

# Demand Response due to The Penetration of Electric Vehicles in a Microgrid Through Stochastic Optimization

D. Trujillo and E. García, *Member, IEEE*

**Abstract**—The study carries out an economic technical analysis of the effect of the penetration of electric vehicles in a microgrid with various types of renewable energy sources and loads of different nature. The electric vehicle has been modeled through its main component, the battery, by using criteria of randomness in the entry and type of load used by each vehicle. Following this process, the energy demand curves and voltage profiles resulting from such penetration were obtained. In a second phase, three demand response programs based on incentives and prices were applied, and the impact of these decisions on the system through new demand curves and voltage profiles were quantified, the comparison with the base scenario is also carried out. In its final stage, the different scenarios proposed are evaluated financially and the NPV financial index is calculated, which is included in a binary-type optimization model, allowing through simulations to make decisions about the best demand response program alternative for the system.

**Index Terms**—Electric Power, Demand Response, Electric Vehicle, Microgrid.

## I. INTRODUCCIÓN

El constante avance tecnológico impacta directamente en las sociedades y en sus diferentes elementos, uno de los principales es el medio de transporte que incide no solamente en el estilo de vida de las personas sino también en factores ambientales, económicos, entre otros [1] [2] [3]. En las últimas décadas fuentes de energía convencional han impactado en el medio ambiente y condiciones de vida de las personas, esto acompañado del incremento en el precio del petróleo [2] [4] y reservas que de acuerdo al consumo actual se agotarán en no más de 5 décadas [5] deja un importante problema a abordar y es la búsqueda del sustituto de los vehículos basados en combustible fósil por vehículos basados en otros tipos de energías.

La necesidad de cambio en el transporte y en otros ámbitos conlleva actualmente a la aplicación de alternativas como vehículos híbridos, vehículos basados en hidrógeno, basados en biocombustible, basados en energía solar, proyectos actuales para vehículos basados en aire comprimido, entre otras [6] [7] [8] [9] [10], ideas que tanto empresas como el mundo académico-científico abordan con el fin de sustituir el uso de combustible fósil y ser una valiosa alternativa en los mercados futuros.

D. Trujillo is with the Electrical Engineering Department, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador (email: dtrujillos2@est.ups.edu.ec)

E. García is with the Electrical Engineering Department, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador (email: egarcia@ups.edu.ec)

A consecuencia de la evolución de la sociedad como tal y la implementación de nuevas tecnologías, sistemas asociados se ven afectados como es el caso de los sistemas eléctricos de potencia, pues los incrementos de vehículos eléctricos en las diferentes ciudades generan una necesidad de energía adicional para su carga [11] [12] e impactan en su infraestructura actual.

Diferentes variables e indicadores técnicos también se ven alterados como son los perfiles de voltaje, niveles de frecuencia, cargabilidad, fiabilidad y flexibilidad del sistema eléctrico, entre otros [13] [14] [3] [15]. Es por ello que planificar el despacho económico [16], la expansión y funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia, así como estrategias para abordar dicho cambio es vital para las diferentes sociedades [17] [18].

En la actualidad los vehículos eléctricos ya son una realidad mundial [19], representan una alternativa valiosa y cada vez abarcan mayor mercado entre el transporte cotidiano es por ello que existen planes mundiales como el EV30 @ 30 [20] que estima un crecimiento exponencial en la penetración de estos nuevos vehículos en las principales ciudades del mundo y brinda insumos para planificación de expansión en servicios asociados. Diversos estudios han sido presentados y otros se encuentran en etapas de desarrollo con el fin de modelar los vehículos eléctricos como carga dentro del sistema entre ellos podemos encontrar estudios asociados a big data [17], patrones de uso aleatorio [21], longitudinales [22], juego de gestión de carga [23], entre otros que tratan en cierta forma de pronosticar el incremento de demanda, tipos de carga estática y dinámica [24], comportamiento de los vehículos, etc.

Otra de las piezas clave es la batería dado que es el principal componente del vehículo eléctrico y el cual está asociado directamente con el incremento de demanda en el sistema eléctrico de potencia. Importantes avances se han realizado en tecnologías de baterías y varios proyectos muy ambiciosos continúan con el fin de mejorar su capacidad brindando mayor autonomía para el caso de los vehículos eléctricos. Actualmente se encuentran aplicaciones comerciales de varios tipos como: plomo ácido, níquel hierro, níquel cadmio, litio, ión litio, entre otras [4] [5] [25]. Sin embargo, pese a tener avances significativos en el desarrollo de baterías, logrando un buen rendimiento y tiempo adecuado de descarga en uso, todavía la autonomía es una meta [26] para las grandes empresas fabricantes de automóviles pues supone la mejor alternativa para reemplazar el automóvil basado en combustible fósil.

Es así que la presente investigación aborda la problemática de cual será el modelo de respuesta de la demanda adecuado

para optimizar el consumo de energía de una microrred debido a la inserción de vehículos eléctricos, con el fin de aportar desde una perspectiva técnico económica y contribuir a la generación de alternativas para la sociedad. En una primera fase se trata de modelar el vehículo eléctrico como elemento de incremento de demanda a través de su principal componente la batería, complementándolo con el uso de patrones aleatorios de tiempos y tipos de recarga. Posteriormente la demanda definida se inserta en un caso de estudio mediante curvas reales de demanda proporcionadas por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE)-Ecuador y se evalúa el impacto en los perfiles de voltaje del sistema. En una segunda fase el proyecto plantea tres escenarios de programas de respuesta de la demanda tomando en cuenta criterios por incentivos y por precios [27] [28], se aplican dichos programas simulando los tres escenarios con sus respectivos ajustes de respuesta de la demanda y se comparan el escenario inicial planteado, ambos asociados a demanda de energía y perfiles de voltaje. Finalmente, en la tercera fase se evalúan los tres escenarios desde una perspectiva económica a través del indicador financiero valor actual neto (VAN) y un modelo de optimización [29] de tipo binario bajo criterios de presupuestos y flujos de caja, generando como resultado insumos para toma de decisiones acerca del mejor programa de respuesta de la demanda a ejecutar. Cabe señalar que se realizan los diferentes escenarios para una microrred que contempla diferentes tipos de energías renovables y varios criterios de diseño en la configuración y operación basados en [30], así como distintos tipos de carga entre estas las correspondientes al ingreso de vehículos eléctricos en la microrred. En el presente documento se establece el planteamiento de la microrred, aleatoriedad de ingreso de vehículos eléctricos y programas de respuesta de la demanda en la sección II, los resultados alcanzados de las respectivas simulaciones en la sección III y las conclusiones obtenidas en la sección IV.

