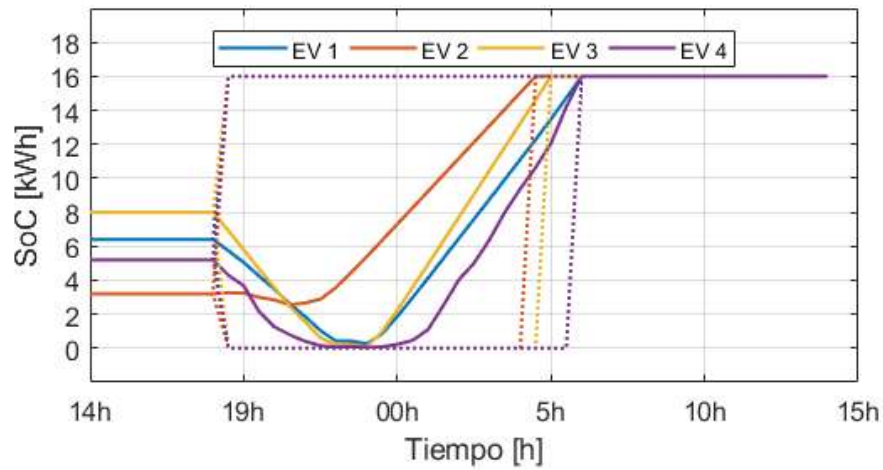
CT = Tiempo de conexión

Y entonces con dichos datos, se puede realizar el análisis de los resultados que arrojan las siguientes gráficas:

a)



b)



c)

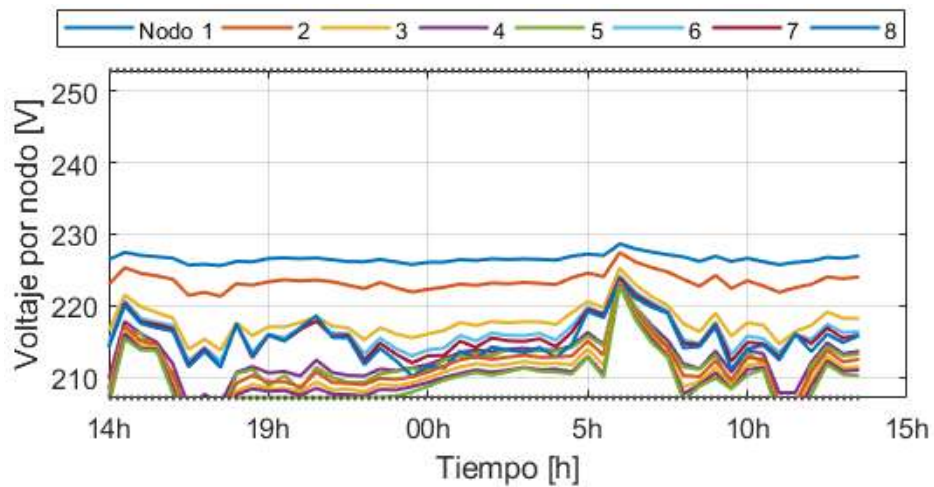


Fig. 4. 5 Caso de 12 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.

4.5.2. RESULTADOS

Para este caso, en donde se percibe una mayor diferencia es en los perfiles de voltaje, ya que debido a la adición de un vehículo la carga base de la red pretende violar ciertos límites, y aunque en algún momento unos cuantos voltajes lo hagan, el sistema sigue balanceado debido a la gestión del sistema que no permite que dichos voltajes, bajen más, manteniéndose dentro de parámetros aceptables de funcionamiento.

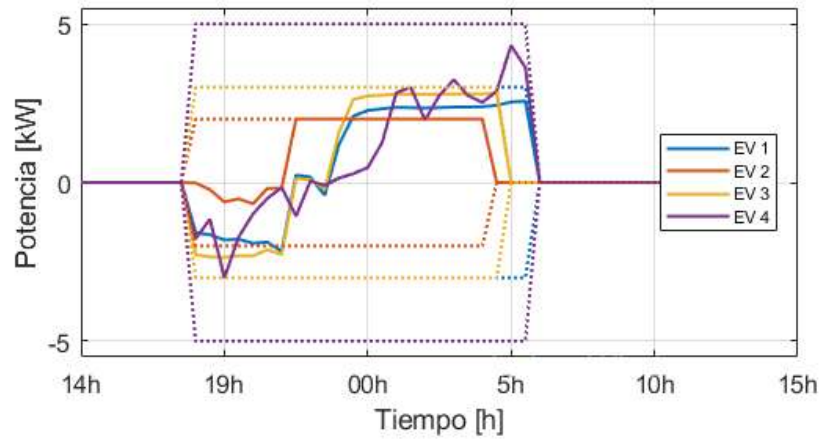
Por otro lado, ahora se puede apreciar mejor el hecho de que, dependiendo de la capacidad de los cargadores de cada vehículo, se puede tener una carga-descarga más rápida o lenta, lo que repercute en una administración a modo de que los vehículos que cuenten con un mayor estado de carga inicial, van a “administrar” la carga según el tiempo de conexión, es decir que los vehículos que tengan mayor tiempo de conexión, que en este caso son 12 horas, suministrarán o consumirán cierta cantidad de energía con la intención de equilibrar la demanda que se esté teniendo tanto del lado residencial como del lado de los otros vehículos, pero de manera más lenta, debido a que cuentan con el mayor tiempo de conexión disponible, por lo que en el momento en el que los perfiles de voltaje estén dentro de los límites permitidos, procederán a recargar sus baterías sin olvidar que siguen teniendo participación en la gestión de la energía demandada por la red.

Para este caso el costo por utilización de la energía para recargar todos los vehículos aumentó a $9.6 + 12.8 + 8 + 10.8 = \text{\$41.20}$ debido a la adición del cuarto vehículo.

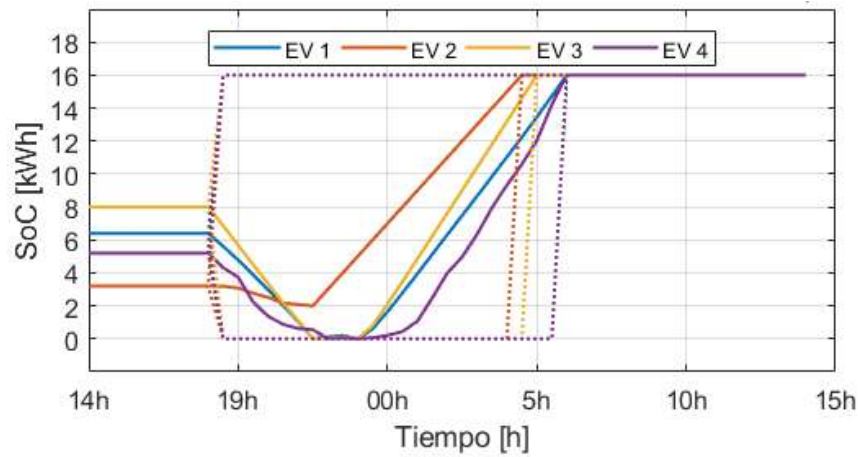
4.6. CASO DE ESTUDIO DE 12 NODOS Y TARIFA DOBLE

Ahora bien, continuando con la misma red de 12 nodos, pero ahora se observa su comportamiento con la tarifa doble. (Ver ANEXO E).

a)



b)



c)

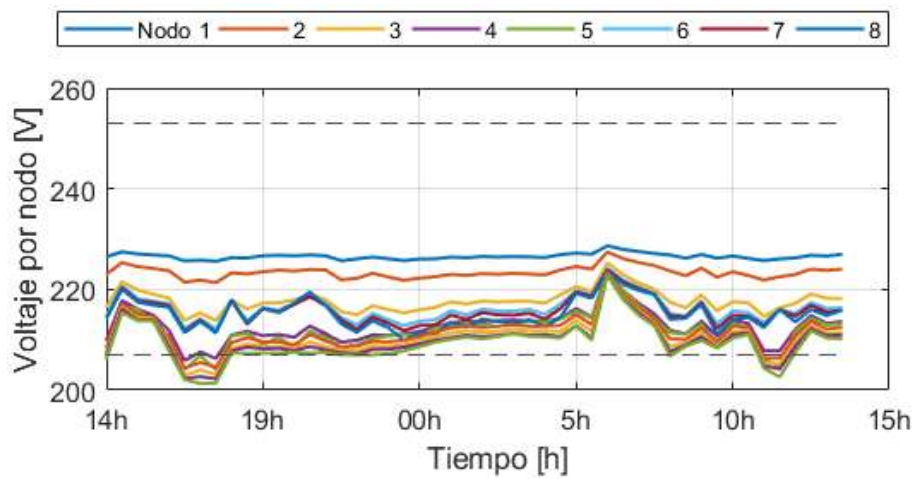


Fig. 4. 6 Caso de 12 nodos y tarifa doble. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.

4.6.1. RESULTADOS

Se puede apreciar entonces en las gráficas, que tanto los perfiles de potencia como los estados de carga, priorizan el suministro de energía a la red en el orden del que cuenta con mayor estado de carga inicial al que menos tiene, es decir, obligatoriamente deben inyectar al sistema la energía que contengan en sus baterías con la intención de venderla, independientemente del estado de carga con el que cuente el vehículo, equilibrando mejor el sistema que en el caso de una sola tarifa.

Por lo que en la gráfica de la Fig. 4.6c) se puede observar que ya no existen las violaciones que se tuvieron con tarifa única gracias a que todos los vehículos inyectaron la energía que traían al interconectarse, aun así, existe una ligera caída de tensión la cual no es significativa, y que la gestión logra balancear a lo largo del tiempo de interconexión de los vehículos eléctricos.

El costo por la venta y consumo de energía en este caso asciende a:

$$4 \times 16 \times 1 = \$64.00$$

$$16 \times (0.4 + 0.2 + 0.5 + 0.32) \times 1.5 = \$34.08$$

$$\$64 - \$34.08 = \mathbf{\$29.92}$$

4.7. CASO DE ESTUDIO DE 16 NODOS Y TARIFA ÚNICA

Para el siguiente ejercicio se tiene una red de 16 nodos y continúan interconectándose 4 vehículos, pero ahora se encuentran en los nodos 4, 10, 12 y 15. La ramificación de los nodos también ha crecido, por lo que la carga ahora está dispersa a distancias mayores, suponiendo entonces un desbalance mayor. (Ver ANEXO F).

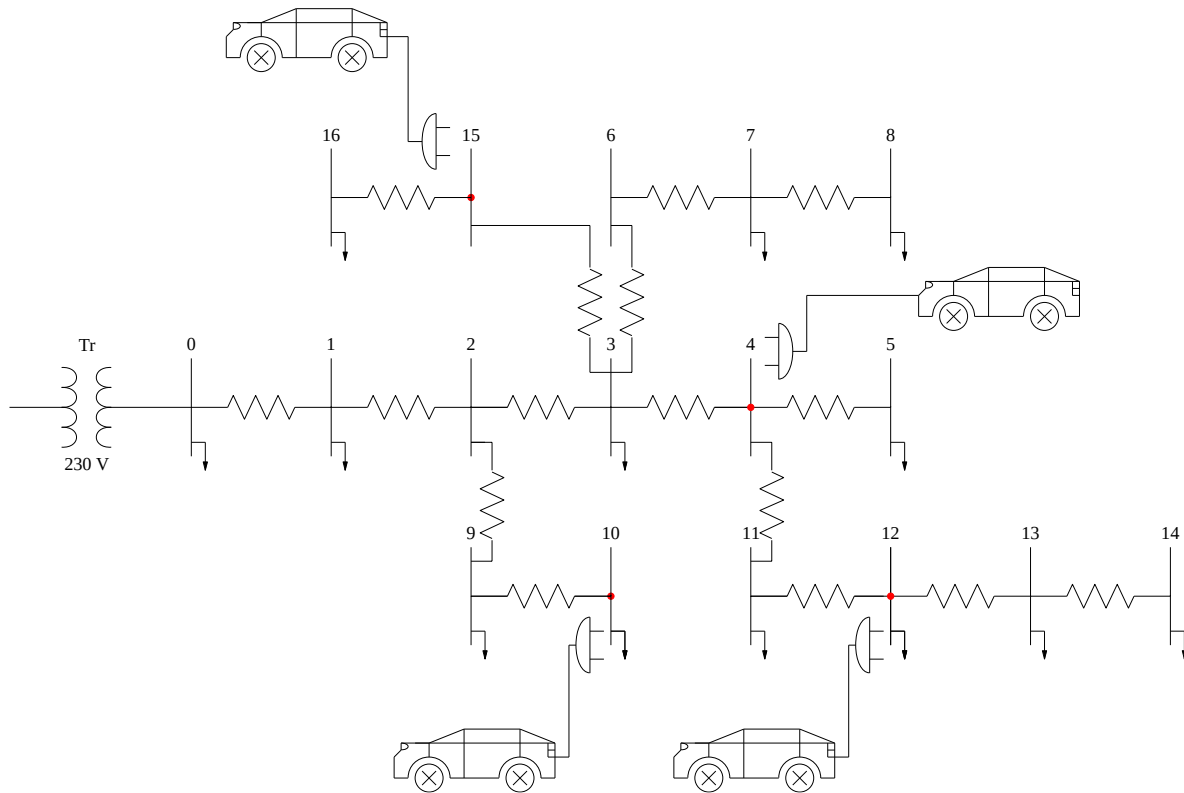


Fig. 4. 7 Red de 16 nodos

4.7.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO

En este caso, las tasas de carga y descarga para los vehículos 1 y 2 son distintas, teniendo mayor rango al momento de recargarse y disminuyendo su capacidad cuando suministran energía, por lo que esto supone un proceso más lento en el momento en el que el sistema les exija un suministro para balancear la carga y evitar tocar los límites inferiores de voltaje.

Los datos para dicha red son los siguientes:

VEE	soc (kWh)	MCR (kWh)	MDR (kWh)	CT (h)	NODO
VE 1	6.4	4	3	12	4
VE 2	3.2	4	3	10.5	10
VE 3	8	3	3	11	12
VE 4	4.5	3	3	12	15

Tabla 4. 3 Datos de caso de 16 nodos.

Donde:

soc = Estado de carga

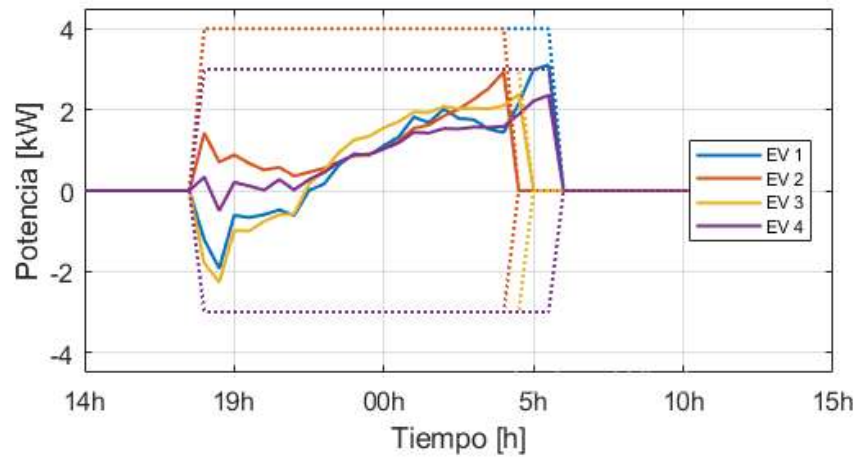
MCR = Tasa de carga máxima

MDR = Tasa de descarga máxima

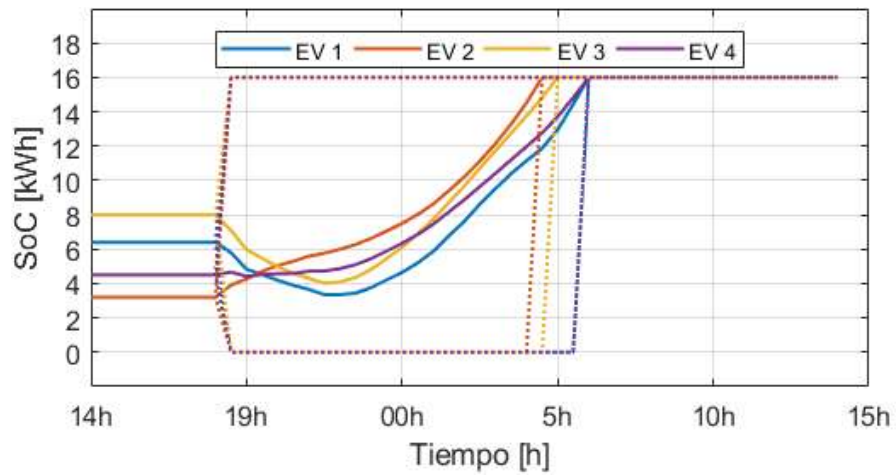
CT = Tiempo de conexión

Y los resultados que arroja este caso se observan en las gráficas siguientes:

a)



b)



c)

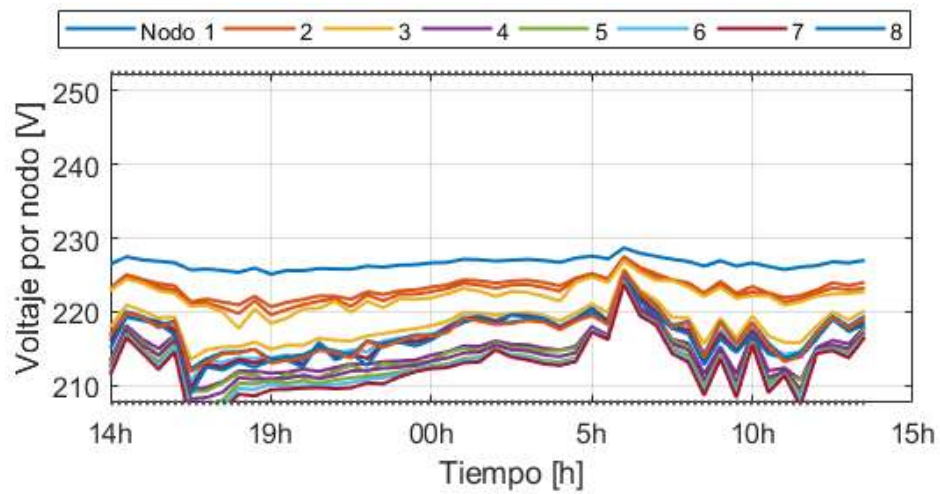


Fig. 4. 8 Caso de 16 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje.

4.7.2. RESULTADOS

Se puede observar que al igual que los casos anteriores la gestión de la carga de los vehículos equilibra de manera más fácil el sistema (Fig. 4.8b)), y las distancias extras de las ramificaciones de nodos, no significó algún problema para balancear las cargas, por lo que únicamente se tiene un poco más de demanda en los momentos donde se realiza la interconexión (Fig. 4.8c)), nuevamente no existen violaciones a los límites de voltaje que generen un problema de desbalance de la red.

