



Ingrid M. Vila Biaggi, M.S., P.E. presidenta

Cathy Kunkel, analista energía

Agustín A. Irizarry Rivera, Ph. D., P.E. consultor

enero 2022

---

## Estudio de integración de vehículos eléctricos en Puerto Rico

CAMBIO desarrolló un estudio de modelaje del sistema de distribución de la red eléctrica de Puerto Rico, evaluando el impacto de una penetración significativa de vehículos eléctricos en la red actual versus una red descentralizada, como propone Queremos Sol.

Este estudio complementa los estudios del modelaje del sistema eléctrico publicados por CAMBIO en marzo de 2021 que analizaron y validaron la viabilidad de la propuesta Queremos Sol. Queremos Sol propone la transición hacia 75% energía renovable distribuida en 15 años, basado en la energía solar en techos. Esto incluye equipar a todos los hogares en el país con un sistema básico de energía solar con baterías para que todos puedan tener acceso a la resiliencia energética. Los estudios del modelaje de 2021 demostraron que esta transición es viable con mejoras modestas en el sistema de distribución y conllevaría ahorros significativos en el costo de combustible sin menoscabar la confiabilidad o calidad de potencia de la red.<sup>1</sup>

La sostenibilidad energética de Puerto Rico depende no solamente de una transformación del sistema eléctrico, sino también del sistema de transportación. Esto implica ampliar y mejorar las opciones y el uso del transporte público, así como integrar los vehículos eléctricos. Esto permite reducir el uso de combustibles fósiles y por consiguiente reducir las emisiones relacionadas a la utilización de vehículos a base de sistemas de combustión. Se estima que cada vehículo emite anualmente 4.6 toneladas métricas de CO<sub>2</sub>.<sup>2</sup> En el caso de Puerto Rico, el Departamento de Transportación y Obras Públicas (DTOP) informó que para el 2019 habían 2.8 millones de vehículos registrados, lo que implica una generación de aproximadamente 13 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> anualmente.<sup>3</sup> Una transición a vehículos eléctricos con capacidad de recarga por medios renovables implicaría una reducción importante en emisiones de gases de invernadero y otros contaminantes producto de la combustión fósil.

El estudio actual evalúa la integración de vehículos eléctricos, lo que tendrá impactos en el sistema eléctrico al aumentar la demanda energética y cambiar los patrones del uso eléctrico. El estudio evalúa el impacto en la red actual, de generación centralizada y a base de combustibles

---

<sup>1</sup> CAMBIO, [Estudio de Integración de Recurso Solar Distribuido](#), marzo 2021.

<sup>2</sup> Environmental Protection Agency, [Greenhouse Gas Emissions from Typical Passenger Vehicles](#), marzo 2018.

<sup>3</sup> Departamento de Transportación y Obras Públicas de Puerto Rico, [SHSP Plan Estratégico de Seguridad Vial 2019-2023](#), 2019.

fósiles, así como en una red descentralizada con el 75% de su generación descentralizada y a base de energía renovable en techos y almacenamiento, como propone Queremos Sol. Debido a la fragilidad y falta de confiabilidad de la red eléctrica actual, es importante analizar y planificar bien el impacto de penetraciones más altas provenientes de cargadores de vehículos eléctricos.

El estudio de modelaje realizado evalúa la integración de cargadores eléctricos en 10% hasta 40% de los hogares y concluye que un sistema eléctrico descentralizado y basado en la energía renovable en techos, como propone Queremos Sol, resulta mucho más resiliente para integrar cargadores de vehículos eléctricos. En específico los resultados del estudio nos permiten derivar las siguientes conclusiones:<sup>4</sup>

- El integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 20% de los hogares y negocios de Puerto Rico a la red actual requiere una inversión aproximada de \$250 millones. En comparación, integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 20% de los hogares y negocios de Puerto Rico en una red con 75% de energía distribuida no requiere inversión alguna.
- El integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 40% de los hogares y negocios a la red actual requiere una inversión aproximada de \$440 millones. En comparación, integrar esta misma cantidad a la red con 75% de energía distribuida requiere solamente \$41 millones en mejoras, o diez veces menos. Estas mejoras se concentrarían en las líneas de bajo voltaje (4.16 kV) y en las líneas rurales y largas.
- El costo de mejoras necesarias a la red para integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 40% de los hogares y negocios de Puerto Rico en una red con 75% de energía renovable distribuida es menor que el costo de las mejoras para integrar 10% de cargadores de vehículos eléctricos a la red centralizada y dependiente de combustibles fósiles que tenemos hoy.

