

---

# Vehículos eléctricos como controladores de frecuencia en una microred

## Electric vehicles as frequency controllers on a microgrid

Santiago Tirado <sup>a</sup>, Sergio Rivera <sup>b</sup> \*

<sup>a</sup>Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

<sup>b</sup>Jefe Técnico Laboratorio de Metrología (LBE), Investigador en EMC-UN

Grupo de Investigación de Compatibilidad Electromagnética, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Recibido: 13/02/2017; revisado: 3/07/2017; aceptado: 25/10/2017

---

**S. Tirado, S. Rivera:** Vehículos eléctricos como controladores de frecuencia en una microred. *Jou.Cie.Ing.* **10** (1): 6-17, 2018. ISSN 2145-2628, e-ISSN 2539-066X.

### Resumen

El vehículo eléctrico hoy en día juega un papel muy importante en el progreso de la humanidad en muchos aspectos, ya que ofrece mejoras en movilidad, medio ambiente, tecnologías, entre otros. Por lo tanto es un buen atributo buscar ventajas en la parte tecnológica de ingeniería a partir del uso de los vehículos eléctricos. Por eso la implementación de sistemas como **Vehicle To Grid (V2G)** ayudan a aprovechar las características eléctricas de los vehículos para la ayuda en fallas y mejor servicio de la red eléctrica. Es por eso que este estudio esta direccionado al fin de analizar el sistema V2G como un control de frecuencia en la red, teniendo en cuenta perturbaciones en energías renovables. Todo esto mediante simulaciones de un sistema ya establecido en el software **Matlab**, que permite observar como las perturbaciones de las energías renovables afectan la frecuencia de toda la red y como la implementación de una flota de vehículos eléctricos, ayuda a controlar estas fluctuaciones en frecuencia.

**Palabras Clave:** Vehículos eléctricos, potencia, frecuencia, control, fuentes renovables, perturbaciones.

### Abstract

Nowdays the Electric Vehicles have an important development in the humanity progress in so many aspects, for the reason that it offers improvements in mobility, enviroment, technology, etc. In this way, it is a good thing to look for advantages in the technologic part of engineering based on the electric vehicles. Thus, the implementation of systems like **Vehicle To Grid (V2G)** help to take advantage of the electrical characteristics of the vehicles for the help in fails and for a better service in the grid, taking to account disturbance of renewable energies. All of these are done by simulations of a system which is already done in the software **Matlab**, which allow to take a look how the disturbance of the renewable energies affect the frequency of all the grid and how the implentation of a electric vehicles float helps to control these frequency fluctuations.

**Keywords:** Electric vehicles, power, frequency, control, renewable sources, disturbances.

---

\* srriverar@unal.edu.co

## 1. Introducción

Cuando se habla del uso del vehículo eléctrico dentro de la cotidianidad de una persona, todo mundo referencia el mismo procedimiento: cargo mi vehículo en mi casa, gasto la energía cargada durante el día, busco regenerar algún porcentaje de la energía mediante algún sistema de frenado y eso es todo. Es decir, solo se ve el vehículo eléctrico como una carga mas, como algún elemento pasivo dentro de la red eléctrica que consume energía por que necesita hacer una función específica, en este caso movimiento.

Pero en el común no se han imaginado la bi-direccionalidad del vehículo eléctrico [1–5], o sea no solo que consuma energía dada por la red, sino que ayude a la red eléctrica entregándole energía para suplir fluctuaciones del sistema en voltaje y frecuencia debido a fallas del sistema, cambio de carga, perturbaciones, entre otros. Esta es la idea principal del sistema Vehicle To Grid (V2G), planteado por el Doctor Willet Kempton de la universidad de Delaware, el cual planteaba que los vehículos eléctricos trabajaran como una esponja, apto para absorber el exceso de electricidad cuando la demanda fuese baja y devolver algo de esta electricidad absorbida cuando la demanda eléctrica de la red fuese alta [3–5].

Partiendo de esto, se puede plantear la posibilidad de tener un control a partir de los vehículos eléctricos, esto por que la electricidad devuelta por parte de los vehículos eléctricos puede ayudar a las posibles fallas que existen en frecuencia, gracias a la relación directa que existe entre la potencia activa y la frecuencia del sistema [6]. Conociendo esta relación, existe la motivación de conocer como la implementación de vehículos eléctricos puede ayudar al control de frecuencia [1–3, 7]. Además de entender como son las perturbaciones en un sistema donde hay generación por medio de energías renovables tales como eólica y solar. De esta manera, en el estudio presentado en este artículo se usó un sistema V2G ya establecido en el software Matlab, que tiene características de una flota de vehículos eléctricos, generación convencional, eólica y solar, y una carga residencial típica convencional. Entonces se dispuso que en este sistema se pudiera ver como en 3 clases de perturbaciones la respuesta en frecuencia mejora con la tecnología V2G. De esta manera, se realizó una comparación de resultados entre la frecuencia del sistema con la aparición de vehículos eléctricos entregando electricidad a la red y la frecuencia cuando no existen vehículos eléctricos. Además se puede entender y observar como la potencia activa tanto

de las fuentes de generación como la de los vehículos eléctricos, cambian dependiendo de las perturbaciones a diferentes horas que afectan el sistema.

Dentro de las limitantes que se encontraron para lograr un estudio más apto y más exhaustivo, fue el hecho de que el simulador creado en matlab ya estaba predeterminado y no permitía modificaciones relevantes en el sistema, como por ejemplo el cambio de carga, o el cambio de factor de potencia. No obstante, si era posible hacer un estudio claro y conciso en cuanto a la frecuencia del sistema a partir de un rotor en un generador diésel, o las potencias entregadas a cada instante de tiempo de cada uno de los generadores y lo que consumía o entregaba dependiendo el caso. Todas estas posibilidades que brinda el simulador fueron la base para encontrar los resultados y el futuro análisis del proyecto, con el fin de tener un fundamento tanto teórico como práctico a la hora de argumentar el por qué si es una buena idea el sistema V2G [1, 8].

En cuanto al procedimiento utilizado, se realizó una comparación de señales de frecuencia de la red estudiada, teniendo en cuenta cuando existe y no existe la implementación del sistema V2G y el comportamiento de los generadores, la carga y la flota de vehículos eléctricos. Al final de todo este procedimiento, se llegó a la conclusión que el sistema V2G, tiene una gran ayuda en el sistema para el control de frecuencia [8] y estabilidad del sistema (habilidad del sistema para mantener la frecuencia en estado estable dentro de un rango nominal, después que ocurrido un desbalance entre la potencia generada y demandada [9, 10]). En primera instancia aporta un beneficio en mantener la frecuencia dentro de un pequeño rango a pesar de que exista la falla y asiste a la segunda etapa de este control reduciendo los tiempos de estabilización notablemente. También para hablar de las conclusiones encontradas con todo el conocimiento abordado por V2G, es un sistema que tiene la posibilidad de ser una herramienta ante contingencia en los sistemas de potencia, con el fin de tener una reserva de generación en un tiempo o lugar en que la generación a partir de los generadores convencionales se vea comprometida [3, 7].