## II. MICRORRED Y PROGRAMAS DE RESPUESTA DE LA DEMANDA

### A. Planteamiento de la Microrred

La microrred se considera una valiosa configuración a nivel de sistemas eléctricos por sus diferentes características como la flexibilidad, accesibilidad, incremento de seguridad y resiliencia, reduce el impacto medio ambiental, descentralización del suministro, operación aislada, entre otros [31] [32]. Para el caso del presente proyecto se plantea la microrred presentada en la Fig. 1, como se puede observar involucra la integración de varios tipos de energías renovables y diferentes tipos de carga entre la cual se deja una variable aleatoria a ingresar que será asignada a los vehículos eléctricos resultado de simulaciones posteriores. La potencia de la microrred fue planteada con 100 kW y un nivel de voltaje de 13.2 kV.

Asociada a la microrred se establece una curva de demanda de energía base generalizada que ha sido construida en Matlab bajo los datos reales proporcionados por el Centro Nacional de Control de Energía – Ecuador, el mencionado consumo de energía se puede observar en la Fig. 5 y en la Fig. 7 el cual ha sido utilizado en dicha sección para simular y calcular los

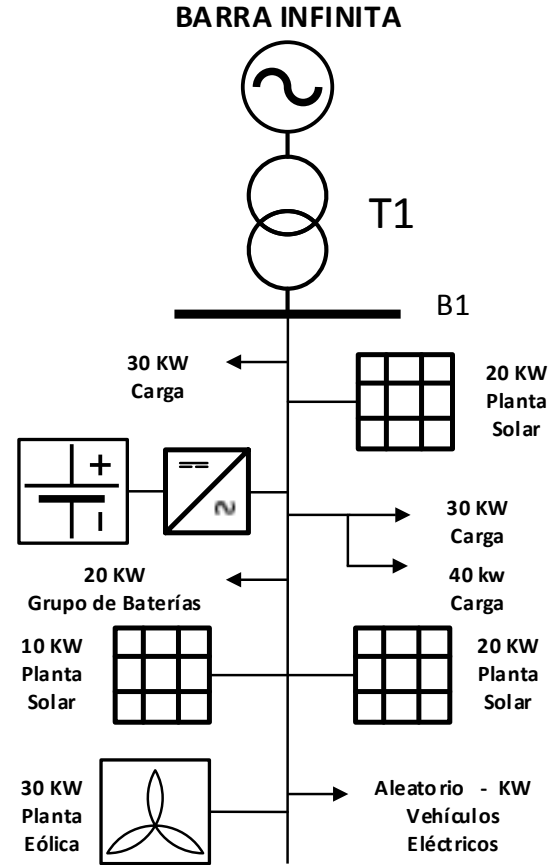


Fig. 1. Arquitectura de la microrred base.

cambios presentados con el ingreso de vehículos eléctricos en la microrred en cuanto a demanda de energía y perfil de voltaje.

Para el caso de las curvas de demanda de la microrred bajo la penetración de vehículos eléctricos se plantea (1).

$$Ds_i = Pmr \cdot Dpu_i + Dve_i \quad (1)$$

Siendo  $Ds_i$  la demanda total de la microrred en kW en la hora  $i$ .  $Pmr$  la potencia nominal de la microrred en kW,  $Dpu_i$  la demanda base en escala por unidad para la hora  $i$  y  $Dve_i$  la demanda de vehículos eléctricos en kW la hora  $i$ .

Para el caso de perfil de voltaje se plantea (2) con el fin de lograr una aproximación adecuada que permita representar el efecto en el voltaje debido a variación en demanda de energía en la microrred.

$$PV_i = 1.4 - \gamma \cdot \left( \frac{Ds_i}{Pmr} \right) \quad (2)$$

Siendo  $PV_i$  el perfil de voltaje en el nodo principal en la hora  $i$ .  $\gamma$  representa el coeficiente de relación voltaje-potencia,  $Ds_i$  la demanda total de la microrred en kW en la hora  $i$  y  $Pmr$  la potencia nominal de la microrred en kW.

Cabe notar que en (2) se contempla la compensación en 1.4 con el fin de visualizar mejor el efecto y generar un desplazamiento en la gráfica de perfil de voltaje en el eje de las ordenadas, el valor del coeficiente gamma para el presente

proyecto fue calculado en 0.3915 acorde a los datos del mismo según (3).

$$\gamma = \left( \frac{V_n}{P_{m\acute{a}x}} \right) \cdot DSTP \quad (3)$$

Siendo  $\gamma$  el coeficiente de relación voltaje-potencia.  $V_n$  el voltaje de línea nominal de la red,  $P_{m\acute{a}x}$  la demanda máxima de la red en el período planificado y  $DSTP$  la desviación estándar de potencias en escala por unidad para el período planificado.

### B. Demanda de Energía por Penetración de Vehículos Eléctricos

Para el año 2017 ya se contaba con un inventario en el parque automotor eléctrico a nivel mundial superior a los tres millones [20], esto más la tendencia exponencial de crecimiento que se espera debe ser tomada en cuenta en los diferentes estudios de expansión de los sistemas. En el caso del presente estudio una vez que se ha planteado el escenario base de la microrred en la sección anterior, se establecen criterios de aleatoriedad de ingreso de los vehículos eléctricos, así como criterios asociados a otros factores relevantes de tal forma que permita acercar la investigación a escenarios reales.