El costo de las mejoras necesarias al sistema de distribución para integrar cargadores de vehículos eléctricos es significativamente más bajo con una red de distribución que ya integra una alta penetración de energía solar en techos.

En este reporte, presentamos un trasfondo sobre el crecimiento reciente de vehículos eléctricos en Puerto Rico y proyecciones sobre posibles aumentos en la integración de vehículos eléctricos y su impacto en la red. Además, presentamos un resumen de la metodología, resultados y conclusiones del modelaje de la integración de vehículos eléctricos a la red eléctrica.

---

<sup>4</sup> Los costos podrían variar hasta un 30%, por la incertidumbre y variabilidad entre los alimentadores individuales.

## I. Trasfondo: Vehículos eléctricos en Puerto Rico

Aunque los vehículos eléctricos en este momento representan una fracción pequeña del total de vehículos que transitan por las calles de Puerto Rico, el número de vehículos eléctricos está aumentando rápidamente. El Grupo Unido de Importadores de Autos reporta que las ventas de autos híbridos o eléctricos en los primeros cuatro meses del año 2022 fue 45% más alto en comparación con el mismo periodo del año 2021.<sup>5</sup> La misma entidad reporta que en abril de 2022, los vehículos híbridos o eléctricos representaron más de 3.1% de la demanda de vehículos nuevos en el país.<sup>6</sup>

Actualmente, Puerto Rico no cuenta con metas de política pública para el despliegue de vehículos eléctricos. Sin embargo, el gobierno federal ha establecido mediante orden ejecutiva una meta para que, al 2030, el 50% de los vehículos vendidos sean de cero emisiones.<sup>7</sup> Estados como Nueva York y California han incorporado metas más agresivas que disponen que el 100% de los vehículos vendidos sean de cero emisiones para el año 2035.<sup>8</sup>

En los próximos cinco años, Puerto Rico recibirá más de \$13.6 millones de fondos federales (de los cuales ya se ha recibido \$4.9 millones) para establecer 15 estaciones públicas de carga en tres carreteras de la isla.<sup>9</sup>

El despliegue de infraestructura para cargar vehículos eléctricos debe coordinarse para minimizar el impacto en la red eléctrica. La ubicación de cargadores tiene implicaciones en cuanto a dónde y cuándo las personas van a cargar sus vehículos. Si se ofrecen más opciones para cargar vehículos durante las horas de trabajo, por ejemplo, esto significaría que más personas cargarían sus vehículos durante las horas pico del sol, maximizando el uso directo de la energía solar para los vehículos eléctricos.

Estimamos que una penetración de 20% de vehículos eléctricos para el año 2035 aumentaría en 7% el consumo eléctrico ese año. Una penetración de 40% representaría un aumento de 13%. Este aumento en demanda, además de tener implicaciones en los recursos de generación, podría sobrecargar las líneas de distribución, creando la necesidad de mejoras para poder integrar más

---

<sup>5</sup> El Nuevo Día, [“Detallan el plan para la construcción de la red de recarga de vehículos eléctricos en Puerto Rico,”](#) 2 de agosto de 2022.

<sup>6</sup> El Nuevo Día, [“Crece la venta de autos híbridos y eléctricos en Puerto Rico: ¿se sostendrá?”](#), 4 de junio de 2022. (Nota: el 3.1% no incluye autos de marca Tesla).

<sup>7</sup> The White House, [“Fact Sheet: President Biden Announces Steps to Drive American Leadership Forward on Clean Cars,”](#) August 5, 2021.

<sup>8</sup> California Office of the Governor, [“Governor Newsom Announces California Will Phase Out Gasoline-Powered Cars & Drastically Reduce Demand for Fossil Fuel in California’s Fight Against Climate Change,”](#) September 23, 2020; Autoweek, [“New York Will Ban Sale of Gas-Engined Cars by 2035,”](#) September 15, 2021.