El desarrollo de este estudio se explicara de la siguiente forma en este artículo: la segunda sección introduce al lector hacia el concepto de Vehicle To Grid (V2G), luego daremos paso a un breve recuento histórico de como se ha dado a conocer este sistema en la sección 3. Seguido de esto se hablara del simulador usado en la sección 4. Las secciones 5 y 6 presentan los resultados en frecuencia con el sistema V2G sin implementar e implementado, respectivamente. Por último se analizan los resultados y se presentan las

conclusiones encontradas con este estudio.

## 2. Concepto del Sistema Vehicle To Grid (V2G).

Los sistemas de potencia cada día están en constante cambio y crecimiento, ya que con las energías renovables (Solar, Eólica, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, etc.) y las energías convencionales se pueden tener diferentes formas de generación, pero esto implica tener en cuenta nuevas variables que afectan al sistema como lo es la radiación solar, velocidad del viento, etc. La variabilidad e incertidumbre de estas variables puede causar fallas en la red en cuanto a la regulación de voltaje y variaciones de la frecuencia, por tanto se debe tener un control de estas fallas de tal forma que el sistema no sienta las consecuencias de estas nuevas variables. Entonces, ¿Por que no pensar en nuevas alternativas de control, para seguir con el lineamiento de las nuevas alternativas de generación de energía?.

En esta búsqueda de métodos de control alternativos, podemos mencionar lo que se conoce como vehicle to grid, el cual puede ayudar en momentos críticos a suplir la demanda y ayudar con la regulación de voltaje y frecuencia. Cuando se habla de momentos críticos, pueden ser las perturbaciones grandes y pequeñas de los sistemas de potencia, pero también se quiere mirar perturbaciones en las energías renovables como por ejemplo, poca radiación en un día el cual pueda disminuir la generación por paneles solares. Otro ejemplo de perturbación en las energías renovables es la poca velocidad del viento en la generación eólica, lo cual daría paso a que se tuviera pico bajo de generación y se tenga problemas en la red eléctrica.

Como se sabe la potencia generada en una red eléctrica es suministrada por diferentes fuentes de generación como plantas hídricas, térmicas o con fuentes de energías renovables como eólicas, solar. Estas plantas hacen que el flujo de potencia vaya en una dirección dentro de la red y se distribuya por todo el sistema de energía. Hoy en día los vehículos eléctricos son una carga inductiva, que se pueden encontrar en electro-líneas, en el hogar o en el lugar de trabajo para lograr que su batería sean cargadas.

Una integración dentro de la red eléctrica entre las diferentes formas de generación (energías renovables y energías convencionales) y los vehículos eléctricos como un ente no solo que consume sino que aporta un flujo eléctrico bidireccional, es lo que se conoce como el sistema vehicle to grid [2, 11]. En donde el vehículo eléctrico puede ser un generador de energía

eléctrica para suplir la demanda en ciertos momentos, pero también puede ser un regulador de voltaje y de frecuencia para la red. Lo que implica que el vehículo eléctrico puede ser una ayuda para el sistema en momentos que este lo requiera. La figura 1 demuestra la interconexión que tiene un sistema vehicle to grid.

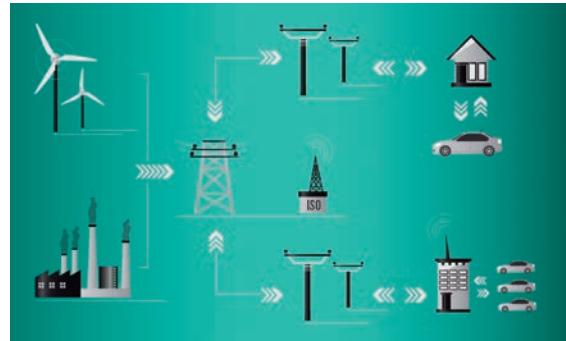


Figura 1. Sistema V2G con energías renovables.

## 3. Discusión sobre el estado del arte del sistema V2G para regulación de frecuencia

En la universidad de Delaware en 1997, el Doctor Willet Kempton planteo la idea de que el carro eléctrico no solo era capaz de consumir electricidad de la red, sino que podía devolver a la red la electricidad no utilizada y almacenada en la batería del carro, haciendo que los vehículos eléctricos una carga bidireccional. Es decir el Doctor Kempton buscaba en grandes rasgos que los vehículos eléctricos trabajaran como una esponja, apto para absorber el exceso de electricidad cuando la demanda fuese baja y devolver algo de esta electricidad absorbida cuando la demanda eléctrica de la red fuese alta [2,3]. Kempton planteo la situación de un ciudadano normal. El cual posee una casa con conexión trifásica a 220 V AC y con 40 A de corriente, en donde la casa tiene una carga promedio de 1 kW con sobre picos de 4 kW, pero las instalaciones de esta casa están dispuestas a soportar 8 kW de potencia ya que el ciudadano adquiere un carro eléctrico y necesita que la batería se carro se recargue satisfactoriamente. Dado de esto, la idea es que la potencia de salida del carro va a superar la potencia de la demanda de la casa la mayoría de las veces.

De esta manera, la propuesta de Kempton ([2, 3]) es que el dueño del vehículo debe tener una forma de guardar una reserva límite de descarga del vehículo. En pocas palabras una forma de controlar la carga o descarga del carro, lo cual según Kempton se reduciría a un control de carga y de descarga más inteligente. Lo cual da lugar al planteamiento de un panel de control con

lo cual el conductor pudiera cargar su vehículo según las necesidades requeridas. Por ejemplo que nunca se descargara menos de una autonomía de 2 millas, o que su siguiente viaje será de 10 millas y que empezara a las 6:45 am del día siguiente. Todo esto con el fin de conseguir una eficiente carga de la batería dependiendo de la necesidad del conductor y no solo teniendo un tiempo.

