

**ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA PARA ESTACIONES DE CARGA DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS CON ALTA INCERTIDUMBRE CONSIDERANDO
EL PERFIL DE VOLTAJE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA PARA ESTACIONES DE CARGA DE
VEHÍCULOS ELÉCTRICOS CON ALTA INCERTIDUMBRE
CONSIDERANDO EL PERFIL DE VOLTAJE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.**

**AUTOR:
BYRON DANIEL BENALCÁZAR LÓPEZ**

**DIRECTOR:
EDWIN MARCELO GARCÍA TORRES**

Quito, Julio 2017

Byron Daniel Benalcázar López

ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA PARA ESTACIONES DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS CON ALTA INCERTIDUMBRE CONSIDERANDO EL PERFIL DE VOLTAJE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Byron Daniel Benalcázar López (Y'1993-SM'01). Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: robótica móvil, potencia, microcontroladores, automatización y control industrial.
bbenalcazar@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Edwin Marcelo García Torres (Y'1978-SM10). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y actualmente está cursando un doctorado en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).
egarcia@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2017 Universidad Politécnica Salesiana
QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Edwin Marcelo García Torres, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Óptima respuesta a la demanda para estaciones de carga de vehículos eléctricos con alta incertidumbre considerando el perfil de voltaje en la red de distribución* realizado por Byron Daniel Benalcázar López, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Julio 2017



Edwin Marcelo García Torres

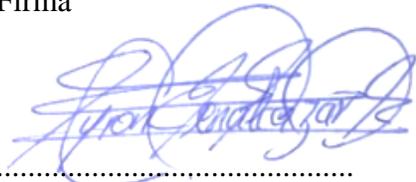
Cédula de identidad: 1803087400

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Byron Daniel Benalcázar López, con documento de identificación N° 1725121808, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Óptima respuesta a la demanda para estaciones de carga de vehículos eléctricos con alta incertidumbre considerando el perfil de voltaje en la red de distribución*”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Byron Daniel Benalcázar López

Cédula: 1725121808

Fecha: Julio 2017

INDICE GENERAL

Abstract	1
1. Introducción	2
2. Marco teórico	6
2.1 Baterías de Vehículos Eléctricos.....	6
2.2 Características de baterías de iones de Litio	8
2.3 Características de baterías de Plomo-ácido.....	9
2.4 Análisis y comparación de curvas de carga de baterías de Iones-Li y Pb-Ácido	10
2.5 Modelo del Algoritmo Húngariano.....	11
3. Modelamiento	12
3.1 Perfiles de carga y voltaje mediante heurística en base al Algoritmo Húngariano....	13
3.2 Seudocódigo	14
4. Análisis de resultados	15
4.1 Caso de estudio	15
4.2 Resultados de la heurística.....	17
5. CONCLUSIONES	18
6. Referencias.....	19
6.1. Estado del Arte.....	23
6.2. Indicadores de la matriz de estado del arte	25

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Gestión de carga de Vehículos Eléctricos para reducir el impacto a la red de distribución.....	5
Figura 2. Curvas de carga lenta, rápida y ultra rápida de baterías de ion-Li.	9
Figura 3. Curvas de carga lenta, rápida y ultra rápida de baterías de Plomo-ácido.	10
Figura 4. Estimación de curvas de carga genéricas en base a curvas de carga existentes de baterías de Litio y Plomo.	11
Figura 5. Curvas genéricas de carga de baterías de EVs.....	11
Figura 6. Diagrama de flujo del Algoritmo Hungariano [48].	12
Figura 7. Perfiles de carga y voltaje de una estación de recarga sin ingreso de EVs.	15
Figura 8. Perfil de carga con el ingreso de carga de EVs sin gestión de carga.	15
Figura 9. Ingreso de carga de tres EV con distintas características y distinto nivel de afectación.	16
Figura 10. Ingreso aleatorio de carga de EVs, sin gestión de carga.....	16
Figura 11. Ingreso de carga de EVs a la red de distribución con gestión de carga.	17
Figura 12. Comparación del comportamiento de perfiles de tensión y carga sin optimizar.	18
Figura 13. Comparación del comportamiento de perfiles de tensión y carga del ingreso de carga de EVs optimizado.	18

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de las principales características de baterías existentes.	5
Tabla 2: Características de los tipos de carga de baterías de EVs.	7
Tabla 3: Tipos y capacidad de baterías de EVs existentes en el mercado automotriz	8
Tabla 4: Seudocódigo de heurística en base al Modelo Hungariano.	14
Tabla 5: Matriz de estado del arte.	23

ÓPTIMA RESPUESTA A LA DEMANDA PARA ESTACIONES DE CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS CON ALTA INCERTIDUMBRE CONSIDERANDO EL PERFIL DE VOLTAJE EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.

Resumen

Este documento muestra un análisis del comportamiento del perfil de voltaje en la red de distribución por la inserción de carga de distintos Vehículos Eléctricos (EVs) en diferentes periodos de tiempo y cantidad de carga, se analiza los perfiles de voltaje ya que son un indicador de la confiabilidad de un sistema eléctrico. Basándose en varios escenarios de recarga, es posible determinar el porcentaje de afectación a la red de distribución actual y si la red puede abastecer la carga de los EVs.

Mediante una heurística en base al algoritmo Húngaro es posible estimar el comportamiento de la demanda de las redes de distribución y la variación de los perfiles de voltaje, logrando discernir cuáles son las horas óptimas para realizar la recarga de baterías de los EVs. El análisis se asocia con la predicción de la potencia máxima que puede poseer una estación de carga de cuatro bahías en diferentes horas, considerando carga lenta, rápida y súper rápida, cada una de estas con diferente nivel de afectación a la red, buscando también la correcta gestión de carga de EVs para aumentar la eficiencia, calidad y confiabilidad de las redes de distribución.

Palabras Clave: Algoritmo Húngaro, Perfil de carga, Perfil de voltaje, Respuesta a la demanda, Sistemas de distribución.

Abstract

This document shows an analysis of the behavior of the voltage profile in the distribution network by the insertion of charge of different Electric Vehicles (EVs) in different periods of time and amount of load, it is analyzed the voltage profiles since they are an indicator of The reliability of an electrical system.

Based on several recharge scenarios, it is possible to determine the percentage of affectation to the current distribution network and whether the network can supply the load of the EVs.

By means of a heuristic based on the Hungarian algorithm it is possible to estimate the behavior of the demand of the distribution networks and the variation of the voltage profiles, and it is possible to discriminate the optimum hours for the recharge of the batteries of the EVs. The analysis is associated with the prediction of the maximum power that a four-bay charging station can have at different times, considering slow, fast and super fast load, each of them with different level of affectation to the network, also looking for the Correct load management of EVs to increase the efficiency, quality and reliability of distribution networks.

Keywords: Hungarian algorithm, Load Profile, Voltage Profile, Demand Response, Distribution Systems.

1. Introducción

Una de las principales preocupaciones en el mundo actual es reducir los niveles de contaminación del aire, la emisión de gases de efecto invernadero y disminuir la excesiva dependencia de los combustibles fósiles [1]. Un primer e importante paso fue representado por el aumento de la generación de electricidad a partir de fuentes renovables [2], a nivel mundial un gran número de países han centrado sus investigaciones en formas limpias de generar energía eléctrica no convencional y renovable con el fin de disminuir el impacto ambiental y además conservar las reservas de petróleo que cada vez son más escasas [3], el siguiente paso es la reducción del nivel de contaminación en las zonas urbanas [1], reemplazando a los vehículos convencionales de combustión interna, es decir que utilizan combustible fósil para su funcionamiento por nuevas tecnologías en vehículos que funcionan en base a energía eléctrica [4][5], debido a que la causa principal del problema ambiental es producida por las emisiones del sistema actual de transporte [6].

Los Vehículos Eléctricos (EVs) en la actualidad son una realidad en el medio del transporte, siendo un transporte eco amigable que ayudará a mitigar la contaminación del medio ambiente [7], ya que no emite ningún tipo de gas de efecto invernadero perjudicial [8], sin duda el Vehículo Eléctrico (EV) es la alternativa que cuenta con más apoyo debido a que la tecnología está suficientemente desarrollada y en la actualidad una gran cantidad de fabricantes de automóviles como Renault, Nissan, Mitsubishi y General Motors optan por la opción del EV como parte de sus líneas de producción logrando disminuir costos de los EVs en el mercado automotriz y de esta manera competir en el mercado con los vehículos convencionales, dando paso a un posible escenario de diferente tecnología de energía en transporte [9].

Por otro lado, en el escenario eléctrico es fundamental la inversión para mejorar la infraestructura actual de las redes de distribución para abastecer a la carga de EVs[10].

Este vehículo tiene la capacidad de consumir y almacenar energía cuando conviene al sistema eléctrico de distribución, pudiendo de ésta manera de alguna forma apoyar al sistema eléctrico como una opción de respuesta a la demanda [11]. Cabe mencionar que un EV se considera un automóvil que está compuesto por un motor eléctrico [12], el cual contiene una batería recargable, para que el EV aporte a la red de distribución es necesario implementar un sistema que permita el flujo bidireccional de energía desde el punto de carga al vehículo y viceversa, este sistema debe poseer un inversor [13], el mismo que al igual que el motor del EV requieren generalmente de voltajes de alimentación de 600V [14].

El creciente interés en EVs como una solución a la contaminación mundial ha llevado a áreas de investigación como la comunicación inalámbrica entre vehículos eléctricos, controles automáticos, políticas eléctricas, algoritmos de carga y sistemas de baterías [15]. Entre estas áreas de investigación, el algoritmo de carga es un área crucial que puede implementar la energía bidireccional y el flujo de energía entre un vehículo eléctrico enchufable y la red de distribución. Se está realizando mucha investigación en tecnología de vehículo a red "Vehicle to Grid" (V2G), y es un factor importante en la red inteligente [16].