<sup>9</sup> El Nuevo Día, [“El gobierno de Biden aprueba el plan de Puerto Rico para construir infraestructura de carga para vehículos eléctricos,”](#) 14 de septiembre de 2022; The White House, [“President Biden’s Bipartisan Infrastructure Law is Delivering in Puerto Rico,”](#) November 2022.

lugares de carga. Esta situación puede representar un reto en Puerto Rico, dados los problemas de fluctuaciones de voltaje que ya aquejan la red eléctrica.

El Negociado de Energía inició en 2021 un procedimiento regulatorio relacionado con el despliegue de cargadores eléctricos, con la intención de planificar la interconexión de infraestructura de cargadores eléctricos a la red. Hasta el momento, el caso ha incluido una discusión de diseños tarifarios que incentivarían el uso de cargadores fuera de las horas pico de demanda eléctrica, y el Negociado ha impuesto una fecha límite de 30 de septiembre de 2023 para que LUMA cree una tarifa especial para los clientes residenciales con cargadores de vehículos eléctricos. El Negociado también ha ordenado a LUMA conocer mejor las necesidades de las comunidades de bajos recursos con relación a la transportación para integrarlas en su planificación. El caso no ha profundizado las mejoras a la red de distribución que deben priorizarse para integrar cargadores eléctricos.<sup>10</sup>

En las próximas secciones, presentamos un resumen de la metodología y resultados del “Análisis de Integración de Vehículos Eléctricos”, desarrollado en coordinación con WildKat Engineering, el cual arroja luz sobre el impacto de altas penetraciones de vehículos eléctricos en el sistema de distribución. Los resultados del estudio pueden contribuir a definir la política pública y las acciones necesarias para asegurar una integración confiable, costoefectiva y sostenible de vehículos eléctricos en Puerto Rico.

## II. Metodología

En este estudio, utilizamos 27 alimentadores de distribución que son representativos de los circuitos de distribución eléctrica en Puerto Rico. Estos 27 alimentadores (circuitos) de distribución son representativos de: circuitos cortos (< 5 millas), largos (> 20 millas) y medianos (entre 5 y 20 millas) e incorporan los diversos voltajes de distribución utilizados en Puerto Rico (4.16, 7.2, 8.32 y 13.2 kV entre línea viva y línea viva).

Por ejemplo, la Figura 1 muestra el detalle de ubicación del alimentador número 1203-02, Saint Just 03, en Carolina. Este alimentador tiene 9.6 millas de largo y discurre por una zona urbana, con demanda principalmente comercial. El alimentador opera a 4.16 kV nominales. Los colores indican la cantidad de fases en el alimentador de distribución y los puntos muestran la ubicación de los transformadores. El diámetro (grosso) del punto indica la capacidad del transformador.

---

<sup>10</sup> Caso NEPR-MI-2021-0013. Vea la [Resolución y Orden](#) de 13 de enero de 2023.