Dentro de los planteamientos hechos por Kempton, no existía la limitación de la casa como punto único de carga de los vehículos eléctricos, también con el fin de tener la posibilidad de más energía para la red y en cualquier instante; se planteó la idea de que los parqueaderos de los vehículos y las oficinas o construcciones comerciales sean un punto de carga y descarga de los vehículos eléctricos, en donde cada uno de los espacios de parqueo tenga una conexión de 220 V AC. La acción de descarga y carga debe depender del propietario del vehículo, ya que si se quiere que solo se cargue el carro o pueda existir la posibilidad de entregar energía en el panel del carro se debe indicar esta instrucción. En sí, la idea inicial de Vehicle to Grid (V2G) era la integración de los vehículos eléctricos a la red eléctrica. No solo como carga inductiva para la red sino también como una ayuda de entrega de energía cuando la red lo necesite. Dando paso a reducir así tanto los costos de consumo de la energía eléctrica como los costos de maniobra ingenieril cuando ocurre una falla o manejar los recursos en las horas picos en ciertas áreas que lo requirieren.

Ya con la idea de Vehicle to Grid, Willet Kempton y Toru Kubo, calcularon el costo de dar energía desde los vehículos eléctricos y compararlos con los costos normales sin la inclusión de los vehículos en Japón [12], más específicamente en la región de Kanto, una de las islas más representativas de este país. Para lograr esta comparación se realizó un análisis de cuanta energía eléctrica se puede obtener de los vehículos eléctricos teniendo en cuenta dos cosas: la primera es la proyección de Natural Resources and Energy Agency (NREA) para la flota de los vehículos eléctricos de aproximadamente de 518.000 vehículos y la segunda es la potencia de las baterías de los vehículos eléctricos que usando el máximo es de 30 kW [12]. Según lo anterior se obtuvo una potencia a partir de toda la flota de vehículos eléctricos aproximadamente de 15,5 GW. Lo cual es aproximadamente el 25 % del pico de la demanda, según la empresa prestadora del servicio eléctrico de la isla llamada Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Pero toda esta energía obviamente no es para la red, ya que obviamente el consumo de las casas de los dueños de los vehículos según datos estadísticos tiene una demanda

de 5 kW, por lo cual la red tendría una fuente de 10 kW por vehículo, obteniendo un total por toda la flota de 5,2 GW. Este planteamiento anterior daría una gran ayuda a la red en cuanto a que se podría suplir las generadoras nucleares que regularmente producen 1GW.

Para poder mirar las consecuencias en frecuencia, Wenqui Tian realizó un trabajo llamado Simulation of Vehicle-to-Grid (V2G) on Power System Frequency Control en donde realiza una simulación de un sistema de potencia, introduciendo el sistema V2G, entonces, realizó una comparación entre el comportamiento del sistema con el sistema implementado y sin el sistema implementado. Uno de los resultados incluidos por Tian se encuentra que el sistema al tener una fluctuación en frecuencia y con el sistema V2G activo presenta menos sobrepicos y el tiempo de estabilización se reduce de una forma significativa [13]. Dentro de las conclusiones de este trabajo, Tian establece que el sistema V2G, puede ayudar a mejorar de una manera reveladora las desviaciones en frecuencia del sistema causadas por una perturbación en carga, ya que con la carga almacenada por los vehículos eléctricos, se puede tener una respuesta rápida y estable para estos cambios.

Uno de los experimentos más relevantes que apoyan la idea del sistema V2G como un método de control de Frecuencia, fue realizado por Alec N. Brooks para la California Air Resources Board y para The California Environmental Protection Agency. El procedimiento del experimento consistía en adaptar un carro con una interfaz red de potencia bidireccional y con una conectividad de internet para que el flujo desde el carro o hacia el carro pueda ser despachado inalámbricamente. El despacho de energía fue enviado al vehículo cada 4 segundos de intervalos y el comportamiento del vehículo fue monitorizado y reportado cada vez que se observaba un cambio. El escenario del estado se asumió que habían 2 periodos donde el carro estaba conectado. El primer periodo cuando se encuentra conectado en una casa por la noche hasta el siguiente día, lo que equivale a tiempo cercano de 14 horas y el segundo periodo en el lugar de trabajo durante un día normal laboral, es decir un tiempo de 9 horas; además se mantuvieron condiciones de diferentes condiciones iniciales y niveles en la red de servicio [14].

La perspectiva económica de la regulación de frecuencia a partir del sistema V2G, se puede observar en A public Policy Strategies for Electric Vehicles and for Vehicle to Grid Power [15]. Basándose en el sistema de energía de Francia, se explica como el sistema del vehículo eléctrico tiene la capacidad de responder de una manera rápida a un requerimiento de regulación de frecuencia (alrededor de 15 segundos), más rápido

que una planta convencional de regulación, ya que no existe una rampa transitoria entre una falla y volver a la recuperación del sistema. Por todo lo anterior y conociendola bi-direccionalidad, el costo de la potencia de reserva para la regulación se verá reducido desde un valor de 8.04 /MW para el control primario y de 9.30 /MW hasta casi cero, ya que por la ayuda de las baterías de los vehículos eléctricos, esta reserva en los generadores no es necesaria.

En el año 2005 la universidad de Delaware realizo un estudio acerca de la idea de incluir V2G para poder estabilizar la red incluyendo las energías renovables a gran escala. Dentro de este estudio se tuvieron en cuenta factores como el hecho de que la potencia pico generada en Estados Unidos se obtenga a partir de celdas fotovoltaicas y que la energía eólica sea la encargada de generar la mitad de la energía total del país. A partir de lo anterior, se predijo que las celdas fotovoltaicas tienen un cierto periodo de generación, en donde su punto máximo es al medio día debido al posicionamiento del sol, lo cual si se pretende que estas celdas entreguen la potencia pico de Estados Unidos, se debe buscar la forma de almacenar esta energía, ya que como bien se sabe normalmente en una zona rural donde estén ubicadas casas familiares, centro comerciales, colegios, etc. La hora de pico de energía es alrededor de las 7 pm de la noche, hora a la cual ya las celdas fotovoltaicas no estarán en funcionamiento [7]. Entre otros de los limitantes que presenta las celdas fotovoltaicas, es que se debe cumplir con un requerimiento mínimo de almacenamiento dado por el sistema eléctrico de cada país o región según el caso [7]. El estudio, toma como ejemplo el caso del estado de California en donde este mínimo de almacenamiento debe ser de 750 kW [16] durante una hora; es ahí donde entra la importancia de V2G, ya que brinda la posibilidad al sistema el almacenar la energía necesaria, ya que tomando como un ejemplo la camioneta RAV4, la cual puede almacenar 7kW durante una hora el requerimiento mínimo puede estar dado por 143 camioneta. Ahora bien a nivel de Estados Unidos en general se planteó que las celdas fotovoltaicas generen 162 GW de la capacidad instalada nacional, se necesitarían que 23 millones de RAV4, lo cual según el estudio hecho es cercano al 13 % de la flota total de vehículo de todo el país.