Hay muchos temas de investigación que han hecho equilibrar las demandas de la red a través de las tecnologías V2G. Sin embargo, se ha prestado poca atención al control y la carga de los vehículos eléctricos enchufables con sistemas de almacenamiento de energía de la batería doméstica a un costo eléctrico mínimo [17]. Es importante diseñar una

arquitectura y controladores eficientes que reflejen el estado energético del hogar y las restricciones para hacer un método óptimo de algoritmo de carga entre un vehículo eléctrico enchufable y un hogar inteligente [14]–[16].

Por otro lado, los inconvenientes asociados con la inserción de EVs en la actualidad son varios: el aumento de carga de EVs en horas de demanda máxima ocasiona pérdidas, caída de voltaje excesiva, sobrecarga en redes de distribución, contaminación armónica, aumento del flujo de potencia y otros efectos negativos en las redes de distribución lo que se traduce como un problema de calidad de energía. [18][19].

La gestión de demanda de energía eléctrica en redes de distribución, se convierte en un caso de estudio muy importante conforme avanzan los años, esto se debe al aumento de carga desmedida por el ingreso de nuevas cargas a la red, como es la inserción de la carga de las baterías de los vehículos eléctricos, electrodomésticos con nuevas tecnologías como cocinas de inducción, además de las cargas comerciales y residenciales existentes en las redes [20]. La gestión de la demanda energética es más importante día a día, ya que se encarga de administrar de mejor manera los gastos del sistema eléctrico, las generadoras que operan en su punto máximo o picos de la curva de la demanda y de esta manera mantener los índices de calidad de energía [21].

Por esta razón, es necesario analizar cómo afectará la inserción de los EVs a las redes eléctricas de distribución, como deberán interactuar las nuevas cargas con las redes de distribución y que nuevos elementos serán necesarios implementar en las mismas [22]; estos casos de estudio son necesarios ya que si la demanda de energía tiene crecimiento y no se prevé el mismo, provocaría ineficiencia en el sistema eléctrico en parámetros de potencia, así como gastos

de operación y construcción de nuevas centrales y la expansión de redes [23][24].

Actualmente para lograr mitigar el impacto negativo de los gases invernadero que emiten los vehículos convencionales, los diferentes gobiernos han tomado acciones que incentivan económicamente y fomentan el crecimiento de la tecnología en relación a un transporte eléctrico [25]. El crecimiento continuo de EVs en países europeos y países de América Latina crea un escenario en el que se evalúa la capacidad eléctrica de las redes de distribución para el abastecimiento de la carga de los EVs [26], así como también se analiza desde la perspectiva de emisiones de gases a la atmósfera. La recarga de baterías de los EVs en horas diurnas elevan el nivel de la demanda en las redes de distribución, por lo cual se debe aumentar la capacidad de los conductores, transformadores y elementos internos de las subestaciones de los sistemas de distribución [27], además en algunos países de Latinoamérica implica un incremento de costos en la planilla del consumo de energía eléctrica, el mismo que es menor respecto a las altas emisiones de CO₂ actualmente [28]. Para evitar un alto índice de afectación a la red con la inserción de carga de EVs se puede implementar un sistema de carga inteligente aprovechando la energía solar en horas de la mañana y el uso de baterías en horas pico, además de realizar una correcta gestión en el tipo de carga que se desee para el EV [29], considerando el nivel de incertidumbre de la cantidad de EVs y la capacidad de carga de las baterías de los EVs, y de esta manera liberar carga a la red, a su vez se reduce el costo de la planilla de energía y principalmente se realiza una óptima gestión [10].

Uno de los mayores inconvenientes de la energía eléctrica es la complejidad para ser almacenada, siendo las baterías una

de las pocas formas de almacenamiento de energía eléctrica existentes, en principio las baterías convierten la energía eléctrica en energía química para poder almacenarla, posteriormente se puede utilizar esta energía en el momento que la red eléctrica presente fallas de funcionamiento o cuando se requieran realizar operaciones que funcionen independientemente de la red eléctrica [30]. En base a este principio, el elemento principal de un EV es su batería, ya que de esta depende el correcto funcionamiento y la autonomía de recorrido que disponga el EV [31] [32].

En base a varios estudios y experimentaciones las baterías toman un papel importante en la investigación al ser una de las pocas formas de almacenar energía eléctrica, la finalidad de los estudios básicamente es desarrollar nuevas tecnologías de baterías, cada vez más eficientes y confiables [32]. De esta manera en la actualidad existe una gran variedad de tipos de baterías en el mercado, cada una de ellas con características específicas diseñadas para trabajos específicos [33].

Se puede realizar una clasificación de baterías según diferentes criterios; por las características constructivas que posean, es decir, el material con el cuál son construidas [34]; por las características de funcionamiento, entre estas características se encuentran el nivel de voltaje que posee la batería por cada celda; por el campo de uso o por la capacidad de almacenamiento. Los tiempos de carga y descarga se analizan en todas las baterías [32].

Tipos de baterías [33]:

- Baterías de Plomo-Ácido.
- Baterías de Níquel-Hierro.
- Baterías Alcalinas de Magnesio.
- Baterías Níquel-Cadmio.
- Baterías de Níquel-Hidruro Metálico.
- Baterías de Litio.
- Baterías de Polímero de Litio.

Las baterías de Plomo-Ácido son las primeras baterías recargables para uso comercial, poseen un tiempo de vida útil relativamente corto, la tensión que puede entregar es de 2 Voltios (V) por celda, este tipo de batería posee poca capacidad de almacenamiento de energía y generalmente son utilizadas en el suministro de reservas de sistemas informáticos y pequeños EV [35], sin embargo este tipo de baterías posee la auto-descarga más baja de los sistemas recargables [32].

Las baterías de Níquel-Hierro poseen una larga vida útil y simple fabricación, además el costo es relativamente bajo respecto a las demás baterías y posee gran flexibilidad a sobrecargas y descargas reiteradas sin perder su capacidad de almacenamiento [36]. Por otro lado, a bajas temperaturas su rendimiento es ineficiente y almacena la energía por cortos periodos de tiempo por lo cual no se utilizan para EVs [33].

Las baterías Alcalinas de Magnesio posee una tensión nominal de 1.5 V por celda y la carga se mantiene estable durante largos periodos de tiempo [37]. Las baterías de Níquel-Cadmio entregan una tensión estable en sus terminales durante la descarga, poseen un bajo índice de falla respecto a las de Plomo-Ácido y además una mayor capacidad de almacenamiento de energía, la tensión nominal es únicamente de 1.2 V por celda al igual que las baterías de Níquel-Hidruro Metálico [32][33].

Las baterías de Iones de Litio son las más utilizadas por los fabricantes de EVs, debido a sus grandes ventajas respecto a todas las demás baterías [38], ya que el tiempo de carga de estas baterías es relativamente corto y el voltaje por celda que entrega puede ser hasta de 4 V por celda, el costo es la principal desventaja respecto al resto de baterías [32] [33].

Las baterías de polímero de Litio son las mismas que las de Iones de Litio pero en menores dimensiones [39], además el

ciclo de carga-descarga es más largo y posee mayor capacidad [32] [33].

Tabla 1: Resumen de las principales características de baterías existentes [32].

Índice	Pb-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
T. nominal (V/celda)	2,0	1,2	1,2	4,0
E. específica (Wh/kg)	40	60	90	140
P. específica (W/kg)	150-300	80-150	200-300	420
Densidad de E (Wh/l)	80	95	150	290
Auto descarga(%/mes)	4_6	10	15-25	2
Vida cíclica (ciclos)	500-600	>1500	>1200	>3000
Coste (\$/kWh)	120-150	250-350	300-450	600-800

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales características de los diferentes tipos de baterías.

Debido a que los EVs operan en base a la energía almacenada en las baterías para movilizarse y dichas baterías tienen un máximo de autonomía para recorrer en un determinado periodo de tiempo. Una vez cumplida la autonomía los EVs necesitarán recargar las baterías para continuar con su recorrido, para lo cual se necesita de puntos estratégicos de recarga específicos para EVs, lo que implica el ingreso de nuevas cargas a las redes eléctricas existentes, las mismas que son cargas extras significantes para los alimentadores de una subestación de

distribución, por este motivo las empresas distribuidoras deben robustecer las redes existentes y las generadoras aumentar el nivel de generación para cubrir dicha carga y mantener los parámetros de calidad y confiabilidad de tal manera que los demás usuarios no se vean afectados [40][41].

Las estaciones de recarga de baterías de EVs deben cumplir con varias garantías para el correcto funcionamiento de las mismas sin afectar a las redes de distribución existentes [42], en concepto de una red inteligente las estaciones de carga de EVs deben poseer alguna central de generación no convencional para mitigar el impacto de la carga de EVs a la red, en la mayoría de estaciones de carga en Europa y EEUU se utilizan paneles fotovoltaicos para aprovechar la energía solar y mediante esta generación cubrir la carga de EVs y en ciertas horas cargar un banco de baterías, las mismas que van a utilizar en caso que exista carga de EV en horas punta [43].

