
FACILITANDO EL INGRESO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL SISTEMA METROPOLITANO DE DISTRIBUCION DE LA ANDE: ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA DEMANDA Y GENERACIÓN DISTRIBUIDA

José Benítez, Wilson Mosqueira, Daniel Ríos

Universidad Nacional de Asunción – Facultad Politécnica

Paraguay

Resumen

A día de hoy la mayor parte de la energía consumida mundialmente tiene su origen en combustibles fósiles como el petróleo, el carbón o el gas, es decir, existe una fuerte dependencia energética de fuentes no renovables que va en aumento debido a la también creciente demanda energética. Esta alta tasa de utilización provoca diferentes impactos en varios campos ya sea ambiental, económico y de movilidad. En la actualidad, el sistema de transporte en el Paraguay es totalmente dependiente de combustibles fósiles (gasolina y diésel); los motores de combustión interna ocasionan altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) lo cual además generan problemas respiratorios en la población y causan daños a la capa de ozono por emisiones de CO₂. En el ámbito económico, están los gastos y efectos en la economía para la producción de derivados del petróleo para su utilización en medios de transporte. El vehículo eléctrico está llamado a ser el sustituto natural del vehículo convencional y las energías renovables están llamadas a ser sustitutas naturales de las energías no renovables. La electrificación del transporte puede traer beneficios ambientales, de salud y económicos cuando se combina con la cartera de generación de electricidad de Paraguay, que presenta bajas emisiones de carbono al tratarse en su totalidad por electricidad generada a través de centrales hidroeléctricas. La presente investigación tiene por finalidad realizar un estudio del impacto de la introducción de vehículos eléctricos en el sistema eléctrico de la ANDE en forma escalonada. Para determinar el impacto que tendría la implementación de este tipo de vehículos se seleccionan dos transformadores de distribución (PD) de zonas residenciales para determinar la forma de la curva de carga que presentan los usuarios sin la carga de los vehículos eléctricos, posteriormente partiendo de uno de los ensayos con vehículos eléctricos más grandes del mundo “My Electric Avenue” se estableció una curva de carga de los vehículos eléctricos siguiendo como premisa los hábitos de carga de los usuarios de vehículos eléctricos [1]. A través de herramientas de simulación de flujo de potencia, se han evaluado las simulaciones con distintos niveles de penetración de los vehículos eléctricos, en los cuales se determinó el número de vehículos que pueden ser introducidos en dichos transformadores, como carga sin sobrepasar los límites de funcionamiento de los transformadores de distribución ni de las líneas de distribución. Concluyéndose que el vehículo eléctrico puede ser introducido hasta en un 75% de penetración por PD sin alterar la capacidad del transformador ni de las líneas de distribución existentes, además de generar una evolución positiva del factor de carga, que conlleva el beneficio del incremento de los ingresos sin la necesidad de inversión en infraestructura adicional, ya que no solo mejora el desempeño del sistema a través del aumento del factor de carga, sino también se adecua al estilo de vida de la mayoría de los usuarios y a los patrones de utilización de sus vehículos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

1.1 Palabras clave

1. Batería 2. Curva de Carga 3. Impacto 4. Red Eléctrica 5. Vehículos

1. INTRODUCCION

En la actualidad, el sistema de transporte en el Paraguay es totalmente dependiente de combustibles fósiles (gasolina y diésel); los motores de combustión interna ocasionan altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), lo cual además generan problemas respiratorios en la población y causan daños a la capa de ozono [2], En Paraguay se estima que el 70 % de la contaminación urbana proviene de fuentes móviles por el uso masivo de los vehículos convencionales, cuya cifra es bastante considerable. El parque automotor del Paraguay está estimado en un total de 2,3 millones de unidades a agosto del año 2019, teniendo un crecimiento del 5,16% con respecto al año anterior. De este total, un 61,76% corresponde a automotores (1.459.692) y un 0,14% a autos antiguos (3.294). Cerca del 50% del parque automotor se distribuye en el departamento Central y Asunción, y el resto del 50% en todo el país [3]. Paraguay es uno de los pocos países en América Latina que mantiene un sistema integrado de monopolio público de electricidad hidroeléctrica que comprende casi el 100 % de la electricidad en el país, siendo uno de los mayores exportadores netos de electricidad del mundo.