Hal Turton como líder del grupo de energía y economía en la división de energía (THE Energy Divison) en el instituto Paul Scherrer, hizo un estudio acerca del posible impacto que podría tener en el futuro el sistema V2G en el mercado energético global. Para ello, Turton uso un modelo de optimización que

incluye el comportamiento detallado de las tecnologías y sus dinámicas. Este modelo se conoce como ERIS (Energy Research and Investment Strategies), el cual es un modelo de curvas de demanda de energía y sus tecnologías en el sector eléctrico y no eléctrico (transporte, térmico, combustible) [17]. En este estudio realizado también se utilizaron diferentes escenarios, en los que el sistema V2G está incluido o excluido, o donde se tienen en cuenta políticas ambientales y como el sistema V2G puede ayudar a este sistema, entre otros escenarios. Dentro de los resultados arrojados por este estudio se encuentra una forma correcta de aprovechar todos los beneficios que puede tener el sistema V2G la cual sugiere que debe existir una combinación de infraestructura que incluya regulación, medición y conexión en edificios y en los vehículos eléctricos. Si se garantiza lo anterior y dentro de un marco en que no haya políticas de medio ambiente, el sistema en general de V2G estaría dispuesto a brindar los servicios ya expuestos por el Dr. Kempton como lo son regulación, apoyo de potencia en horas pico, mantener una reserva de energía, entre otros.

Peter Diamandis un pionero en el campo de la innovación, competencias incentivas y espacios comerciales, además de ser uno de los 50 líderes más grandes según la revista Fortune; escribió un artículo relacionado sobre la posibilidad que la energía solar con ayuda de baterías y junto a los vehículos eléctricos pueden dar un golpe de autoridad en la industria energética en las próximas dos décadas [1, 18]. Para el señor Diamandis es importante 3 hechos para que esto suceda, el primero es la generación de energía solar en abundancia, lo cual se puede lograr aprovechando un 1 % de los 7,2 Zetta-joules ( $7,2 \times 10^{21}$ ) es decir  $25,92 \times 10^{24}$  Wh que el sol es capaz en promedio en un día, dicho de otra manera si a partir de paneles solares se pudiera tener una energía de  $25,9 \times 10^{21}$  Wh, podríamos tener 6 veces la energía consumida hoy en día, y esto sería posible haciendo que entre el 50 % y el 100 % de la energía generada en el mundo sea solar, lo cual para una proyección de 20 años no es descabellado ya que se según el articulo en el año 2035 el costo de generación por gas va a ser mucho más costoso por kWh a comparación con la energía solar, debido al crecimiento tecnológico que se ha logrado en estos últimos en las celdas fotovoltaicas.

Finalmente, otra posibilidad que podría brindar apoyo a las energías renovables sería un almacenaje, el cual tendría la función de absorber el exceso de potencia generada por las energías renovables y convencionales y devolverlo cuando las energías renovables no sean capaces de entregar la potencia necesaria. Es ahí donde

es importante V2G ya que los vehículos con energía almacenada podrían ser el respaldo necesario y también el almacenamiento para la energía de exceso [19, 20]. Dentro de la idea del sistema V2G se encuentra la ayuda a la inclusión de energías renovables tales como energía solar, eólica. Ya que el gran inconveniente es que estas dos fuentes son bastante intermitentes debido a que tanto como el sol y el viento son las fuentes de la generación de la energía eléctrica, pero estos a lo largo del día no son constantes, por lo cual se necesitaría un respaldo, el cual actuaría cuando las energías renovables no sean suficientes para suplir la demanda [19, 20].

#### 4. Simulador de V2G

El simulador con que se realizó el estudio se puede encontrar en el software **MATLAB 2015**, es llamado desde la ventana de comandos a partir del comando *power\_V2G*. Este comando hace que se abra un modelo de red eléctrica en simulink, el cual cuenta con características típicas de un sistema de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. Además el tiempo de simulación de este sistema es de un día, que por cuestiones de configuración del modelo planteado, y para observar mejor los resultados por el software se dará en segundos, es decir: 86.400 *seg*. En esta simulación se tienen en cuenta situaciones de la vida cotidiana tanto en carga, en generadores y en la flota de vehículos eléctricos [21].

Dentro de las características del simulador, se encuentran 3 tipos de generadores. El primer generador es síncrono a partir de diésel, otro a partir del movimiento de turbinas eólicas y otro a partir de radiación solar, lo cual ayuda a los objetivos de este proyecto, ya que se busca la implementación de energías renovables. Cada uno de los generadores mencionados sufre una perturbación a momentos diferentes del día, haciendo que el correcto funcionamiento de los mismos se vea comprometido y cause efectos a estudiar en la red. Por parte de la carga se compone por una carga totalmente activa residencial, en donde también se tiene una pequeña máquina asíncrona que funciona también como generador. También se encuentra en la carga las baterías para el funcionamiento de la flota de vehículos eléctricos, la cual cuenta con una característica en la simulación de poder activar o desactivar el sistema V2G.

En el simulador se pueden ver varias características eléctricas del sistema y de los diferentes componentes importantes que componen la red; es decir por ejemplo la potencia activa, reactiva y aparente de generadores, carga y vehículos eléctricos, lo cual permite un estudio

más profundo del sistema y de lo que pasa internamente. Todo el simulador ya está establecido previamente, sus ajustes y cambios son difíciles de predecir ya que no hay forma cercana de encontrar como fue realizado o el código pertinente para realizar los cambios requeridos, a pesar de ello es muy fácil de manejar y de fácil acceso. A continuación se mostraran algunos de los componentes del sistema para poder entender mejor el funcionamiento del simulador.

##### 4.1. Generadores

Para la simulación del sistema V2G, se proponen 3 generadores diferentes, los cuales tienen su característica de potencia instalada, eficiencia, materia prima usada para la generación, entre otros. Cada uno de estos generadores tiene una característica especial de carga y aporta un porcentaje de la potencia total generada del sistema, que es de 27,66 MW. En los siguientes ítems se explicará mejor cada uno de los generadores planteados.

- **Generador Diesel:** En este generador se encuentra instalado una máquina síncrona de polos salientes, con una potencia aparente nominal de 15 MVA, con un voltaje de 25 kV y con una frecuencia nominal de 60Hz.
- **Generador Eólico :** La característica principal de este generador, es una potencia nominal de 4,5 MW con una velocidad nominal de 13,5 m/s, ahora bien tiene una velocidad de parada de 15 m/s. Durante toda la simulación, se tienen variaciones de velocidad del viento.
- **Generador Panel Fotovoltaico:** Como es bien sabido, estos paneles fotovoltaicos tienen una eficiencia demasiado baja en la vida real, es por eso que para no separarse mucho de la realidad y hacer el simulador lo más verídico y certero, se planteó que este panel tuviera una eficiencia del 10 %, donde solamente entregase 8 MW de lo que realmente pudiese encontrar, se supone que es un parque que necesita una dimensión de 1  $m^2$  por MW.