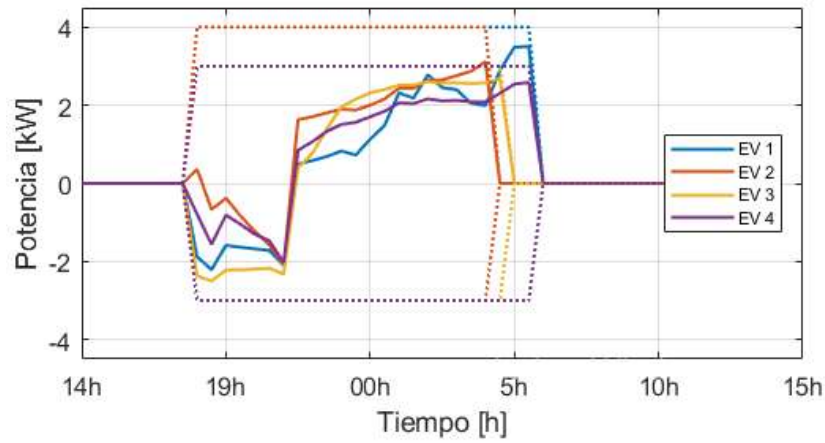
En este caso el costo tarifario por utilización de la energía es de:

$$9.6 + 12.8 + 8 + 11.5 = \text{\$41.90}$$

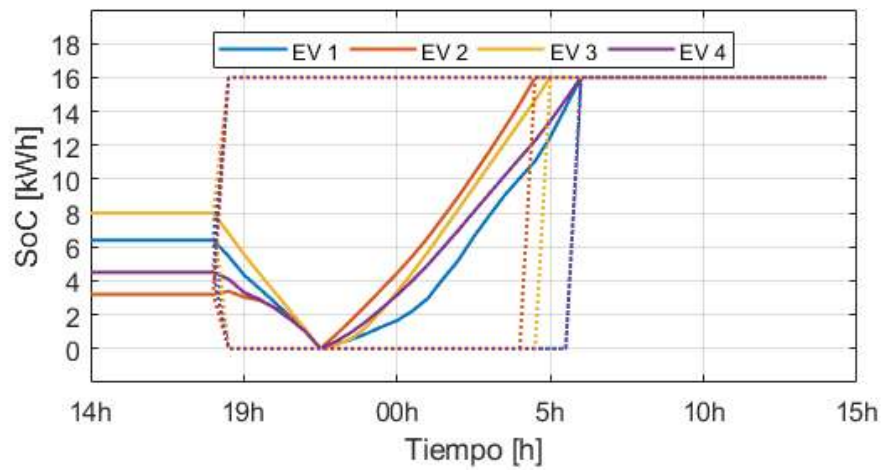
4.8. CASO DE ESTUDIO DE 16 NODOS Y TARIFA DOBLE

Para éste mismo caso, pero con la tarifa doble, el comportamiento de la red es el siguiente. (Ver ANEXO F).

a)



b)



c)

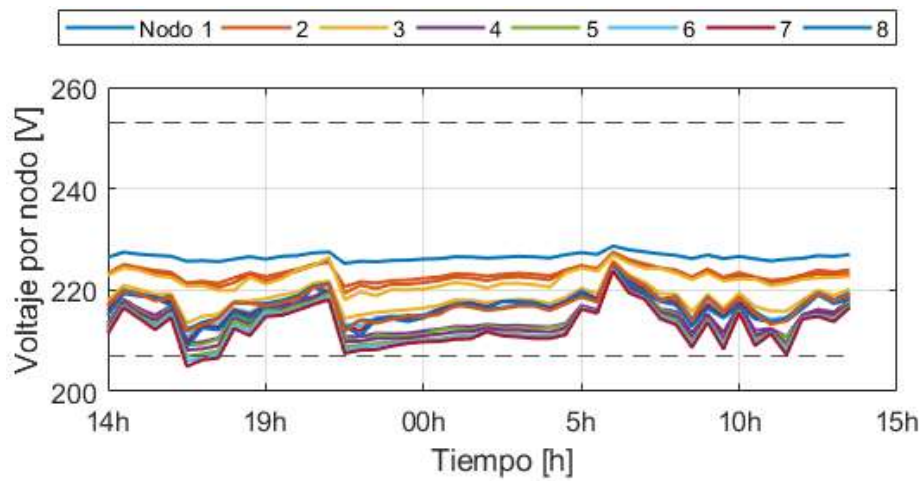


Fig. 4. 9 Caso de 16 nodos y tarifa doble. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje

4.8.1. RESULTADOS

Aunque pareciera que a mayor cantidad de ramas y nodos el sistema presentaría un desbalance, lo cierto es que es todo lo contrario, al menos en el escenario de doble tarifa ya que todos los vehículos independientemente de su tiempo de conexión, suministran toda su energía aportando a la carga que estén solicitando las residencias de la red, pero al momento de que el sistema alcanza la otra tarifa, todos los vehículos proceden a consumir para recargar sus baterías, y aunque esto signifique una demanda de energía al mismo tiempo, la gestión se encarga de administrarla de modo que no exista un sufrimiento hacia las residencias y demás elementos interconectados a la red, y esto se puede observar en la gráfica de la Fig. 4.9c).

En este caso el costo de recargar las baterías es:

$$4 \times 16 \times 1 = \$64.00$$

$$16 \times (0.4 + 0.2 + 0.5 + 0.28) \times 1.5 = \$33.12$$

$$\$64 - \$33.12 = \mathbf{\$30.88}$$

4.9. CASO DE ESTUDIO DE 24 NODOS Y TARIFA ÚNICA

Se aborda entonces un último ejercicio el cual representa la red más grande, con mayor cantidad de ramas, nodos y vehículos, que van a suponer una demanda mucho mayor a la de los ejercicios anteriores. (Ver ANEXO G).

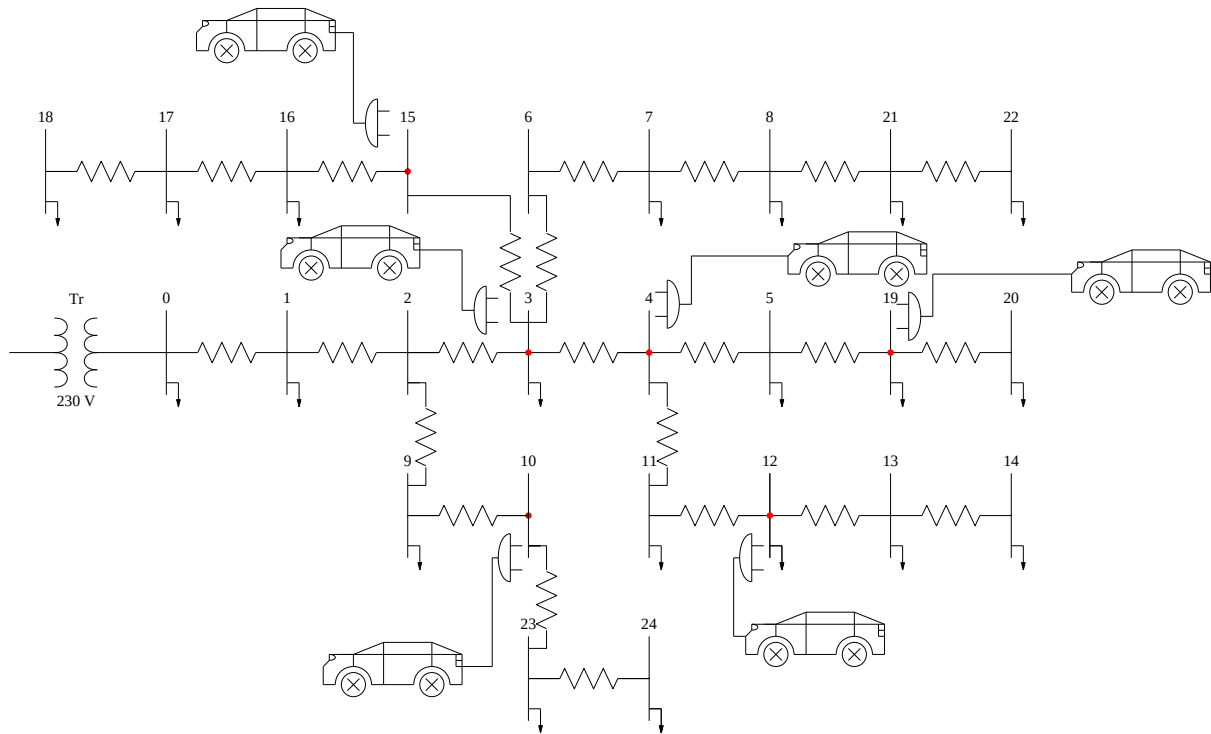


Fig. 4. 10 Red de 24 nodos

4.9.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO

Ahora el número total de nodos ha crecido hasta 24, y las ramas que interconectan a los mismos se han dispersado hacia otras partes más alejadas del transformador. Ahora se tiene la interconexión de 6 vehículos y por supuesto cada uno con diferentes datos de energía que la gestión hace trabajar para no generar violaciones ni desbalances al sistema. La información es la siguiente:

VEE	soc (kWh)	MCR (kWh)	MDR (kWh)	CT (h)	NODO
VE 1	6.4	4	3	12	3
VE 2	3.2	4	3	10.5	4
VE 3	8	3	3	11	10
VE 4	4.5	3	3	12	12
VE 5	1.2	4	3	12	15
VE 6	2.8	4	3	12	19

Tabla 4. 4 Datos de caso de 24 nodos.

Donde:

soc = Estado de carga

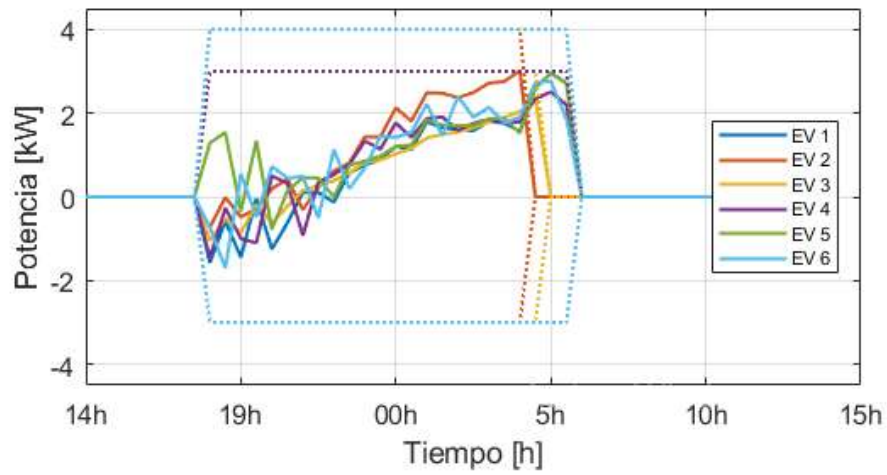
MCR = Tasa de carga máxima

MDR = Tasa de descarga máxima

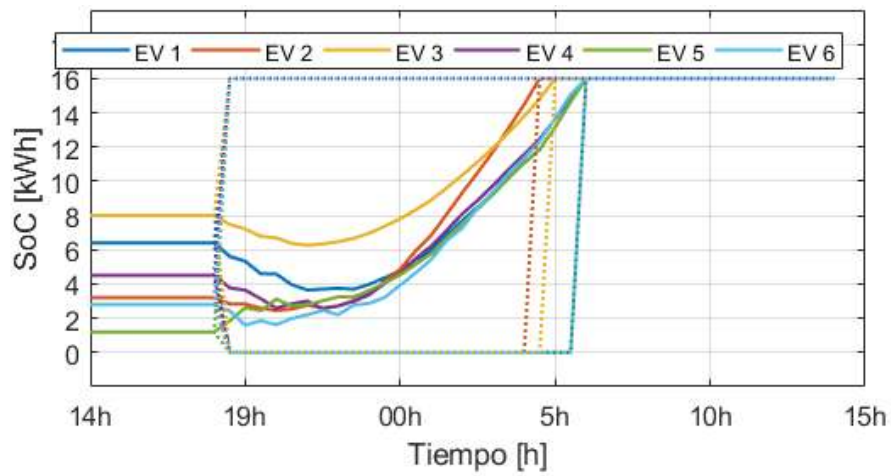
CT = Tiempo de conexión

El comportamiento se muestra en las gráficas siguientes:

a)



b)



c)

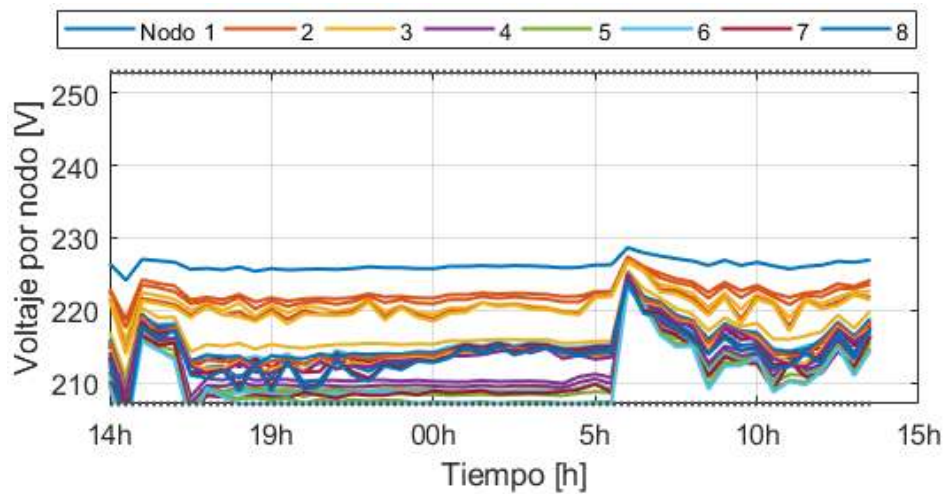


Fig. 4. 11 Caso de 24 nodos. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje

4.9.2. RESULTADOS

Para este último ejercicio, sí se puede observar que efectivamente existe una demanda energética mayor y una carga un tanto desbalanceada, incluso por el simple hecho de que existe una cantidad mayor de casas dispersas a lo largo de más ramificaciones y distancias mayores alejadas del transformador, por lo que sin que aún se hayan interconectado los vehículos, ya se puede percibir que los perfiles de voltaje han caído un poco más del límite inferior sobre todo en las horas pico de demanda de energía. Sin embargo, nuevamente la gestión determina que no deben existir esas violaciones desde que el primer vehículo se interconecte, por lo que en todo el periodo de tiempo de interconexión de los vehículos, la carga está balanceada gracias a la administración de la energía, que provoca que el nivel de voltaje en los nodos donde se encuentran los vehículos interconectados, así como en los más cercanos a los mismos, se sitúe en un nivel por encima del límite inferior, y lo haga de manera continua durante todo el tiempo de interconexión de los vehículos eléctricos.

El costo por cargar todos los vehículos en este caso es de:

$$9.6 + 12.8 + 8 + 11.5 + 14.8 + 13.2 = \text{\$69.90}$$

En este caso que es el más complejo por la cantidad de nodos y vehículos con los que cuenta la red, se añade una gráfica más, la cual detalla las curvas de carga tanto base como total de los vehículos eléctricos interconectados.

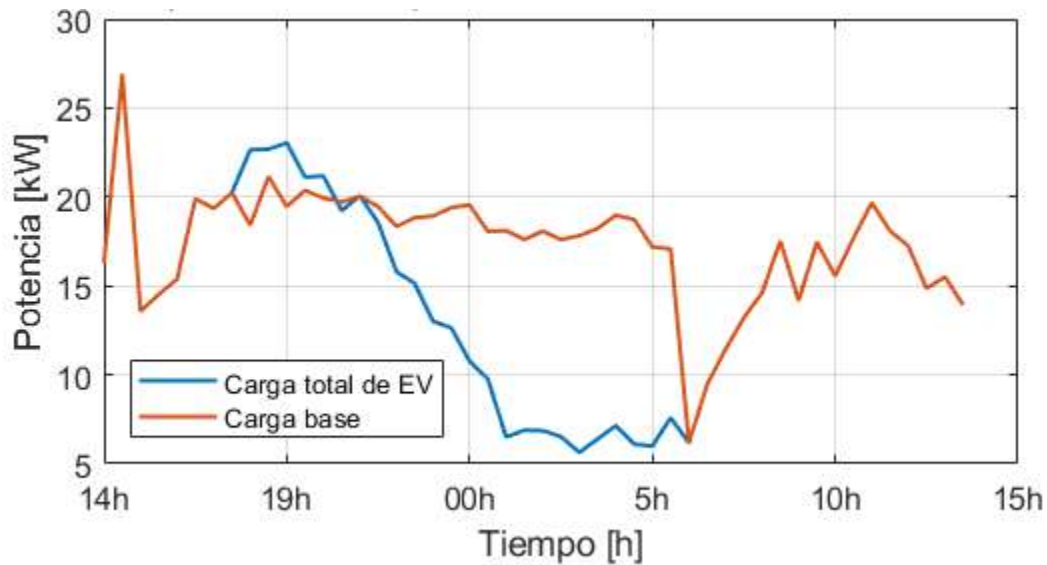


Fig. 4. 12.1 Carga base y Carga total de VE'S

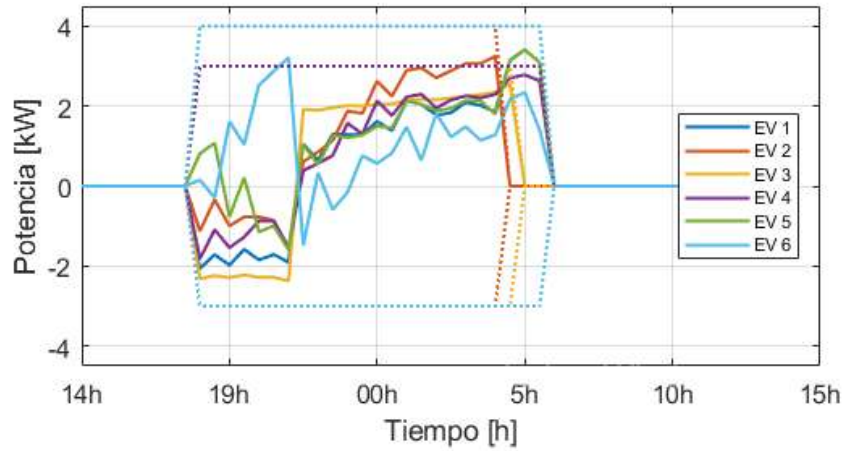
La Fig. 4.12.1 muestra cómo se comporta la carga base antes de la interconexión de los vehículos teniendo unos picos de demanda muy altos, principalmente en horas pico, por lo que lógicamente se pudiera pensar que al momento de conectar los VE'S la curva mostraría un desbalance muy notorio, lo cual no es así, esto se debe a que, al existir más vehículos interconectados, y más vehículos con estados de carga inicial elevados, proporcionan un respaldo mayor para la red en el momento en el que los que tienen menos carga están consumiendo energía para recargar sus baterías, por lo que durante este periodo de tiempo, la curva de carga base se mantiene en un nivel medio.