Con el fin de generar la aleatoriedad en el ingreso de vehículos eléctricos a una microrred, se establece inicialmente tres tipos de carga y se asocia a cada una de ellas potencias y tiempos de carga acorde a lo presentado en la Tabla I.

TABLA I  
PARÁMETROS DE TIPOS DE CARGA

Tipo de carga	Potencia de carga (kW)	Tiempos de carga total (Horas)
Lenta	10	5
Rápida	20	2
Ultra rápida	30	0.5

Conforme a los mencionados criterios se elabora el algoritmo 1 en Matlab basado en un generador de aleatorios que permite simular el ingreso de tantos vehículos eléctricos como se desee en una microrred eléctrica y acorde a los escenarios planificados inicialmente.

### C. Programas de Respuesta de la Demanda y Viabilidad Financiera

Las diferentes actividades cotidianas de una sociedad generan períodos de tiempo en el cual se acumula el requerimiento de energía eléctrica, esto conlleva la afectación del estado de operación del sistema y de sus variables asociadas, por lo que los agentes del sector eléctrico usualmente deben tomar decisiones sobre cómo reducir dichos picos de demanda y/o manejarlos con el fin de garantizar la estabilidad del sistema y brindar un servicio adecuado al usuario.

Los programas de respuesta de la demanda representan el cambio en el consumo de energía eléctrica de los clientes [33] y son útiles en dichos escenarios ya que permiten en muchos casos reducir los picos [34] por tiempos aceptables en el corto, mediano y largo plazo según sea el caso. Existen

---

#### Algoritmo 1: Aleatoriedad en ingreso de vehículos eléctricos a la microrred y evaluación financiera.

---

**Ingreso:** Vector con cantidad de vehículos eléctricos por escenario  
Tiempos, factor de tiempo y potencias de carga  
Parámetros para evaluación financiera

**Salida:** Matrices de demanda de energía  
Resultados de PRD y evaluación financiera

**Paso 1:** Inicializa escenarios y generador de aleatorios  
 $VESC = VESC1, \dots, VESCn$   
 $forv = 1 : length(VESC)$   
 $\dots AH = tabulate(randi([124], 1, VESC)$   
end

**Paso 2:** Aleatorios para tipo de carga (lenta, rápida y ultra rápida).  
 $fori = 1 : 24(Lazohorario)$   
 $Aut_{h,ora} = AH(i, 2);$   
 $forj = 1 : Aut_{h,ora}(Lazodeasignacin)$   
 $TC(i,j), TpC(i,j);$   
switch  $TpC(i,j)$   
case 1  $FTpCRL(i,j)$   
case 2  $FTpCRL(i,j)$   
case 3  $FTpCRL(i,j)$   
end, end, end

**Paso 3:** : Aleatorios - distribución uniforme para el tipo de carga y factor de tiempo de carga.  
 $fori = 1 : 24(Lazohorario)$   
 $Aut_{h,ora} = AH(i, 2);$   
 $forj = 1 : Aut_{h,ora}$   
 $TC(i, j), TpC(i, j);$   
switch  $TC(i,j)$   
case 1  $POT(i,j), TpCRL(i,j)$   
case 2  $POT(i,j), TpCRL(i,j)$   
case 3  $POT(i,j), TpCRL(i,j)$   
end, end, end

**Paso 4:** Cálculo de demanda por vehículo en función de la potencia y horas de carga asignadas.  
 $nTpCRL = size(TpCRL); dem_{VE} = ;$   
 $fori = 1 : 24$   
 $forj = 1 : nTpCRL(2)$   
Variables decimales  
 $dem_{VE}(i, j) = F_{dem};$   
Ajustes por ingresos  
end, end

**Paso 5:** Matrices resultantes, cálculo de VAN y modelo de optimización en GAMS.  
 $Ds_i = Pmr \cdot Dpu_i + Dve_i$   
(Demanda final agregada a la microrred)  
 $DEM_X POT = \{CLentaH : 1 - 24; CRápidaH : 1 - 24; CURápidaH : 1 - 24\}$   
(Distribución por tipo de carga)  
 $VAN = -Io + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t}$   
 $M\acute{a}x \sum_{i=1}^{np} VAN_i \cdot X_i$   
 $\sum_{i=1}^{np} d_{ij} \cdot X_i \leq P_j; \quad j = 1 \dots m$   
 $X_i \in \{0, 1\}; \quad i = 1 \dots n$

---

varias alternativas de programas de respuesta de la demanda entre los cuales podemos encontrar: precio en tiempo real, tiempo de uso, precio de pico crítico, planes de incentivo, control de carga, entre otros [27] [33] [34] [35] [36].

En el desarrollo del presente proyecto se aplican tres programas de respuesta de la demanda los cuales son: control de carga directo, precio de pico crítico y tiempo de uso, cada uno de ellos simulado y contrastado con el escenario base con el fin de analizar el impacto de dicho programa. Con el fin de evaluar las alternativas se calcula el indicador financiero valor actual neto (VAN) mediante (4) basado en [37] [38] [39] [40], con presentación de la fórmula acorde al estudio actual.

$$VAN_i = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad (4)$$

Siendo  $VAN_i$  el beneficio esperado o valor actual neto generado por el programa de respuesta de la demanda  $i$  con respecto al caso base.  $I_o$  la inversión inicial del programa,  $F_t$  los flujos de caja en cada período  $t$ ,  $n$  el número de períodos de duración del programa y  $k$  el tipo de interés.

Para los flujos de caja del presente estudio se han establecido varios parámetros para cada programa de respuesta de la demanda basados en su naturaleza y en datos reales del entorno del estudio (pliegos tarifarios-Ecuador, costos y tasas del mercado, etc.), con ligeras modificaciones como márgenes de seguridad y tasas deseadas, estos se pueden observar en la Tabla II.