##### 4.2. Carga

- **Carga residencial** La carga es netamente consumidora de potencia activa, trata de simular que es una zona residencial donde existe un factor de potencia de 0,95 y con una potencia nominal de consumo de 10 MW, esta potencia puede ser cambiada de valor, función que servirá para poder lograr resultados y análisis de este estudio.

- **Carga Industrial.** La carga industrial se simula a partir de una maquina asincronica que consume mas reactivos que activos. Esta maquina tiene una potencia nominal de 0,15 MW con un voltaje de 600 V a 60 Hz, su control se hace por medio de la relación entre la velocidad del rotor y el torque mecánico.

#### 4.3. Flota de Vehiculos Eléctricos

El número de vehículos en este sistema es de 100, los cuales se reparten no equitativamente en 5 perfiles de uso diferentes, que tienen como garantía de que siempre habrá al menos una cantidad de vehículos conectados a la red para entregar energía devuelta. Se idealiza que cada carro tenga una batería con capacidad de 40 kW, lo que quiere decir que se tiene una flota total de 4 MW, además de una energía de las baterías de 85 kWh con una eficiencia del 90%. La idea dentro de este estudio, es que se pueda controlar 2 estados típicos. Un estado en donde los vehículos no estén conectados a la red; o la otra opción de estado es que funcionen de forma bidireccional activando el sistema de V2G. Para poder llegar al objetivo que sean capaces de entregar energía a la red para la regulación de frecuencia necesaria, este control se alcanza con el uso de un control *PI* con constantes  $k_p$  igual a 2 y  $k_i$  de 4. Esta es la parte esencial para el análisis esperado hacer durante todo este estudio.

#### 4.4. Perturbaciones

En el tiempo de simulación de 24 horas o en segundos 86.400, se presentan 3 clases de perturbaciones, que afectan directamente a cada uno de los 3 generadores implícitos en la red eléctrica respectivamente a diferentes momentos del día. Cada una de las perturbaciones se expondrá en los siguientes items.

- **Perturbación en carga asincronica:** A las 3 horas o 10.800 segundos de simulación se presenta una de las primeras perturbaciones de la red, y es la entrada al sistema de la maquina asincrónica que simula la parte industrial de la carga, lo cual causa que el generador diésel presente una falla en la generación y por ende ese vea afectada la frecuencia del sistema, haciendo que tenga unas fluctuaciones.
- **Perturbación en Panel solar:** Alrededor del mediodía, es decir a los 43.200 segundos, se simula como si una gran sombra cubriese los paneles solares y se dejara de producir energía solar por un tiempo pequeño en el día, lo cual hace que exista una perturbación en la red del sistema, lo cual causa que la frecuencia del sistema sufra un cambio.
- **Perturbación en Generador Eólico:** La perturbación que sufre este generador, es debido a que la velocidad del viento a las 22 horas o 79.200 segundos sobrepasa la velocidad máxima a que produce los generadores eólicos, recordemos que las turbinas eólicas tienen una velocidad mínima del viento donde empiezan a generar, pero también tiene una velocidad máxima que se establece con el fin de preservar la parte mecánica de la turbina. Entonces siguiendo en nuestro caso, como ya se había dicho los aerogeneradores se detienen y dejan de entregar potencia a una velocidad mayor de 15 m/s, la cual se alcanza precisamente a las 22 horas y en ese momento empieza a decrecer la generación.

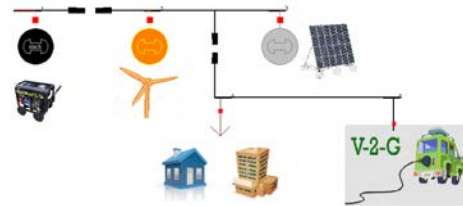


Figura 2. Simplificación del sistema V2G en Matlab.

En la figura 2 se muestra el sistema simplificado del simulador en Matlab y sus componentes importantes.

### 5. Resultados sin implementación de V2G

En esta sección del artículo, se quiere mostrar cuales fueron los resultados en frecuencia obtenidos a partir del sistema de Matlab. Para ello miraremos primero la señal de frecuencia del sistema en por unidad en general y su comportamiento específico en cada una de las perturbaciones que sufre la red a lo largo del día aclaradas en la sección 4.

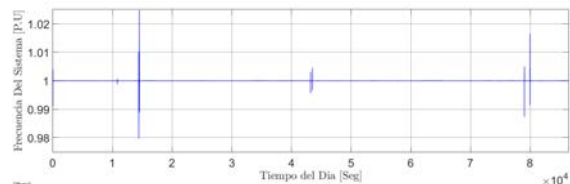


Figura 3. Frecuencia del sistema sin implementación de V2G.

La figura 3 muestra las características de la frecuencia del sistema a lo largo de la simulación, en donde se ve como sufre la frecuencia fluctuaciones a causa de las perturbaciones.

La primera perturbación que aparece en el sistema ocurre a las 3 horas o 10.800 segundos y es a



causa de la entrada de la maquina asincronica como carga industrial, en este caso la frecuencia sufre una desviación en por unidad de alrededor de 0,0008 por encima y de 0,002 por debajo, con un tiempo transitorio de estabilización cercano a los 25 segundos, se puede observar mejor en la figura 4.

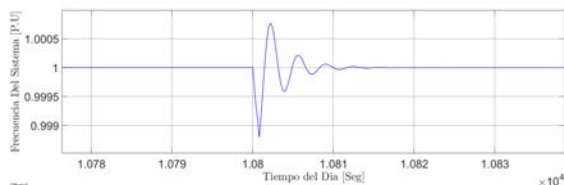


Figura 4. Perturbación de frecuencia a causa de la maquina asincronica.

La segunda perturbación del sistema sucede a los 14.400 seg o 4 horas, y es causada por una falla monofásica linea-tierra en la linea A en el bus de la carga. Se puede evidenciar mejor esta fluctuación de frecuencia en la figura 5.

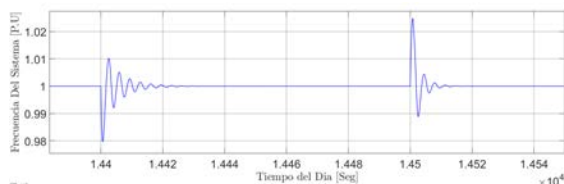


Figura 5. Perturbación de frecuencia a causa de falla monofásica.