Cuando los vehículos con menos carga inicial ya han cargado lo suficiente, los que tenían mayor carga ahora proceden a cargarse, y ahora sí todos los vehículos distribuyen la carga que requieren durante todo su tiempo de interconexión manteniendo todos los niveles de voltaje en un rango correcto. Por lo tanto, la curva de carga total de los vehículos eléctricos disminuye conforme se acerca su hora de desconexión gracias a que las baterías están por llegar a su carga total, entonces en el momento de desconexión, la carga base disminuye a su mínimo, puesto que a esa hora usualmente las personas se están despertando y comienzan a prepararse para el inicio del día por lo que un momento después nuevamente se tiene una demanda de energía pero ahora debido al uso normal de la energía de la red.

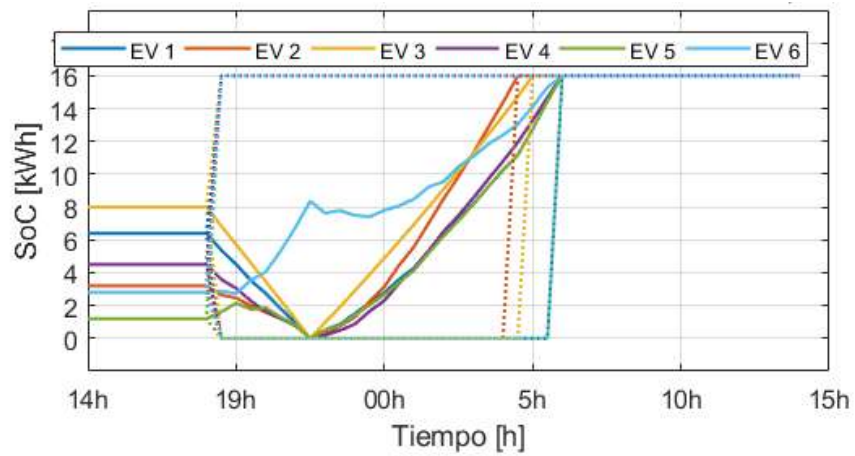
4.10. CASO DE ESTUDIO DE 24 NODOS Y TARIFA DOBLE

Ahora, para el mismo caso, pero con el escenario de la doble tarifa, los resultados obtenidos son los siguientes: (Ver ANEXO G).

a)



b)



c)

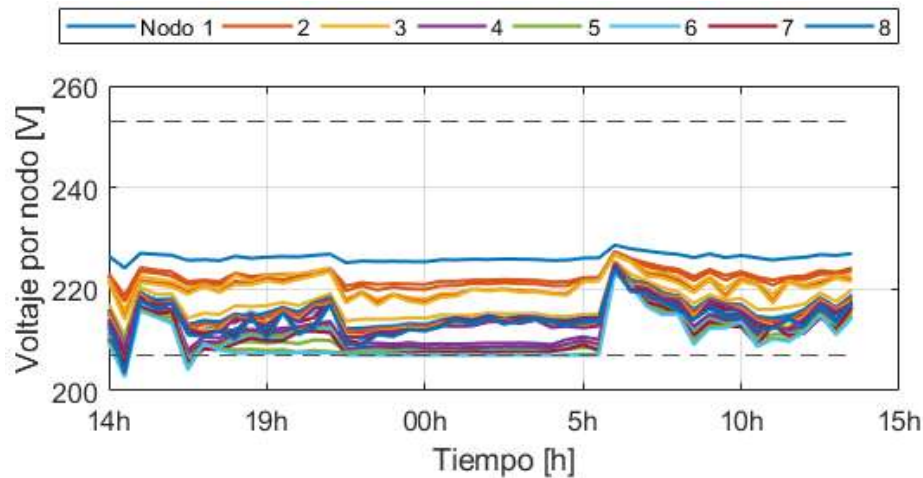


Fig. 4. 13 Caso de 24 nodos y tarifa doble. a) Perfiles de potencia, b) Estados de carga de los perfiles, c) Perfiles de voltaje

4.10.1. RESULTADOS

En el escenario de las dos tarifas ocurre algo curioso, pues, aunque en teoría todos los VEE deberían inyectar la energía que les queda en sus baterías, a excepción del que tiene menos carga, ya que prácticamente ya no tiene nada de energía que suministrar, los demás así deberían hacerlo, pero el único que no lo hace es el VE 6, y esto se debe a que tiene tiempo de conexión completa, además de contar con una tasa de carga alta por lo que busca equilibrar la red consumiendo energía mientras los demás la suministran (Fig. 4. 12a)), aun cuando está en el rango de tarifa alta, y en el momento en el que la segunda tarifa entra en función, suministra un poco de energía mientras los demás comienzan a consumir, y esto se debe a que aún tiene tiempo suficiente para terminar de recargarse por completo, como se puede apreciar en la gráfica b) de la Fig. 4.12.

Y en la gráfica c) de la misma Fig. 4.12, se puede observar que los perfiles de voltaje se encuentran por encima del límite inferior en todo momento en donde la gestión se encuentra activa, por lo que no existe un desbalance de la red, aun teniendo muchos más nodos y vehículos interconectados.

En este caso el costo por recargar las baterías de los vehículos asciende a:

$$6 \times 16 \times 1 = \$96.00$$

$$16 \times (0.4 + 0.2 + 0.5 + 0.28 + 0.075 + 0.17) \times 1.5 = \$39.00$$

$$\$96 - \$39 = \mathbf{\$57.00}$$

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN A FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

La era de los combustibles fósiles y de los vehículos de combustión interna poco a poco está llegando a su fin, por lo que la implementación de las nuevas tecnologías de movilidad en los automotores irá en aumento, hasta que llegue el día en el que acudas al concesionario de vehículos de tu preferencia, y se pueda elegir entre vehículos eléctricos y vehículos a combustión.

Para ese entonces, todo tipo de infraestructura, espacio funcional y público, e incluso escolar, debe de estar preparado para satisfacer las necesidades de todos los usuarios que cuenten con este tipo de vehículos, que con el tiempo se encontrarán más comúnmente en dichos espacios, por lo que, cabe destacar que a lo largo del trabajo, se ha presentado una solución efectiva y eficiente para los problemas de inestabilidad de tensión que surgen en los nodos de interconexión en el tiempo en el que el vehículo se encuentra conectado a la red.

Que sin duda alguna repercutirá de manera positiva, al funcionamiento adecuado del sistema eléctrico nacional, ayudando incluso a aminorar otros problemas que tienen que ver con la calidad de la energía que utilizan las personas para realizar sus actividades del día a día.

Es de mencionar también que la herramienta utilizada para la solución del problema presentado puede ser aplicada para cualquier número de elementos reales presentes en una determinada red eléctrica de cierta zona residencial, industrial, escolar, etc. Por lo que los objetivos planteados en el inicio del trabajo de investigación, han sido alcanzados de manera satisfactoria.

5.2. PROYECCIÓN A FUTURO

En medida del crecimiento tecnológico en el área de la electrificación vehicular específicamente, todos los ámbitos inmersos en ella deben estar preparándose para realizar una integración adecuada de las soluciones que se deban aplicar a la problemática creciente con respecto a la movilidad eléctrica. Incluyendo, las soluciones que se han presentado en este trabajo de investigación, por lo que es muy importante crear programas que incluyan la gestión que aquí se presentó, de la energía suministrada y consumida por los vehículos cuando éstos llegan a un punto de carga y se conectan para recargarse. Y de esta manera, independientemente del lugar en donde te encuentres, la acción de recargar tu

vehículo siempre sea la más económica, eficiente, rápida y menos problemática para la red.

Finalmente, sería interesante realizar un estudio referente al impacto económico que resultaría de la aplicación del sistema de gestión de energía propuesto. En este sentido, un estudio de factibilidad económica de la aplicación de dicho sistema, determinaría si efectivamente existe un ahorro en comparación con los costos actuales de utilización de la energía eléctrica.

Sería notorio también, realizar una comparativa acerca del comportamiento actual de la red con los vehículos eléctricos que ya se encuentran en circulación, contra el comportamiento con la gestión activa, y entonces determinar si mediante la aplicación de la gestión se tiene una mejor estabilidad en la tensión y menos caídas significativas en momentos pico de demanda de energía. Por lo que el alcance de esta investigación podría ser incluso internacional, en el orden de mejorar la infraestructura energética nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andrés Ovalle, Ahmad Hably and Seddik Bacha. "Grid Optimal Integration of Electric Vehicles: Examples with Matlab Implementation." In: Springer. (2018), pp. 1-5 (cit. on p. 1, 3, 4).
- [2] M. Liserre, T. Sauter, and J. Y. Hung. "Future Energy Systems: Integrating Renewable Energy Sources into the Smart Power Grid Through Industrial Electronics". In: IEEE Industrial Electronics Magazine 4.1 (Mar. 2010), pp. 18–37 (cit. on p. 3).
- [3] P. Meibom, K. B. Hilger, H. Madsen, and D. Vinther. "Energy Comes Together in Denmark: The Key to a Future Fossil-Free Danish Power System". In: IEEE Power and Energy Magazine 11.5 (Sept. 2013), pp. 46–55 (cit. on p. 3).
- [4] I. Krastev, P. Tricoli, S. Hillmansen, and M. Chen. "Future of Electric Railways: Advanced Electrification Systems with Static Converters for ac Railways". In: IEEE Electrification Magazine 4.3 (Sept. 2016), pp. 6–14 (cit. on p. 3).
- [5] Davis Montenegro Martinez. "Actor's based diakoptics for the simulation, monitoring and control of smart grids". Theses. Université Grenoble Alpes, Nov. 2015(cit. on p. 3).
- [6] K. Basu, V. Debusschere, S. Bacha, U. Maulik, and S. Bondyopadhyay. "Non-intrusive Load Monitoring: A Temporal Multilabel Classification Approach". In: IEEE Trans. Ind. Informat. 11.1 (Feb. 2015), pp. 262–270 (cit. on pp. 3, 79, 158).
- [7] E. Paparoditis and T. Sapatinas. "Short-Term Load Forecasting: The Similar Shape Functional Time-Series Predictor". In: IEEE Trans. Power Syst. 28.4 (Nov. 2013), pp. 3818–3825 (cit. on pp. 3, 79, 158).
- [8] Integration of Electric Vehicles in the Distribution Network: A Review of PV Based Electric Vehicle Modelling, Asaad Mohammad, Ramon Zamora and Tek Tjing Lie, Department of Electrical and Electronic Engineering, Auckland University of Technology, Auckland 1010, New Zealand, *Energies* 2020.
- [9] Impact of Electric Vehicle Charging Station Load on Distribution Network, Sanchari Deb, Kari Tammi 2, Karuna Kalita 3 and Pinakeshwar Mahanta karuna.kalita@iitg.ernet.in (K.K.); pinak@iitg.ernet.in (P.M.), Correspondence: sancharideb@yahoo.co.in (S.D.); kari.tammi@aalto.fi (K.T.), *Energies* 2018, 11, 178; doi:10.3390/en11010178
- [10] Daniel Murias "Historia de los vehículos eléctricos". En Motorpasión (2019)
- [11] Elizabeth Prado "Pros y contras de los autos eléctricos". En Rastreator (2020)

- [12] “Prospectiva del sector eléctrico 2008-2017” SENER pp. 109, En World Energy Outlook 2008, pp 143.
- [13] Luis Vilchis “Auto eléctrico vs Auto de gasolina” En El Universal (2020)
- [14] Monteiro, V.; Gonçalves, H.; Afonso, J.L. Impact of Electric Vehicles on power quality in a Smart Grid context. In Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, Lisbon, Portugal, 17–19 October 2011; pp. 1–6.
- [15] Shareef, H., Islam, M., & Mohamed, A. (2016). A review of the stage-of-the-art charging technologies, placement methodologies, and impacts of electric vehicles [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 403–420
- [16] Ehsani, M., Milad Falahi, M., & Lotfifard, S. (2012). Vehicle to grid services: Potential and applications [J]. *Energies*, 5(10), 4076–4090.
- [17] Drude, L., Pereira Junior, L. C., & Rüther, R. (2014). Photovoltaics (PV) and electric vehicle-to-grid(V2G) strategies for peak demand reduction in urban regions in Brazil in a smart grid environment [J]. *Renewable Energy*, 68, 443–451.
- [18] Ma, Z., Callaway, D. S., & Hiskens, I. A. (2013). Decentralized charging control of large populations of plug-in electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(1), 67–78.
- [19] Michael CW Kintner-Meyer, Kevin P. Schneider, Robert G. Pratt. (2007). Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids: Part 1: Technical analysis [J]. *Online Journal of Euec Paper*, 1:01–19.
- [20] Sortomme, E., & El-Sharkawi, M. A. (2012). Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), 351–359.
- [21] Daniel Murias “Anatomía del vehículo eléctrico”. En Motorpasión (2020).
- [22] José M. Martín Spuch “El motor de un coche eléctrico: tipos y funcionamiento”. En SoyMotor (2021).
- [23] Michael Faraday “Ley de inducción electromagnética de Faraday” (1831).
- [24] Jorge Majdalani para el portal “ADSLZONE” (2021).
- [25] KIA CORP “¿Los cargadores de coches eléctricos son universales?” (2017)
- [26] Cadie Thompson “How the electric car became the future of transportation” para el portal INSIDER (2017).
- [27] Joan Hinojo “La infraestructura de recarga de VE. Un mercado en desarrollo” para el portal HYE (2020).

ANEXOS

ANEXO A

```
% clear
clc
close all
% Load profiles for the 8 nodes of the test grid
load_nodes =[1.99 1.4 1.74 1.77 1.96 2.51 2.5 2.44 2.87 2.8 2.82 2.63
2.69 2.36 2.45 2.39 1.87 1.88 1.64 1.58 1.31 1.26 0.77 0.94 0.81 0.88
0.72 0.91 0.87 0.75 0.84 1.01 0.74 1.2 1.51 1.67 1.86 2.23 1.8 2.15
2.03 2.17 2.43 2.27 2.15 1.94 1.96 1.69;
2.05 1.52 1.8 1.83 1.88 2.48 2.34 2.57 2.84 2.83 2.96 2.59
2.7 2.45 2.47 2.32 1.9 1.9 1.61 1.54 1.31 1.18 0.87 0.75 0.8 0.81
0.65 0.76 0.87 0.78 0.64 0.96 0.85 1.24 1.41 1.73 1.79 2.2 1.69 2.22
1.95 2.14 2.49 2.22 2.13 1.84 1.93 1.68;
2.01 1.5 1.6 1.8 1.87 2.41 2.41 2.5 2.84 2.78 2.87 2.57
2.62 2.37 2.48 2.26 2.04 1.89 1.68 1.48 1.39 1.23 0.9 0.82 0.87 0.88
0.63 0.74 0.84 0.72 0.77 1.01 0.77 1.11 1.45 1.69 1.82 2.16 1.73 2.21 1.9
2.12 2.48 2.34 2.15 1.87 1.94 1.69;
2.14 1.42 1.69 1.87 1.9 2.47 2.52 2.47 2.92 2.82 2.77 2.66
2.51 2.39 2.59 2.4 2 1.96 1.61 1.67 1.3 1.17 0.83 0.89 0.81 0.86
0.71 0.82 0.89 0.89 0.75 0.86 0.83 1.23 1.36 1.62 1.79 2.25 1.75 2.32
1.94 2.26 2.45 2.28 2.21 1.86 1.98 1.87;
1.97 1.49 1.71 1.85 1.96 2.54 2.42 2.66 2.78 2.94 2.9 2.66
2.66 2.42 2.48 2.25 1.89 1.88 1.65 1.63 1.37 1.25 0.75 0.88 0.89 0.78
0.79 0.84 0.98 0.74 0.69 0.92 0.72 1.28 1.4 1.63 1.83 2.15 1.73 2.07
1.88 2.28 2.54 2.22 2.12 1.89 1.92 1.71;
2.02 1.46 1.78 1.73 1.96 2.56 2.35 2.59 2.72 2.89 2.94 2.65
2.71 2.48 2.49 2.28 2.09 1.81 1.53 1.57 1.34 1.15 0.83 0.8 0.94 0.8
0.76 0.78 0.91 0.78 0.75 0.96 0.81 1.18 1.47 1.66 1.84 2.11 1.77 2.16
1.88 2.18 2.45 2.18 2.22 1.85 1.88 1.77;
2.03 1.46 1.61 1.85 1.93 2.52 2.4 2.45 2.86 2.88 2.9 2.66
2.75 2.4 2.52 2.23 1.96 1.87 1.68 1.65 1.37 1.31 0.76 0.86 0.89 0.75
0.63 0.76 0.85 0.73 0.78 0.95 0.78 1.16 1.41 1.6 1.81 2.23 1.86 2.14
1.96 2.3 2.43 2.36 2.05 1.79 1.98 1.79;
2.07 1.46 1.65 1.82 1.92 2.41 2.41 2.55 2.82 2.74 2.88 2.69
2.54 2.36 2.59 2.41 2.05 1.94 1.61 1.52 1.38 1.21 0.79 0.95 0.85 0.76
0.75 0.78 0.93 0.71 0.78 0.91 0.68 1.07 1.42 1.6 1.87 2.18 1.84 2.19
2.01 2.24 2.4 2.22 2.21 1.81 1.92 1.73];

% A_tilde matrix for the system in the first case
A_tilde_1 = ...
[-40 20 0 0 0 0 0 0;
20 -30 10 0 0 0 0 0;
0 10 -26.666666666666668 6.666666666666667 0 10 0 0;
0 0 6.666666666666667 -13.333333333333334 6.666666666666667 0 0 0;
0 0 0 6.666666666666667 -6.666666666666667 0 0 0;
0 0 10 0 0 -30 20 0;
0 0 0 0 0 20 -30 10;
0 0 0 0 0 0 10 -10];

% A_tilde matrix for the system in the second case
```



```

% A_tilde_2 = ...
% [-40 20 0 0 0 0 0 0;
% 20 -26.66666666666668 6.66666666666667 0 0 0 0 0;
% 0 6.66666666666667 -20.66666666666668 4 0 10 0 0;
% 0 0 4 -10.66666666666668 6.66666666666667 0 0 0;
% 0 0 0 6.66666666666667 -6.66666666666667 0 0 0;
% 0 0 10 0 0 -30 20 0;
% 0 0 0 0 0 20 -30 10;
% 0 0 0 0 0 0 10 -10];

% input voltage and resistance for the transformer
v_0 = 230;
R_0 = 0.05;
% voltage constraints for each node of the grid
v_max = zeros(size(load_nodes))+v_0*1.1;
v_min = zeros(size(load_nodes))+v_0*0.9;
% fictive tariff for 06h-23h (day tariff)
tariffs = ones(1,length(load_nodes))*1.5;
% fictive tariff for 23h01-05h59 (night tariff)
% tariffs(16:32) = 1;
% System matrix A and transformer voltage vector v_k_0 from modeling
v_k_0 = [-v_0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
% A = A_tilde_1\eye(length(A_tilde_1));
A = A_tilde_2\eye(length(A_tilde_2)); % uncomment to check Case 2
% voltage imposed on each node by the transformer and the system topology
v_k_base =
repmat((1/R_0)*A*v_k_0,1,length(load_nodes))+(1/v_0)*A*(load_nodes*1000);
% Parameters for each of the 3 PEVs
soc_cap = [16 16 16]'; % storage capacities [kWh]
soc_d = [16 16 16]'; % desired final states of charge [kWh]
soc_0 = [6.4 3.2 8]'; % initial states of charge [kWh]
p_max_c = [3 3 3]'; % max charging rates [kW]
p_max_i = [3 3 3]'; % max discharging rates [kW]
Ki = [24 21 22]'; % final time step of connection periods
dt = 0.5; % time step [h]
t_0 = 8; % t_0+dt is the time step under evaluation
% t_0 is the time step corresponding to soc_0
% (vehicles can be connected from before but in
% this case this is the initial time step for
% the three EVs)
nodes = [2 3 8]'; % Nodes where EVs are connected
Lhat_ = sum(load_nodes); % Total load profile (neglecting losses)
watch_evolution = 1; % Set to 1 in order to watch the routines' evolution
[pow_traj_ast,s] =
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_cap,soc_d,...
    soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat_',...
    nodes,watch_evolution);
if s > 0 % if the maximum infeasibility goes below zero (all the voltage
% constraints are feasible and the Phase II problem can find the
% optimal schedules)
else
[pow_traj_ast,soc_traj_ast] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII...
(soc_cap,soc_d,soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,...
v_max,v_min,Lhat_,nodes,tariffs,pow_traj_ast,watch_evolution);