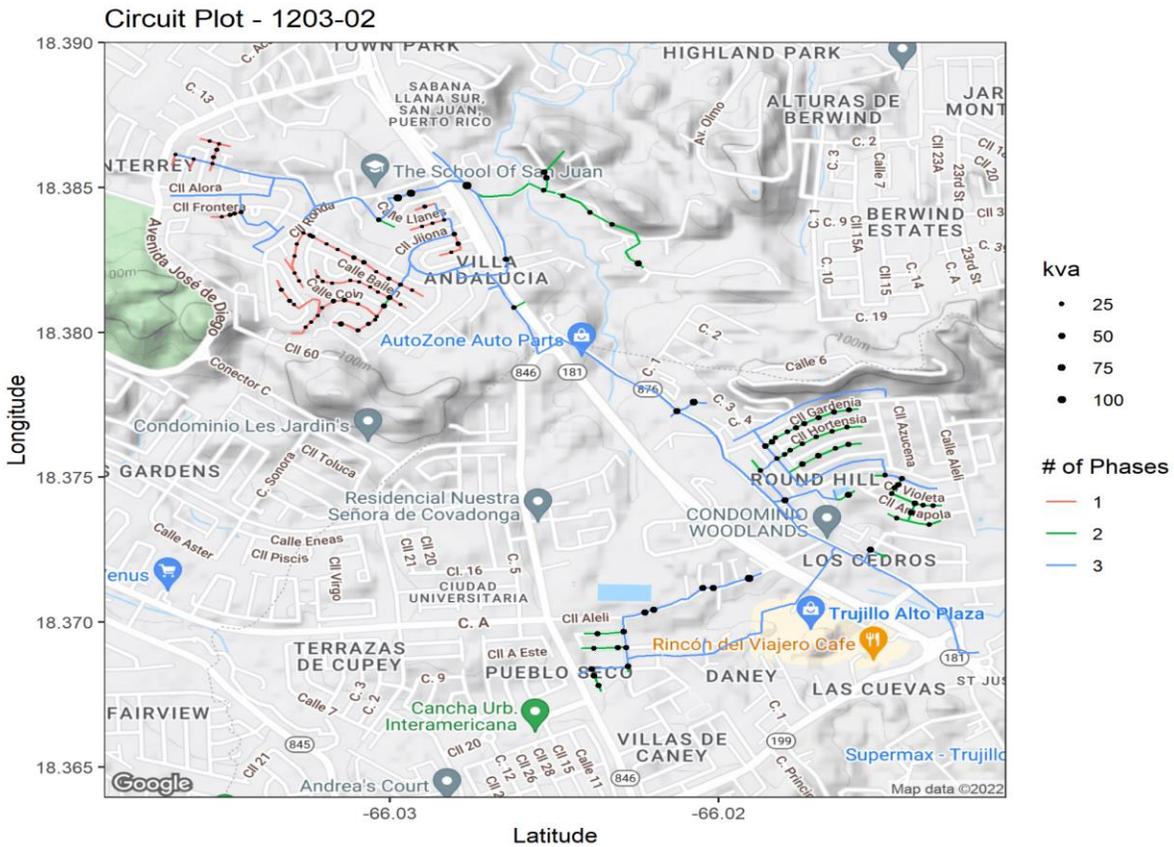


Figura 1. Alimentador número 1203-02, Saint Just 03, en Carolina. Este alimentador tiene 9.6 millas de largo y discurre por una zona urbana, con demanda principalmente comercial. El alimentador opera a 4.16 kV nominales.

El informe completo muestra la ubicación y características de cada uno de los 27 alimentadores modelados.

Además, los alimentadores se seleccionaron para asegurar representatividad geográfica y de zonas (rural y urbana) de Puerto Rico, como muestra el mapa de la Figura 2. Estos alimentadores representan el 2.5% del total de líneas de distribución del país. La Tabla 1, a continuación, contiene información de cada circuito modelado.

Número de identificación	Nombre	Región	Voltaje (kV)
8202-03	Adjuntas 03	Arecibo	8.32
8405-02	Manatí Urbano 02	Arecibo	13.2
7701-01	Hatillo 01	Arecibo	4.16
1704-01	Sierra Linda 01	Bayamón	4.16
1806-01	Levittown 01	Bayamón	13.2
9103-04	Santa Ana 04	Bayamón	8.32
2501-02	Vieques 02	Vieques	4.16
2602-03	Humacao 03	Caguas	8.32
3007-03	Gautier Benítez 03	Caguas	8.32
3014-04	Río Caña 04	Caguas	4.16
3201-04	Juncos 04	Caguas	4.16
3205-09	Juncos 2 09	Caguas	13.2
3801-02	Culebra 02	Culebra	4.16
2402-02	Loíza Valley 02	Carolina	13.2
1203-02	Saint Just 03	Carolina	4.16
2201-04	Luquillo 04	Carolina	8.32
6002-04	McKinley 04	Mayagüez	4.16
6702-04	Boquerón 04	Mayagüez	7.2
7011-02	T Bone 02	Mayagüez	13.2
4301-03	Maunabo 03	Ponce ES	4.16
3501-03	Aibonito 03	Ponce ES	8.32
4003-03	Jobos 03	Ponce ES	13.2
5005-05	Pámpanos 05	Ponce OE	4.16
5016-03	Villa del Carmen 03	Ponce OE	13.2
1525-01	Las Lomas 01	San Juan	4.16
1529-11	San Patricio 11	San Juan	4.16
1403-01	Chardón 01	San Juan	13.2

Tabla 1. Número de identificación, nombre, región y voltaje nominal de los circuitos de distribución modelados en el estudio.