Con este preámbulo nace la propuesta de realizar un análisis del impacto que ocasionara la introducción de los vehículos eléctricos en las redes de distribución de la ANDE, para de esta manera analizar la viabilidad de un ingreso escalonado de los vehículos eléctricos y por sobre todo si las costumbres de carga de los usuarios se adaptan a las prestaciones de los vehículos y sus consumos, verificando de esta manera si las redes de distribución toleraran estas costumbres o si se deberá realizar una inversión para satisfacer las prestaciones de los usuarios que adquieran vehículos eléctricos. El alcance específico que se quiere desarrollar en este proyecto consiste en a través de un cálculo exhaustivo y simulaciones, establecer diferentes escenarios de implementación del vehículo eléctrico sobre la red de baja y media tensión en términos de, por ejemplo, número de vehículos, hora y tipo de recarga.

2. OBJETIVO GENERAL

Analizar y proponer soluciones en los puestos de distribución (PD) que tendrá el impacto de la carga de los vehículos eléctricos buscando mejorar la utilización de la energía eléctrica disponible.

2.1 Objetivos específicos

- Comprender el comportamiento de la curva de carga de varios puestos de distribución (PD).
- Proponer varios modelos de carga de vehículos eléctricos que optimiza la utilización de la energía eléctrica disponible en los puestos de distribución (PD).
- Analizar los resultados obtenidos y demostrar cual propuesta logra la mayor eficiencia y minimiza los costos.

3. METODOLOGÍA

La metodología empleada para determinar el impacto de la carga de los vehículos eléctricos es la de analizar el comportamiento de la red de distribución de energía eléctrica desarrollando flujos de potencia, durante un periodo continuo de siete días seguidos y también con distintos niveles de demanda. Para validar el funcionamiento del modelo se realizaron un centenar de curvas de carga de

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

vehículos eléctricos que fueron adicionadas a las curvas de carga de los puestos de distribución ubicados en zonas urbanas del departamento central..

4. EL VEHÍCULO ELÉCTRICO [4]

Los vehículos eléctricos son impulsados por uno o más motores eléctricos, que emplean la energía eléctrica almacenada en baterías recargables y la transforma en energía cinética. A diferencia de los vehículos de combustión interna, que funcionan quemando combustible, un coche eléctrico obtiene la tracción de los motores eléctricos. Esta energía es almacenada en sistemas recargables, baterías, que luego consumen la energía almacenada durante su desplazamiento. El motor de un vehículo eléctrico puede ser de corriente alterna o de corriente continua.

4.1 Tipos de Recarga

El naciente escenario comercial del Vehículo Eléctrico establece diferentes opciones tecnológicas de recarga que se contemplan hoy en día, en la tabla I se observa la clasificación, se tiene en cuenta la potencia demandada a la red y por consiguiente el tiempo necesario para obtener una carga completa igualmente dicho tiempo dependerá de la capacidad de la batería que esté incorporada en cada vehículo, teniendo en cuenta esta salvedad podemos clasificar los modos de recarga de la siguiente manera.

Tabla I: Tipos de recarga [5]

Recarga Rápida	<ul style="list-style-type: none"> • 50 KW equivalente al 80 % de capacidad. • De 5 a 30 minutos.
Recarga Semi- Rápida	<ul style="list-style-type: none"> • 32 A, 220/380 V. • De 4 a 6 horas.
Recarga Lenta	<ul style="list-style-type: none"> • 16 A, 220/380 V. • De 5 a 8 horas.

5. EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA [6]

El sistema eléctrico de potencia(SET) es un conjunto de elementos que tiene como fin generar, transformar, transmitir, distribuir y consumir la energía eléctrica, de tal forma que se logre la mayor calidad al menor costo posible. La función del SEP es abastecer a todos los usuarios con energía eléctrica tan económicamente como sea posible, en la cantidad deseada y con un nivel aceptable de calidad, seguridad y confiabilidad. Un SEP se compone de tres partes o subsistemas fundamentales: generación o producción de la energía eléctrica, transmisión de la energía eléctrica y distribución de la energía eléctrica. El Puesto de distribución, normalmente conocido como PD, es un conjunto de instalaciones que sirve para transformar la energía eléctrica de media tensión a baja tensión. En este sitio se aloja el transformador de distribución que es el equipo más importante, el cual buscamos determinar qué efectos tendrá al recibir la adicción de la carga de los vehículos eléctricos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

5.1 Flujo de Potencia [7]

Los estudios de flujo de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas de potencia, así como de también en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. El resultado de las dos ecuaciones de la figura 1, proporciona la inyección de potencia activa y reactiva a través de una barra. Sin embargo, este sistema no puede ser resuelto por métodos tradicionales debido a que las ecuaciones no son lineales, por lo que se recurre generalmente a métodos numéricos iterativos. Para la realización de las simulaciones en este trabajado se utilizó el software Matpower: Matpower es un paquete de archivos de Matlab orientado a la solución de problemas de flujo de potencia, Flujo Óptimo de Potencia, estimación de estado, etc.