```

end Código utilizado de [1]

ANEXO B

```

function [pow_traj_ast,s] = ...
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_c,soc_d,soc_0,p_max_c,...
p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat,nodes,...
watch_evolution)
% ----- Description inputs
% soc_c : battery available capacities [kWh]
% soc_d : final desired states of charge [kWh]
% soc_0 : initial states of charge [kWh]
% p_max_c : max charging rates [kW]
% p_max_i : max discharging rates [kW]
% t_0 : time step corresponding to soc_0
% Ki : total time steps
% dt : time step
% A : system matrix
% v_0 : transformer voltage
% v_k_base : voltages imposed by the transformer and base loads on the
grid
% nodes
% v_max : upper boundary for voltages on each node
% v_min : lower boundary for voltages on each node
% Lhat_ : total load forecast on the transformer
% nodes : nodes of the grid where EVs are connected
% watch_evolution : (1) plots internal evolution, (otherwise) ignores
% ----- Description outputs
% pow_traj_ast : optimal power trajectory
% s : max infeasibility bound on the voltage constraints
% ----- Onjective
% Drive the bound "s" bellow zero in order to provide an initial guess
for
% the charging schedules such that the voltage, soc, and power
constraints
% are respected
% (Minimize s)
% Initialization of variables
% Number of PEVs
N = length(Ki);
Lhat_ = Lhat';
% construction of soc_k constraints for visualization of evolution
soc_min = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0-1e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+2e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki+t_0+1)) = +soc_d-2e-3;
soc_min = cumsum(soc_min,2);
soc_min=soc_min(:,2:end);
soc_max = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0+1e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c-2e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki+t_0+1)) = -soc_c+soc_d+2e-3;
soc_max = cumsum(soc_max,2);
soc_max=soc_max(:,2:end);
% construction of soc_k constraints for the routine
soc_lo = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+1)) = +1e-3;

```

```

soc_lo(sub2ind(size(soc_lo), (1:N)', Ki*0+t_0+2)) = -soc_0-2e-3;
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo), (1:N)', Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_lo = cumsum(soc_lo, 2);
soc_lo=soc_lo(:, 2:end);
soc_lo(:, 1:t_0)=[];
soc_lo(:, max(Ki):end)=[];
soc_lo=soc_lo(:);
soc_lo(soc_lo==Inf)=[];
soc_up = zeros(N, length(Lhat_)+1);
soc_up(sub2ind(size(soc_up), (1:N)', Ki*0+1)) = -1e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up), (1:N)', Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c+2e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up), (1:N)', Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_up = cumsum(soc_up, 2);
soc_up=soc_up(:, 2:end);
soc_up(:, 1:t_0)=[];
soc_up(:, max(Ki):end)=[];
soc_up=soc_up(:);
soc_up(soc_up==Inf)=[];
% construction of charging rate constraints for each EV
u_up = zeros(N, length(Lhat_));
u_up(sub2ind(size(u_up), (1:N)', Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = -p_max_c*(t_0>0);
u_up(sub2ind(size(u_up), (1:N)', Ki+t_0)) = p_max_c;
u_up = cumsum(u_up, 2, 'reverse')+1e-3;
u_lo = zeros(N, length(Lhat_));
u_lo(sub2ind(size(u_lo), (1:N)', Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = +p_max_i*(t_0>0);
u_lo(sub2ind(size(u_lo), (1:N)', Ki+t_0)) = -p_max_i;
u_lo = cumsum(u_lo, 2, 'reverse')-1e-3;
% construction of initial guess of charging rates
% note: this Phase I initial guess is defined by fastest charging
schedules
p_max_until = floor((soc_d-soc_0)./(p_max_c*dt));
p_to_goal = ((soc_d-soc_0)./(p_max_c*dt)-p_max_until).*p_max_c;
u = zeros(N, length(Lhat_)+1);
u(sub2ind(size(u), (1:N)', p_max_until+t_0+1)) = p_max_c;
u(sub2ind(size(u), (1:N)', p_max_until*0+t_0+1)) = ...
u(sub2ind(size(u), (1:N)', p_max_until*0+t_0+1))- p_max_c;
u = cumsum(u, 2, 'reverse');
u(sub2ind(size(u), (1:N)', p_max_until+t_0+2)) = p_to_goal;
u=u(:, 2:end);
% construction of a mask to avoid influence on unexisting controls
mask = zeros(N, length(Lhat_)+1);
mask(sub2ind(size(mask), (1:N)', Ki+t_0+1)) = 1;
mask(sub2ind(size(mask), (1:N)', Ki*0+t_0+1)) = -1;
mask = cumsum(mask, 2, 'reverse');
mask=mask(:, 2:end);
mm = (mask(:)==1)';
% constraints on A_ev*u defined by constraints on voltages of each node
v_up = (v_0/1000)*(v_max(:, sum(mask, 1)>0)-v_k_base(:, sum(mask, 1)>0))+1e-3;
v_lo = (v_0/1000)*(v_min(:, sum(mask, 1)>0)-v_k_base(:, sum(mask, 1)>0))-1e-3;
% construction of equality constraints matrix "A_soc_end" for the final
% states of charge
A_soc_end = zeros(N, N*max(Ki));
for tt = 1 : max(Ki)
    A_soc_end(:, (tt-1)*N+1:(tt)*N) = diag(mask(:, t_0+tt))*dt;
end

```

```

% construction of inequality constraints matrix "A_soc" for the partial
% states of charge at each time step "k"
A_soc = repmat(A_soc_end,max(Ki)-1,1);
for nn = 1 : max(Ki)-1
    A_soc((nn-1)*N+1:nn*N, (nn)*N+1:end) = ...
        0*A_soc((nn-1)*N+1:nn*N, (nn)*N+1:end);
end
Indices=zeros(1,sum(max(Ki)-Ki));
prev_count = 0;
for ii = 1:length(Ki)
    Indices_Ki = (Ki(ii)): (max(Ki)-1);
    Indices(prev_count+1:prev_count+length(Indices_Ki)) = ...
        (Indices_Ki-1)*N+ii;
    prev_count = prev_count +length(Indices_Ki);
end
A_soc(Indices,:)=[];
A_soc(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_soc_end(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_soc_end(:,end+1) = A_soc_end(:,end)*0;
% Elimination of nodes (columns of the system matrix A) without PEVs.
A_ev = A(:,nodes);
% Repetition of "A_ev" matrix for each time step until the disconnection
of
% the last PEV.
A_ev_re = zeros(length(A)*max(Ki),sum(Ki));
prev_row = 0;
prev_col = 0;
for tt = 1:max(Ki)
    N_connected = sum(mask(:,t_0+tt));
    A_ev_re(prev_row+1:prev_row+length(A),...
        prev_col+1:prev_col+N_connected) ...
        = A_ev(:,mask(:,t_0+tt)==1);
    prev_row = prev_row+length(A);
    prev_col = prev_col+N_connected;
end
% Partial state of charge inequality constraint matrices for lower and
% boundaries, including the max infeasibility bound "s" variable
% - For states of charge constraints (no influence of "s"):
A_soc_s_lo = [A_soc zeros(sum(Ki)-1,1)];
A_soc_s_up = [A_soc -zeros(sum(Ki)-1,1)];
% - For charging rates constraints (no influence of "s"):
A_u_s_lo = [eye(sum(Ki)) zeros(sum(Ki),1)];
A_u_s_up = [eye(sum(Ki)) -zeros(sum(Ki),1)];
% - For voltage constraints:
A_v_s_lo = [A_ev_re ones(size(A_ev_re,1),1)];
A_v_s_up = [A_ev_re -ones(size(A_ev_re,1),1)];
% Parameters of descent, and backtracking line search
alpha = 0.5;
beta = 0.8;
mu = 10;
t = 1;
t_pre = t;
num_constraints = 2*sum(Ki)+2*size(A_soc,1)+2*size(A_ev_re,1);
Epsilon_lambda = 1e-20;
Epsilon_Barrier = 1e-50;
% Max number of iterations
Max_Iter=1000;

```

```

for ii = 1:Max_Iter
    % computes the states of charge trajectories
    x_k = A_soc*u(mm)';
    % computes voltage contribution of EVs
    v = A_ev_re*u(mm)';
    if ii == 1 % initialize s
        s = 1e-3 + max([-v+v_lo(:); v-v_up(:)]);
    end
    % computes the extended objective function's current value (including
    % inequalities implicitly)
    H = t*s...
    - sum(log(-v_lo(:)+v+s)+log(v_up(:)-v+s))...
    - sum(log(-soc_lo+x_k)+log(soc_up-x_k))...
    - sum(log(-u_lo(mm)' +u(mm)')+log(u_up(mm)' -u(mm)')));
    % computes the gradient of the extended objective function
    dH_dus = A_v_s_lo'*(1./(v_lo(:)-v-s))...
    + A_v_s_up'*(1./(v_up(:)-v+s))...
    + A_soc_s_lo'*(1./(soc_lo-x_k))...
    + A_soc_s_up'*(1./(soc_up-x_k))...
    + A_u_s_lo'*(1./(u_lo(mm)' -u(mm)'))...
    + A_u_s_up'*(1./(u_up(mm)' -u(mm)')));
    dH_dus(end) = dH_dus(end)+t;
    % computes de Hessian given the implicit inclusion of the inequalities
    % in the objective function
    I_x_lo = diag(1./(soc_lo-x_k).^2);
    I_x_up = diag(1./(soc_up-x_k).^2);
    I_u_lo = diag(1./(u_lo(mm)' -u(mm)')).^2);
    I_u_up = diag(1./(u_up(mm)' -u(mm)')).^2);
    I_v_lo = diag(1./(v_lo(:)-v-s).^2);
    I_v_up = diag(1./(v_up(:)-v+s).^2);
    Hessian = + A_v_s_lo'*I_v_lo*A_v_s_lo + A_v_s_up'*I_v_up*A_v_s_up ...
    + A_soc_s_lo'*I_x_lo*A_soc_s_lo ...
    + A_soc_s_up'*I_x_up*A_soc_s_up ...
    + A_u_s_lo'*I_u_lo*A_u_s_lo + A_u_s_up'*I_u_up*A_u_s_up;
    % normalizaion of the gradient
    dH_dus_normalized = dH_dus/norm(dH_dus);
    % computes the direction of descent in the Newton's method with
    % equality constraints
    if rcond([Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))])>1e-15
        Delta_x_w = ...
        -[Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))]\...
        [dH_dus_normalized;zeros(size(A_soc_end,1),1)];
    else % If the extended matrix in the equality constrained
        % problem is badly conditionned, the routine stops
        break
    end
    % Extracts the elements that correspond to the direction of descent
    Delta_x = Delta_x_w(1:length(dH_dus_normalized));
    % w = Delta_x_w(length(dH_dus_normalized)+1:end);
    % Computes the decrement
    lambda = (Delta_x'*Hessian*Delta_x)^2;
    % If the decrement is less that the threshold after changing "t",
    % the routine stops
    if t > t_pre && lambda < Epsilon_lambda
        break
    else
        end
end

```

```

% pause(1)
t_pre = t;
% Initial step size in the backtracking line search
Ts = 100000;
H_ir = Inf;
% backtracking line search subroutine
while (H_ir > (H+alpha*Ts*(dH_dus_normalized'*Delta_x)))
u_ir = u;
u_ir(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x(1:end-1)';
s_ir = s + Ts*Delta_x(end);
% computes the possible state of charge trajectories
x_k_ir = A_soc*u_ir(mm)';
% computes possible voltage contribution of EVs
v_ir = A_ev_re*u_ir(mm)';
% checks if possible variable values lie within specified ranges
if (sum(v_ir < (v_lo(:)-s_ir))+ sum(v_ir > (v_up(:)+s_ir))+ ...
sum(x_k_ir < soc_lo) + sum(x_k_ir > soc_up) + ...
sum(u_ir(mm)' < u_lo(mm)') + sum(u_ir(mm)' > u_up(mm)'))>0
Ts=beta*Ts;
else
H_ir = t*s_ir...
- sum(log(-v_lo(:)+v_ir+s_ir)+log(v_up(:)-v_ir+s_ir))...
- sum(log(-soc_lo+x_k_ir)+log(soc_up-x_k_ir))...
- sum(log(-u_lo(mm)'+u_ir(mm)')+log(u_up(mm)'-u_ir(mm)')));
Ts=beta*Ts;
end
% If decrement is less than threshold, "t" is updated
if lambda < Epsilon_lambda
t=mu*t;
break
end
end
% Plots
% If watch_evolution == 1, the most important variables are plotted in
% order to verify the evolution of the algorithm
if ii == 1 && watch_evolution == 1
% Sets up figure(10) to watch Phase I evolution
figure(10)
clf(figure(10),'reset')
set(gcf,'color','w');
fig = gcf;
fig.PaperPositionMode = 'auto';
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title('Phase I: Presione cualquier tecla para continuar');
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on', 'FontSize',13);
pause
end
if watch_evolution == 1 && sum(ii == [1 0:5:Max_Iter])==1
x = cumsum([soc_0 u*dt],2);
x = x(:,2:end);
TotalLoad = Lhat_+sum(u,1);
voltages_total = (v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)';
power_lim_up = (mask.*u_up)';
power_lim_lo = (mask.*u_lo)';
figure(10)

```

```

% State of Charge plots
subplot(2,2,1);
plot1 = plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x], 'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll), 'DisplayName', ['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca, 'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min], ':', 'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca, 'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max], ':', 'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca, 'YLim', [-2 max(soc_c)+4])
set(gca, 'YTick', 0: 2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')
% xticklabels({'14h', '19h', '00h', '5h', '10h', '15h'});
xticklabels({'14h', '16:30h', '19h', '21:30h', '00h', '2:30h', '5h', '7:30h', '10
h', '12:30h', '15h'});
ylabel(gca, 'SoC [kWh]')
set(gca, 'FontSize',12)
grid
legend1 = legend(gca, 'show');
set(legend1, 'Location', 'north', 'FontSize',10, 'Orientation',...
'Horizontal');

% Total load plots
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_, 'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Carga total de EV')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,TotalLoad, 'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Carga base')
hold off
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')
ylabel(gca, 'Potencia [kW]')
set(gca, 'FontSize',12)
grid on
legend1 = legend(gca, 'show');
set(legend1, 'Location', 'southwest', 'FontSize',10);
xticklabels({'14h', '19h', '00h', '5h', '10h', '15h'});

% Voltage plots
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,voltages_total, 'LineWidth',1.5,...
'DisplayName', 'Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--', 'Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--', 'Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:)'+s*1e3/v_0, ':',...
'Color',[.31 .31 .31], 'LineWidth',2)
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:)'-s*1e3/v_0, ':',...
'Color',[.31 .31 .31], 'LineWidth',2)
hold off
set(gca, 'YLim', [min(v_min(1,:)-s*1e3/v_0) ...
max(v_max(1,:)+s*1e3/v_0)])
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')

```

```

% xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
xticklabels({'14h','16:30h','19h','21:30h','00h','2:30h','5h','7:30h','10
h','12:30h','15h'})
ylabel(gca,'Voltaje por nodo [V]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'Nodo 1','2','3','4','5','6','7','8');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
grid

% Charging/discharging rate plots
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u','LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_up,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_lo,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Potencia [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
grid
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
%
xticklabels({'14h','16:30h','19h','21:30h','00h','2:30h','5h','7:30h','10
h','12:30h','15h'});
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase I: Iteración: ', num2str(ii), ', s: ',...
num2str(s), ' lamda: ' num2str(lambda/2), ' Ts: '...
num2str(Ts), ' m/t: ' num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on','FontSize',13);
pause(0.01)
end
% Descent computation
u_pre = u;
u_pre(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x(1:end-1)';
s_pre = s + Ts*Delta_x(end);
% Stopping criteria (Stop specially if "s" goes below zero which means
% that voltage constraints are feasible)
if s < 0 || num_constraints/t < Epsilon_Barrier % stopping criterion
break
else
u = u_pre;
s = s_pre;
end
end

```



```

% Plot of the final iteration
if watch_evolution == 1
x = cumsum([soc_0 u*dt],2);
x = x(:,2:end);
TotalLoad = Lhat_+sum(u,1);
voltages_total = (v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)';
power_lim_up = (mask.*u_up)';
power_lim_lo = (mask.*u_lo)';
figure(10)
% State of Charge plots
subplot(2,2,1);
plot1 = plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x], 'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll), 'DisplayName', ['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca, 'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min], ':', 'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca, 'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max], ':', 'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca, 'YLim', [-2 max(soc_c)+4])
set(gca, 'YTick', 0: 2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')
ylabel(gca, 'SoC [kWh]')
set(gca, 'FontSize',12)
xticklabels({'14h', '19h', '00h', '5h', '10h', '15h'});
grid
legend1 = legend(gca, 'show');
set(legend1, 'Location', 'north', 'FontSize',10, 'Orientation',...
'Horizontal');
% Total load plots
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_, 'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Carga total de EV')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,TotalLoad, 'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Carga base')
hold off
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')
ylabel(gca, 'Potencia [kW]')
set(gca, 'FontSize',12)
xticklabels({'14h', '19h', '00h', '5h', '10h', '15h'});
grid
legend1 = legend(gca, 'show');
set(legend1, 'Location', 'southwest', 'FontSize',10);
% Voltage plots
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,voltages_total, 'LineWidth',1.5,...
'DisplayName', 'Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--', 'Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--', 'Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:)+s*1e3/v_0, ':',...
'Color',[.31 .31 .31], 'LineWidth',2)