La siguiente perturbación que se tiene en la figura 3 sucede en un tiempo cercano a los 43.200 segundos, es decir al medio día, y es debido a una nube que se opone al rayo del sol que influye sobre los paneles solares. Lo anterior causa que el panel deje de generar por un tiempo específico, haciendo que la frecuencia del sistema sufra 2 desviaciones seguidas. Una primera desviación hace que la frecuencia suba en por unidad a 1,0031 y por debajo a 0,9956 con un tiempo transitorio de 40 segundos y la segunda desviación hace que suba a 1,0046 y baje hasta un valor de 0,9966 con el mismo tiempo transitorio. Esta fluctuación gráficamente se puede ver en la figura 6.

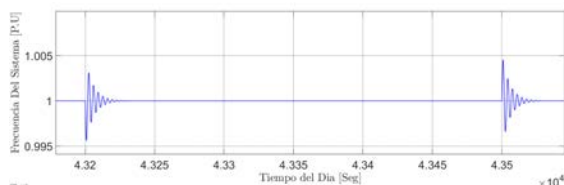


Figura 6. Perturbacion de frecuencia a causa del panel solar.

Cuando está finalizando el día, la frecuencia sufre la última perturbación a los 79.200 segundos o a las 22 horas, debido a que existe una ráfaga de viento que hace que las turbinas de viento se detengan, debido a la velocidad de parada que tiene el sistema. Esta perturbación al igual que la causada por el generador solar, tiene dos fluctuaciones seguidas y es la más grande que sufre la frecuencia, porque tiene una subida en por unidad de 0,05 en primera instancia y luego de 0,165, además presenta una primera bajada de 0,9874 y luego de 0,9919, cada una de las fluctuaciones presentan un transitorio de 30 segundos. Para entender mejor lo ocurrido, se puede observar la figura 7.

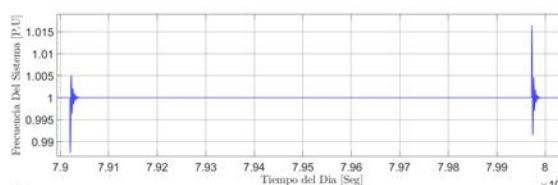


Figura 7. Perturbacion de frecuencia a causa de generador eólico.

Como un resumen en la tabla 1, se sintetiza los resultados en frecuencia en valor real de 60 Hz como valor nominal de las fluctuaciones que sufre el sistema sin implementar V2G.

	Frecuencia máxima alcanzada (Hz)	Frecuencia mínima alcanzada (Hz)	Tiempo Transitorio (s)
<b>Perturbación maquina asincronica</b>	60,048	59,988	25
<b>Perturbación solar</b>	60,186	59,796	40
<b>Perturbación eólica</b>	60,990	59,244	30
<b>Perturbación por falla monofásica</b>	61.488	58,782	40

Tabla 1: Resultados en frecuencia sin V2G.

La idea que se quiere hacer esta parte es tener una referencia de límites de frecuencia establecido por cierto sistema eléctrico real y tomar los resultados obtenidos y compararlos como si el sistema V2G estuviera implementado en el sistema real, por lo que hemos escogido el caso de Colombia y su sistema. Entonces recordemos que los límites de frecuencia máximo y mínimo dados para el caso del Sistema



Interconectado Nacional (STN) de Colombia son de 59,8 y 60,2 Hz [22], por lo que podemos concluir que en nuestro sistema las perturbaciones en frecuencia debido a lo solar, eólico y por la falla monofásica, se salen de los límites establecidos, por lo cual se puede dar un problema mucho mayor en la estabilidad del sistema lo cual puede traer consecuencias fatales para equipos eléctricos, debido a que se puede perder sincronismo en protecciones, sincronismo entre equipos eléctricos, desfases más altos, armónicos que hagan perder la calidad de energía, entre otros. La tabla 2 que nos muestra los resultados obtenidos por cuanto abajo y por encima están las fluctuaciones debido a las perturbaciones, teniendo como base los límites de frecuencia del STN.

	Porcentaje de sobrepaso por encima (%)	Porcentaje de Sobrepasso Por Debajo (%)
<b>Perturbación Maquina Asincronica</b>	-0,25249169	-0,31438127
<b>Perturbación Solar</b>	-0,02325581	0,00668896
<b>Perturbación Eolico</b>	1,31229236	0,92976589
<b>Perturbación por falla monofásica</b>	2,13953488	1,70234114

Tabla 2: Porcentajes de desviación por límites superiores e inferiores de frecuencia.

## 6. Resultados con implementación de V2G

Ya implementado el sistema V2G, los vehículos eléctricos se encuentran conectados a la red, entonces ya existe la bidireccionalidad de que tanto se ha hablado en este sistema, es decir, los vehículos consumen potencia de la red normal, pero también tienen la capacidad de entregar potencia si la red lo requiere en un momento. De nuevo miraremos las señales de frecuencia del sistema para hacer la comparación con la sección anterior.

La figura 8 nos muestra la frecuencia del sistema con V2G, tomando las perturbaciones que sufren los generadores y también la falla línea-tierra.

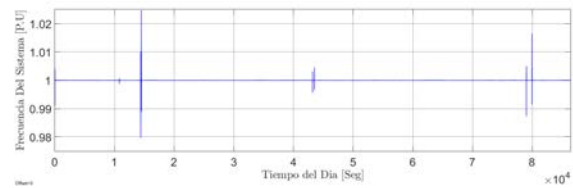


Figura 8. Frecuencia del sistema con implementación de V2G.

Ya sabemos que la primera perturbación que afecta al sistema sucede a las 3 horas o 10.800 segundos y su causa es debida a la entrada de la carga industrial al sistema. Ya con el sistema V2G, esta perturbación hace que la frecuencia se desvíe 0,0002 por encima y 0,0007 por debajo, teniendo un tiempo transitorio de 13 segundos. Se ve mejor su comportamiento en la figura 9.

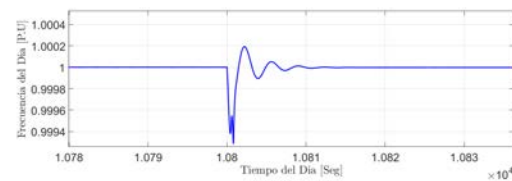


Figura 9. Perturbación de frecuencia a causa de máquina asíncrona con V2G.