En el presente trabajo se propone el modelamiento de una heurística basada en el Modelo Hungariano que pretende estudiar el impacto de carga de baterías de los EVs en las redes eléctricas de distribución, como se comporta el perfil de voltaje con diferentes casuísticas de comportamiento de los usuarios en la recarga de los EVs en una estación de

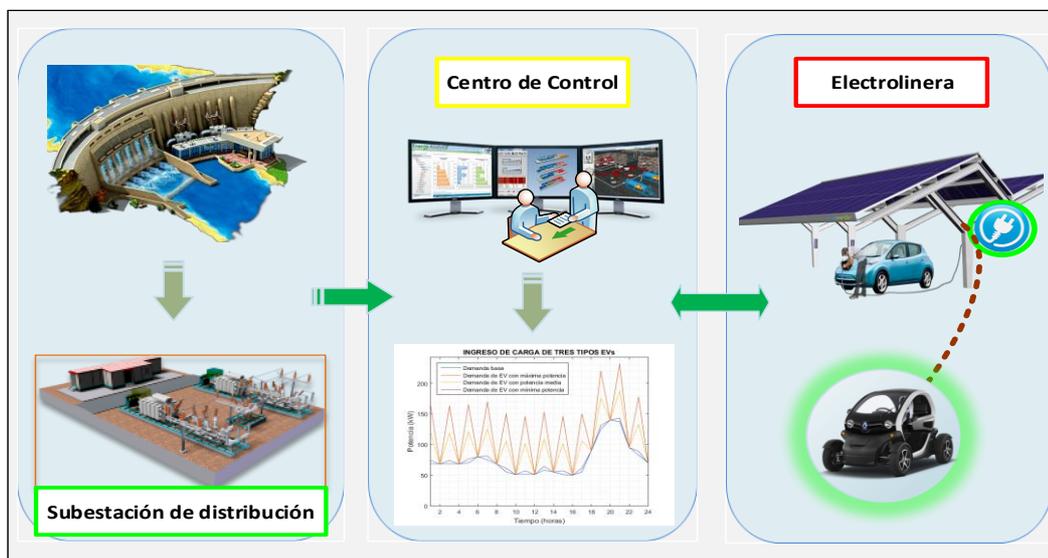


Figura 1. Gestión de carga de Vehículos Eléctricos para reducir el impacto a la red de distribución.

carga de cuatro bahías, considerando un alto nivel de incertidumbre y los porcentajes de afectación a la red en cargas lenta, rápida y ultra rápida, en diferentes escenarios de tiempo en horas del día, en base al perfil de carga.

Para que el impacto de la implementación de los EVs en las redes de distribución sea mínimo se debe contar con una red que sea capaz de detectar las variaciones y fluctuaciones de magnitudes eléctricas claves, es decir, se debe contar con una red inteligente, la misma que se la pueda monitorear desde un centro de control, para tener un análisis en tiempo real de la red de distribución y de los parámetros eléctricos que se deseen analizar, realizando una correcta gestión de la carga de EVs [44].

Mediante un centro de control se realiza una gestión óptima de la carga de EVs para disminuir el porcentaje de afectación a las redes de distribución como se muestra en la Figura 1, en este caso de estudio la demanda total de los EVs es cubierta por la red de distribución en su totalidad, sin considerar fuentes de generación no convencional.

En la sección 2 se presenta las generalidades del estudio, considerando los principales problemas y el objetivo específico del presente análisis, determinando los parámetros necesarios para estimar el perfil de carga de una red residencial con la carga de las baterías de EVs mediante una heurística basada en el modelo Hungariano. En la sección 3 se analizan las curvas del perfil de carga y perfil de voltaje reales sin considerar la carga de EVs, además del pseudocódigo empleado para la estimación del comportamiento de los perfiles de carga y de voltaje con la implementación de carga de los EVs. En la sección 4 se realiza el análisis de los resultados del caso de estudio. Finalmente las conclusiones del modelamiento de este trabajo.

2. Marco teórico

La estimación del comportamiento del perfil de carga y perfil voltaje de la red de distribución con la inserción de carga de EVs se lo realiza mediante un método de optimización que se basa en datos de demanda de la red de distribución, la demanda de los EVs y datos técnicos de carga y descarga de las diferentes baterías de EVs existentes en el mercado automovilístico, considerando un alto nivel de incertidumbre de la cantidad de EVs que se cargan y el tipo de carga seleccionada por cada hora del día [45].

2.1 Baterías de Vehículos Eléctricos

Se conoce como batería eléctrica a un sistema que sea capaz de almacenar energía de forma química y posteriormente sea capaz de transformarla a energía eléctrica para realizar un trabajo determinado [32]. Las baterías se constituyen de materiales que poseen propiedades que permiten acumular energía química, siendo el componente más pequeño de una batería la celda [45].

Una celda se conoce como un dispositivo electroquímico que permite el almacenamiento de energía, se conforma de un electrolito y dos electrodos. El electrolito se caracteriza por poseer una gran cantidad de iones y es una sustancia que contiene a los electrodos, por otra parte los electrodos se componen de materiales semiconductores con el fin de proporcionar las características químicas necesarias para almacenar energía [45]. Existen varios parámetros que caracterizan el comportamiento de una batería:

Tensión

- Tensión de vacío (E_0) es la tensión que una batería tiene en sus terminales cuando no se cierra un circuito, y el valor depende de su construcción [32].

Capacidad

- Se entiende por capacidad de una batería a la cantidad de

electricidad que puede suministrar o aceptar una batería en unidad de tiempo (Ah), existe la capacidad nominal, la capacidad real, la capacidad retenida y capacidad disponible. El valor de la capacidad (C) se calcula mediante una integral entre la corriente que circula por la batería en un periodo de tiempo, como se muestra en (1) [32].

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i * \partial t \quad (1)$$

Profundidad de descarga

- Se define como la relación entre la capacidad entregada en amperios por cada hora C(A/h) durante la descarga de una batería y la capacidad nominal de la misma batería, generalmente a este parámetro se conoce como DOD de sus siglas en inglés.

Índice de capacidad (C)

- Se conoce como la razón de carga o descarga en amperios (A) y el valor es numéricamente proporcional a la capacidad nominal en A/h [32].

Autodescarga

- Se define como la pérdida de capacidad de una batería cuando ésta se mantiene en circuito abierto, generalmente se expresa en términos de porcentaje entre la razón de las pérdida de capacidad respecto a la capacidad nominal en periodos de tiempo por cada mes [45].

Carga Lenta

- Proceso de recarga de baterías en el cuál se garantiza el restablecimiento de la capacidad que ha sido descargada en periodos largos de tiempo, por lo general 8 horas o más y la corriente de carga es mínima, mediante este tipo de carga el

nivel de afectación a las redes de distribución es mínima [32][45].

Carga Rápida

- Proceso de recarga de baterías acelerado, en el cuál se garantiza el restablecimiento de la capacidad que ha sido descargada en cortos periodos de tiempo, por lo general entre 2 y 3 horas, la corriente de carga es considerable, por lo cual este tipo de carga posee mayor afectación a las redes de distribución [32] [45].

Carga Ultra rápida

- Proceso de recarga de baterías mediante un sistema controlado, el mismo que permite garantizar el restablecimiento de la capacidad que se ha descargado en periodos de tiempo muy reducidos que oscilan entre los 20 minutos y 30 minutos, la corriente de carga supera los 200 amperios, por lo cuál es el tipo de carga que posee mayor afectación a las redes de distribución [32][45].

En la Tabla 2 se muestra las características más importantes de los diferentes tipos de carga, considerando el tipo de alimentación, parámetros eléctricos y el tiempo que tarda en cargar cada tipo, tomando como caso de estudio la carga de una batería de 24 kWh de capacidad.

Tabla 2: Características de los tipos de carga de baterías de EVs [45].

Tipo de carga	Tipo de alimentación	# fases	V	I	t_carga (24kWh)
Lenta	C. Alterna	1	127 V	16-30 A	6-8 h
		2	230 V	16-30 A	6-8 h
Rápida		3	400 V	64 A	3-4 h
Ultra rápida	C. Continua	1+,1-	400 V	400 A	15-30 min

La sobrecarga en baterías es un proceso que ocurre cuando se continúa cargando una batería después de haber completado su capacidad nominal [32].

La vida útil de una batería depende de la conservación de los parámetros electroquímicos, en caso de baterías recargables el tiempo de vida útil se relaciona con el número de meses o años de funcionamiento o en el número de ciclos de carga-descarga al que se ha sometido a una batería [45].

Otros parámetros de baterías

- Densidad de Energía (Wh/l).
- Densidad de Potencia (W/l).
- Energía Específica (Wh/kg).
- Potencia Específica (W/kg).

En la Tabla 3 se muestra la capacidad y el tipo de baterías que poseen las diferentes marcas de EVs que se comercializan en la actualidad, se puede observar que el tipo de batería utilizada por la gran mayoría de marcas comerciales de EVs es de iones de Litio.

Tabla 3: Tipos y capacidad de baterías de EVs existentes en el mercado automotriz [46].

Marca	kWh	Tipo batería
Audi E-tron	95	Ión-Litio
BMW i3	22	Ión-Litio
BYD E6	54	Ión-Litio
Chevrolet Volt	16	Ión-Litio
Ford focus	23	Ión-Litio
Hyundai Ioniq	28	Ión-Litio
KIA Soul	27	Ión-Litio
Mercedes ED	36	Ión-Litio
Mitsubishi i-MiEV	16	Ión-Litio
Nissan Leaf	24	Ión-Litio
Opel Ampera-e	60	Ión-Litio
Peugeot iOn	14,5	Ión-Litio
Renault Twizy	6,1	Ión-Litio
VW e-Golf	26,5	Ión-Litio
Tesla Model X	75	Ión-Litio
Little Ebox	10	Ácido-Pb
Mahindra Reva	-	Ácido-Pb
Eve	-	Pb
Noun Electric	11	Pb

A pesar que el costo de las baterías de iones de Litio es más elevado respecto a las demás baterías existentes como se visualiza en la Tabla 1, sin embargo posee una gran cantidad de ventajas respecto al resto, que justifica el costo [32]. Además de las baterías de Litio también existen fabricantes que prefieren utilizar baterías de Plomo-ácido (Pb-ácido) principalmente por su costo como se muestra en la Tabla 3.

2.2 Características de baterías de iones de Litio

Las baterías de iones de Litio poseen características que las ubican por encima del resto de baterías de distinta tecnología, desde el peso hasta el nivel de voltaje son algunas de las principales ventajas de estas baterías respecto al resto.

La reducción del peso de las baterías es una de las ventajas de este tipo de baterías, esto se debe a que los electrodos de este tipo de baterías son de Litio y Carbono, lo que se traduce a la disminución considerable del peso, ya que el Litio es un metal muy reactivo, posee un alto nivel de energía potencial almacenada entre sus átomos, los mismos que son contenidos en espacios muy reducidos, logrando disminuir el volumen de la batería, pero manteniendo la misma cantidad de carga [45].