```

```

plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:)-s*1e3/v_0,':',...
'Color',[.31 .31 .31],'LineWidth',2)
hold off
set(gca,'YLim',[min(v_min(1,:)-s*1e3/v_0) max(v_max(1,:)+s*1e3/v_0)])
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Voltaje por nodo [V]')
set(gca,'FontSize',12)
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
legend1 = legend(gca,'Nodo 1','2','3','4','5','6','7','8');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
grid
% Charging/discharging rate plots
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u','LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_up,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,power_lim_lo,':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Potencia [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
grid
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase I: Iteración: ', num2str(ii), ', s: ',...
num2str(s), 'lamda: ' num2str(lambda/2), 'Ts: ' ...
num2str(Ts), 'm/t: ' num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on','FontSize',13);
pause(1)
end
% output assignments
pow_traj_ast = u;
end

```

Código utilizado de [1]

ANEXO C

```

function [pow_traj_ast,soc_traj_ast] = ...
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII(soc_c,soc_d,soc_0,p_max_c,...
p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat,nodes,tariffs,...
u_0_phaseI,watch_evolution)
% ----- Description inputs
% soc_c : battery available capacities [kWh]
% soc_d : final desired states of charge [kWh]
% soc_0 : initial states of charge [kWh]
% p_max_c : max charging rates [kW]
% p_max_i : max discharging rates [kW]
% t_0 : time step corresponding to soc_0
% Ki : total time steps
% dt : time step
% A : system matrix
% v_0 : transformer voltage
% v_k_base : voltages imposed by the transformer and base loads on the
grid
% nodes
% v_max : upper boundary for voltages on each node
% v_min : lower boundary for voltages on each node
% Lhat_ : total load forecast on the transformer
% nodes : nodes of the grid where EVs are connected
% tariffs : day and night tariffs (or per hour tariffs)
% u_0_phaseI : Initial guess defined by the phase I routine
% watch_evolution : (1) plots internal evolution, (otherwise) ignores
% ----- Description outputs
% pow_traj_ast : optimal power trajectory
% s : max infeasibility bound on the voltage constraints
% ----- Objective
% Minimize the cost of charging the three PEVs while respecting the
power,
% soc and voltage constraints
% Initialization of variables
% number of EVs
N = length(Ki);
Lhat_ = Lhat';
% construction of soc_k constraints for visualization of evolution
soc_min = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0-1e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+2e-3;
soc_min(sub2ind(size(soc_min),(1:N)',Ki+t_0+1)) = +soc_d-2e-3;
soc_min = cumsum(soc_min,2);
soc_min=soc_min(:,2:end);
soc_max = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+1)) = soc_0+1e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c-2e-3;
soc_max(sub2ind(size(soc_max),(1:N)',Ki+t_0+1)) = -soc_c+soc_d+2e-3;
soc_max = cumsum(soc_max,2);
soc_max=soc_max(:,2:end);
% construction of soc_k constraints for the routine
soc_lo = zeros(N,length(Lhat_)+1);
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+1)) = +1e-3;
soc_lo(sub2ind(size(soc_lo),(1:N)',Ki*0+t_0+2)) = -soc_0-2e-3;

```

```

soc_lo(sub2ind(size(soc_lo), (1:N)', Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_lo = cumsum(soc_lo, 2);
soc_lo=soc_lo(:, 2:end);
soc_lo(:, 1:t_0)=[];
soc_lo(:, max(Ki):end)=[];
soc_lo=soc_lo(:);
soc_lo(soc_lo==Inf)=[];
soc_up = zeros(N, length(Lhat_)+1);
soc_up(sub2ind(size(soc_up), (1:N)', Ki*0+1)) = -1e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up), (1:N)', Ki*0+t_0+2)) = -soc_0+soc_c+2e-3;
soc_up(sub2ind(size(soc_up), (1:N)', Ki+t_0+1)) = Inf;
soc_up = cumsum(soc_up, 2);
soc_up=soc_up(:, 2:end);
soc_up(:, 1:t_0)=[];
soc_up(:, max(Ki):end)=[];
soc_up=soc_up(:);
soc_up(soc_up==Inf)=[];
% construction of charging rate constraints for each EV
u_up = zeros(N, length(Lhat_));
u_up(sub2ind(size(u_up), (1:N)', Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = -p_max_c*(t_0>0);
u_up(sub2ind(size(u_up), (1:N)', Ki+t_0)) = p_max_c;
u_up = cumsum(u_up, 2, 'reverse')+1e-3;
u_lo = zeros(N, length(Lhat_));
u_lo(sub2ind(size(u_lo), (1:N)', Ki*0+t_0+1*(t_0==0))) = +p_max_i*(t_0>0);
u_lo(sub2ind(size(u_lo), (1:N)', Ki+t_0)) = -p_max_i;
u_lo = cumsum(u_lo, 2, 'reverse')-1e-3;
% construction of initial guess of charging rate trajectories
% note: Inherited from Phase I
u = u_0_phaseI;
% construction of a mask to avoid influence on unexisting controls
mask = zeros(N, length(Lhat_)+1);
mask(sub2ind(size(mask), (1:N)', Ki+t_0+1)) = 1;
mask(sub2ind(size(mask), (1:N)', Ki*0+t_0+1)) = -1;
mask = cumsum(mask, 2, 'reverse');
mask=mask(:, 2:end);
mm = (mask(:)==1)';
% constraints on A_ev*u defined by constraints on voltages of each node
v_up = (v_0/1000)*(v_max(:, sum(mask, 1)>0)-v_k_base(:, sum(mask, 1)>0))+1e-3;
v_lo = (v_0/1000)*(v_min(:, sum(mask, 1)>0)-v_k_base(:, sum(mask, 1)>0))-1e-3;
% construction of equality constraints matrix "A_soc_end" for the final
% states of charge
A_soc_end = zeros(N, N*max(Ki));
for tt = 1 : max(Ki)
A_soc_end(:, (tt-1)*N+1:(tt)*N) = diag(mask(:, t_0+tt))*dt;
end
% construction of inequality constraints matrix "A_soc" for the partial
% states of charge at each time step "k"
A_soc = repmat(A_soc_end, max(Ki)-1, 1);
for nn = 1 : max(Ki)-1
A_soc((nn-1)*N+1:nn*N, (nn)*N+1:end) = ...
0*A_soc((nn-1)*N+1:nn*N, (nn)*N+1:end);
end
Indices=zeros(1, sum(max(Ki)-Ki));
prev_count = 0;
for ii = 1:length(Ki)

```

```

Indices_Ki = (Ki(ii)):(max(Ki)-1);
Indices(prev_count+1:prev_count+length(Indices_Ki)) = ...
(Indices_Ki-1)*N+ii;
prev_count = prev_count +length(Indices_Ki);
end
A_soc(Indices,:)=[];
A_soc(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
A_soc_end(:,sum(A_soc_end)==0)=[];
% Elimination of nodes (columns of the system matrix A) without PEVs.
A_ev = A(:,nodes);
% Repetition of "A_ev" matrix for each time step until the disconnection
of
% the last PEV.
A_ev_re = zeros(length(A)*max(Ki),sum(Ki));
prev_row = 0;
prev_col = 0;
for tt = 1:max(Ki)
N_connected = sum(mask(:,t_0+tt));
A_ev_re(prev_row+1:prev_row+length(A),...
prev_col+1:prev_col+N_connected) = ...
A_ev(:,mask(:,t_0+tt)==1);
prev_row = prev_row+length(A);
prev_col = prev_col+N_connected;
end
% Parameters of descent, and backtracking line search
alpha = 0.5;
beta = 0.8;
mu = 10;
t = 1;
t_pre = t;
num_constraints = 2*sum(Ki)+2*size(A_soc,1)+2*size(A_ev_re,1);
Epsilon_lambda = 1e-20;
Epsilon_Barrier = 1e-50;
% Max number of iterations
Max_Iter=1000;
for ii = 1:Max_Iter
% computes the states of charge trajectories
x = cumsum([soc_0 u*dt],2);
x = x(:,2:end);
x_k = A_soc*u(mm)';
% computes voltage contribution of EVs
v = A_ev_re*u(mm)';
% computes the extended objective function's current value (including
% inequalities implicitly)
H = t*sum(tariffs*u') ...
- sum(log(-soc_lo+x_k)+log(soc_up-x_k)) ...
- sum(log(-u_lo(mm)' +u(mm)')+log(u_up(mm)' -u(mm)')) ...
- sum(log(-v_lo(:)+v)+log(v_up(:)-v));
% computes the gradient of the extended objective function
dH_du0 = repmat(tariffs,N,1);
dH_du = t*dH_du0(mm)' ...
+ A_soc'*(1./(soc_lo-x_k)+1./(soc_up-x_k)) ...
+ eye(sum(Ki))'*(1./(u_lo(mm)' -u(mm)')+...
1./(u_up(mm)' -u(mm)')) ...
+ A_ev_re'*(1./(v_lo(:)-v)+1./(v_up(:)-v));
% computes de Hessian given the implicit inclusion of the inequalities
% in the objective function

```

```

I_x_lo = diag(1./(soc_lo-x_k).^2);
I_x_up = diag(1./(soc_up-x_k).^2);
I_u_lo = diag(1./(u_lo(mm)'-u(mm)').^2);
I_u_up = diag(1./(u_up(mm)'-u(mm)').^2);
I_v_lo = diag(1./(v_lo(:)-v).^2);
I_v_up = diag(1./(v_up(:)-v).^2);
Hessian = A_ev_re'*I_v_lo*A_ev_re + A_ev_re'*I_v_up*A_ev_re + ...
I_u_lo + I_u_up + A_soc'*I_x_lo*A_soc + A_soc'*I_x_up*A_soc;
% normalizaion of the gradient
dH_du_normalized = dH_du/norm(dH_du);
% computes the direction of descent in the Newton?s method with
% equality constraints
if rcond([Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))])>1e-15
Delta_x_w = ...
-[Hessian A_soc_end';A_soc_end zeros(size(A_soc_end,1))]\...
[dH_du_normalized;zeros(size(A_soc_end,1),1)];
else % If the extended matrix in the equality constrained
% problem is badly conditionned, the routine stops
break
end
% Extracts the elements that correspond to the direction of descent
Delta_x = Delta_x_w(1:length(dH_du_normalized));
% w = Delta_x_w(length(dH_du_normalized)+1:end);
% Computes the decrement
lambda = (Delta_x'*Hessian*Delta_x)^2;
% If the decrement is less that the threshold after changing "t",
% the routine stops
if t > t_pre && lambda < Epsilon_lambda
break
else
end
t_pre = t;
% Initial step size in the backtracking line search
Ts = 100000;
H_ir = Inf;
% backtracking line search subroutine
while (H_ir > (H+alpha*Ts*(dH_du_normalized'*Delta_x)))
u_ir = u;
u_ir(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x';
% computes the possible state of charge trajectories
x_k_ir = A_soc*u_ir(mm)';
% computes possible voltage contribution of EVs
v_ir = A_ev_re*u_ir(mm)';
% checks is possible variable values lie within specified ranges
if (sum(u_ir(mm)' < u_lo(mm)') + sum(u_ir(mm)' > u_up(mm)') ...
+ sum(x_k_ir < soc_lo) + sum(x_k_ir > soc_up) ...
+ sum(v_ir < v_lo(:)) + sum(v_ir > v_up(:)))>0
Ts=beta*Ts;
else
H_ir = t*tariffs*sum(u_ir,1)' ...
- sum(log(-soc_lo+x_k_ir)+log(soc_up-x_k_ir))...
- sum(log(-u_lo(mm)' +u_ir(mm)')+log(u_up(mm)'-u_ir(mm)'))...
- sum(log(-v_lo(:)+v_ir)+log(v_up(:)-v_ir));
Ts=beta*Ts;
end
% If decrement is less than threshold, "t" is updated
if lambda < Epsilon_lambda

```

```

t=mu*t;
break
end
end
% Plots
% If watch_evolution == 1, the most important variables are plotted in
% order to verify the evolution of the algorithm
if ii == 1 && watch_evolution == 1
% Sets up figure(11) to watch Phase II evolution
figure(11)
clf(figure(11),'reset')
set(gcf,'color','w');
fig = gcf;
fig.PaperPositionMode = 'auto';
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title('Phase II: Presione cualquier tecla para continuar');
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on','FontSize',13);
pause
end
if watch_evolution == 1 && sum(ii == [1 0:5:Max_Iter])==1
figure(11)
% State of Charge plots
subplot(2,2,1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x],'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max],':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-2 max(soc_c)+4])
set(gca,'YTick',0: 2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'SoC [kWh]')
set(gca,'FontSize',12)
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
% Total load plots
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_,'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Carga total de EV')
hold on
%%
% 0:length(Lhat_)-1
% Lhat_
% sum(u,1)
% Lhat_+sum(u,1)

```

```

%%
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_'+sum(u,1),'LineWidth',1.5,...
'DisplayName','Carga base')
hold off
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Potencia [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
grid
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','southwest','FontSize',10);
% Voltage plots
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1,(v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)',...
'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
hold off
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Voltaje por nodo [V]')
set(gca,'FontSize',12)
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
legend1 = legend(gca,'Nodo 1','2','3','4','5','6','7','8');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
grid
% Charging/discharging rate plots
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u,'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_up)',':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_lo)',':','LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Potencia [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
grid
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase II: Iteración: ' num2str(ii) ', lamda: '...
num2str(lambda/2) ', Ts: ' num2str(Ts) ', m/t: '...
num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on','FontSize',13);

```



```

pause(0.01)
end
% Descent computation
u_pre = u;
u_pre(mm) = u(mm) + Ts*Delta_x';
% Stopping criteria
if num_constraints/t<Epsilon_Barrier % stopping criterion
break
else
u = u_pre;
end
end
% Plot of the final iteration
if watch_evolution == 1
figure(11)
% State of Charge plots
subplot(2,2,1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 x], 'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll), 'DisplayName', ['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca, 'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_min], ':', 'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca, 'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_),[soc_0 soc_max], ':', 'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca, 'YLim', [-2 max(soc_c)+4])
set(gca, 'YTick', 0: 2: max(soc_c)+3)
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')
ylabel(gca, 'SoC [kWh]')
set(gca, 'FontSize',12)
xticklabels({'14h', '19h', '00h', '5h', '10h', '15h'});
grid
legend1 = legend(gca, 'show');
set(legend1, 'Location', 'north', 'FontSize',10, 'Orientation',...
'Horizontal');
% Total load plots
subplot(2,2,2);
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_, 'LineWidth',1.5, 'DisplayName',...
'Carga total de EV')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,Lhat_+'sum(u,1)', 'LineWidth',1.5,...
'DisplayName', 'Carga base')
hold off
xlabel(gca, 'Tiempo [h]')
ylabel(gca, 'Potencia [kW]')
set(gca, 'FontSize',12)
xticklabels({'14h', '19h', '00h', '5h', '10h', '15h'});
grid
legend1 = legend(gca, 'show');
set(legend1, 'Location', 'southwest', 'FontSize',10);
% Voltage plots
subplot(2,2,3);
plot(0:length(Lhat_)-1, (v_k_base+(A_ev*u)*1000/v_0)',...

```

```

'LineWidth',1.5, 'DisplayName','Voltages')
hold on
plot(0:length(Lhat_)-1,v_max(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
plot(0:length(Lhat_)-1,v_min(1,:),'--','Color',[.31 .31 .31])
hold off
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Voltaje por nodo [V]')
set(gca,'FontSize',12)
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
legend1 = legend(gca,'Nodo 1','2','3','4','5','6','7','8');
set(legend1,'Location','north','FontSize',10,'Orientation',...
'Horizontal');
grid
% Charging/discharging rate plots
subplot(2,2,4);
plot1 = plot(0:length(Lhat_)-1,u,'LineWidth',1.5);
for ll=1:N
set(plot1(ll),'DisplayName',['EV ' num2str(ll)]);
end
hold on
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_up),' ':'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
set(gca,'ColorOrderIndex',1);
plot(0:length(Lhat_)-1,(mask.*u_lo),' ':'LineWidth',1.5,...
'HandleVisibility','off')
hold off
set(gca,'YLim',[-max(p_max_c)-0.5 max(p_max_c)+0.5])
xlabel(gca,'Tiempo [h]')
ylabel(gca,'Potencia [kW]')
set(gca,'FontSize',12)
legend1 = legend(gca,'show');
set(legend1,'Location','east','FontSize',8);
xticklabels({'14h','19h','00h','5h','10h','15h'});
grid
set(gcf,'NextPlot','add');
axes;
h = title(['Phase II: Iteración: ' num2str(ii) ', lamda: '...
num2str(lambda/2) ', Ts: ' num2str(Ts) ', m/t: '...
num2str(num_constraints/t)]);
set(gca,'Visible','off');
set(h,'Visible','on','FontSize',13);
pause(1)
end
% output assignments
pow_traj_ast = u;
soc_traj_ast = cumsum([soc_0 u*dt], 2);
end

```

Código utilizado de [1]