Para seguir con el análisis de la misma forma que se realizó en la sección anterior, miremos detenidamente lo que sucede con la segunda perturbación que afecta a los paneles solares al medio día. Esta simulación se puede ver mejor en la figura 10, en donde se ve que existen 2 fluctuaciones casi simultáneas de nuevo, la primera supera por encima la frecuencia nominal por unidad por un valor de más de 0,0003 y por debajo por un valor de 0,0019 con un tiempo transitorio de 20 seg ; en cuanto a la segunda fluctuación hace que la frecuencia a un valor de 0,0019 de más por encima de la nominal y de 0,0003 de menos por debajo de la frecuencia 1 P.U; esta fluctuación demora en volverse a estabilizar al valor nominal alrededor de 30 seg.

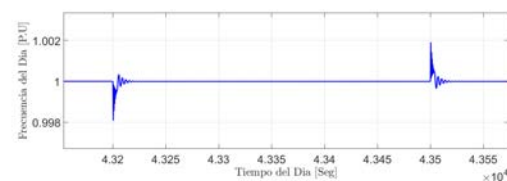


Figura 10. Perturbación de frecuencia a causa del panel solar con V2G.

Ya mirando la última fluctuación de frecuencia del sistema a causa de la generación eólica, de nuevo es

la más alta a comparación de las fallas causadas por la generación del sistema, ya que alcanza una frecuencia en la primera fluctuación de 1,0003 por encima y de 0,9935, pasando un tiempo de 20 segundos para poderse estabilizar luego en la segunda fluctuación la frecuencia tiene un valor pico de 1,0067 por arriba y por la parte de abajo de 0,9997. Recordemos que esta perturbación ocurre a las 22 horas y aquí la generación eólica deja de generar por completo. La fluctuación se puede ver mejor en la figura 11

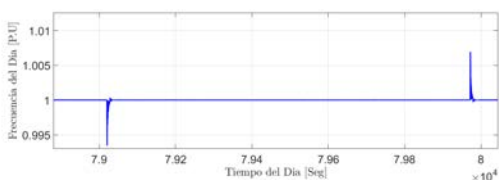


Figura 11. Perturbación de frecuencia a causa del generador eólico Con V2G.

Un acercamiento a la falla monofásica mostrada en la frecuencia del sistema se puede ver en la figura 12, la cual nos muestra que la frecuencia alcanza un valor máximo de 1,015 P.U. y de 0,987 P.U. como mínimo. Tal fluctuación hace que la frecuencia tome 10 segundos para volverse a estabilizar a su valor nominal. A pesar de que tiene un transitorio bastante rápido, la frecuencia alcanza un valor muy alto a comparación de el valor nominal y a comparación de lo causado por las perturbaciones, haciendo que el sincronismo del sistema tenga problemas nuevamente.

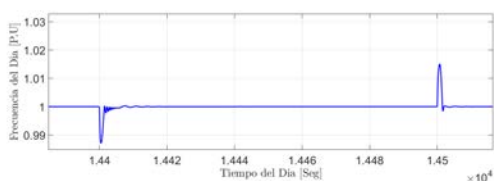


Figura 12. Perturbación de frecuencia a causa de la falla monofásica con V2G.

Una vez más, queremos mostrar los resultados obtenidos con el sistema V2G en términos del valor real de la frecuencia (60 Hz) por cada perturbación que tiene nuestro sistema. Por lo que hemos creado la tabla 3; en donde además de mostrar el valor máximo y mínimo real de la frecuencia, se muestra el tiempo transitorio que tiene cada fluctuación del sistema.

	Frecuencia máxima alcanzada (Hz)	Frecuencia mínima alcanzada (Hz)	Tiempo Transitorio (segundos)
<b>Perturbación Maquina Asincronica</b>	60,030	59,988	13
<b>Perturbación Solar</b>	60,114	59,886	20
<b>Perturbación Eolica</b>	60.402	59,610	20
<b>Perturbación por Falla Monofásica</b>	60,900	59,220	10

Tabla 3: Resultados en frecuencia Con V2G.

	Porcentaje de sobrepaso por encima (%)	Porcentaje de Sobrepaso Por debajo (%)
<b>Perturbación Maquina Asincronica</b>	-0,282392	-0,31438127
<b>Perturbación Solar</b>	-0,1428	0,143827
<b>Perturbación Eolico</b>	0,3355	-0,00317
<b>Perturbación por Falla Monofásica</b>	1,16	-0,09698

Tabla 4: Porcentajes de desviación por límites superiores e inferiores de frecuencia.

Ahora bien, como se hizo en el caso donde el V2G no estaba implementado, se tendrá en cuenta los límites establecidos del SIN de Colombia (59,8 y 60,2 Hz) para saber si la frecuencia de nuestro sistema puede o no causar algún tipo de pérdida de sincronismo o daños en las cargas. Basándonos en la tabla 3, nos queda claro que las perturbaciones eólica y la causada por la falla

monofásica se salen de los límites establecidos, lo cual si se mira en la carga debe haber un comportamiento extraño en estas fluctuaciones, tal análisis y conclusión se verá más adelante.

Referenciamos la tabla 4 para mirar cuan desviado en porcentaje está la frecuencia a causa de cada una de las perturbaciones, con el fin de saber más adelante si existe un mejoramiento del sistema incluyendo el sistema V2G.

### 7. Análisis de resultados

En las dos secciones anteriores, mostramos como el sistema se comporta con el V2G sin implementar y luego implementado, ahora la idea, es mostrar como cada una de las fluctuaciones se ve afectado gracias a V2G. Para ello, primero la señal completa de la frecuencia durante la simulación mostrando, revelando las dos señales, una con la frecuencia sin V2G y la otra con el sistema V2G haciendo efecto. Se tiene la figura 13, que nos muestra las dos gráficas montadas solo cuando existen las perturbaciones a los generadores y la falla monofásica.

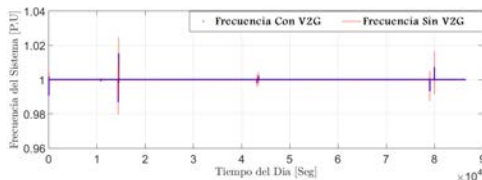


Figura 13. Frecuencia del sistema.

Como se puede ver si existe un mejoramiento en las fluctuaciones de la frecuencia del sistema, cuando esta V2G, pero mas exactamente miremos como es el mejoramiento teniendo en cuenta la diferencia que hay entre los resultados en por unidad de cada una de las fluctuaciones mostrados en las tablas 1 y 3 respectivamente. Ya haciendo este procedimiento, el resultado de esta comparación en cuanto mejora la frecuencia en valor en Hz y el tiempo del transitorio en tiempo fue el siguiente mostrando en la tabla 5.