TABLA II  
PARÁMETROS DE PROGRAMAS DE RD

PRD	Parámetros
Control de carga directo	Valor del kWh: 0.10 (\$)
	Costos operativos: 30%
	Tasa de descuento: 15%
	Presupuesto-desembolsos: 20% del máximo valor del beneficio neto en los tres programas.
Pico crítico	Valor del kWh: 0.10 (\$)
	Costos operativos: 5%
	Tasa de descuento: 15%
	Presupuesto-desembolsos: 20% del máximo valor del beneficio neto en los tres programas.
Tiempo de uso	Valor del kWh: 0.10 (\$)
	Costos operativos: 5%
	Tasa de descuento: 15%
	Presupuesto-desembolsos: 20% del máximo valor del beneficio neto en los tres programas.
	Precio en valle: 50% del precio en pico.

Los programas de respuesta de la demanda generan el beneficio representado mediante la aplicación de (4), pero dependen también de los desembolsos periódicos que se necesite realizar en la ejecución de los programas y de presupuestos disponibles, es por ello que se ingresan los resultados de (4) a un modelo de optimización estocástico de tipo binario el cual permitirá evaluar el programa que debe ejecutarse acorde con los flujos, presupuestos y beneficio esperado, el mencionado modelo ha sido construido basado en criterios de [29], [41] y [42]. Como se puede observar en (5), (6) y (7) el problema queda expresado de la siguiente manera:

$$\text{Máx} \sum_{i=1}^{np} VAN_i \cdot X_i \quad (5)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{np} d_{ij} \cdot X_i \leq P_j; \quad j = 1 \dots m \quad (6)$$

$$X_i \in \{0, 1\}; \quad i = 1 \dots n \quad (7)$$

Siendo en la función objetivo  $VAN_i$  el beneficio esperado o valor actual neto generado por el programa de respuesta de

la demanda  $i$  con respecto al caso base y  $X_i$  el programa de respuesta de la demanda. En las restricciones  $d_{ij}$  representa los desembolsos generados por el programa  $i$  en el período  $j$ ,  $P_j$  el presupuesto del período  $j$  para programas de respuesta de la demanda,  $j$  el número de períodos de desembolsos y  $np$  el número de programas de respuesta de la demanda generados.

Para el presente estudio el modelo de optimización ha sido simulado a través de los paquetes GAMS y SOLVER de Microsoft Excel para dos períodos de tiempo el primero de 11:00 a 13:00 y el segundo de 19:00 a 21:00, estos períodos fueron seleccionados acorde a las curvas resultantes de demanda debido a la penetración de vehículos eléctricos y su aleatoriedad en la microrred (Ver Fig. 3) y a los tres programas de respuesta de la demanda planificados en el estudio, cabe señalar que los escenarios de demanda en el algoritmo se pueden modificar con el fin de lograr un crecimiento lineal, exponencial, etc. Para el estudio se han realizado cinco escenarios que permiten identificar el crecimiento de demanda en la microrred.

En cada uno de los períodos mencionados para el modelo de optimización se simuló aplicando los tres tipos de programas de respuesta de la demanda y evaluando sus resultados en cuanto a desembolsos, presupuestos y beneficios netos.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Análisis de la Demanda de la Microrred

En la Fig. 2 se puede observar la demanda generada por el ingreso de vehículos eléctricos a la microrred de forma aleatoria según el algoritmo planteado; se han simulado cinco escenarios con crecimiento en la demanda debido al ingreso de vehículos eléctricos a la microrred, los valores utilizados conforme dicho crecimiento son: 1, 5, 10, 20 y 30 vehículos eléctricos, estos valores de acuerdo a la planificación del estudio y considerando una microrred de potencia máxima de 100 kW.

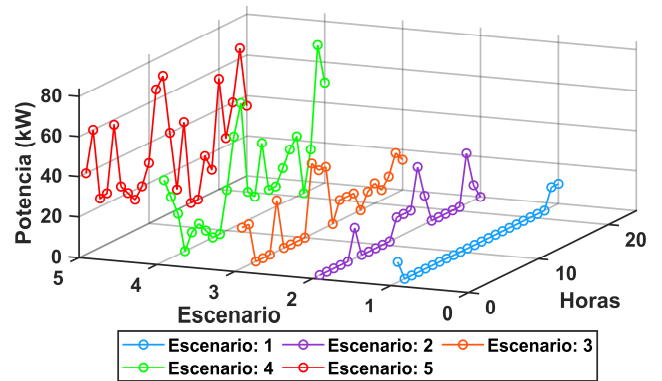


Fig. 2. Demanda de energía de por ingreso de vehículos eléctricos - escenarios.

Una vez estimada la demanda adicional generada por los vehículos eléctricos en la microrred se procede a consolidar las curvas de demanda total del sistema por cada escenario como se puede observar en la Fig. 3, dentro de estas curvas y basado en los datos obtenidos se identificaron ciertos picos

comunes entre los diferentes escenarios, estableciendo así los períodos de mayor demanda en las horas 11:00 a 13:00 y 19:00 a 21:00, los cuales sirven de insumos para la construcción de perfiles de voltaje, aplicación de programas de repuesta de la demanda y cálculos de viabilidad financiera de los programas planteados.

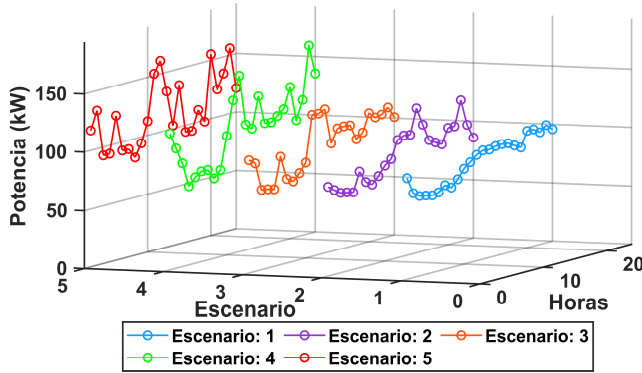


Fig. 3. Demanda total de energía de la microrred - escenarios.