ANEXO D

```

clear
clc
close all
% Load profiles for the 10 nodes of the test
load_nodes =[3.255969339    0.435192989 1.280555839 1.39077667
1.034270653 0.911330998 2.107180326 1.616424813 3.820843978 3.353593062
2.312398129 1.433535459 2.944445042 4.112065898 3.015651455 3.01598928
0.249169678 0.440395699 1.143595629 0.817025326 0.824280946 0.174222365
1.123784263 0.462756846 1.200996279 0.405897129 0.755710015 0.956856881
0.473092349 0.799562208 1.029460633 0.675398392 0.497137916 0.544318844
0.91380118 0.752558609 2.877925381 1.579770728 0.005509538 3.629588053
1.931543645 2.350465841 1.709360679 1.532275837 2.790418704 2.631249144
0.830640552 2.372476417
0.605466387 0.905692356 0.021374021 0.526268795 3.334473569 1.634346989
0.360170114 2.266266405 2.688178421 3.363755351 2.008118246 2.187734607
3.13808585 0.237120425 0.361972494 0.955602166 0.841031683 2.305056839
0.922418506 1.412135316 0.542686022 1.850157853 1.153319904 1.314483876
1.024676155 1.331728504 0.032726287 0.073109757 0.171821939 1.255380603
1.062120706 0.797385617 0.537125569 1.85185195 1.702141119 2.414076229
0.416436817 1.714270253 1.274591832 2.502474247 1.486329761 0.768798571
1.522580229 2.806086275 0.701145421 0.918357172 2.349578769 0.98118062
0.266495157 1.106473368 0.122826526 2.247572755 2.296083683 4.119862568
0.730815637 0.871191094 3.315990185 0.252064568 1.424874829 3.321040966
0.885596442 0.540514535 1.646764129 0.953987488 2.823895494 1.475488417
2.230714996 0.261806311 0.8978222 0.174351469 0.671989736 0.892106889
0.787537505 0.060871319 0.89891292 0.52066919 0.522928722 0.108591029
0.094231994 1.401728506 0.559196643 0.642844605 1.219255987 1.669028029
2.211292441 1.803449338 1.867342873 2.454406808 1.614310624 2.480420032
3.00287841 1.653512903 2.439106337 2.569182342 1.955891333 0.871741516
0.351589782 1.844830045 1.240070134 0.666458095 1.296423892 1.137006738
2.018438002 3.454792483 1.726992748 0.961806356 0.449039597 1.603559181
3.042550195 2.738206905 3.107572229 2.170586355 0.403925789 2.363661055
2.048028094 0.946440844 1.223950236 0.987751895 0.571430085 0.034471679
1.10135034 0.045011654 1.053071394 0.500640558 0.582395236 0.064365206
0.94064834 0.687647109 0.665518662 0.248489867 1.373357466 1.307491729
0.204701009 1.33802987 0.028799147 3.576198286 1.009851784 0.235212996
0.809558849 3.27500277 1.823197852 2.653662694 1.316983808 1.276867469
1.077170991 1.265422549 0.383891861 1.577451804 0.103237416 0.208669134
2.816919386 1.499453933 0.663186139 1.923879753 0.482694776 4.148657118
0.747601317 1.03377969 2.831509522 0.017335789 0.270856584 0.7818294
1.759498886 0.892125201 1.256576701 0.600911172 0.620894705 0.052648909
0.163063535 1.199806441 0.063480069 0.514842463 0.960490129 0.434610401
0.737541348 0.713017043 0.889506412 0.415557968 1.603282859 1.201981127
1.236066692 2.87290666 3.005794687 0.161281824 0.967860789 1.349985009
1.004505684 0.2418455 2.584883256 1.003327563 0.005707701 2.68323901
0.977071898 0.892316165 1.448903985 0.226458274 0.511768351 2.205657193
0.153663151 1.60563887 0.162690038 2.293307919 2.93602314 1.356418739
3.15826276 0.051757225 1.068005946 4.445157529 3.744593638 2.20680978
1.145654715 2.082389501 0.790136464 1.315748982 0.274712235 0.681533052
0.554959795 0.818261719 0.798092069 0.497281841 0.260772001 0.514270801
0.95062436 0.230096095 0.788750709 1.535463275 0.38860944 1.41105893
1.775530956 0.482519061 0.030998379 2.747405826 2.427018624 2.015576555
2.239131982 0.288165688 1.225329313 0.370215734 1.869293564 0.893233273

```

```

2.504667848 1.762528624 3.249091895 2.445356231 2.397561312 0.737048754
3.478044116 2.909776081 1.396126522 1.546675071 3.96626236 0.349245317
3.433897017 1.713037025 3.165546565 1.953243394 1.324194345 1.381216125
0.085439416 1.758619613 0.923079946 0.783334553 0.229522337 0.578303851
1.305026395 0.724842199 0.175711397 0.741930256 0.451807807 0.452400586
0.25945533 0.803506263 0.555202135 1.714075894 1.150402657 0.669514006
1.63532218 2.632828311 1.208258159 0.025029706 2.504237455 2.79724099
2.185246928 3.224750554 0.721985565 0.771016645 2.389841484 0.89879604
1.601250947 1.91367071 2.141008792 1.700364046 3.398382335 4.593806435
1.971848587 1.761175405 2.740454413 2.831622118 3.463776807 0.670046902
0.485814859 1.436150765 0.26119285 0.180469051 2.444234359 1.908256331
1.326887971 1.230860036 0.890621717 1.52628272 0.707844192 1.429583578
0.274551188 0.634008332 0.73400865 0.940414812 0.77520121 0.626013223
0.037894545 0.431211417 0.652523209 0.199853797 1.658813012 0.95345343
1.222384701 2.837899459 2.622147056 0.080537363 2.655060023 0.440679918
2.716578129 3.457006519 1.958303828 0.815361328 2.098070639 0.491320907
2.618821765 0.197582244 1.738148369 1.888985201 0.264665445 2.035315631
3.727401512 2.674050221 3.445685282 5.12435824 4.73254373 3.045921505
1.938039944 3.835132254 2.016403843 4.302549769 2.636499869 0.578486813
0.9520331 1.454579581 3.0290919 0.919212088 1.084509776 0.588003374
0.186726885 0.580929915 0.997080489 0.734125888 1.84901059 1.247996773
0.677890689 0.940875134 0.384206158 0.890579305 0.941707602 1.954213086
2.624165397 0.906589645 1.63494084 1.024246995 0.119195681 3.074163262
3.480768456 0.005706917 2.394457675 1.387615196 0.678455253 1.186836696
3.021495886 1.38629095 1.954128578 1.850308129 0.743133343 2.31695556
1.985519168 1.571230695 2.689852275 1.028937563 1.264268386 2.993840205
1.405706574 3.532235278 2.595380966 0.545079179 1.061598561 1.68879954
1.395728686 1.784018271 0.391753869 1.428026903 0.061992768 0.856107946
0.261111922 0.718642788 0.13120671 0.910128355 1.092480018 0.596809169
0.210132055 0.899134424 0.650832588 1.426964496 0.478628678 0.866624825
0.406174425 1.341736675 2.49161749 1.258830893 0.834591616 2.177456826
0.999390655 1.605647037 0.601172048 1.730012182 2.015536897 2.274308051
];
% A_tilde matrix for the system in the first case
A_tilde_1 = ...
[-40 -20 0 0 0 0 0 0 0 0
20 -50 10 0 0 0 0 0 20 0
0 10 -26.6667 6.6667 0 10 0 0 0 0
0 0 6.6667 -13.3334 6.6667 0 0 0 0 0
0 0 0 6.6667 -6.6667 0 0 0 0 0
0 0 10 0 0 -30 20 0 0 0
0 0 0 0 0 20 -30 10 0 0
0 0 0 0 0 0 10 -10 0 0
0 20 0 0 0 0 0 0 -30 10
0 0 0 0 0 0 0 0 10 -10
];
% A_tilde matrix for the system in the second case
% A_tilde_2 = ...
% [-40 20 0 0 0 0 0 0;
% 20 -26.66666666666668 6.66666666666667 0 0 0 0 0;
% 0 6.66666666666667 -20.66666666666668 4 0 10 0 0;
% 0 0 4 -10.66666666666668 6.66666666666667 0 0 0;
% 0 0 0 6.66666666666667 -6.66666666666667 0 0 0;
% 0 0 10 0 0 -30 20 0;
% 0 0 0 0 0 20 -30 10;
% 0 0 0 0 0 0 10 -10];
% input voltage and resistance for the transformer

```

```

v_0 = 230;
R_0 = 0.05;
% voltage constraints for each node of the grid
v_max = zeros(size(load_nodes))+v_0*1.1;
v_min = zeros(size(load_nodes))+v_0*0.9;
% fictive tariff for 06h-23h (day tariff)
tariffs = ones(1,length(load_nodes))*1.5;
% fictive tariff for 23h01-05h59 (night tariff)
tariffs(16:32) = 1;
% System matrix A and transformer voltage vector v_k_0 from modeling
v_k_0 = [-v_0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
A = A_tilde_1\eye(length(A_tilde_1));
% A = A_tilde_2\eye(length(A_tilde_2)); % uncomment to check Case 2
% voltage imposed on each node by the transformer and the system topology
v_k_base = repmat((1/R_0)*A*v_k_0,1,length(load_nodes))...
+(1/v_0)*A*(load_nodes*1000);
% Parameters for each of the 3 PEVs
soc_cap = [16 16 16]'; % storage capacities [kWh]
soc_d = [16 16 16]'; % desired final states of charge [kWh]
soc_0 = [6.4 3.2 8]'; % initial states of charge [kWh]
p_max_c = [3 3 3]'; % max charging rates [kW]
p_max_i = [3 3 3]'; % max discharging rates [kW]
Ki = [24 21 22]'; % final time step of connection periods
dt = 0.5; % time step [h]
t_0 = 8; % t_0+dt is the time step under evaluation
% t_0 is the time step corresponding to soc_0
% (vehicles can be connected from before but in
% this case this is the initial time step for
% the three EVs)
nodes = [2 3 8]'; % Nodes where EVs are connected
Lhat_ = sum(load_nodes); % Total load profile (neglecting losses)
watch_evolution = 1; % Set to 1 in order to watch the routines' evolution
[pow_traj_ast,s] =
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_cap,soc_d,...
    soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat_',...
    nodes,watch_evolution);
if s > 0 % if the maximum infeasibility goes below zero (all the voltage
% constraints are feasible and the Phase II problem can find the
% optimal schedules)
else
[pow_traj_ast,soc_traj_ast] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII...
(soc_cap,soc_d,soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,...
v_max,v_min,Lhat_,nodes,tariffs,pow_traj_ast,watch_evolution);

```

end

Código utilizado de [1]

ANEXO E

```

clear
clc
close all
% Load profiles for the 12 nodes of the test
load_nodes =[0.255881837    1.881572073 1.973822674 2.2026108
1.81758357  0.402571273 1.301064567 0.525263653 3.155929399 2.717790869
0.663358497 1.16644758  1.360495198 1.199442552 2.356440416 2.372612643
0.37514896  1.568548348 1.216664202 1.646764542 0.714616655 1.743312231
0.658471454 0.844455402 0.285272566 0.62991954  0.77684746  0.630761607
1.055743717 0.225899565 0.596879972 0.041957939 0.572936206 1.044170961
1.43697441  2.091592927 0.115270285 1.517695628 1.781354513 0.022597234
1.144563783 2.054052536 1.901483248 1.720466503 2.153109371 2.202330351
2.379801822 0.364665745
1.03722641  1.079384069 0.857319134 0.514450751 1.059297165 2.107604862
2.918445683 2.395577875 3.024500897 0.152780056 2.091346196 0.457788866
2.699512294 3.756360281 1.482195573 2.741800128 0.890012135 0.39568164
0.655029476 1.038504753 0.757006866 0.030482331 0.900461245 0.809143846
0.770444784 0.787497518 0.076251505 0.848039822 0.4122013  0.217034834
0.525097233 1.126899859 0.573847666 1.063687574 0.60713219  0.351553241
0.219600595 1.319844784 0.21098717  2.089341144 0.841099969 3.046085392
1.136898247 2.240171466 1.851090336 1.303307882 0.381808424 0.184023805
0.990752582 1.138731436 1.181738943 2.203561159 0.229364455 1.462826511
0.651516592 2.047230922 1.222861917 4.269153867 2.582411787 2.459201024
0.717173488 0.911203697 1.708675372 0.418508907 2.355394138 0.592988158
0.340113481 0.532652701 0.759656029 0.246538417 0.112602708 0.78312537
0.463256524 0.861289955 0.649770394 0.650103699 0.391643111 0.030743196
0.675891263 0.304625406 0.25923123  0.122712674 1.384715636 1.471811635
0.517777792 2.877121781 1.392470905 1.601814445 3.43480178  1.9777485
3.310288044 0.238788316 0.7755537  0.85376896  0.510423687 2.081748775
1.02877455  0.723866299 1.326663504 2.473708148 0.164201022 2.540280152
1.092716151 0.230652393 3.480755588 0.304269014 1.528990877 2.095906374
1.349005602 0.165606684 2.428425744 3.529640048 0.748155676 1.770799908
1.905343835 0.532997668 0.512864472 1.233575375 0.828025861 0.051940887
0.53033282  0.336466954 0.242667823 0.837376976 0.954146341 0.077764487
0.370533872 0.739985866 0.608479108 1.541048983 1.482451195 1.485137358
0.346311114 2.775658382 0.789089916 0.176489212 0.498776126 0.484211775
1.245671097 1.437746409 1.17216164  0.78982955  1.975724488 1.251510124
2.087232025 1.854575189 0.018399515 2.22005462  2.014983276 2.829699128
1.106696832 3.439597362 0.275323933 0.598743737 2.723101706 0.861437472
3.001139813 1.554492356 1.09808259  1.484784801 1.36756998  1.032451426
0.199260514 0.136028363 1.22794084  0.287842896 0.737425873 0.748197615
0.864369058 0.127954727 0.878474761 0.19815098  0.200831463 0.35157887
0.72662755  0.266709261 0.394969546 0.02275999  0.63838555  1.282269319
0.65811552  0.134104561 0.889966688 2.776494259 0.47600317  2.307326836
2.584203317 4.856424925 0.666575985 0.800115507 0.428749905 0.622988025
0.899819883 0.412161969 1.59490678  1.796912553 0.400283243 1.02933656
1.770123751 0.036873553 0.828142057 2.059103745 2.075245321 1.268218182
0.876272407 1.752770102 0.154771727 0.512433907 0.459448774 0.079895081
1.227474396 1.32734721  1.317672134 0.81936037  0.242395674 0.845282416
0.490228618 0.555088446 0.831828045 0.375404227 0.722600671 0.130618506
0.628194577 0.803474152 0.708213469 0.655961344 0.370192525 0.502836497
2.854124207 3.131880834 0.829825557 1.589351126 0.218918969 1.18276293
0.163425562 0.627489107 1.850727458 1.396737742 1.012257236 2.081024675

```

```

2.88116482 0.699887944 1.599794165 0.279287463 1.334742394 1.911020217
0.112382617 3.538674999 0.160704026 3.897782122 0.65182582 2.360398975
1.44792198 1.520616804 1.590924659 0.441032591 2.695523364 1.591407258
1.459999181 0.171305827 0.42251145 0.831017287 0.590455065 0.686103655
0.25525367 0.563333813 0.078321017 0.54647549 0.894684532 0.1587132
0.531312417 0.067638404 0.6821886 0.682214289 0.673524837 1.181288321
0.775123832 0.092131305 1.065104043 1.745142808 2.007289334 2.729927803
1.717869987 0.12563108 0.085688081 0.551088196 2.111415465 2.054488875
0.04660403 0.784199029 0.578033651 1.095204159 0.716569449 0.71833404
0.764375204 0.119917191 1.786380453 1.697178053 2.014963062 2.023009164
1.662404169 0.040168017 2.310565482 1.658875823 1.329460158 1.959138695
0.34005872 1.763030425 0.685531824 1.274938002 0.465668399 0.677014091
0.158767745 0.201086358 0.78708308 0.090852773 0.641194669 1.130984058
0.688358509 0.914145819 0.937515838 1.062117067 0.774047159 0.109345755
1.52395652 0.601634038 0.808433971 2.614041833 2.054090688 0.510313085
0.961801348 0.022418896 2.57383874 1.955325911 1.472805645 0.114780912
2.979946182 0.236064513 1.191623612 0.526453855 2.956148746 0.309979096
2.737275426 1.283641351 1.681193117 0.087060656 1.246248953 2.376240064
4.177747693 0.920840258 1.665830001 1.56563514 1.189107388 2.003811304
1.711292644 1.919303169 1.293217536 0.637270251 0.18180169 0.04943904
0.772837497 0.5834183 0.620605061 0.742071731 0.331102124 0.999698987
0.432179417 0.572509782 0.332623923 0.756932088 1.269791322 0.967113778
0.316971282 2.11561452 1.810120181 0.694379043 0.121023918 0.25347825
2.381164498 1.758199273 0.851070906 1.049063819 1.352080807 0.302676748
1.190431617 0.960365006 1.206978018 0.027224839 2.28326413 3.580299966
0.801839971 2.644030499 3.115134626 2.773552547 2.578108549 2.790180105
0.641846475 2.774348384 2.055136665 0.123420766 1.974581668 0.768784819
1.359678454 1.370850228 0.479231323 0.437970588 0.4330879 0.408202913
0.205104271 0.819592027 0.202675466 0.368381345 0.400458334 0.990714973
0.341385446 0.534691088 0.248768224 1.356462002 1.007354421 2.059189835
2.837147928 0.652258746 1.329331322 2.493048014 1.864129733 0.827526358
1.308850401 0.292505782 1.371778585 1.174364498 1.778293601 2.870781952
1.29040624 0.357877353 1.629934939 0.704819036 0.338626567 2.440514587
2.95863305 2.03870474 2.994321712 1.268903179 2.912845623 1.030926131
2.544399083 1.606622372 2.128935566 2.76721097 1.959898071 0.932853734
0.589375865 0.451508561 1.379500027 1.33435238 0.587680141 0.146266188
1.108843603 0.536267297 0.312147973 0.565903761 0.202238847 1.117915547
0.211725125 1.159485265 0.529263838 0.585085059 0.568708064 1.298899499
2.357645467 1.841779682 1.586791511 1.632325736 1.122633888 1.689421669
1.976688917 1.069942102 1.099523499 1.69018216 1.050829748 0.136246251
1.591759823 1.581315121 0.420785065 0.475712616 2.064935984 0.567533607
3.134930157 1.929835461 0.924752276 2.853682155 1.971553609 2.220246063
0.702081799 3.027528493 1.090016206 0.924044275 0.455699689 2.433639629
2.005709232 1.749706553 1.220250844 0.883339873 0.761923989 0.840828577
0.955288843 0.518085065 0.183327414 0.536477589 0.933154891 0.668333777
0.271814619 1.04787716 0.331962351 0.576847969 1.216722691 0.398961837
2.087955331 0.450275741 1.676524223 0.024975147 1.766668642 0.627144866
0.981655334 3.700216141 2.788881699 1.083885425 1.055809172 1.865064113
];
% A_tilde matrix for the system in the first case
A_tilde_1 = ...
[-40, 20, 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
 20,-30,10,0,0,0,0,0,0,0,0,0;
 0, 10,-26.6667,6.6667,0,10,0,0,0,0,0,0;
 0,0,6.6667,-33.3334,6.6667,0,0,0,20,0,0,0;
 0,0,0,6.6667,-6.6667,0,0,0,0,0,0,0;
 0,0,10,0,0,-30,20,0,0,0,0,0;