En términos energéticos estas baterías poseen 150 W/h de electricidad por cada kilogramo de peso de la batería logrando superar a todas las otras tecnologías de baterías ya que llegan a un máximo de 100W/h las de Hidruro de Níquel Hidruro (Ni-MH) en el mejor de los escenarios y a 25W/h las de Pb-ácido [47]. Otra ventaja es que posee una pérdida de carga muy pequeña, llegando a alcanzar un máximo del 5% de su energía acumulada, a diferencia de una batería de Ni-MH pierde un 20% de carga si no se recarga, además de poseer alta resistencia a las descargas cuando este tipo de baterías no son utilizadas

durante un periodo largo de tiempo [45], las baterías convencionales se deben descargar, en cambio a las de Litio no es necesario ya que este tipo no poseen el denominado efecto memoria [47]. Posee un gran número de ciclos de carga y descarga sin afectar a su rendimiento. Tiene el más alto nivel de tensión por celda siendo 4 V por cada celda (4V/celda) [32].

Además de poseer tiempos muy cortos de recarga, como se muestra en la Figura 2, en la cual se hace referencia al estado de carga que se encuentra la batería y el tiempo que demora en cargarse la batería en diferentes tipos de carga; el tiempo de recarga en carga lenta es aproximadamente de seis horas, en carga rápida cuatro horas y en carga ultra rápida aproximadamente 2 horas.

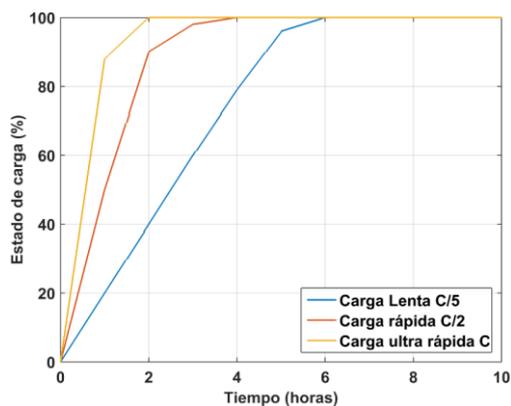


Figura 2. Curvas de carga lenta, rápida y ultra rápida de baterías de ion-Li.

De igual manera este tipo de baterías posee algunas desventajas respecto al resto de baterías, poseen una construcción con baja resistencia, siendo muy vulnerable a las sobrecargas y sobre descargas [32]. A pesar que posee tiempos relativamente bajos de recarga, éste tipo de baterías presenta problemas de aceptación de carga rápida, para lo que se necesita un sistema de control muy preciso de la tensión de cada celda para garantizar el correcto funcionamiento de las mismas [47], actualmente los precios iniciales son muy elevados [45].

2.3 Características de baterías de Plomo-ácido

Las baterías de Plomo-ácido actualmente constituyen una gran parte del mercado mundial de baterías, dicha importancia de este tipo de baterías en el mercado se debe principalmente a la combinación de varios factores importantes, empezando por que es el tipo de batería más conocida en el mundo gracias al tiempo que lleva en el mercado, siendo la batería más antigua respecto a las demás, otro de los aspectos importantes del éxito de las baterías de Plomo-ácido es el costo muy reducido respecto al resto de baterías, siendo el factor económico un pilar fundamental de dicho éxito [32].

Al ser las baterías más antiguas y conocidas del mercado existen numerosas aplicaciones de éstas, desde baterías de arranque de vehículos convencionales, instalaciones fotovoltaicas e inclusive aplicaciones de tracción eléctrica.

Las características más importantes de este tipo de baterías se las puede analizar en base a las ventajas y desventajas que presenta esta tecnología [32].

La principal ventaja de este tipo de baterías es que se encuentra totalmente ingresada en el mercado, ocupando un gran porcentaje en distintas aplicaciones y áreas tecnológicas, además de poseer buenas características eléctricas ya que después de las baterías de iones de Litio estas baterías son las que poseen un alto nivel de tensión por celda, que es de dos voltios por cada celda (2V/celda). Posee una excelente capacidad para cubrir picos de corriente durante la descarga de las baterías [47], un alto nivel de eficiencia y de fácil reciclaje. En base a tiempos de recarga, esta tecnología de baterías tarda alrededor de 15 horas en carga de tipo lenta, donde su corriente de carga es insignificante para las redes de distribución, en carga rápida esta tecnología recupera la capacidad de carga perdida durante la descarga en un tiempo aproximado de 11 horas y la

corriente de carga puede ocasionar fluctuaciones en las redes. Sin embargo este tipo de baterías presentan facilidad para carga ultra rápida, disminuyendo el tiempo de recarga pero aumentando el porcentaje de afectación a las redes de distribución. En la Figura 3 se muestra el tiempo que demora la batería de Pb-ácido en cargarse, haciendo referencia al estado de carga de una batería.

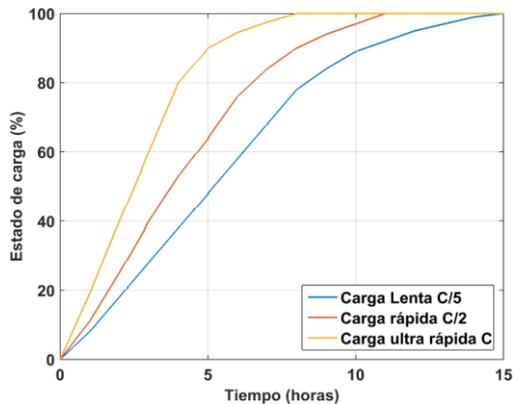


Figura 3. Curvas de carga lenta, rápida y ultra rápida de baterías de Plomo-ácido.

De igual manera que las baterías de iones de Litio, este tipo de baterías poseen un determinado número de desventajas, siendo la principal desventaja el elevado peso que posee por sus características de construcción, ya que utiliza como material activo al plomo [45]. Posee una vida útil demasiado corta que oscila entre 500 a 600 ciclos de carga-descarga, el mínimo tiempo de recarga de este tipo de baterías es de 6 horas, teniendo el problema que se necesitan grandes periodos de tiempo para la recarga de las mismas, posee una baja resistencia ante sobrecargas y sobredescargas no programadas, llegando a poner en peligro la vida útil de la misma [47].

A pesar que el costo inicial de estas baterías son bajos, no ocurre lo mismo durante el periodo de vida útil, ya que se necesita de mantenimientos periódicos para garantizar su correcta operación y esto se ve reflejado en un aumento de costos de mantenimiento [32].

2.4 Análisis y comparación de curvas de carga de baterías de Iones-Li y Pb-Ácido

En la Figura 2 y Figura 3 se indica las curvas de carga de las dos diferentes tecnologías de baterías eléctricas más utilizadas para EVs, detallando cuál es el tiempo que se tarda en recargar los dos tipos de baterías en los tres tipos de carga, mediante este análisis se pretende determinar curvas genéricas de carga lenta, rápida y ultra rápida para realizar un análisis de las redes de distribución y los perfiles de carga y voltaje con la inserción de EVs de manera general, considerando el estado de carga de las baterías y teniendo siempre presente que el voltaje por celda de cada batería va a variar según sea el tipo. Es importante mencionar que al cargar una batería entre los valores de estado de carga del 20% al 80%, la eficiencia de las baterías es prácticamente la máxima [45]. Por esta razón el rendimiento de las baterías jamás alcanzarán el 100% ya que dependen de la eficiencia energética considerando pérdidas de las baterías por autodescargas o la velocidad de descarga de las baterías[47], es decir, mientras más lenta sea la carga y descarga en las baterías mayor será el rendimiento de las mismas debido a que las pérdidas se reducen [45].

El comportamiento de carga de las baterías de Pb-ácido se las puede representar mediante un modelado con ecuaciones directas como se muestra en la ecuación (2), donde a , b , k y f_0 son varios parámetros que varían dependiendo la corriente de carga, es decir el tipo de carga de la batería [47].

$$f(t) = f_0 + \frac{K}{t-b} \exp\left(\frac{a}{t-b}\right) \quad (2)$$

Para modelar las curvas genéricas de carga de baterías de EVs es necesario comparar los distintos tipos de carga de las dos baterías diferentes, con la finalidad de obtener una curva

representativa a las curvas de las dos baterías, para lo cual es necesario determinar la desviación estándar entre cada tipo de carga de las dos tecnologías de baterías [32].

En la Figura 4 se muestra las curvas de los diferentes tipos de carga y de las dos baterías. Para lograr determinar curvas genéricas de cada tipo de carga, se analiza el mismo tipo de carga analizando los dos tipos de baterías, logrando de esta manera conseguir las curvas genéricas de cada tipo de carga.

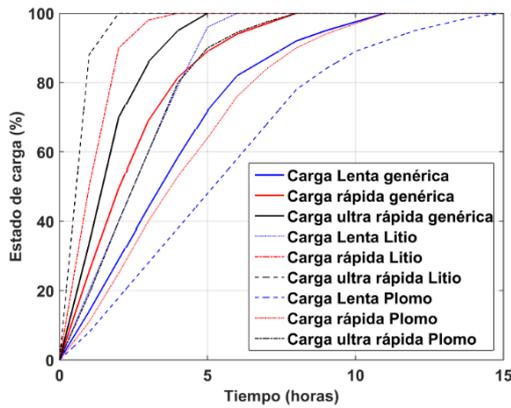


Figura 4. Estimación de curvas de carga genéricas en base a curvas de carga existentes de baterías de Litio y Plomo.