De acuerdo a la capacidad de la microrred, su generación, carga y penetración de vehículos eléctricos se obtuvo por cada escenario la energía que deberá suministrar la barra infinita cada día, como se puede observar en la Tabla III, esto con el fin de poder abastecer toda la demanda de la microrred. Estos datos resultan importantes al aplicar programas de respuesta de la demanda ya que establecerá el ahorro en contraste de los escenarios y brindará bases para futuros proyectos en los cuales se puede incluir precios nodales o precios dinámicos en el tiempo.

TABLA III  
ENERGÍA-BARRA INFINITA

ESCENARIO	ENERGÍA (kWh/día)
1 VE	0.7
5 VE's	60.42
10 VE's	110.23
20 VE's	314
30 VE's	472.06

**B. Perfiles de Voltaje de la Microrred**

Como es lógico la variación de demanda incide en las diferentes variables eléctricas como son frecuencia, corrientes, voltajes, etc., en la presente sección una vez obtenidas las curvas de demanda total de la microrred se procede a aplicar (2) con el fin de construir las curvas de perfil de voltaje.

Como se puede apreciar en la Fig. 4 la variación en el perfil de voltaje es inversamente proporcional a la variación en la demanda de la microrred, permitiendo observar el efecto sobre el sistema debido al incremento de carga por inclusión de los vehículos eléctricos.

Al contrastar la curva de demanda base con la curva de demanda final incluidos los vehículos eléctricos de manera aleatoria se puede identificar también los picos de diferente naturaleza y notar que para aplicación de programas de

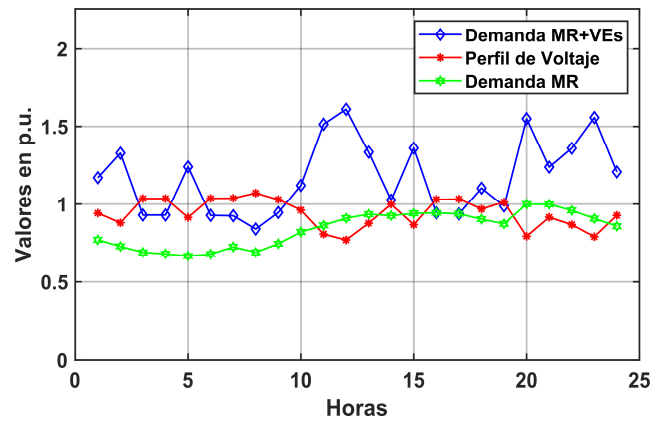


Fig. 4. Curva de demanda y perfil de voltaje de la microrred – escenario 5.

respuesta de la demanda es necesario tomar decisiones sobre la demanda final de la microrred y no sobre las dos curvas independientes ya que podría ser errónea la selección de períodos para aplicación de dichos programas.

**C. Programas de Respuesta de la Demanda y Viabilidad Financiera**

La aplicación de los tres tipos de programas planificados: control de carga directo, precio de pico crítico y tiempo de uso fueron simulados y cada uno de ellos genera un impacto acorde a su naturaleza y bajo las mismas condiciones de la microrred. En las Fig. 5, 6 y 7 se puede observar un ejemplo del impacto del programa de respuesta de la demanda de tipo incentivo: control de carga directo, aplicado para el escenario 5 en el período de 19:00 a 21:00.

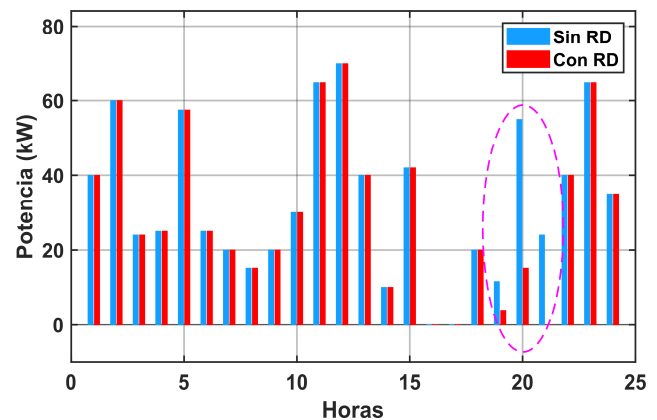


Fig. 5. Demanda de energía eléctrica de la microrred – escenario 5 con y sin respuesta de la demanda.

Se puede observar claramente en la Fig. 5 el beneficio obtenido en la microrred en cuanto a reducción de demanda de energía acorde al programa y horario mencionados previamente, dicho efecto genera un nuevo insumo para la simulación de perfiles de voltaje y suministro de la barra infinita los cuales serán analizados en las Fig. 6 y 7.

En la Fig. 6 se puede identificar claramente la disminución de demanda de energía debido a la aplicación del programa

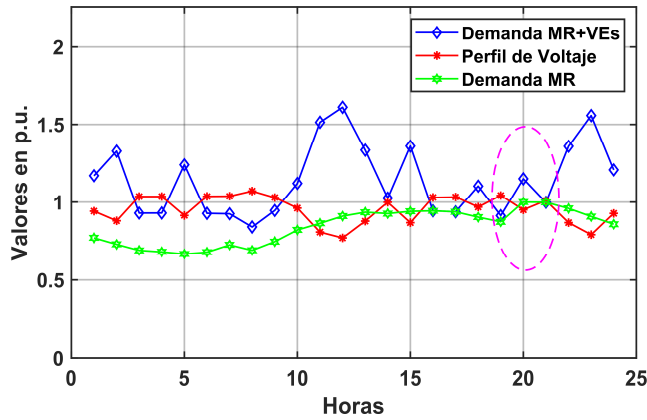


Fig. 6. Curvas de demandas y perfiles de voltaje de la microrred – escenarios 5 con aplicación de respuesta de la demanda.

y su correspondiente recuperación en el nivel de voltaje, si se comprara con la Fig. 4 que representa el estado inicial del escenario 5 es claramente identificable el efecto de aplicación de programas de respuesta de la demanda en la microrred. De similar forma se simularon los diferentes escenarios obteniendo en cada uno similares decrementos en la demanda total de energía de la microrred debido a la restricción de carga en el período de tiempo en el cual se aplicó respuesta de la demanda, cuantificando el beneficio total por escenario, necesidades de energía de la barra infinita, desembolsos, presupuestos, entre otros datos insumos de las posteriores secciones.