Figura 2. Los 27 circuitos de distribución eléctrica modelados en el estudio en relación con su ubicación en Puerto Rico, Vieques y Culebra.

Los datos utilizados para desarrollar los modelos provienen del trabajo realizado en el “Estudio de integración del recurso solar distribuido”, desarrollado por CAMBIO en el 2021<sup>11</sup> y que partió de datos provistos, en origen, por la Autoridad de Energía Eléctrica. Sin embargo, los datos utilizados en el modelaje se calcularon de manera independiente. Los modelos desarrollados siguen fielmente los estándares de la industria eléctrica.

Para comparar la red actual, centralizada y dependiente de combustibles fósiles, con una red descentralizada a base de recursos renovables en techos, como propone Queremos Sol, se utilizó un modelo en que se añadieron sistemas fotovoltaicos residenciales de 2.7 kW de energía solar con 12.6 kWh de baterías, y sistemas fotovoltaicos comerciales para lograr 75% del consumo eléctrico en el año 2035.<sup>12</sup> Estas instalaciones fotovoltaicas se modelaron en las líneas de distribución conectadas a la red usando los transformadores existentes. La cantidad de sistemas fotovoltaicos con baterías en cada transformador depende de la cantidad de residencias y comercios conectados al transformador. Se utilizaron perfiles de energía solar de las diferentes regiones de la isla para modelar la generación de estos sistemas fotovoltaicos.

Tanto para la red actual centralizada y la red descentralizada con energía distribuida, se modelaron cuatro escenarios de penetraciones de vehículos eléctricos: 10%, 20%, 30% y 40%.

<sup>11</sup> [www.cambiopr.org/solmastechos](http://www.cambiopr.org/solmastechos)

<sup>12</sup> Este modelo se utilizó en el “Estudio de integración de recurso solar distribuido” publicado por CAMBIO en 2021. Los sistemas fotovoltaicos suplen el 75% del consumo energético antes de que se añadan los cargadores para vehículos eléctricos.

¿Qué significa esto? 40% de penetración significa que en el 40% de todos los puntos de demanda de electricidad de un circuito de distribución se añade una estación de carga de vehículo eléctrico. Es decir, en el 40% de las residencias del circuito de distribución se añade una estación de carga de vehículo eléctrico. ¿Cómo se seleccionan los lugares en los que se añade el cargador de vehículo eléctrico? Los lugares se seleccionan al azar, pero siempre conectados a un transformador en uso. ¿Cuánta energía consumen estos cargadores de vehículos eléctricos? Se usa un perfil de consumo energético basado en el desempeño actual de cargadores eléctricos observados en otros estudios. Fuera del consumo de los cargadores, se utilizó el mismo consumo energético para el año 2035 que se modeló en los estudios anteriores de 2021.

Se modeló el desempeño de cada línea de distribución utilizando la herramienta OpenDSS<sup>13</sup> bajo los siguientes nueve (9) escenarios:

Escenario	Penetración de Vehículos Eléctricos	Penetración de Energía Renovable Distribuida <sup>14</sup>
caso base	0%	Actual
EV10	10%	Actual
EV20	20%	Actual
EV30	30%	Actual
EV40	40%	Actual
PVEV10	10%	75%
PVEV20	20%	75%
PVEV30	30%	75%
PVEV40	40%	75%

Tabla 2. Los nueve escenarios modelados

El primer escenario, sin vehículos eléctricos y sin una penetración alta de energía renovable distribuida, provee un punto de referencia (“baseline”) sobre el desempeño del sistema actual.

<sup>13</sup> OpenDSS es un software de calidad industrial, capaz de modelar en detalle el comportamiento de los alimentadores de distribución, incluyendo desbalance en las fases.