```

```

0,0,0,0,0,20,-30,10,0,0,0,0;
0,0,0,0,0,0,10,-10,0,0,0,0;
0,0,0,20,0,0,0,0,-40,20,0,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,20,-40,20,0;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,20,-30,10;
0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,10,-10];

% A_tilde matrix for the system in the second case
% A_tilde_2 = ...
% [-40 20 0 0 0 0 0 0;
% 20 -26.666666666666668 6.666666666666667 0 0 0 0 0;
% 0 6.666666666666667 -20.666666666666668 4 0 10 0 0;
% 0 0 4 -10.666666666666668 6.666666666666667 0 0 0;
% 0 0 0 6.666666666666667 -6.666666666666667 0 0 0;
% 0 0 10 0 0 -30 20 0;
% 0 0 0 0 0 20 -30 10;
% 0 0 0 0 0 0 10 -10];
% input voltage and resistance for the transformer
v_0 = 230;
R_0 = 0.05;
% voltage constraints for each node of the grid
v_max = zeros(size(load_nodes))+v_0*1.1;
v_min = zeros(size(load_nodes))+v_0*0.9;
% fictive tariff for 06h-23h (day tariff)
tariffs = ones(1,length(load_nodes))*1.5;
% fictive tariff for 23h01-05h59 (night tariff)
tariffs(16:32) = 1;
% System matrix A and transformer voltage vector v_k_0 from modeling
v_k_0 = [-v_0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
A = A_tilde_1\eye(length(A_tilde_1));
% A = A_tilde_2\eye(length(A_tilde_2)); % uncomment to check Case 2
% voltage imposed on each node by the transformer and the system topology
v_k_base = repmat((1/R_0)*A*v_k_0,1,length(load_nodes))...
+(1/v_0)*A*(load_nodes*1000);
% Parameters for each of the 4 PEVs
soc_cap = [16 16 16 16]'; % storage capacities [kWh]
soc_d = [16 16 16 16]'; % desired final states of charge [kWh]
soc_0 = [6.4 3.2 8 5.2]'; % initial states of charge [kWh]
p_max_c = [3 2 3 5]'; % max charging rates [kW]

p_max_i = [3 2 3 5]'; % max discharging rates [kW]
Ki = [24 21 22 24]'; % final time step of connection periods
dt = 0.5; % time step [h]
t_0 = 8; % t_0+dt is the time step under evaluation
% t_0 is the time step corresponding to soc_0
% (vehicles can be connected from before but in
% this case this is the initial time step for
% the four EVs)
nodes = [2 3 8 11]'; % Nodes where EVs are connected
Lhat_ = sum(load_nodes); % Total load profile (neglecting losses)
watch_evolution = 1; % Set to 1 in order to watch the routines' evolution
[pow_traj_ast,s] =
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_cap,soc_d,...
soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat_',...
nodes,watch_evolution);
if s > 0 % if the maximum infeasibility goes below zero (all the voltage
% constraints are feasible and the Phase II problem can find the

```



```
% optimal schedules)
else
[pow_traj_ast,soc_traj_ast] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII...
(soc_cap,soc_d,soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,...
v_max,v_min,Lhat_,nodes,tariffs,pow_traj_ast,watch_evolution);
```

```
end
```

Código utilizado de [1]

ANEXO F

```
clear
clc
close all
% Load profiles for the 16 nodes of the test
load_nodes =[1.494767146    0.573689135 1.384448413 0.693784832
0.996662344 0.04825214 0.653938776 0.513936426 1.058288468 1.142678081
2.114806023 0.331593506 2.392950712 1.889055285 2.243440215 0.702470268
1.432988375 1.036168628 0.894802522 0.994806252 0.448773959 1.176915445
0.422853462 0.461119367 0.566583732 0.901611089 0.243809767 0.334974971
0.581163443 0.128393039 0.314314611 0.721685641 0.766180107 0.639499424
0.600110661 0.335861321 1.376583822 0.723327822 1.286903275 0.513788528
0.861917046 1.168038279 2.25593438 0.269074135 2.114660976 1.737300114
1.32268197 0.194280998
1.691638686 0.030927142 1.109859304 0.915503599 1.912871058 0.428883193
0.587500304 2.08963912 1.96574257 0.496195643 2.21297046 2.11028892
0.403385957 0.590122776 1.705137471 1.249884912 0.222525915 1.024893575
1.29942514 0.699868879 0.062126886 0.38419965 0.453229027 0.228081911
0.689276575 0.331644939 0.250569905 0.324669802 0.451042461 0.201687268
0.539292835 0.605557864 0.284146937 0.450096703 0.536373401 1.04381237
1.074833042 0.119734832 0.063254759 1.287822384 2.184433413 2.352326482
0.713633006 0.860657147 1.866581141 0.799603389 0.931082899 1.392171577
0.220899127 0.872794196 0.080220169 0.896268051 1.641794871 2.270281035
2.192124349 0.598709611 2.887801789 0.926465214 2.398682396 1.190469517
1.753830149 1.97272122 0.480279537 1.017351111 1.399775649 0.701496707
1.376520519 0.682736402 0.241047838 0.331954241 0.103122848 0.055732486
0.131761856 0.863224429 0.01393397 0.598765928 0.759253056 0.202813794
0.411720164 0.374091795 0.575410736 0.515338443 0.543924684 1.706934499
1.498346055 1.537510424 1.051820084 2.015766679 0.609633755 0.191333811
0.082627042 1.114252813 2.337229894 0.518722572 1.468122694 0.440469329
1.659360575 0.904266018 1.306816077 0.804993916 0.261788845 0.075112302
0.781797604 0.210969926 1.468560419 2.277086369 0.476105335 2.193306699
0.157889921 1.684227933 0.578071616 0.025980203 0.342572916 0.726930472
0.679249274 1.348648597 0.105307411 1.052588867 0.237519446 0.696710661
0.48632878 0.444757634 0.543228396 0.492470718 0.50517623 0.344942534
0.04074239 0.204352379 0.516172238 1.351102561 0.253769701 1.530068098
0.252640771 0.371603473 1.448918292 0.453200507 0.217275039 0.793821367
2.084055921 1.62820519 1.686009835 1.421140077 0.889629261 0.211447831
0.671550123 0.708103069 0.654171017 1.315145917 0.362059153 0.398232371
0.742156221 0.290836171 0.46417623 0.784398958 1.738875762 0.293853651
1.690591935 1.253438257 0.770574981 0.34385779 1.590116944 0.347540124
0.833706386 0.723687739 1.098968631 0.167974379 0.501324734 0.90844543
0.358322391 0.706620315 0.624201315 0.646672938 0.124794325 0.385133798
```

0.602125045	0.320962929	0.245833076	0.547249317	0.822873807	0.174958303
0.809247923	1.93143798	1.574901514	1.969198211	0.480012977	2.107475206
1.259702459	0.150604507	1.233978906	1.678112453	1.213051791	0.139061782
0.627683023	1.063647402	1.363275051	0.190165153	1.154806182	2.581830731
0.637773537	1.967469447	2.370236074	2.501023706	1.998492031	1.798026756
2.184759711	1.176770886	2.502438671	0.796940909	0.584647012	0.856769669
0.996605004	1.179340066	1.049302945	0.594094866	0.088180961	0.004720505
0.504842683	0.172593711	0.171669768	0.017093538	0.393652321	0.069403122
0.390316673	0.920300452	0.059264973	0.579872212	0.992381301	1.949670982
1.322127965	1.785062208	0.834885006	1.702338066	0.339327243	0.834034814
1.700779457	0.8310341	1.583556037	0.5796673	1.344323904	2.47370756
0.197281624	0.645204684	0.043243397	0.297978169	0.600208735	2.132912851
1.498235118	1.661180275	0.199981533	1.220234046	0.165146541	0.214098296
1.659618665	0.087392789	1.072232121	1.927956913	2.195631396	1.331441129
0.400769725	0.669420078	1.075386126	0.08194768	0.339541981	0.43645105
0.264460505	0.057005617	0.228122875	0.609593486	0.488262329	0.629430209
0.330693854	0.192026949	0.296293509	0.185718531	1.137906754	0.410853779
0.660635068	2.034487216	0.99040637	0.918864037	1.585103984	2.128923437
1.815741463	1.092289735	0.50251359	0.031847416	0.175769791	0.033041519
2.253331023	0.677591883	0.647918048	0.495360944	1.369055334	1.982038512
0.959909698	1.067293923	0.885030549	1.386144004	0.53859153	1.010389495
0.853596368	0.063404557	0.808996458	0.049189293	2.143918172	0.120003154
0.816156031	1.256128395	0.732769896	0.817664327	0.993055565	0.407309688
0.792219432	0.083750053	0.4306958	0.086866438	0.621269911	0.626545249
0.374280129	1.012983686	0.671045842	1.11382889	0.683562266	0.420109712
1.042555242	0.692738553	1.621353128	0.557700078	1.151920568	0.653401977
0.202275356	0.828250812	0.65473207	0.668008532	0.812621594	0.768049703
0.40849287	1.025021925	0.689441612	1.061320921	1.653982612	0.635907973
1.406633324	2.111465167	0.725531161	0.050667656	2.333104284	1.71124452
1.908118074	1.161582317	0.737876608	2.661186833	0.125258031	1.643447857
0.91537204	1.154781024	0.999342146	0.715206615	0.627566595	0.876825419
0.600481299	0.434423391	0.347387084	0.33400983	0.157113024	0.542304099
0.159177166	0.510228572	0.592931517	0.409687886	1.043832528	0.071738839
0.408464711	0.189349134	0.170926609	0.774972014	2.006053261	0.257292848
1.632174257	1.495923638	0.886076831	1.454209399	1.378055664	2.363942609
0.419369576	0.577895518	0.582634494	1.148121007	1.069870229	0.706715499
0.848804609	1.430770095	3.204331504	1.974897604	1.770612301	2.03725876
0.812010521	1.579444848	0.449907977	1.348899376	1.3592752	1.50601714
0.457498475	0.745712173	0.899375009	0.377402832	0.023819458	0.271712209
0.711653461	0.001521194	0.159711886	0.241484874	0.175134518	0.704097348
0.709097684	0.592002706	0.639364807	0.934953559	1.019306436	0.118458848
0.78663279	0.68569249	1.160346918	0.826094255	1.248065921	0.537649865
1.05683674	0.803984217	0.996267393	1.821635748	1.176262447	1.190538036
1.877069971	0.114097355	1.328892508	0.440651432	0.094926308	0.150189761
1.656689258	1.722979762	1.013085603	2.081839465	1.964741713	0.760349166
0.061648036	1.570471274	2.098539281	0.195012368	0.316539913	0.173836131
0.837224999	0.960118879	1.008320407	0.15391125	0.907220458	0.397795764
0.104908077	0.384294368	0.571002186	0.575678182	0.743492463	0.623226105
0.156582245	0.33503731	0.187235329	0.051128738	0.455680212	0.299368001
0.702879355	0.309474551	1.214904895	0.664042414	0.648785494	0.401026546
0.176828265	2.868639025	0.77975684	0.708566682	0.572331542	1.282977131
1.650072469	1.084906448	1.36675192	1.39775562	1.644122197	0.614714992
2.119331537	1.501677037	1.687506944	1.398752531	0.396919686	1.782392456
1.427150759	1.85617797	0.69498957	1.13291494	0.900075057	0.938524804
0.28616885	0.645319146	0.374866957	0.548411209	0.5991528	0.067851891
0.137680041	0.527045072	0.178258581	0.674765408	0.044734755	0.001267277
0.425042484	0.144827421	0.187259515	0.722735484	1.13561536	1.122545338

```

1.229257544 0.547274818 0.142237578 1.633719306 0.806072939 1.624384119
0.80492467 0.117909504 0.179757266 1.158819788 0.293322454 0.789748022
0.1612991 0.945223091 0.789383094 1.127666452 0.09484266 2.857226942
1.050099973 1.847336121 1.655325694 1.743687594 0.269050043 1.453776558
2.187606752 0.974328657 1.364386302 1.282277275 0.918561557 0.239621594
0.684554147 0.298125792 0.413429063 0.933643945 0.125703392 0.378841564
0.169829654 0.034457709 0.459750884 0.360927094 0.543351992 0.438417367
0.090896032 0.357209223 0.016234037 0.740058239 0.286928704 0.449779745
1.311358876 1.909774597 0.851064153 1.078851832 1.064411626 0.781307147
0.944608199 0.751749273 0.086196681 0.670495825 1.186945676 0.78305515
0.763198103 0.487446065 0.464776883 1.307721037 1.340957194 2.150767612
1.448627753 1.579426292 1.75362653 1.961260786 1.738659693 0.79298778
0.774196034 0.630664439 1.349766904 1.635880262 1.168592703 1.834722387
0.784875325 0.298688319 0.45631764 0.47403777 0.829018246 0.856180141
0.095221171 0.480894094 0.609036428 0.546248099 0.587174258 0.57416725
0.416232111 0.206273757 0.658408384 0.271296498 0.401548584 1.022345769
0.960995176 1.233592065 0.690399569 1.56344915 0.335195153 1.557666392
0.041258321 2.188565078 0.464360955 0.274196169 0.815717938 0.222257613
1.906211001 0.928735979 1.322629469 1.010546048 0.630864992 1.161209628
0.655684319 0.74185476 0.700082748 2.640841914 0.488893669 1.141528552
0.623209744 1.291460562 2.093793066 2.349783267 0.546572042 0.860129495
0.520620674 0.267822283 0.991039743 1.149101678 0.016608815 0.369072942
0.770908973 0.2375424 0.354669681 0.510877832 0.490052871 0.575684486
0.336061913 0.524963951 0.331299784 0.51650619 0.779429358 1.573733871
0.611146697 1.844783724 0.563967269 0.969893851 1.900793185 0.673474292
2.668789109 0.557156064 1.249124487 0.426552164 0.947804113 0.172607826
0.277775583 1.070450092 0.445538544 1.417016901 0.551187285 1.705724456
2.11069362 0.894455867 0.610692183 0.093826429 2.434348532 2.288435369
2.289436664 1.44873623 1.119569223 1.820414282 0.552949118 1.788457134
1.22645089 0.714795977 0.813625343 0.800945245 0.232082212 0.473148971
0.47552137 0.858613985 0.453951474 0.034900861 0.474332044 0.052487054
0.703424665 0.557495363 0.152919208 0.440927325 0.736756244 0.969760526
0.562294962 1.594156114 0.503710582 0.530298686 0.110998396 1.627843418
2.229831355 2.531704761 0.619197097 0.901122371 0.982276262 1.472643312
];
% A_tilde matrix for the system in the first case
A_tilde_1 = ...
[-40 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
20 -50 10 0 0 0 0 0 20 0 0 0 0 0 0 0
0 10 -36.6667 6.6667 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 10 0
0 0 6.6667 -33.3334 6.6667 0 0 0 0 0 20 0 0 0 0 0
0
0 0 0 6.6667 -6.6667 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 10 0 0 -30 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 20 -30 10 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 10 -10 0 0 0 0 0 0 0 0
0 20 0 0 0 0 0 0 -30 10 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 10 -10 0 0 0 0 0 0
0 0 0 20 0 0 0 0 0 0 -40 20 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 20 -40 20 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 20 -30 10 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 -10 0 0
0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -30 20
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 20 -20
];
% A_tilde matrix for the system in the second case
% A_tilde_2 = ...

```

```

% [-40 20 0 0 0 0 0 0];
% 20 -26.66666666666668 6.66666666666667 0 0 0 0 0;
% 0 6.66666666666667 -20.66666666666668 4 0 10 0 0;
% 0 0 4 -10.66666666666668 6.66666666666667 0 0 0;
% 0 0 0 6.66666666666667 -6.66666666666667 0 0 0;
% 0 0 10 0 0 -30 20 0;
% 0 0 0 0 0 20 -30 10;
% 0 0 0 0 0 0 10 -10];
% input voltage and resistance for the transformer
v_0 = 230;
R_0 = 0.05;
% voltage constraints for each node of the grid
v_max = zeros(size(load_nodes))+v_0*1.1;
v_min = zeros(size(load_nodes))+v_0*0.9;
% fictive tariff for 06h-23h (day tariff)
tariffs = ones(1,length(load_nodes))*1.5;
% fictive tariff for 23h01-05h59 (night tariff)
tariffs(16:32) = 1;
% System matrix A and transformer voltage vector v_k_0 from modeling
v_k_0 = [-v_0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0];
A = A_tilde_1\eye(length(A_tilde_1));
% A = A_tilde_2\eye(length(A_tilde_2)); % uncomment to check Case 2
% voltage imposed on each node by the transformer and the system topology
v_k_base = repmat((1/R_0)*A*v_k_0,1,length(load_nodes))...
+(1/v_0)*A*(load_nodes*1000);
% Parameters for each of the 4 PEVs
soc_cap = [16 16 16 16]'; % storage capacities [kWh]
soc_d = [16 16 16 16]'; % desired final states of charge [kWh]
soc_0 = [6.4 3.2 8 4.5]'; % initial states of charge [kWh]
p_max_c = [4 4 3 3]'; % max charging rates [kW]

p_max_i = [3 3 3 3]'; % max discharging rates [kW]
Ki = [24 21 22 24]'; % final time step of connection periods
dt = 0.5; % time step [h]
t_0 = 8; % t_0+dt is the time step under evaluation
% t_0 is the time step corresponding to soc_0
% (vehicles can be connected from before but in
% this case this is the initial time step for
% the four EVs)
nodes = [4 10 12 15]'; % Nodes where EVs are connected
Lhat_ = sum(load_nodes); % Total load profile (neglecting losses)
watch_evolution = 1; % Set to 1 in order to watch the routines' evolution
[pow_traj_ast,s] =
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_cap,soc_d,...
    soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat_',...
    nodes,watch_evolution);
if s > 0 % if the maximum infeasibility goes below zero (all the voltage
% constraints are feasible and the Phase II problem can find the
% optimal schedules)
else
[pow_traj_ast,soc_traj_ast] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII...
(soc_cap,soc_d,soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,...
v_max,v_min,Lhat_,nodes,tariffs,pow_traj_ast,watch_evolution);

```

end

Código utilizado de [1]