El hecho de que la reducción de la fluctuación tanto en tiempo del transitorio como en magnitud, da paso a pensar que el sistema V2G tiene una directa relación con la primera y segunda etapa de control de frecuencia AGC (Automatic Gain Control), ya que recordando, la primera etapa de este sistema ayuda a que no existan oscilaciones mayores cuando aparece la falla mediante un control kp y la segunda etapa es devolver la frecuencia a su valor nominal mediante un control

ki, que es precisamente las condiciones que presenta el sistema V2G.

	Frecuencia Mejorada Limite Superior	Frecuencia Mejorada Limite Inferior	Tiempo Transitorio Mejorado
<b>Perturbación Maquina Asincronica</b>	0,018	0	12
<b>Perturbación Solar</b>	0,072	0,090	20
<b>Perturbación Eólica</b>	0,588	0,366	10
<b>Perturbación Por Falla Monofasica</b>	0,588	0,438	30

Tabla 5: Comparación de frecuencia V2G no implementado e Implementado.

Ahora bien, los resultados arrojados también nos demuestra que el sistema se vuelve mas robusto con la implementación de V2G, que el sistema tiene la capacidad de soportar grandes magnitudes de falla o de perturbaciones en frecuencia con ayuda de V2G. Y esto lo hace mediante la inyección de potencia activa al sistema cuando este lo requiera y se tenga la necesidad de esta potencia. En pocas palabras V2G serviría como pequeñas subestaciones de compensación de potencia activa, pero que no necesitan de gran magnitud ni de muchas protección como si lo requieren las grandes subestaciones.

### 8. Conclusiones

- El sistema V2G es una buena alternativa para la ayuda de la implementación de las energías renovables, debido a que estas energías no tienen una generación constante y dependen de una materia prima no controlable, el sistema V2G puede servir como suplencia en los momentos críticos y como recolector de energía cuando existe sobregeneracion en el sistema.
- Para que exista la parte bidireccional de energía en el

sistema, se necesita una gran inversión en estructura y una buena reglamentación y regulación para que el sistema siga siendo sostenible para todas las partes del sistema (generación, transmisión, distribución, comercialización y consumidores).

- El simulador *Power\_V2G* de Matlab puede ser una herramienta bastante eficiente como base para el estudio de sistemas de potencia mas grandes y mas robustos, con el fin de mirar su comportamiento con el sistema V2G.

## Referencias

- [1] L. Wang, S. Sharkh, A. Chipperfield, and A. Cruden, "Dispatch of vehicle-to-grid battery storage using an analytic hierarchy process," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 4, pp. 2952–2965, April 2017.
- [2] Z. Zhou, C. Sun, R. Shi, Z. Chang, S. Zhou, and Y. Li, "Robust energy scheduling in vehicle-to-grid networks," *IEEE Network*, vol. 31, no. 2, pp. 30–37, March 2017.
- [3] W. Kempton and J. TomiÁ, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 268 – 279, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305000352>
- [4] P. Yannick, P. Marc, and K. Willett, "A public policy strategies for electric vehicles and for vehicle to grid power," in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Nov 2013, pp. 1–10.
- [5] S. Vandael, T. Holvoet, G. Deconinck, S. Kamboj, and W. Kempton, "A comparison of two giv mechanisms for providing ancillary services at the university of delaware," in *2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Oct 2013, pp. 211–216.
- [6] S. Kumar and R. Udaykumar, "Stochastic model of electric vehicle parking lot occupancy in vehicle-to-grid (v2g)," *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 655 – 659, 2016, 5th International Conference on Advances in Energy Research (ICAER) 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610216314448>
- [7] W. Kempton and J. TomiÁ, "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 280 – 294, 2005. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775305000212>
- [8] A. Haque, A. I. Saif, P. Nguyen, and S. Torbaghan, "Exploration of dispatch model integrating wind generators and electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 1441 – 1451, 2016. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916313800>
- [9] J. Hu, J. Cao, J. M. Guerrero, T. Yong, and J. Yu, "Improving frequency stability based on distributed control of multiple load aggregators," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1553–1567, July 2017.
- [10] Y. K. Wu, "Frequency stability for an island power system: Developing an intelligent preventive-corrective control mechanism for an offshore location," *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 23, no. 2, pp. 74–87, March 2017.
- [11] K. N. Kumar, B. Sivaneasan, P. H. Cheah, P. L. So, and D. Z. W. Wang, "V2g capacity estimation using dynamic ev scheduling," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 1051–1060, March 2014.
- [12] W. Kempton and T. Kubo, "Electric-drive vehicles for peak power in japan," *Energy Policy*, vol. 28, no. 1, pp. 9 – 18, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421599000786>
- [13] W. Tian, J. He, L. Niu, W. Zhang, X. Wang, and Z. Bo, "Simulation of vehicle-to-grid (v2g) on power system frequency control," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, May 2012, pp. 1–3.
- [14] J. Lin, K. C. Leung, and V. O. K. Li, "Optimal scheduling with vehicle-to-grid regulation service," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 6, pp. 556–569, Dec 2014.
- [15] P. Yannick, P. Marc, and K. Willett, "A public policy strategies for electric vehicles and for vehicle to grid power," in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Nov 2013, pp. 1–10.
- [16] K. Margellos and S. Oren, "Capacity controlled demand side management: A stochastic pricing analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 706–717, Jan 2016.
- [17] Y. T. Liao and C. N. Lu, "Dispatch of ev charging station energy resources for sustainable mobility," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 1, pp. 86–93, June 2015.
- [18] P. Chambon, S. Curran, S. Huff, L. Love, B. Post, R. Wagner, R. Jackson, and J. G. Jr., "Development of a range-extended electric vehicle powertrain for an integrated energy systems research printed utility vehicle," *Applied Energy*, vol. 191, pp. 99 – 110, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917300533>
- [19] S. Yoon, K. Park, and E. Hwang, "Connected electric vehicles for flexible vehicle-to-grid (v2g) services," in *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, Jan 2017, pp. 411–413.
- [20] H. Farzin, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghaie, "Reliability studies of modern distribution systems integrated with renewable generation and parking lots," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 431–440, Jan 2017.
- [21] matlab, "24-hour simulation of a vehicle-to-grid (v2g) system," <http://es.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/24-hour-simulation-of-a-vehicle-to-grid-v2g-system>.
- [22] XM, "Conceptos basicos de control de frecuencia," [http://www.xm.com.co/memoriascapacitacionmsa/control\\_frecuencia/conceptos\\_basicos\\_frecuencia.pdf](http://www.xm.com.co/memoriascapacitacionmsa/control_frecuencia/conceptos_basicos_frecuencia.pdf), 2012.