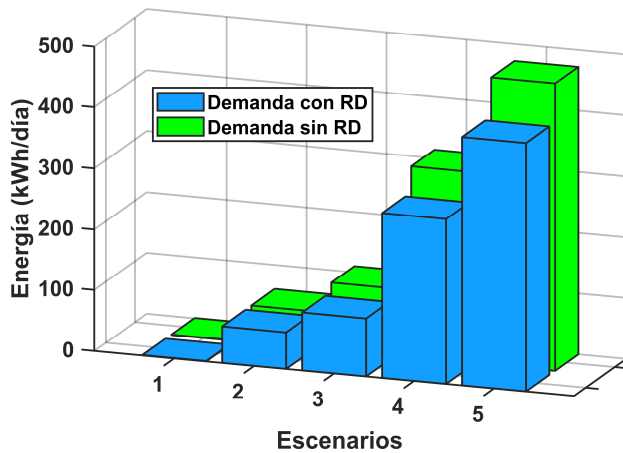


Fig. 7. Demanda de energía eléctrica que suministra la barra infinita a la microrred – escenarios.

El efecto se puede apreciar en la Fig. 7 con una disminución en 3 de los 5 escenarios en cuanto a las necesidades de suministro de la barra infinita hacia la microrred debido a la aplicación del programa de respuesta de la demanda establecido. Se obtuvo también los valores correspondientes al ahorro energético del proyecto a través de los programas de respuesta de la demanda: control de carga directo, pico crítico y tiempo de uso, los cuales se pueden observar en la Tabla IV.

A la par de los efectos en voltajes y demanda, el algoritmo arroja datos sobre el beneficio por la aplicación de los tres

TABLA IV  
AHORRO ENERGÉTICO POR PRD'S

Período	Programa de Respuesta de la demanda	Escenario – Ahorro de energía (kWh/día)					Total (%)
		1	2	3	4	5	
Control de							
11:00	Carga Directo	0.0	50.0	65.0	114.0	80.0	17.8
	a Pico Crítico	0.0	0.0	25.0	0.0	15.0	2.3
13:00	Tiempo de Uso	0.0	0.0	12.5	0.0	7.5	1.2
Control de							
19:00	Carga Directo	0.0	0.0	22.5	45.0	71.5	8.0
	a Pico Crítico	0.0	0.0	7.5	45.0	22.5	4.3
21:00	Tiempo de Uso	0.0	0.0	3.8	22.5	11.3	2.2

programas y los desembolsos requeridos para su aplicación como podemos observar en la Tabla V.

TABLA V  
RESULTADOS DE APLICACIÓN DE PRD

Período	Programa de Respuesta de la demanda	Desembolsos (\$)					Beneficio Neto (\$)
		1	2	3	4	5	
Control de							
11:00	Carga Direct.	0.0	1.5	1.95	3.42	2.4	12.99
	a Pico Crítico	0.0	0.0	0.13	0.00	0.08	2.27
13:00	Tiempo-Uso	0.0	0.0	0.06	0.00	0.04	1.14
	Presupuesto	0.0	0.7	0.91	1.6	1.12	–
Control de							
19:00	Carga Direct.	0.0	0.0	0.68	1.35	2.15	5.33
	a Pico Crítico	0.0	0.0	0.04	0.23	0.11	3.98
21:00	Tiempo-Uso	0.0	0.0	0.02	0.11	0.06	1.99
	Presupuesto	0.0	0.0	0.32	0.86	1.00	–

Como se puede observar en ambos casos el beneficio neto máximo alcanzado es con el programa de control de carga directo, sin embargo, es necesario ajustarse a los presupuestos y desembolsos requeridos de acuerdo con los datos de la Tabla V, estos establecen los insumos del modelo de optimización planteado en (5), (6) y (7) los cuales fueron simulados, obteniendo como resultado los valores presentados en la Tabla VI.

TABLA VI  
EVALUACIÓN DE PRD'S - OPTIMIZACIÓN

Período	Programa de Respuesta de la demanda	Valor binario	Estado de ejecución
11:00	Control de Carga Directo	0	No viable
	Pico Crítico	1	Viable
	Tiempo de Uso	1	Viable
	Función objetivo	Beneficio neto (\$)	3.41
	a	R1	0
13:00	Restricciones-Holgura en presupuesto (\$)	R2	0.7
	R3	0.7225	
	R4	1.596	
	R5	1.0075	
	Control de Carga Directo	0	No viable
19:00	Pico Crítico	1	Viable
	Tiempo de Uso	1	Viable
	Función objetivo	Beneficio neto (\$)	5.96
21:00	a	R1	0
	Restricciones-Holgura en presupuesto (\$)	R2	0
	R3	0.25875	
	R4	0.5175	
	R5	0.83225	

Como se puede apreciar pese a tener mejor beneficio con el programa de control de carga directo no es óptimo ejecutarlo debido a los desembolsos y presupuesto asignado, en ambos escenarios simulados se obtuvo que con dicho presupuesto es óptimo ejecutar los dos programas restantes. Al ser una microrred de 100 kW los valores obtenidos de beneficios netos de los programas independientes y el beneficio neto del modelo de optimización arrojan resultados favorables para la aplicación de dichos programas y además generan algunas holguras en los presupuestos 4 y 3 respectivamente, lo que presenta un adecuado flujo de efectivo requerido y un margen de seguridad en los desembolsos. Se debe notar que estos escenarios podrían escalarse a una red de mayor potencia en las cuales se podrían calcular beneficios a nivel de ciudades o estados con el fin de planificar programas de respuesta de la demanda y ejecutarlos en sistemas de este tipo.