ANEXO G

```

clear
clc
close all
% Load profiles for the 24 nodes of the test
load_nodes =[0.251161419    1.978558586 0.483139871 0.162939233
0.365544541 0.420757477 0.940368997 1.249337254 0.939947236 1.525697984
0.982413395 0.554531492 1.178733581 1.184822502 1.443077824 0.891662869
1.111363188 0.217107694 0.716022788 0.761901354 0.787398623 0.020934613
0.115152485 0.267248667 0.501225328 0.095585302 0.239802543 0.492488441
0.592572994 0.360740466 0.180952801 0.204326148 0.416560722 0.768060542
0.418681705 0.476640286 1.329692576 0.390204565 0.178891808 1.266126427
0.917228752 0.266010201 1.466066281 1.288474654 0.347891537 0.568126383
0.240963898 0.993597952
0.434489138 1.744228458 0.975145341 0.805792222 1.288314346 0.562346008
0.996409904 1.251855368 0.071238912 0.438649704 1.643451883 1.995352678
0.692582251 1.027615405 0.625844551 1.255285912 0.066556176 0.071613178
0.769993385 0.663633122 0.625703577 0.338767691 0.209377813 0.021636091
0.448086305 0.429781769 0.059605661 0.536736767 0.33780123 0.110707147
0.09520189 0.152553516 0.406207477 0.40865252 0.282559303 0.827026912
0.394037404 1.262159042 0.379274348 0.658457061 0.588731035 0.774248849
0.566882521 1.400049639 0.968359598 0.973788385 0.760919228 0.366966902
1.208280083 0.495462617 0.486212639 0.743835015 1.212132889 0.886585309
0.795699681 1.147383135 0.851435901 1.443262793 0.022930662 2.108077616
1.381140961 0.257986363 1.048441022 0.492011481 0.370218469 0.259890626
0.856142096 1.010729597 0.169827033 0.334059546 0.164759016 0.27396207
0.25051367 0.226451951 0.260045326 0.086159512 0.163672892 0.235605805
0.485021535 0.230694998 0.415843333 0.356365776 0.009506021 0.808095903
0.54866943 0.087516488 1.181250454 1.435312898 0.664557193 1.290162295
1.23924512 0.0345205 0.765133051 0.455603803 0.779199208 0.788730849
0.449622902 1.212074392 0.240732915 0.829489912 0.196403602 1.668251183
1.431748997 0.826157061 0.138798734 1.105094997 1.676387881 0.961952516
0.308589701 1.085158465 1.205792969 1.04285925 0.178965954 0.718111148
0.658533019 0.087567917 0.059063933 0.705477092 0.490135366 0.093423739
0.318419045 0.508716286 0.265495486 0.527330947 0.299876606 0.213926058
0.172284906 0.553063031 0.517863042 0.176088854 0.641384089 0.618973061
0.138759369 0.939571357 1.252638471 0.461202203 0.385598663 0.063256797
0.62452322 1.013101721 0.188453667 1.00804608 1.028402934 0.549110345
1.221855632 1.455260404 0.762011556 0.334951261 0.392556016 1.090561964
0.654856631 1.123791713 0.45784226 0.168039571 0.628462074 0.63983217
1.278537829 0.190233051 0.634919176 1.161941261 0.582803013 0.977602
0.575721153 0.561836277 0.295067039 0.705792775 0.156993293 0.493410101
0.331819403 0.518030381 0.101799063 0.524441913 0.141977121 0.369327723
0.319311756 0.286101712 0.512539397 0.025666315 0.78265969 0.40969245
0.64366399 0.969815162 0.915243623 0.542384364 0.621578774 0.946383881
1.236044542 0.120112572 0.775332443 0.202295119 0.374800363 0.412684874
0.75971976 1.920046451 1.183643698 0.574030544 0.182601023 0.330663794
1.324914381 0.92917315 1.032640254 0.631951165 0.861762618 0.116721224
0.331634621 1.414106276 0.0781635 0.488458423 0.436792371 0.80559338
0.149830814 0.41060576 0.555366249 0.35561605 0.314110285 0.268900683
0.048127981 0.334380868 0.092776037 0.103853639 0.509879629 0.176451754
0.45837693 0.220315242 0.227631561 0.292216617 0.260607758 0.27586081
0.986213537 0.042236809 0.138473632 1.389131994 0.56291177 0.201380358
1.71883666 1.106082707 0.550065274 0.16243378 0.969491826 0.140616157

```

0.560430958	1.145832194	0.194203284	0.284014351	0.716259768	0.85435155
0.139954778	0.001133691	0.533687449	0.446381652	1.171562921	1.359314117
1.526185793	1.496197965	0.287245844	1.053278663	0.989514446	0.827330747
0.920127117	0.467433542	0.656940476	0.353403757	0.057003362	0.340050934
0.249483792	0.257397285	0.01357432	0.544536984	0.442595552	0.118302065
0.062918136	0.150254706	0.031469417	0.68027874	0.13424877	0.211483617
0.649191701	0.620627363	0.558672208	0.079105322	0.941566321	1.304846228
0.497823091	1.152132488	0.823602659	1.03268539	0.854257481	0.963328309
0.396016885	1.758536898	0.005012276	0.12877864	0.171376267	1.532640317
0.629916499	1.047970678	1.236076671	0.787731321	0.417370055	0.19699865
1.54810218	1.822607116	0.621103587	0.201614795	0.580548371	1.054999419
0.745310548	0.887520425	0.54942084	0.076780812	0.359825963	0.493226867
0.159046486	0.366957354	0.169161142	0.345542801	0.10825075	0.403186553
0.03874588	0.580184546	0.244566745	0.551466726	0.43548079	0.603196446
0.0801909	0.730290638	0.52535628	0.36994388	0.670529738	0.025315832
0.315895439	0.230393891	1.01393782	1.017910245	0.929952083	0.444632839
0.451989299	0.986946009	0.77891331	0.038983179	1.292032903	0.375051492
1.570276187	0.903076293	0.053438174	1.659123948	0.640023978	1.117155811
1.262829187	0.367074011	1.090217717	0.40641809	0.359173524	0.688024343
0.094454585	0.471812058	0.196350399	0.383573937	0.321100899	0.361250681
0.518932714	0.152587521	0.324608403	0.185465586	0.240782277	0.377854199
0.377091534	0.257098673	0.252398572	0.689137609	0.656537582	0.970360004
0.342771189	0.610586181	0.00420439	0.456654134	0.227563923	0.63381591
0.149174051	0.793714187	1.038430917	0.68168347	0.130625089	0.510913288
0.087973739	1.11773098	0.527771803	0.823276911	0.822085414	0.474775721
0.047195041	0.661971466	0.023715495	2.017621036	0.835689017	0.340339993
0.40680947	0.063203813	1.538962554	0.755003828	0.145261041	0.814425007
0.822207687	0.972843197	0.827995208	0.453652833	0.506476385	0.316682014
0.243101256	0.282626597	0.223466818	0.305570442	0.665822794	0.105810297
0.432086984	0.325429437	0.23184637	0.15349374	0.754019714	0.523988664
0.815647341	1.273398706	0.960021237	0.789871701	0.637641174	0.698617231
1.599548932	0.128615576	0.810489819	1.188898634	0.068144567	0.464006897
1.109707494	1.20952191	0.207216269	1.152943246	1.222569084	1.29664758
0.917086081	0.881247876	1.44459272	1.048073072	0.07933992	0.709968954
0.650913334	0.054487704	1.610107351	0.940207091	1.23816203	0.386818336
0.178883618	0.044527773	0.473700517	0.481546584	0.512488918	0.217434071
0.422616184	0.040308566	0.168195667	0.244033523	0.607691347	0.160276031
0.004133157	0.45983308	0.12721829	0.086626365	0.620268431	0.143721693
1.120509843	0.995771225	0.992455449	0.790627292	0.800246197	0.301150345
0.001071925	0.932772967	1.061620517	0.589306185	0.723931645	0.904147893
0.418505148	0.625935188	0.849303572	0.189782959	0.021170053	0.817174972
1.498620381	1.292779633	0.929178908	0.398214189	1.760872347	0.877376458
1.119840969	0.659758816	0.619702461	1.219819547	1.174107014	0.647709639
0.204554095	0.06617539	0.343215736	0.636544223	0.287751272	0.535076188
0.486342086	0.384998442	0.092807642	0.175342438	0.043665534	0.411437996
0.297691525	0.347907931	0.144028366	0.063746385	0.607249368	0.959425709
0.659366454	0.38664187	0.063165835	0.36689723	0.706807715	0.828123421
0.467925835	0.77360566	1.032775537	0.13473951	0.953360038	0.262891567
1.207199541	0.260492465	0.118939661	0.805133962	0.506027471	0.739350891
1.433576702	0.877201009	1.654438622	1.200580434	1.719662516	2.136303372
0.769061221	1.561473173	0.838947754	0.875126417	0.111730901	0.357303796
0.971156618	1.129519592	0.194541036	0.425536057	0.027371557	0.332749676
0.467874584	0.375461169	0.443370216	0.225050751	0.144574657	0.217116057
0.180907509	0.407405941	0.352207959	0.061039153	0.700627715	0.517113311
0.044767124	0.070403702	0.278164754	1.52724819	0.917168648	1.379959239
0.063318336	0.912595388	0.607747388	0.609990977	0.411528581	0.343521236

0.90964658	0.159292111	0.622985831	0.030654136	0.021741886	1.372946278
0.510525462	0.926965694	1.789890804	0.879377141	0.834962925	0.977015142
0.191400918	0.576630803	1.563159177	0.294295708	0.971983626	1.067353573
0.231961609	0.665875731	0.164092651	0.232326688	0.292239984	0.054534114
0.364382619	0.38359417	0.4402877	0.459131285	0.054089144	0.37321818
0.051743952	0.516560105	0.314559485	0.204782217	0.302444866	0.04405966
0.971544595	1.230085429	0.925240009	0.325563214	1.017214872	1.298550763
0.028602246	0.435021004	0.888941035	1.163914361	0.630331005	0.133357638
0.079164421	0.498994153	0.443339299	1.150166059	1.251352616	1.302165376
0.023551229	0.310301256	1.045143814	1.821608631	0.327825031	0.388182762
0.893186249	0.397345005	0.179667852	0.548531913	0.485937558	0.890572386
0.816217192	0.591718346	0.13365297	0.429612424	0.442779167	0.061670621
0.526505277	0.115934549	0.140896971	0.04427945	0.562910846	0.105445169
0.247050823	0.338878907	0.170897024	0.742363276	0.081254976	0.160476652
1.11198561	0.118634167	0.332979967	0.689260897	1.01792137	1.499176623
1.029157713	0.79147254	0.218442482	0.95128974	1.014910657	0.169015189
0.063697463	1.878020534	0.703632855	1.165446926	0.497291294	0.86345073
0.399858573	1.221013526	0.771701146	0.51186362	1.185483976	0.323806589
1.357256484	0.894757599	1.633566284	0.192244861	1.097903743	0.25014348
0.664339439	0.193676687	0.260749753	0.12399471	0.087239495	0.362075599
0.142828654	0.035937819	0.264534321	0.059822112	0.236355363	0.303801547
0.420634042	0.575661004	0.00205455	0.387068892	0.379335789	0.971702157
0.166580113	0.428280101	0.986320158	0.388562057	0.733401186	0.643642772
0.951937674	1.102100725	0.176369986	0.301966281	0.93678786	0.610911679
0.869869282	0.277978845	0.441310423	0.137731354	0.562870612	0.547074321
1.441365176	0.479389976	0.681310863	1.102102851	1.094593313	0.932745467
0.903649642	0.658537975	0.945437904	0.683659772	1.270694283	0.887542376
0.042256455	0.417472605	0.723695034	0.221657833	0.334307028	0.405569156
0.17817746	0.325279666	0.380628828	0.228408322	0.302761005	0.324580704
0.087096741	0.197430842	0.175850638	0.872209249	0.229282895	0.482902551
0.212925251	0.71589316	0.435785347	0.251516116	0.300241431	0.755074816
0.735870606	1.074480094	0.945575268	0.432339555	0.110995914	0.776095307
1.167475296	0.568161016	0.366653562	1.176639063	0.152896976	0.17904657
1.396839788	1.379125625	0.301401322	0.140557361	1.308900595	0.395594038
0.973578498	0.397618148	0.681845827	1.053347207	0.646038034	0.315457038
0.679034122	0.567155287	0.518690856	0.663352904	0.427010154	0.360821281
0.26772242	0.152810032	0.221498158	0.068216401	0.491387127	0.002719648
0.458380048	0.184826651	0.136882802	0.496898106	0.646434808	0.473431575
0.479938265	1.450859518	0.056747037	0.09221854	0.809879625	0.486941389
1.136601607	1.393985495	1.076703243	0.542201698	0.449564385	0.865226765
1.09488373	1.260015487	0.567954689	0.718821404	1.219153251	1.319403338
0.705798902	0.635006782	1.740925379	1.968756047	0.461289659	0.869341051
1.131331283	0.650315425	1.372112637	0.971185877	0.404135005	0.698330453
0.506091512	1.068470238	0.541124036	0.332019533	0.110198546	0.43290712
0.145777685	0.056618701	0.081967845	0.042354558	0.444286082	0.221162847
0.224503579	0.567266692	0.318949529	0.014355889	0.319133272	0.61182391
0.340202759	0.796335827	0.518488625	0.246176338	0.770594564	0.896741694
1.483411283	1.138976811	0.940550406	0.770156371	0.748349679	0.749988359
0.697787695	0.869151354	0.60109427	0.393153525	0.899621787	1.224059939
0.057364898	0.617675704	1.61041374	1.845821578	1.197428614	1.622021351
0.143520373	1.262478785	0.501439233	1.204320317	0.806292595	1.068098458
0.937533582	0.06304438	0.488348689	0.345383913	0.233970945	0.527578848
0.022172007	0.410989312	0.419715556	0.456430145	0.079103761	0.160175205
0.403259049	0.498750066	0.121436123	0.855182356	0.757491412	1.028967209
0.504342926	1.414563127	1.056899981	0.922781319	0.008095585	0.940026655
0.411543147	0.900411404	0.173923693	0.280462643	1.062400576	1.019952697

```

0.657709152 1.433867238 0.581959468 0.061909429 0.714890981 0.057150338
0.04151385 0.752727888 1.215693827 0.20384172 1.380978307 0.226897079
1.39964476 0.567422943 0.662729885 0.52239692 1.227265348 0.156750826
0.510167347 0.266817275 0.390577611 0.561631291 0.140192759 0.246349208
0.249598236 0.450715438 0.252037058 0.133792665 0.240753355 0.339307668
0.264161156 0.078746731 0.232393687 0.292421776 0.196115944 0.529684812
0.932681492 0.872669743 0.762793839 1.342314435 0.321924336 0.652145742
0.413302205 0.480015477 0.722996171 0.28783725 0.940775487 0.165166001
0.927929503 0.954766784 0.546499283 1.043239601 0.053266708 0.402701791
1.622685289 0.352901337 1.325120627 0.232993379 1.428928863 0.291183455
0.394297289 0.559654137 0.20559339 1.214861973 0.981237161 0.419665882
0.621260641 0.280927294 0.35052139 0.534874456 0.058837467 0.324695427
0.15022302 0.366000376 0.462958981 0.122645055 0.12796839 0.376569414
0.422824114 0.164557181 0.396759773 0.936335081 0.758703322 0.523949289
0.67231759 0.327119326 0.353436361 0.07500089 0.816548384 1.029274047
0.891043542 0.122180029 0.731405146 0.065428204 0.378775876 0.554116487
1.043564623 1.969385562 1.159395074 0.944341323 0.784707643 0.80172668
0.46017901 1.316950545 1.277445704 0.714556433 0.365017253 0.472641986
0.12389669 1.922317989 0.102182179 0.31661629 0.265423687 0.447222723
0.149923151 0.339683067 0.688711533 0.390389731 0.413324083 0.080907568
0.216260541 0.099093693 0.099872535 0.33599854 0.036442933 0.245318832
0.04826229 0.018642231 0.306379519 0.21895639 0.667792168 0.020626847
0.201042263 1.146514024 1.125176192 1.539669977 0.634134165 0.495594655
1.117693972 0.738623265 1.133725579 0.253976141 0.984704425 0.825505786
0.211320257 1.124156689 0.732929052 0.823945745 0.833132869 0.78111638
0.309693562 0.044863339 1.523921436 0.388099371 1.014662199 1.496646029
1.213276716 0.158196532 0.57973932 0.754851536 0.29789246 1.102333492
0.188277427 0.649053088 0.775244809 0.653070547 0.437353757 0.017839278
0.150763246 0.149742752 0.420893724 0.142367724 0.264778612 0.386958635
0.267359663 0.263510626 0.123455617 0.136587427 0.788179611 1.006796473
1.262958276 0.62982247 0.188319995 1.45397352 0.477914578 0.279560256
1.52448005 0.026561207 0.247526764 1.174919796 0.026827196 0.91551498
];
% A_tilde matrix for the system in the first case
A_tilde_1 = ...
[-40 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0
20 -50 10 0 0 0 0 0 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 10 -36.6667 6.6667 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 0
0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 6.6667 -33.3334 6.6667 0 0 0 0 0 20 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 6.6667 -16.6667 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 10 0 0 0 0 0
0 0 10 0 0 -30 20 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 20 -30 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 10 -20 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 10 0 0 0
0 20 0 0 0 0 0 0 -30 10 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 10 -20 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 10 0
0 0 0 20 0 0 0 0 0 0 -40 20 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0

```



```

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 20 -40 20 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 20 -30 10 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 -10 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -30 20 0 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 20 -30 10 0 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 -20 10 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 -10 0
0 0 0 0 0
0 0 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 -
20 10 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
10 -10 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 -20 10 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 10 -10 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 -20 10
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 10 -10

```

```

];
% A_tilde matrix for the system in the second case
% A_tilde_2 = ...
% [-40 20 0 0 0 0 0 0;
% 20 -26.666666666666668 6.666666666666667 0 0 0 0 0;
% 0 6.666666666666667 -20.666666666666668 4 0 10 0 0;
% 0 0 4 -10.666666666666668 6.666666666666667 0 0 0;
% 0 0 0 6.666666666666667 -6.666666666666667 0 0 0;
% 0 0 10 0 0 -30 20 0;
% 0 0 0 0 0 20 -30 10;
% 0 0 0 0 0 0 10 -10];
% input voltage and resistance for the transformer
v_0 = 230;
R_0 = 0.05;
% voltage constraints for each node of the grid
v_max = zeros(size(load_nodes))+v_0*1.1;
v_min = zeros(size(load_nodes))+v_0*0.9;
% fictive tariff for 06h-23h (day tariff)
tariffs = ones(1,length(load_nodes))*1.5;
% fictive tariff for 23h01-05h59 (night tariff)
tariffs(16:32) = 1;
% System matrix A and transformer voltage vector v_k_0 from modeling
v_k_0 = [-v_0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0; 0;
0; 0; 0; 0];
A = A_tilde_1\eye(length(A_tilde_1));
% A = A_tilde_2\eye(length(A_tilde_2)); % uncomment to check Case 2
% voltage imposed on each node by the transformer and the system topology
v_k_base = repmat((1/R_0)*A*v_k_0,1,length(load_nodes))...
+(1/v_0)*A*(load_nodes*1000);
% Parameters for each of the 6 PEVs
soc_cap = [16 16 16 16 16 16]'; % storage capacities [kWh]

```

```

soc_d = [16 16 16 16 16 16]'; % desired final states of charge [kWh]
soc_0 = [6.4 3.2 8 4.5 1.2 2.8]'; % initial states of charge [kWh]
p_max_c = [4 4 3 3 4 4]'; % max charging rates [kW]

p_max_i = [3 3 3 3 3 3]'; % max discharging rates [kW]
Ki = [24 21 22 24 24 24]'; % final time step of connection periods
dt = 0.5; % time step [h]
t_0 = 8; % t_0+dt is the time step under evaluation
% t_0 is the time step corresponding to soc_0
% (vehicles can be connected from before but in
% this case this is the initial time step for
% the six EVs)
nodes = [3 4 10 12 15 19]'; % Nodes where EVs are connected
Lhat_ = sum(load_nodes); % Total load profile (neglecting losses)
watch_evolution = 1; % Set to 1 in order to watch the routines' evolution
[pow_traj_ast,s] =
Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseI(soc_cap,soc_d,...
    soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,v_max,v_min,Lhat_',...
    nodes,watch_evolution);
if s > 0 % if the maximum infeasibility goes below zero (all the voltage
% constraints are feasible and the Phase II problem can find the
% optimal schedules)
else
[pow_traj_ast,soc_traj_ast] = Book_EV_Centralized_Scheduling_PhaseII...
(soc_cap,soc_d,soc_0,p_max_c,p_max_i,t_0,Ki,dt,A,v_0,v_k_base,...
v_max,v_min,Lhat_,nodes,tariffs,pow_traj_ast,watch_evolution);

end

```

Código utilizado de [1]

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado.

Un esfuerzo total, es una victoria completa”

Mahadma Ghandi