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \text{sen}(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)$$

Figura 1: Ecuaciones del Flujo de Potencia

5.2 Modelo del puesto de distribución en el software Matpower

Para realizar las simulaciones en el software Matpower se utilizó el siguiente modelo electric de la figura 3: En el software se introducen los datos de:

- Potencia base
- Datos de generación y cargas
- Datos de barra
- Datos de líneas
- Datos de costos de generación

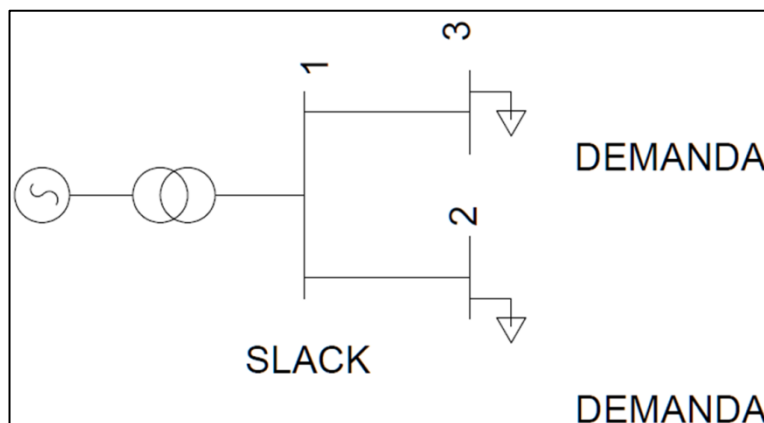


Figura 2: Modelo Eléctrico introducido en el software Matpower

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

5.3 Curva de carga residencial

Para el desarrollo de los flujos de potencia en cada hora de un día típico es necesario crear un modelo válido que refleje el comportamiento de un PD típico de zona residencial, mediante la colaboración del Departamento de Distribución de la ANDE se logró obtener las curvas reales de carga de 2 puestos de distribución de zonas residenciales ubicadas en Asunción y el departamento central. Los datos obtenidos son:

- Capacidad nominal de los transformadores.
- Cantidad de medidores o contadores de energía por transformador (esto fue visualizado en la localización geográficas de los transformadores).
- Estado de los transformadores bajo la condición de carga actual y el comportamiento de la carga al largo de una semana.
- Así como los Parámetros de líneas: longitud, sección transversal, impedancia y el tipo de conductor abierto(desnudo) o pre ensamblado.

5.4 Caracterización de la curva de carga de los vehículos eléctricos [8]

Este es uno de los apartados críticos en la elaboración del proyecto, es muy complicado modelar correctamente los patrones de utilización de los usuarios debido a que es necesario contar con muchos datos. El trabajo desarrolla una metodología que combina las probabilidades acumuladas que se presentaron, así como la demanda típica de los VE (aproximadamente 3.6 kW) y su factor de energía (0.98 inductivo) para producir perfiles diarios de series temporales de VE. Después de un enfoque de selección aleatoria, la metodología define los parámetros clave de un perfil de VE: el número de conexiones al día, el momento de inicio de la carga de cada conexión y el SOC(tiempo de autonomía restante de la batería) inicial y final de cada conexión, todas estas probabilidades se sortean para generar la curva de carga de los VE. La recarga de las baterías del vehículo se inicia en los hogares. Teniendo en cuenta la capacidad de las baterías de los modelos existentes en el mercado resulta un valor unitario promedio de 43 kWh. Se ha considerado entonces para la recarga completa de dicha batería, una intensidad de corriente de 16A y tensión trifásica de 380V. Bajo estas condiciones, una recarga total de cada batería implicaría un suministro constante de ocho horas.

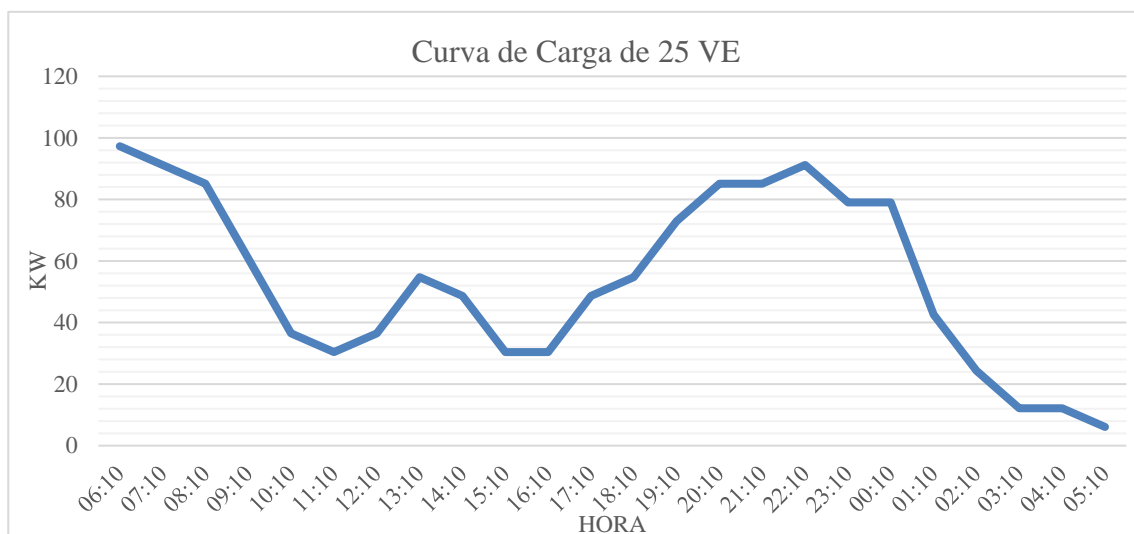


Figura 3: Curva de carga de 25 vehículos eléctricos

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

6. ESCENARIOS

En el caso base creado, se ha considerado que cada hogar que cuenta con un vehículo, puesto que se seleccionaron puestos de distribución que tengan como usuarios conectados a viviendas familiares, dejando de lado los puestos de distribución que tengan conectados negocios comerciales, pequeñas o mini industrias. Se han realizado las proyecciones correspondientes de demanda desde el año 2022(año 1) hasta el año 2031(año 10), adoptando como crecimiento de la demanda el promedio entre los tres últimos valores de los datos expuestos en la Memoria Anual de la ANDE 2020, resultando un 5% por año. Además, se plantea el caso base para el verano en donde se incrementa la carga nominal del transformador en un 30%. Y se han considerado penetraciones de 25%, 50% y 75% arbitrariamente, al ser este un factor externo más bien dependiente de circunstancias externas al trabajo. Los Puestos de Distribución seleccionados fueron el PD 16191 y el PF LU 35 TN 89740.

7. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Los resultados se observan en gráficos de curvas resultantes, que representan la sumatoria de la curva de demanda nominal de los puestos de distribución con la curva de carga generada de la demanda de los vehículos eléctricos desde el año 1 de estudio al año 10 de estudio, con las distintas penetraciones seleccionadas: 25%, 50 % y 75%.

El PD 16191 tiene 23 usuarios conectados, el 75% de penetración corresponde a 17 vehículos eléctricos conectados a la red, se observa en el gráfico, en dos curvas generadas por la simulación se supera la capacidad nominal del puesto de distribución, por lo cual se deberán generar soluciones para realiza la carga de los vehículos, ya que el PD 16191 no podrá soportar la carga generada por los vehículos eléctricos. En las siguientes tablas se resumen los resultados obtenidos durante el análisis de las curvas de cargas resultantes de la simulación del PD 16191 y el PD LU 35 TN 89740.

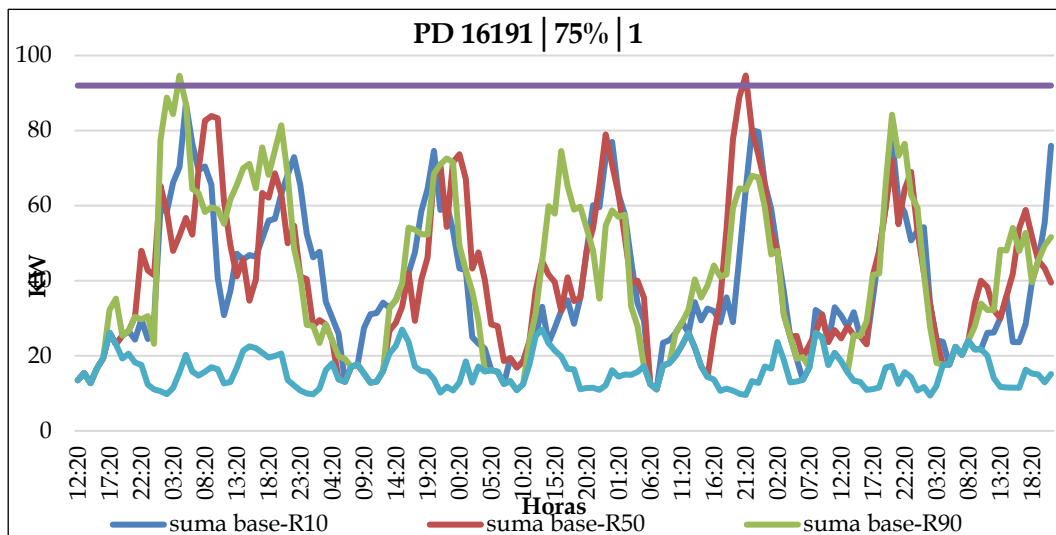


Figura 4: Curva de carga resultante del PD 16191 con penetración del 75 % en el año 1

En la tabla II se resumen los resultados obtenidos durante el análisis de las curvas de cargas resultantes de la simulación del PD 16191 y el PD LU 35 TN 89740.

Tabla II: Resumen de resultados del PD 16191

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Penetración	Año Demanda	AÑO 1	AÑO 5	AÑO10
	25%	Invierno	Si	Si
Verano		Si		
50%	Invierno	Si	Si	Si
	Verano	Si		
75%	Invierno	No	No	No
	Verano	No		

EL PD LU 35 TN 89740 tiene el mismo comportamiento que el PD 16191, concluyéndose que el PD no podrá atender la demanda generada por los vehículos eléctricos cuando la penetración de los vehículos eléctricos sea del 75 % ya desde el año 1 de estudio.

Resumiendo, los resultados obtenidos, cuando la penetración es del 25% y del 50 %, los dos puestos de distribución estudiados, pueden soportar la demanda generada al agregar la carga de los vehículos eléctricos correspondientes a tales penetraciones, también teniendo en cuenta el beneficio del incremento de los ingresos sin la necesidad de inversión en infraestructura adicional, la recarga con una penetración del 25% y del 50 % es la más adecuada para el sistema actual.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo final de grado, se analizó el comportamiento de un puesto de distribución típico de la ciudad de Asunción y del departamento Central, bajo las condiciones extremas de recarga de vehículos eléctricos.

Se ha realizado la caracterización de los parámetros de carga de las baterías a través de la revisión de la información acerca del estado actual de esta tecnología a nivel mundial, considerando también los modelos existentes en el mercado nacional. Se describió un puesto de distribución típico que abastece una zona residencial de la ciudad de Asunción y del departamento Central, mediante la curva de carga semanal que fue obtenida en base a los datos proporcionados por la Administración Nacional de Electricidad (ANDE). También se identificaron varios escenarios de estudio, teniendo en cuenta distintos índices de reemplazo de vehículos con motor a combustión interna a vehículos eléctricos, en un plazo de diez años. Ante la ausencia de datos más específicos sobre la cantidad exacta de vehículos asociados al puesto de distribución, se consideraron valores de acuerdo a la cantidad de medidores instalados por puesto de distribución.

Finalmente, las simulaciones realizadas mediante el software MATLAB con la extensión MATPOWER, arrojaron resultados que, tras su análisis, permitieron determinar que un reemplazo del 25% y del 50 % de los vehículos de un puesto de distribución, favorece la introducción de vehículos eléctricos al sistema sin la necesidad de obras adicionales, ya que no solo mejora el desempeño del sistema a través del aumento del factor de carga, sino también se adecua al estilo de vida de la mayoría de los usuarios y a los patrones de utilización de sus vehículos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Power&Energy. “Como trabajan juntos los vehículos eléctricos y la red”. Volumen 16, Noviembre 2018, paginas.1-4.
- [2] Electricidad – Generación. Viceministerio de Minas y Energía, Agosto de 2019 Disponible en: https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php?option=com_content&view=article&id=1216&Itemid=603
- [3] Dirección de Registro de Automotores. Corte Suprema de Trabajo, Octubre 2019 Disponible en: <https://www.pj.gov.py/contenido/155-direccion-del-registro-de-automotores/1623>
- [4] European Scientific Journal. “Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual y Retos Futuros”, NO. ISSN: 1857 – 7881, Mayo 2016, paginas. 118–123.
- [5] GONZÁLEZ, M; MUSSI, R. *Análisis de un esquema de recarga de vehículos eléctricos para alimentadores del sistema de distribución de energía eléctrica en la ciudad de Asunción*, 2019, pág.21-25.
- [6] QUEIRA, Jacinto, L. *Redes Eléctricas Tomo I. México*2004, pag. 12.
- [7] Grainger, J; Stevenson, W. *Análisis de Sistemas de Potencia*, 1996. pág.285-308.
- [8] IEEE Power&Energy. “Como trabajan juntos los vehículos eléctricos y la red”. Volumen 16, Noviembre 2018, paginas.4-7.