<sup>14</sup> Enfatizamos que “75%” significa que los sistemas fotovoltaicos suplen 75% de la energía que se consume en Puerto Rico antes de añadir los cargadores de vehículos eléctricos.

En todos los escenarios, se evaluaron con OpenDSS unas métricas que indican la capacidad del sistema para manejar ese nivel de penetración de vehículos eléctricos. Estas métricas incluyen: violaciones del voltaje (las horas en el año en que el voltaje del alimentador se encuentra fuera de sus límites de diseño), violaciones térmicas (cuando la corriente se encuentra fuera de los límites de diseño del alimentador), y las pérdidas eléctricas (la cantidad de electricidad, en kilovatio-horas, que se pierden en el alimentador).

Después de evaluar el desempeño de los 27 alimentadores representativos, se extrapolaron los resultados a todo el sistema de distribución de la isla y se estimó el costo de las mitigaciones (mejoras) necesarias para atender las violaciones producidas por la introducción de vehículos eléctricos.

### III. Resultados

El modelaje revela que una red de distribución con una alta penetración (75%) de energía renovable distribuida **puede incorporar más vehículos eléctricos sin requerir mejoras al sistema** en comparación con una red con generación centralizada. La razón es que los sistemas distribuidos que producen energía cerca de donde se consume apoyan también el voltaje del alimentador y esto mitiga la necesidad de actualizar la línea.

Las siguientes gráficas demuestran que, en los 27 alimentadores analizados, un alimentador con 75% energía renovable sufre menos pérdida de energía, violaciones de voltaje y violaciones térmicas ante una mayor integración de vehículos eléctricos. Específicamente, las gráficas comparan el aumento en pérdidas, violaciones de voltaje y violaciones térmicas cuando se añade 40% de vehículos eléctricos a los 27 alimentadores, bajo los escenarios de la red actual versus la red distribuida:

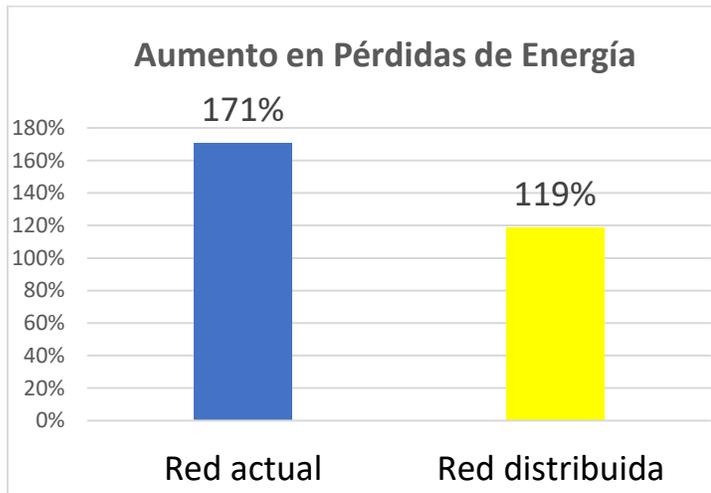


Figura 3. El aumento en pérdidas de energía cuando se añade 40% de vehículos eléctricos a los 27 alimentadores, bajo los escenarios de la red actual versus la red distribuida.

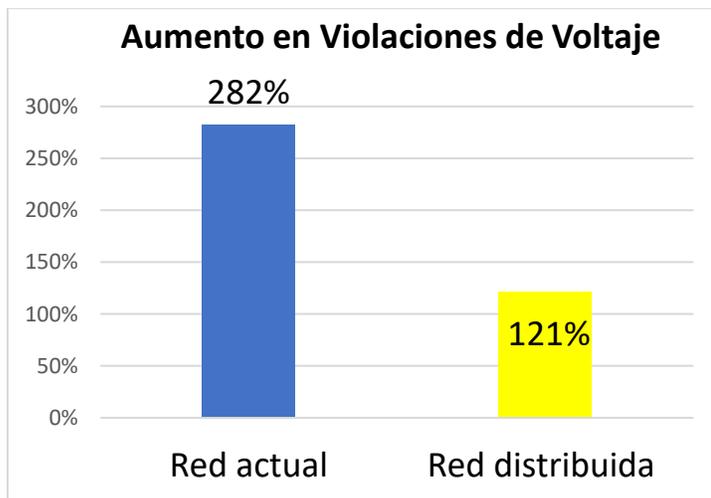


Figura 4. El aumento en violaciones de voltaje cuando se añade 40% de vehículos eléctricos a los 27 alimentadores, bajo los escenarios de la red actual versus la red distribuida.

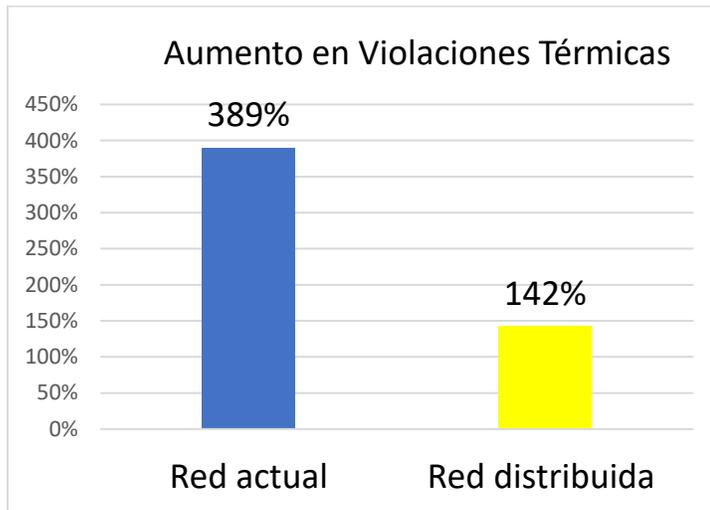


Figura 5. El aumento en violaciones térmicas cuando se añade 40% de vehículos eléctricos a los 27 alimentadores, bajo los escenarios de la red actual versus la red distribuida.

#### IV. Conclusión

La extrapolación de estos resultados a toda la isla permite las siguientes conclusiones<sup>15</sup>:

- Integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 20% de los hogares y negocios de Puerto Rico a la red actual requiere una inversión aproximada de \$250 millones. En comparación, integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 20% de los hogares y negocios de Puerto Rico en una red con 75% de energía distribuida no requiere inversión alguna.
- Integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 40% de los hogares y negocios a la red actual requiere una inversión aproximada de \$440 millones. En comparación, integrar esta misma cantidad a la red con 75% de energía distribuida requiere solamente \$41 millones en mejoras, o diez veces menos. Estas mejoras se concentrarían en las líneas de bajo voltaje (4.16 kV) y en las líneas rurales y largas.
- El costo de mejoras necesarias a la red para integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 40% de los hogares y negocios de Puerto Rico en una red con 75% de energía renovable distribuida es menor que el costo de las mejoras para integrar 10% de cargadores de vehículos eléctricos a la red centralizada y dependiente de combustibles fósiles que tenemos hoy.

Una red energizada con sistemas solares fotovoltaicos en techos y baterías puede integrar cargadores de vehículos eléctricos en el 40% de los hogares y negocios a un costo 10 veces menor que lo que representa integrarlos a la red eléctrica fósil y centralizada.

<sup>15</sup> Los costos podrían variar hasta un 30%, por la incertidumbre y variabilidad entre los alimentadores individuales.

El estudio de modelaje que se presenta aquí demuestra un beneficio importante de una red eléctrica distribuida: esta ofrece un mejor desempeño al añadir cargadores de vehículos eléctricos. Este resultado tiene implicaciones importantes para las transiciones de los sistemas eléctricos y de transporte de Puerto Rico. La falta de confiabilidad del sistema eléctrico ya representa una barrera para el despliegue de vehículos eléctricos en Puerto Rico, dado que las personas que no tienen sus propios sistemas fotovoltaicos no quieren encontrarse sin luz y sin transportación durante los apagones frecuentes. La coalición Queremos Sol propone una transición justa hacia la energía solar en techos, utilizando los fondos federales disponibles para alcanzar 75% de energía renovable distribuida en 15 años, una transición que conllevaría beneficios en términos de resiliencia, asequibilidad y más independencia del mercado de los combustibles fósiles.