Las curvas genéricas de carga poseen un tiempo de recarga completa de la capacidad de carga de las baterías en periodos de tiempo más cortos que las curvas de carga de baterías de Pb-Ácido y en periodos de tiempo más largos que las curvas de carga de baterías de Iones de Litio, para cada tipo de carga, debido a que éstas curvas son en base a las curvas características de carga de las dos baterías en los diferentes tipo de carga, el comportamiento genérico de las baterías de EVs se determina por la desviación estándar entre cada tipo de carga y batería, llegando de esta manera a obtener el comportamiento de carga genérico de baterías de EVs, mediante una ecuación polinómica de grado cinco en base a datos estadísticos como se muestra en la ecuación (3).

$$f(t) = -0.3958t^5 + 5.5t^4 - 27.02t^3 + 50t^2 + 5.4167t + k \quad (3)$$

Donde el valor de la constante k varía dependiendo el tipo de carga que se desee simular, siendo $k = 0$ para carga lenta, $k = 10$ para carga rápida y $k = 30$ para carga ultra rápida.

En la Figura 5 se muestran los tiempos que se demoran las curvas de carga genéricas en cargarse al 100%, en carga lenta, rápida y ultra rápida.

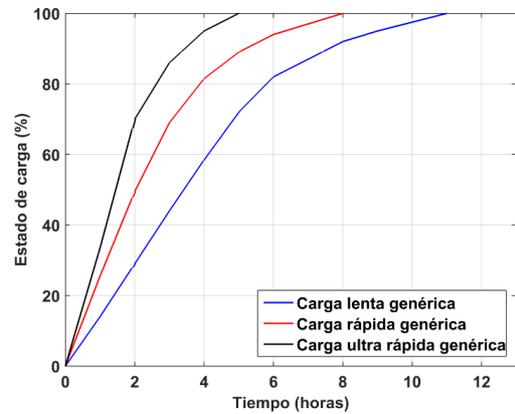


Figura 5. Curvas genéricas de carga de baterías de EVs

En base a estas curvas se analizará el comportamiento de las redes de distribución al ingresar la carga de los EVs.

2.5 Modelo del Algoritmo Húngaro

El modelo Húngaro es un algoritmo creado para resolver problemas de asignación, mediante el teorema sobre elementos ceros de una matriz, este algoritmo se basa en teoría en un plan de asignación óptimo, asignando una sola tarea de un grupo de tareas a un solo individuo de un grupo de individuos, basándose en la eficiencia que posea cada individuo para resolver cada tarea [48].

El algoritmo Húngaro y algunos algoritmos heurísticos como: el Algoritmo de colonia de hormigas, el Algoritmo de enjambre de partículas, o

el Algoritmo genético son heurísticas que se utilizan por lo general para resolver problemas de asignación de alta complejidad. El algoritmo se basa en la teoría de que el plan de asignación óptimo no cambiará más que un número constante de filas o de columnas de la matriz de eficiencia [48].

El procedimiento de un algoritmo Húngaro es básicamente un proceso de seis pasos los cuales se detallan a continuación:

1) Paso 1: Se construye la matriz de eficiencias del problema de asignación (M_1), en la misma que se detalla la eficiencia que tiene cada individuo para realizar todas las tareas. Ésta matriz debe ser de dimensiones $n \times n$.

2) Paso 2: Todos los elementos de cada fila de la matriz de eficiencias se deben restar para el mínimo de cada fila, creando nuevamente una matriz M_2 .

3) Paso 3: Todos los elementos de cada columna de la matriz M_2 se deben restar para el mínimo de cada columna, formándose una nueva matriz M_3 .

4) Paso 4: Todos los elementos cero de la matriz M_3 deben ser cubiertos por líneas rectas, cubriendo la mayor cantidad de ceros con la menor cantidad de líneas, si el número de líneas es igual al tamaño de la matriz M_3 , avanzar al paso 6, de lo contrario, seguir al paso 5.

5) Paso 5: A todos los elementos de la matriz M_3 que no estén cubiertos por líneas se los debe restar para el mínimo de los elementos no cubiertos; todos los elementos de la matriz M_3 que son cubiertos por dos líneas, es decir, se encuentran en la intersección de dos líneas se deben sumar con el mínimo de los elementos no cubiertos formándose una nueva matriz M_4 . Luego se reemplaza la matriz M_4 por la matriz M_3 y se vuelve a la comparación del paso 4.

6) Paso 6: El plan de asignación óptimo se puede obtener asignando las tareas a cada individuo en base a la ubicación de elementos cero de la matriz M_3 .

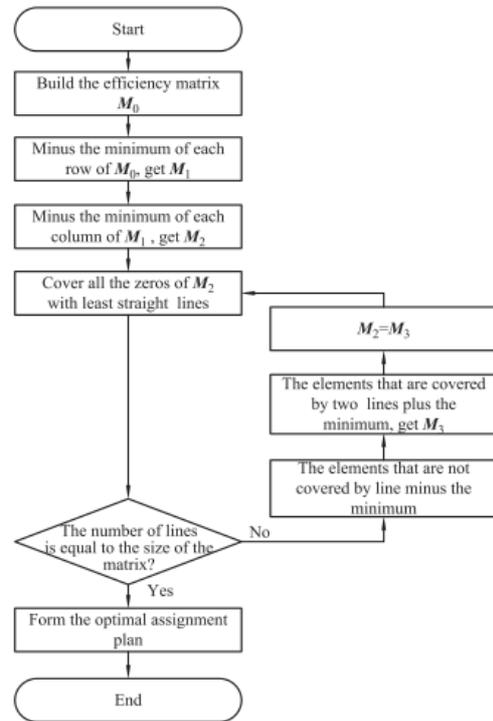


Figura 6. Diagrama de flujo del Algoritmo Húngaro [48].

En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo del Algoritmo Húngaro, en el cuál se pueden resumir todos los pasos mencionados anteriormente.

3. Modelamiento

El principal conflicto que se presenta en el modelamiento de los perfiles de carga y voltaje de una estación de recarga de EVs es el alto nivel de incertidumbre sobre el aumento de demanda por la recarga de baterías, esto depende del número de EVs que ingresen a la estación de recarga y de las características de las baterías de los mismos, considerando que actualmente existe una cantidad considerable de EVs de diferentes fabricantes en el mercado y cada uno con características distintas en la capacidad de sus baterías como se muestra en la Tabla 3.

El modelamiento y análisis se hacen tomando como base una estación de recarga de EVs con cuatro bahías de recarga, las cuales pueden funcionar a carga lenta, carga rápida o carga ultra rápida.

3.1 Perfiles de carga y voltaje mediante heurística en base al Algoritmo Hungariano.

El algoritmo Hungariano es un modelo de optimización que se basa en una matriz de dimensiones $n \times n$, conociendo que el número de bahías son cuatro, entonces la cantidad máxima de EVs que pueden ingresar se limita a ese valor, por otro lado al ser un análisis por cada hora existirá un número aleatorio de EVs que se presenten por hora pudiendo llegar a tener escenarios que no existan EVs, como pueden existir hasta máximo cuatro EVs.

En base a esta aleatoriedad de la cantidad de EVs depende la cantidad de carga a ingresar a la red, por lo cual la heurística propuesta es capaz de elegir aleatoriamente la cantidad de EVs que ingresan por cada hora a la estación de recarga (máximo 4), además de elegir aleatoriamente en base al número de EVs seleccionados, cuales son los vehículos que van a ingresar tomando nuevamente de forma aleatoria a los vehículos mostrados en la Tabla 3, con esto se garantiza un análisis genérico por cada hora.

El Algoritmo Hungariano clásico se basa en una matriz de eficiencia de tiempo para que n individuos realicen n tareas, formándose una matriz cuadrada, a diferencia de la heurística propuesta que toma como matriz principal a la matriz de afectación a la red, en donde se indica por cada vehículo cual es el porcentaje de afectación en cada tipo de carga por bahía.

La función objetivo propuesta en la heurística es minimizar el porcentaje de afectación a la red por la inserción de carga EVs, considerando que cada EV puede cargarse en cualquier tipo de carga.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n CV_{ij} * B_{ij} \quad (4)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{i=1}^n B_{ij} = 1, & j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n B_{ij} = 1, & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

Donde CV_{ij} es el porcentaje de afectación del EV por cada tipo de carga disponible en la estación de recarga y B_{ij} representa si al EV i se ha asignado cargarse mediante la carga j . A cada EV que ingrese a la estación de servicio se le asigna únicamente una bahía de carga con un tipo de carga, es importante mencionar que para el caso de estudio se han fijado que la bahía uno funciona con el tipo de carga lenta, la bahía dos funciona con carga rápida y las bahías tres y cuatro funcionan con carga ultra rápida, esta consideración se ha propuesto con el fin de poder despachar a los EVs de forma rápida, pero además sin afectar a la red de forma significativa. Para llenar la matriz principal de afectación es necesario poseer datos de la potencia que consume cada EV en carga lenta, rápida y ultra rápida y el periodo de tiempo de carga. Además que viene siendo una matriz de dimensiones fijas de cuatro por cuatro, si la aleatoriedad del número de EVs es menor a cuatro, entonces las filas faltantes se completan con ceros, ya que el algoritmo Hungariano acepta únicamente matrices cuadradas.

$$CV_{ij} = \frac{P_{ij}}{t_{cij} * P_{med}} \quad (6)$$

Donde CV_{ij} es el porcentaje de afectación de cada EV en cada tipo de carga, P_{ij} es la potencia de cada EV en cada tipo de carga, t_{cij} es el tiempo de carga por tipo de carga y P_{med} es el promedio de potencia de todos los EVs que se muestran en la Tabla 3.

En la ecuación (6) se muestra como la heurística va formando la matriz de afectación para posteriormente

optimizarla mediante el algoritmo Húngaro.

$$P_0 = \begin{bmatrix} CV_{11} & CV_{12} & \dots & CV_{1n} \\ CV_{21} & CV_{22} & & CV_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ CV_{n1} & CV_{n2} & \dots & CV_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

En (7) se visualiza la forma de la matriz principal de los porcentajes de afectación en cada carga y por cada EV, considerando que las columnas representan a las bahías de carga que son fijas y las filas representan al número de EV que por aleatoriedad se escojan.