#### IV. CONCLUSIONES

La inserción de vehículos eléctricos representará un incremento en la demanda de energía de una microrred por lo que su estimación es clave para planificación de la expansión. El algoritmo de aleatoriedad del presente proyecto ha permitido simular exitosamente la penetración de VE's a la microrred, tomando en cuenta carga de tipo lenta, rápida y ultra rápida cada una con potencia y tiempo independiente, de esta forma cuantificando el incremento horario en la demanda de energía y permitiendo calcular el efecto sobre el perfil de voltaje. En las simulaciones se puede notar la relación inversa existente entre demanda y perfil de voltaje, y en el caso del generador de aleatorios también se puede identificar que al ser de tipo uniforme conforme se incrementa en número de vehículos a ingresar poco a poco toma forma de dicha distribución de probabilidad.

Para el caso de selección de programas de respuesta de la demanda es necesario establecer inicialmente la problemática asociada al sistema sujeto de estudio, dicha problemática debe ser abordada mediante dos perspectivas, la técnica a través de variables como voltaje, frecuencia, demanda, entre otras y la económica a través de indicadores y modelos de optimización que permitan identificar los programas óptimos a ejecutar. Para el caso de la presente investigación se aplica criterios técnicos con el fin de aplanar la curva de demanda evitando efectos indeseados en el perfil de voltaje; en el caso económico se aplica una programación binaria la cual trata de maximizar el beneficio activando los programas de respuesta de la demanda que se deben ejecutar basado en la limitación presupuestal. Al correr el modelo de optimización se puede identificar claramente una dependencia del beneficio y del presupuesto, pero también de los flujos temporales necesarios para cada programa, pues cualquier variación a dichos flujos cambia los valores de VAN del escenario y por lo tanto el modelo planteado, modificando en algunos casos la respuesta óptima. Los valores de ahorro energético logrados son del 17.8% y 8.03% con control de carga directo, 2.3% y 4.33% con pico crítico y del 1.2% y 2.17% con tiempo de uso.

Finalmente, se puede concluir que para una correcta toma de decisiones en cuanto a programas de respuesta de la demanda

las dos perspectivas técnica y económica son necesarias, así como la correcta parametrización de variables con el fin de lograr resultados más cercanos a la realidad de una microrred eléctrica.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana y al Centro Nacional de Control de Energía-Ecuador por su apertura y aporte a la presente investigación.

#### REFERENCES

- [1] F. Ji, L. Xu, and Z. Wu, "Effect of driving cycles on energy efficiency of electric vehicles," *Science in China, Series E: Technological Sciences*, vol. 52, no. 11, pp. 3168–3172, 2009.
- [2] G. J. Offer, D. Howey, M. Contestabile, R. Clague, and N. P. Brandon, "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system," *Energy Policy*, vol. 38, no. 1, pp. 24–29, 2010.
- [3] S. Iqbal, A. Xin, M. U. Jan, M. A. Abdelbaky, H. U. Rehman, S. Salman, S. A. A. Rizvi, and M. Aurangzeb, "Aggregation of EVs for Primary Frequency Control of an Industrial Microgrid by Implementing Grid Regulation Charger Controller," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 141977–141989, 2020.
- [4] L. Sun, C. C. Chan, R. Liang, and Q. Wang, "State-of-art of Energy System for New Energy Vehicles," in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2008.
- [5] A. Khaligh and Z. Li, "Battery, ultracapacitor, fuel cell, and hybrid energy storage systems for electric, hybrid electric, fuel cell, and plug-in hybrid electric vehicles: State of the art," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806–2814, 2010.
- [6] F. R. Salmasi, "Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 56, no. 5 I, pp. 2393–2404, 2007.
- [7] B. Frieske, M. Kloetzke, and F. Mauser, "Trends in vehicle concept and key technology development for hybrid and battery electric vehicles," *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2014*, pp. 1–12, 2014.
- [8] D. Vuljaj, B. Ban, and M. Vražić, "Híbrido drive dimensioning using MATLAB software package," *2016 13th International Conference on Development and Application Systems, DAS 2016 - Conference Proceedings*, pp. 172–175, 2016.
- [9] K. S. Grewal and P. M. Darnell, "Model-based EV range prediction for electric hybrid vehicles," in *IET Conference Publications*, pp. 1–6, 2013.
- [10] K. K. Thanapalan, J. R. Kim, S. J. Carr, F. Zhang, G. C. Premier, J. Maddy, and A. J. Guwy, "Progress in the development of renewable hydrogen vehicles, storage, infrastructure in the UK: Hydrogen Centre in its early years of operation," *Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing, ICICIP 2011*, vol. 44, no. PART 2, pp. 738–742, 2011.
- [11] K. N. Kumar and K. J. Tseng, "Impact of demand response management on chargeability of electric vehicles," *Energy*, vol. 111, pp. 190–196, 2016.
- [12] D. Qin, Q. Sun, R. Wang, D. Ma, and M. Liu, "Adaptive bidirectional droop control for electric vehicles parking with vehicle-to-grid service in microgrid," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 793–805, 2020.
- [13] W. Hoiles and V. Krishnamurthy, "Nonparametric demand forecasting and detection of energy aware consumers," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 695–704, 2015.
- [14] D. Papadaskalopoulos and G. Strbac, "Decentralized Participation of Flexible Demand in Electricity Markets - Part II: Application With Electric Vehicles and Heat Pump Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 3658–3666, 2013.
- [15] M. M. Mahfouz and M. R. Iravani, "Grid-Integration of Battery-Enabled DC Fast Charging Station for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 35, no. 1, pp. 375–385, 2020.
- [16] H. U. R. Habib, U. Subramaniam, A. Waqar, B. S. Farhan, K. M. Kotb, and S. Wang, "Energy cost optimization of hybrid renewables based V2G microgrid considering multi objective function by using artificial bee colony optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 62076–62093, 2020.
- [17] M. B. Arias and S. Bae, "Electric vehicle charging demand forecasting model based on big data technologies," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 327–339, 2016.