Una vez completa la matriz principal de los porcentajes de afectación, se realiza la optimización mediante el algoritmo Húngaro, siguiendo el orden de pasos de este tipo de algoritmo.

A todos los elementos de cada fila de la matriz P_0 se debe restar el mínimo de cada fila, consiguiendo alterar la matriz principal como se muestra en la ecuación (8).

$$CV_{ij}^1 = CV_{ij} - \min(CV_{i1}, CV_{i2}, \dots, CV_{in}) \quad (8)$$

Donde CV_{ij}^1 son los elementos de la matriz principal alterada P_1 . Posteriormente a todos los elementos de cada columna de la matriz P_1 se debe restar el mínimo de cada columna, nuevamente alterando la matriz P_1 como se muestra en la ecuación (9).

$$CV_{ij}^2 = CV_{ij}^1 - \min(CV_{1j}^1, CV_{2j}^1, \dots, CV_{nj}^1) \quad (9)$$

Donde CV_{ij}^2 son los elementos de la matriz P_2 . Logrando tener una matriz con un gran número de ceros, al trazar la menor cantidad de líneas que cubran la mayor cantidad de ceros, si el número de líneas es igual a la dimensión de la matriz, se obtiene directamente la solución, caso contrario, a los números diferentes de cero de la matriz P_2 se debe restarles el mínimo de ellos, y a los ceros que sean la intersección de dos líneas se le suma el mismo valor, creando una nueva matriz, la misma que será la matriz

de la solución como se muestra en la ecuación (10).

$$\begin{cases} CV_{ij_NC}^3 = CV_{ij_NC}^2 - CV_{\min_NC} \\ CV_{ij_2C}^3 = CV_{ij_2C}^2 + CV_{\min_NC} \end{cases} \quad (10)$$

Donde $CV_{ij_NC}^2$ son los elementos diferentes de cero de la matriz P_2 , $CV_{ij_2C}^2$ son los ceros que intersecan dos líneas de la matriz P_2 y CV_{\min_NC} es el valor mínimo de los elementos diferentes de cero de la matriz P_2 .

3.2 Seudocódigo

En base al modelo matemático de la heurística en base al Modelo Húngaro se puede determinar la curva de demanda de energía eléctrica y el perfil de voltaje en cada hora de tal manera que no exista un alto porcentaje de afectación a la red de distribución.

Tabla 4: Seudocódigo de heurística en base al Modelo Húngaro.

Perfil de carga por Modelo Húngaro
Inicializa t (0:1:24)
Inicializa Po, Pij, Pmed
Primero: genera aleatoriedades y calcula porcentajes de afectación
$CV_{ij} = \frac{P_{ij}}{t_{cij} * Pmed}$
Segundo: construir matriz de afectación Po
For s=1-24
$P_0 = \begin{bmatrix} CV_{11} & CV_{12} & \dots & CV_{1n} \\ CV_{21} & CV_{22} & & CV_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ CV_{n1} & CV_{n2} & \dots & CV_{nn} \end{bmatrix}$
Tercero: generar matriz P1
CV_{ij}^1 $= CV_{ij} - \min(CV_{i1}, CV_{i2}, \dots, CV_{in})$
Cuarto: genera matriz solución
CV_{ij}^2 $= CV_{ij}^1 - \min(CV_{1j}^1, CV_{2j}^1, \dots, CV_{nj}^1)$ $CV_{ij_NC}^3 = CV_{ij_NC}^2 - CV_{\min_NC}$ $CV_{ij_2C}^3 = CV_{ij_2C}^2 + CV_{\min_NC}$
end For
Quinto: Gráfica
Plot (t, Po(i))

Los perfiles de demanda y voltaje de la estación de recarga sin la inserción de EVs se muestra en la figura 7.

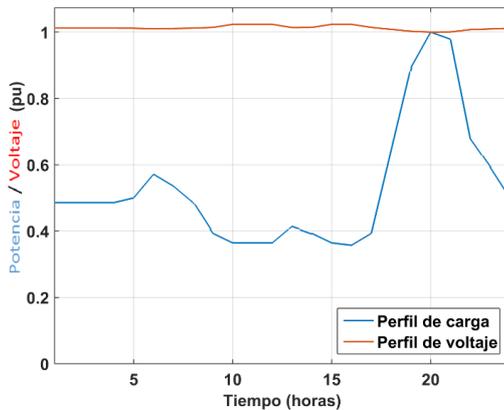


Figura 7. Perfiles de carga y voltaje de una estación de recarga sin ingreso de EVs.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento del perfil de demanda de una estación de recarga de EVs, en donde se considera carga de electrodomésticos e iluminación, se puede observar que el perfil de tensión es básicamente estable respecto al perfil de carga, es decir, no existen fluctuaciones de voltaje.

4. Análisis de resultados

Para analizar los resultados de este estudio que tiene como finalidad optimizar el ingreso de carga de EVs a las redes, utilizando una heurística en base al modelo del algoritmo Húngaro para disminuir el porcentaje de afectación a las redes de distribución. Se analizan diferentes escenarios reales de ingreso de carga de EVs por cada hora, tomando en consideración que pueden ingresar el total de EVs a la estación de servicio, como no puede ingresar ningún EV, es decir, con un alto porcentaje de incertidumbre de ingreso de carga; los EVs que ingresen a la estación de servicio también son elegidos aleatoriamente, logrando obtener de esta manera una gestión inteligente de carga para una estación de

servicio de cuatro bahías mediante la heurística propuesta.

4.1 Caso de estudio

Para analizar el comportamiento de la red de distribución con la inserción de carga de EVs se toma como muestra el comportamiento de los perfiles de tensión y carga de una electrolinera, los mismos que se encuentran en base a los datos de demanda actual, representados en la Figura 7, siendo una pequeña muestra del comportamiento de la demanda de las redes de distribución, se puede observar que la curva de carga de la electrolinera es similar a una curva típica de carga residencial, motivo por el cual el perfil de voltaje se ve afectado en horas de demanda pico, en el caso de inserción de la carga de EVs bajo estos mismos parámetros la red no sería capaz de abastecer a la demanda, ya que existiría un ingreso de carga descontrolado como se muestra en la Figura 8, en donde se ingresa cuatro EVs de diferentes características por cada hora. Inicialmente para abastecer la demanda base se necesita un total de energía de 1.71 MWh por día, y con el ingreso sin gestión de carga de EVs la energía necesaria para abastecer la demanda por día aumenta a 4.76 MWh, representando un aumento de carga del 277.7 % respecto a la demanda base, ocasionando una gran afectación a la red.

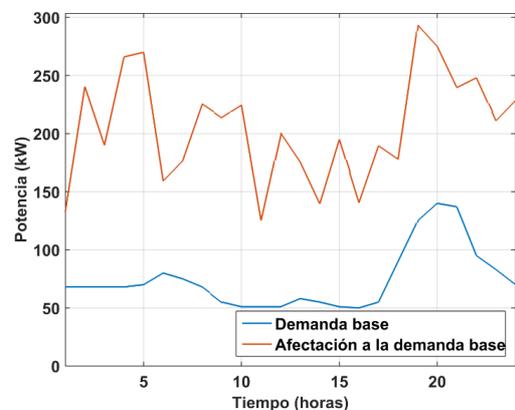


Figura 8. Perfil de carga con el ingreso de carga de EVs sin gestión de carga.

En la Figura 8 se muestra el escenario de ingreso de carga de EVs más crítico, asumiendo que en todas las horas van a ingresar al centro de recarga cuatro vehículos aleatorios. La heurística propuesta es capaz de elegir aleatoriamente el número de vehículos que ingresan por cada hora, en base a un número aleatorio que puede variar entre cero y cuatro, posteriormente a partir del primer número aleatorio que representa la cantidad de vehículos eléctricos se escogen nuevamente de forma aleatoria a los EVs seleccionados del total de existentes en el mercado como se muestra en la Tabla 3.

Debido a que el ingreso de carga de EVs y los horarios de carga de los mismos tienen un alto nivel de incertidumbre, es posible un escenario crítico para la red de distribución, en caso que el número de EVs seleccionados sea el máximo y la carga de los EVs se los realice en horario de demanda pico. Para evitar este tipo de escenario es necesario hacer un plan de control de carga inteligente para la inserción de los EVs, y de esta manera disminuir el porcentaje de afectación a las redes de distribución y se pueda cumplir con la confiabilidad del sistema. Dependiendo el tipo de EVs que ingresen a un centro de recarga, dependerá el nivel de afectación a la red de distribución, ya que cada EV posee características distintas en la capacidad de sus baterías, por este motivo, también afectarán de manera distinta a la red, en la Figura 9 se muestra un escenario de ingreso de carga de un EV de la marca Audi con alto nivel de afectación a la red ya que es el EV que mayor potencia posee, el caso opuesto es el ingreso de carga del EV de la marca Renault Twisy, que por sus características de baterías el porcentaje de afectación a la red es mínimo, apenas es el 6.42 % respecto al de mayor afectación, y una media entre estos para determinar un escenario más real.

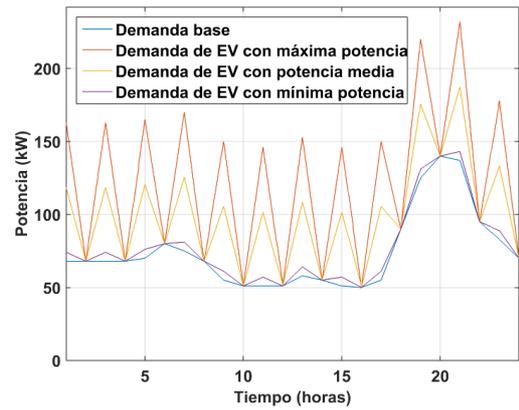


Figura 9. Ingreso de carga de tres EV con distintas características y distinto nivel de afectación.

Para obtener un escenario más real, considerando que en una determinada hora la estación de recarga puede estar con el máximo de EVs permitidos, pero a la hora siguiente no puede ocurrir nuevamente este escenario e incluso pueden existir horas en las que no se tenga ningún EV en la estación de recarga, el modelamiento propuesto analiza este tipo de escenario, como se muestra en la Figura 10, en donde se puede observar la incertidumbre de ingreso de carga de EVs, ya que en horas no existe ningún porcentaje de afectación a la red, y en otras un alto nivel de afectación, inclusive en horas pico de demanda, en el escenario en estudio la cantidad de energía necesaria para cubrir con la demanda se reduce en un 77.8 % respecto al escenario anterior, es decir, 3.42 MWh.

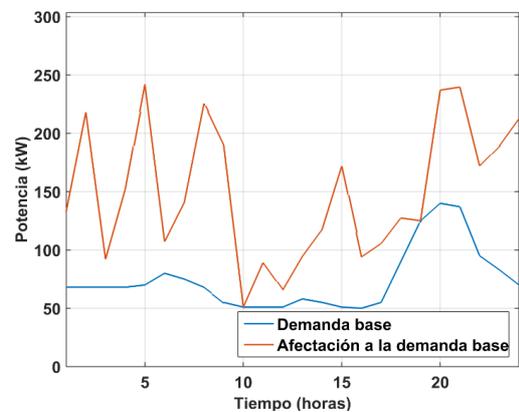


Figura 10. Ingreso aleatorio de carga de EVs, sin gestión de carga.

Una vez analizado todos los posibles escenarios del ingreso de carga de EVs sin gestión de carga, se ha evidenciado que en cualquier caso la afectación en las redes de distribución sería sumamente alta, ya que en el segundo escenario el porcentaje de afectación a la red respecto a la demanda base sería del 199.59%, y en estos casos la infraestructura actual de las redes de distribución no soportaría el ingreso de esta nueva carga.

4.2 Resultados de la heurística.

El modelo de optimización propuesto busca disminuir el impacto del ingreso de carga de EVs mediante la gestión de carga en una electrolinera, ésta gestión de carga se la realiza mediante el principio del modelo Húngaro, asignando de manera óptima el tipo de carga a cada EV que se encuentre en la electrolinera, considerando las veinte y cuatro horas de un día y todas las posibles aleatoriedades de ingreso de EVs por hora.

En la Figura 11 se muestra el ingreso de carga de EVs optimizado, con gestión de carga en la electrolinera en estudio, logrando notoriamente una disminución considerable del nivel de afectación a las redes de distribución al ingresar la carga de EVs a la red, es importante mencionar que en horarios de demanda valle, es decir, desde las 22 horas hasta las 5 horas y si existen hasta dos EVs en la electrolinera se asignará únicamente carga ultra rápida, con la finalidad de aplanar de alguna forma la curva de demanda, comportándose la carga de EVs como una opción de respuesta a la demanda.

Analizando el mismo escenario pero con gestión de carga para el ingreso de EVs se puede observar que el porcentaje de afectación a la red es mínimo respecto al ingreso de EVs sin gestión de carga, afectando a la demanda base con apenas un 33.18%, necesitando un total de energía por día de 2.28 MWh para cubrir la nueva demanda.

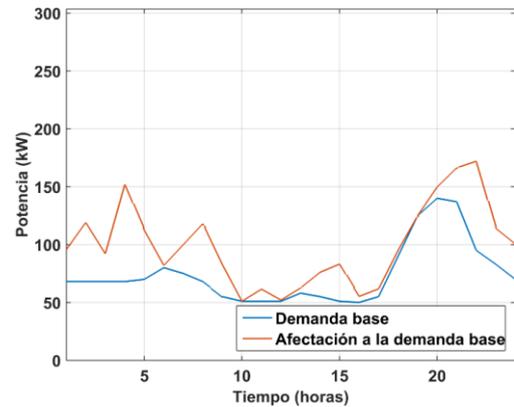


Figura 11. Ingreso de carga de EVs a la red de distribución con gestión de carga.

Comparando la Figura 8 con la Figura 11 se puede evidenciar que existe una reducción importante del nivel de afectación a la red, logrando reducir el porcentaje de afectación de 177.7% al 33.18%, además se puede visualizar que el plan de gestión de carga propuesto en la heurística disminuye el ingreso de carga en horas pico de demanda, e ingresando nuevas cargas en horas valle; teniendo como resultado un sistema óptimo de carga de EVs, el mismo que se puede aprovechar como un sistema de respuesta a la demanda.

Un indicativo importante de la confiabilidad de un sistema eléctrico son los perfiles de voltaje, en este caso se realiza el análisis de los perfiles de voltaje en relación a la demanda base como se visualiza en la Figura 7, de la misma forma se analiza cómo se comportan los perfiles de tensión en el ingreso de carga de EVs sin optimizar ni con gestión de carga, y cómo se comportan los perfiles de tensión una vez que se ha asignado correctamente el tipo de carga de EVs, en la Figura 12 se observa el comportamiento tanto del perfil de demanda de un sistema sin gestión de carga de EVs, como de los perfiles de voltaje con y sin gestión de carga de EVs, haciendo una comparación del sistema optimizado y sin optimizar, en base a sus perfiles de voltaje, evidenciando que los niveles de

afectación entre un escenario respecto al otro es considerable.

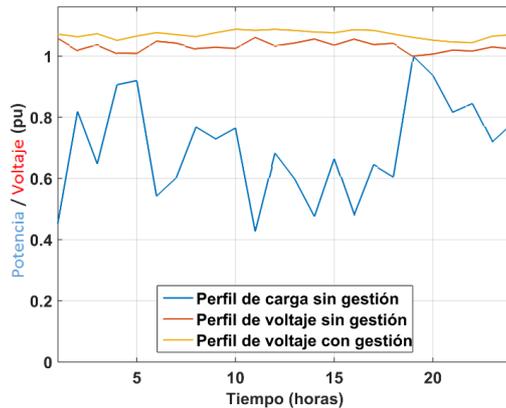


Figura 12. Comparación del comportamiento de perfiles de tensión y carga sin optimizar.

Se puede observar que el perfil de voltaje de un sistema sin gestión de carga de EVs posee un gran número de fluctuaciones, siendo este un indicativo de la inestabilidad del sistema. Por otro lado el perfil de voltaje del sistema con gestión de carga posee un comportamiento más estable y se mantiene dentro de los límites permitidos para asegurar la calidad y confiabilidad del sistema eléctrico.

En la Figura 13 se muestra los perfiles de voltaje de los sistemas optimizado y sin optimizar, respecto al perfil de demanda de un sistema con gestión de carga de EVs, realizando una comparación entre el comportamiento de los perfiles de tensión, se puede observar que el perfil de voltaje de un sistema sin gestión de carga es básicamente inestable, ya que decrece de manera abrupta, con respecto al perfil de voltaje de un sistema con gestión de carga, disminuyendo hasta en un 15% los niveles de tensión, lo que significa que los perfiles de tensión estarían incumpliendo con la normativa de seguridad correspondiente que permite máximo la variación de voltaje en un $\pm 5\%$. De ésta manera se puede mencionar que el sistema de gestión de carga para disminuir el porcentaje de afectación a la red por la inserción de EVs propuesto en éste documento es

exitoso, ya que logra disminuir el porcentaje de afectación a las redes en más de un 144.52 %, liberando un total de energía de 2.476 MWh.

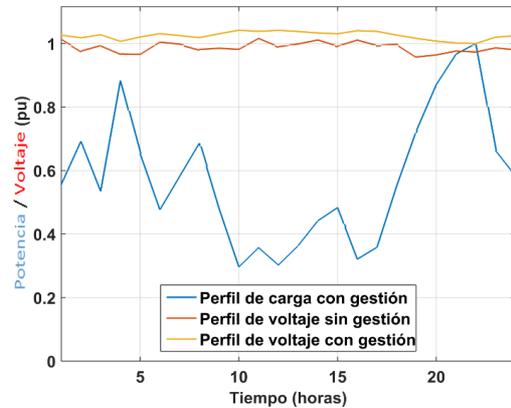


Figura 13. Comparación del comportamiento de perfiles de tensión y carga del ingreso de carga de EVs optimizado.

Es importante mencionar que el análisis propuesto en este documento es considerando que el total de energía necesaria para abastecer la carga de EVs se toma directamente de las redes de distribución, sin embargo existe la posibilidad para mejorar la gestión de carga propuesta en este documento, mediante la utilización de energías no convencionales como eólica, solar y bancos de baterías, las mismas que ayudarían a mitigar aún más el porcentaje de afectación a la red por medio de un despacho óptimo de recursos, mejorando el sistema de gestión de carga propuesto.

5. CONCLUSIONES

El estudio de los perfiles de voltaje en base a la demanda real, nos muestra cómo se puede llegar a comportar la red de distribución, y de esta manera poder planificar la expansión de redes o robustecer las mismas en caso que el análisis no sea favorable en los resultados como es el caso de la Figura 8, por otro lado este estudio nos permite visualizar de igual manera que la carga de EVs se puede comportar como una solución de la respuesta a la demanda si

esta carga se la realiza en horarios establecidos como es el caso de la Figura 11.

Si la red actual de las empresas distribuidoras no abastece de energía suficiente para cubrir la carga con inserción de EVs se debe buscar alternativas realizando una planificación de carga de los EVs, ya que conforme avanza el tiempo el número de EVs en el mercado de transporte aumentará significativamente.

La implementación de nuevas tecnologías afectan directamente a las redes eléctricas, por tal motivo es necesario analizar nuevos métodos de gestión de la demanda para tratar de reducir al mínimo la afectación a las redes de distribución, esencialmente evitar el ingreso de nuevas cargas en horarios de manda pico y por lo contrario se puede utilizar a las nuevas cargas como una opción de respuesta a la demanda si estas cargas nuevas se las ingresa en horas de baja demanda, logrando tener sistemas eléctricos más estables.

Mediante la heurística en base al modelo Hungariano se pudo verificar que la penetración de la carga de EVs en las redes de distribución es posible sin afectar de manera abrupta a las redes existentes, aplicando programas de gestión de carga con horarios establecidos para no afectar la confiabilidad del sistema eléctrico.

Los resultados de la heurística de optimización propuesta para la óptima respuesta a la demanda mediante la inserción de EVs sin afectar en gran porcentaje los perfiles de carga y tensión son altamente favorables, entonces, se puede mencionar que las heurísticas de optimización de asignación se pueden utilizar para este tipo de análisis.

A pesar que el impacto ambiental de los EVs es nula, en nuestro país no existe una motivación para cambiar los vehículos tradicionales por eléctricos, además actualmente los costos de adquisición de un EV son sumamente elevados respecto a vehículos de combustión.

6. Referencias

- [1] A. Neagoe-Stefana, M. Eremia, L. Toma, and A. Neagoe, "Impact of charging Electric Vehicles in residential network on the voltage profile using Matlab," *Adv. Top. Electr. Eng. (ATEE), 2015 9th Int. Symp.*, pp. 787–791, 2015.
- [2] E. M. Garcia and I. Isaac, "Demand response systems for integrating energy storage batteries for residential users," in *Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM), IEEE*, 2016.
- [3] A. Kavousi-Fard and A. Khodaei, "Efficient integration of plug-in electric vehicles via reconfigurable microgrids," *Energy*, vol. 111, pp. 653–663, 2016.
- [4] Z. Yang, K. Li, and A. Foley, "Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 396–416, 2015.
- [5] E. M. García, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, "Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlos algorithms and Markov Chains (MCMC)," *51st Int. Univ. Power Eng. Conf.*, no. Mcmc, pp. 1–6, 2016.
- [6] Á. R. Mateo, "Evaluación del impacto de los vehículos eléctricos en las redes de distribución," *Univ. Pontif. comillas. Esc. técnica Ing. Ing. Ind.*, p. 143, 2010.
- [7] E. M. Garcia, A. Águila, I. Isaac, J. W. González, and G. López, "Analysis of Voltage Profile to determine Energy Demand using Monte Carlos algorithms and Markov Chains (MCMC)," in *51st International Universities' Power*

- Engineering Conference*, 2016, no. Mcmc.
- [8] A. Aljanad, A. Mohamed, and H. Shareef, "Impact study of plug-in electric vehicles on electric power distribution system," *2015 IEEE Student Conf. Res. Dev.*, pp. 339–344, 2015.
- [9] A. Mohsenzadeh, C. Pang, S. Pazouki, and M. Haghifam, "Optimal siting and sizing of electric vehicle public charging stations considering smart distribution network reliability," *2015 North Am. Power Symp. NAPS 2015*, pp. 1–6, 2015.
- [10] S. Shao, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 624–631, 2011.
- [11] A. F. Ali, M. Abdel-Akher, Z. Ziadi, and T. Senjyu, "Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicle for voltage profile enhancement of distribution systems," *Proc. Int. Conf. Power Electron. Drive Syst.*, pp. 399–404, 2013.
- [12] A. Kavousi-fard, A. Abbasi, M. Rostami, and A. Khosravi, "Optimal distribution feeder reconfiguration for increasing the penetration of plug-in electric vehicles and minimizing network costs," *Energy*, vol. 93, pp. 1693–1703, 2015.
- [13] E. M. Garcia, "Diagnóstico de la demanda de consumo de energía eléctrica en un smart home, enfocado en el sector residencial de Quito, durante el año 2015, Barrio la Kennedy. Caracterización y optimización del consumo de energía eléctrica," Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2016.
- [14] G. Morichetti, G. Oggier, G. R. Bossio, C. H. De Angelo, and G. O. García, "Implementación de un convertidor reductor-elevador bidireccional para vehículos eléctricos g," *Converter*, no. November 2015, pp. 538–543, 2002.
- [15] B. Kim, "Smart charging architecture for between a plug-in electrical vehicle (PEV) and a smart home," *2013 Int. Conf. Connect. Veh. Expo, ICCVE 2013 - Proc.*, pp. 306–307, 2013.
- [16] J. García-Villalobos, I. Zamora, J. I. San Martín, F. J. Asensio, and V. Aperribay, "Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: A review of smart charging approaches," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 717–731, 2014.
- [17] D. Carrión, Garcia E Marcelo, J. W. González, and G. J. López, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución," no. January, 2017.
- [18] X. Luo and K. W. Chan, "Real-time scheduling of electric vehicles charging in low-voltage residential distribution systems to minimise power losses and improve voltage profile," *Gener. Transm. Distrib. IET*, vol. 8, no. 3, pp. 516–529, 2014.
- [19] H. Turker, A. Florescu, S. Bacha, and D. Chatroux, "Load rates of low voltage transformers and medium voltage profile assessments on a real distribution electric grid based on average Daily Load Profile (DLP) of a housing for a high penetration of Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)," *2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2011*, 2011.

- [20] J. Silvente and M. Graells, "An optimization model for the management of energy supply and demand in smart grids," *Energy Conf. ...*, pp. 368–373, 2012.
- [21] Y.-W. Chen and J. M. Chang, "Fair Demand Response with Electric Vehicles for the Cloud Based Energy Management Service," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [22] A. Paudel, W. Supingklad, W. Ongsakul, and A. O. Function, "Distribution Network Reconfiguration to Support Electric Vehicles Integration," no. September, pp. 14–16, 2016.
- [23] S. S. Reddy, P. R. Bijwe, and A. R. Abhyankar, "Optimum day-ahead clearing of energy and reserve markets with wind power generation using anticipated real-time adjustment costs," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 71, pp. 242–253, 2015.
- [24] N. Mahmoudi, T. K. Saha, and M. Eghbal, "Modelling demand response aggregator behavior in wind power offering strategies," *Appl. Energy*, vol. 133, pp. 347–355, 2014.
- [25] A. G. Peralta Sevilla and F. Amata Fernández, "Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina," *Rev. Educ. en Ing.*, vol. 8, pp. 1–14, 2013.
- [26] G. Ayala and E. M. Garcia, "Respuesta de la demanda eléctrica basado en el modelo Markoviano," Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [27] L. Barragan and E. M. Garcia, "Modelo multiobjetivo de planificación de transmisión bajo incertidumbre basado en una optima respuesta de la demanda," Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [28] J. Soares, Z. Vale, H. Morais, and N. Borges, "Demand Response in Electric Vehicles Management Optimal Use of End-User Contracts," *Proc. 2015 Fourteenth Mex. Int. Conf. Artif. Intell.*, no. 12004, pp. 122–128, 2015.
- [29] E. Veldman and R. A. Verzijlbergh, "Distribution grid impacts of smart electric vehicle charging from different perspectives," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 333–342, 2015.
- [30] P. Daniel Jacho Topón autorizo and P. Daniel Jacho Topón, "Modelamiento para el almacenamiento y aporte de energía a la red en horas pico de demanda mediante un prototipo," Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [31] T. Mukai, S. Igari, and T. Namerikawa, "Optimal Energy Management for Smart Grid System Considering Battery Characteristics," *Electr. Eng. Japan*, vol. 194, no. 1, pp. 18–26, 2016.
- [32] J. C. Viera Pérez, *CARGA RÁPIDA DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD. ANÁLISIS, SÍNTESIS Y COMPARACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS*. 2003.
- [33] Torres López Alejandro, "Sistema de carga de paneles solares con baterías de autos eléctricos.," INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, 2013.
- [34] P. Moreno and E. M. Garcia, "Respuesta a la Demanda para Smart Home Utilizando Procesos Estocásticos," *I+D Tecnológico*, 2016.

- [35] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. M. García, and R. Hincapié, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016.
- [36] B. Oña and E. M. García, “Uso eficiente del consumo de energía eléctrica residencial basado en el método Montecarlo,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [37] M. Ortiz and E. M. García, “Pronóstico de la demanda eléctrica residencial basado en el modelo de regresión adaptativa multivariante spline (MARS),” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [38] M. Simbaña and E. M. García, “Optimización mediante el método de Montecarlo de la demanda eléctrica residencial,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [39] D. Tasinchana and E. M. García, “Predicción con series de tiempo para la optimización de la demanda eléctrica residencial,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [40] A. Aljanad, A. Mohamed, and H. Shareef, “Impact study of plug-in electric vehicles on electric power distribution system,” in *2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, 2015, pp. 339–344.
- [41] N. B. Arias, J. F. Franco, M. Lavorato, and R. Romero, “Metaheuristic optimization algorithms for the optimal coordination of plug-in electric vehicle charging in distribution systems with distributed generation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 351–361, 2017.
- [42] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, “Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 456–467, 2011.
- [43] S. S. Raghavan, “Impact of demand response on electric vehicle charging and day ahead market operations,” *2016 IEEE Power Energy Conf. Illinois, PECEI 2016*, pp. 1–7, 2016.
- [44] J. Moreno herrero, “Impacto del vehiculo electrico sobre las redes de distribución,” *Esc. Técnica Super. Ing. Minas, Dep. Sist. Energéticos*, pp. 1–127, 2013.
- [45] C. Morente F., “Análisis y modelado del comportamiento de baterías para vehículos eléctricos,” 2015.
- [46] Electromaps, “Características, equipamiento, fotos del nuevo Audi E-Tron Quattro.” [Online]. Available: <https://www.electromaps.com/coches-electricos/audi/e-tron-quattro>. [Accessed: 26-Jun-2017].
- [47] J. L. Balenzategui, “Aproximación al Modelado de los Procesos de Carga y Descarga en Baterías Electroquímicas mediante Ecuaciones Integrales,” p. 46, 1999.
- [48] T. Li, Y. Li, and Y. Qian, “Improved Hungarian algorithm for assignment problems of serial-parallel systems,” *J. Syst. Eng. Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 858 – 870, 2016.