- [18] A. Morales-Acevedo, "Forecasting future energy demand: Electrical energy in Mexico as an example case," *Energy Procedia*, vol. 57, pp. 782–790, 2014.
- [19] D. Trujillo and E. Torres, "Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 1, pp. 5–11, 2020.
- [20] I. E. A. International and E. Agency, "Global EV Outlook 2018 Towards cross-modal electrification," *Global EV Outlook 2018*, 2018.
- [21] F. Rassaei, W. S. Soh, and K. C. Chua, "Demand Response for Residential Electric Vehicles with Random Usage Patterns in Smart Grids," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 4, pp. 1367–1376, 2015.
- [22] J. Asamer, A. Graser, B. Heilmann, and M. Ruthmair, "Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 46, pp. 182–199, 2016.
- [23] N. Z. Xu and C. Y. Chung, "Challenges in Future Competition of Electric Vehicle Charging Management and Solutions," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1323–1331, 2015.
- [24] D. Niculae, M. Iordache, M. Stanculescu, M. Lavinia Bobaru, and S. Deleanu, "A Review of Electric Vehicles Charging Technologies Stationary and Dynamic," *The 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering*, pp. 9–12, 2019.
- [25] M. Sternad, M. Cifrain, D. Watzgenig, G. Brasseur, and M. Winter, "Condition monitoring of lithium-ion batteries for electric and hybrid electric vehicles," *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 126, no. 5, pp. 186–193, 2009.
- [26] F. Rassaei, W. S. Soh, and K. C. Chua, "Distributed Scalable Autonomous Market-Based Demand Response via Residential Plug-In Electric Vehicles in Smart Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3281–3290, 2018.
- [27] J. Gomez Marín, S. Carvajal, and A. Arango Manrique, "Programas de gestión de demanda de electricidad para el sector residencial en Colombia: Enfoque Sistémico," *Energética*, vol. 46, pp. 73–83, 2015.
- [28] S. Chen and C. C. Liu, "From demand response to transactive energy: state of the art," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 10–19, 2017.
- [29] O. Andonian, M. Rópolo, and E. Rabbia, "Un modelo de programación de inversiones," in *XXXVII Jornadas nacionales de profesores universitarios de matemática financiera*, pp. 1–18, 2016.
- [30] D. Trujillo, F. Mosquera, and E. Garcia, "Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales," *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 2, 2021.
- [31] J. A. Guacaneme, D. Velasco, and C. L. Trujillo, "Revisión de las características de sistemas de almacenamiento de energía para aplicaciones en micro redes," *Informacion Tecnológica*, vol. 25, no. 2, pp. 175–188, 2014.
- [32] G. López Jiménez, I. Isaac, J. González Sanchez, and H. Cardona Agudelo, "Integración de energías renovables (solar fotovoltaica) en campus upb laureles-micro red inteligente," *Investigaciones Aplicadas*, vol. 8, no. 2, pp. 152–159, 2014.
- [33] D. Jarrín and M. Garcia, "Gestión energética para una óptima respuesta a la demanda en micro redes inteligentes," *2017 International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, pp. 14–20, 2017.
- [34] I. Arul Doss Adaikalam and C. K. Babulal, "Demand Response Program with Different Elasticities," *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Electrical Engineering*, vol. 44, no. 3, pp. 1165–1171, 2020.
- [35] J. Inga-Ortega, E. Inga-Ortega, C. Gómez, and R. Hincapié, "Electrical load curve reconstruction required for demand response using compressed sensing techniques," *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 1–6, 2017.
- [36] Y. Wang, Q. Chen, C. Kang, M. Zhang, K. Wang, and Y. Zhao, "Load profiling and its application to demand response: A review," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 117–129, 2015.
- [37] Ž. Zore, L. Čuček, D. Širovnik, Z. Novak Pintarič, and Z. Kravanja, "Maximizing the sustainability net present value of renewable energy supply networks," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 131, pp. 245–265, 2018.
- [38] H. R. Omran, S. M. EL-Marsafy, F. H. Ashour, and E. F. Abadir, "Economic evaluation of aromatics production, a case study for financial model application in petrochemical projects," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 26, no. 4, pp. 855–863, 2017.
- [39] F. Morales, G. Carrasco, and G. Terranove, "La evaluación de proyectos de inversión: una perspectiva financiera," *Opuntia Brava*, vol. 11, pp. 465–473, 2019.
- [40] M. C. Tato, "El Valor Actual Neto (VAN) como criterio fundamental de evaluación de negocios. (Spanish)," *Economía y Desarrollo*, vol. 128, no. 1, pp. 180–194, 2001.
- [41] X. Lei, T. Shiyun, D. Yanfei, and Y. Yuan, "Sustainable operation-oriented investment risk evaluation and optimization for renewable energy project: a case study of wind power in China," *Annals of Operations Research*, vol. 290, pp. 223–241, 2020.
- [42] S. S. Reddy, V. Sandeep, and C. M. Jung, "Review of stochastic optimization methods for smart grid," *Frontiers in Energy*, vol. 11, no. 2, pp. 197–209, 2017.



**Danny Trujillo Sandoval** Electrical Engineer from the Escuela Politécnica Nacional - Ecuador (2009), Master in Business Management - Escuela Politécnica Nacional - Ecuador (2012), Master of Electricity mention in Power Electrical Systems – Universidad Politécnica Salesiana. He has worked in various public and private institutions such as CENACE - Ecuador, Escuela Politécnica Nacional, Universidad Internacional SEK.



**Edwin García Torres** Graduated in Electrical Engineering from the Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador. Master in Energy Management. He is currently working towards his doctorate in Engineering with the Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia. Area of interest: demand response, energy management systems, smart microgrids. He is a professor of Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador.