

Microrredes eléctricas: Soluciones energéticas para comunidades aisladas

***Armando Jiménez Zavala**

Universidad Tecnológica de Manzanillo

armandojz@gmail.com

Joel Salome Baylon

Universidad Tecnológica de Manzanillo

Resumen

Imagina un mundo sin acceso a electricidad por medios convencionales, donde las personas dependen de soluciones costosas e ineficientes para cubrir sus necesidades energéticas. Para más de 775 millones de personas en el mundo, esta es una realidad. En México el nivel de electrificación es superior al 99.5%, sin embargo, esta cifra aún representa miles de personas sin acceso pleno al suministro de electricidad económica, confiable y continua. Las microrredes eléctricas ofrecen una solución sostenible para llevar energía limpia y confiable a las zonas más remotas, lo que las convierte en una opción sostenible que puede impulsar el desarrollo económico y social de las comunidades aisladas de la red eléctrica, al tiempo que mitiga las emisiones contaminantes.

La electricidad es el motor que impulsa el desarrollo económico, social y tecnológico en el mundo moderno, siendo esencial para la calidad de vida y progreso humano. Sin embargo, esta realidad contrasta con la situación de millones de personas que viven en la oscuridad debido a su lejanía de las redes de distribución de energía. Es aquí donde las microrredes eléctricas cuentan con el

potencial para transformar la vida de comunidades aisladas, cerrando la brecha de desigualdad energética y trayendo consigo beneficios ambientales y económicos.

Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), alrededor de 775 millones de personas carecen de electricidad, y 2,300 millones dependen de

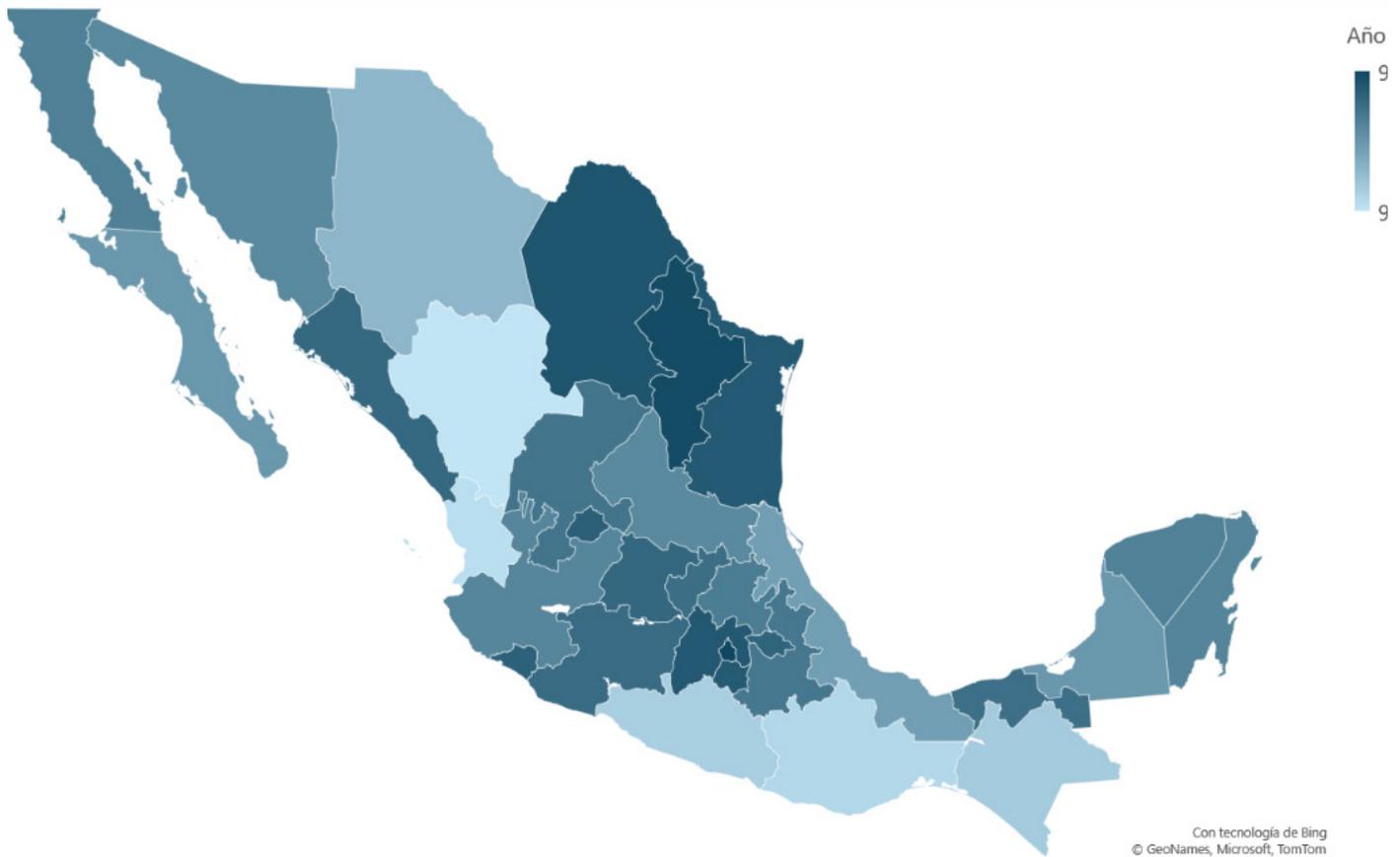


Figura 1. Nivel de electrificación por entidad federativa al 2021. Elaboración propia con datos de CENACE.

combustibles tradicionales como la biomasa, carbón o querosén para cocinar [1].

En México, a pesar de que más del 99% de la población cuenta con acceso a la electricidad, todavía existen comunidades rurales y aisladas que viven sin este recurso. De acuerdo con información proporcionada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en México hay poco más de 46 millones de usuarios que cuentan con un contrato de suministro de energía [2]. El programa de Desarrollo Eléctrico Nacional (PRODESEN) en su edición 2024-2038, revela que en México se cuenta con una cobertura eléctrica al cierre del 2023 del 99.43% de la población. Así mismo, revela que aún existen 743,685 habitantes sin acceso las redes de distribución [3].

A pesar de la importancia que tiene el

acceso y aprovechamiento de la electricidad, aún hay comunidades y pequeños poblados que logran acceder a estos beneficios, principalmente por los altos costos asociados a la construcción de infraestructura y a su lejanía de las redes principales.

Existe información proporcionada por la propia CFE y por el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), donde dan cuenta del nivel de electrificación a nivel nacional, desglosado por entidad federativa. Estos reportes no se actualizan con regularidad, por lo que la granularidad de la información está disponible sólo para años previos. Sin embargo, sí se cuenta con reportes más regulares y actualizados en donde la CFE ha indicado que el nivel de electrificación alcanza el 99.51%, al mes de julio del 2024 [2].

En la Figura 1, se muestra el desglose de electrificación por entidad federativa al 2021. Puede observarse que cada estado presenta variaciones en el nivel de acceso a electricidad, que va desde el 97.7% en Durango, hasta el 99.94% en la actual Ciudad de México.

Aunque la electrificación alcanza casi el 100%, algunas comunidades aún carecen de este recurso esencial. Actualmente el sistema eléctrico mexicano está compuesto por una red compleja de infraestructura que comprende generación, transmisión, distribución y comercialización de electricidad.

Al tratarse de un sistema que abarca todo el país, con más de 100 mil km de líneas de transmisión,

el sistema eléctrico enfrenta desafíos inherentes a su complejidad, como son la modernización para mejorar la resiliencia y la eficiencia energética, integración de más energías renovables en la red y por supuesto, la expansión de la infraestructura de transmisión y distribución en áreas rurales y comunidades aisladas.

En comunidades sin electrificación, las personas recurren a alternativas como generadores diésel o de gasolina, utilizados por periodos cortos para cubrir necesidades básicas. Algunos otros pueden tener instalados sistemas de generación de energía mediante paneles solares fotovoltaicos, o estrategias de solución provisional mediante el uso de baterías que se recargan de forma eventual. Sin embargo, indudablemente existen comunidades,

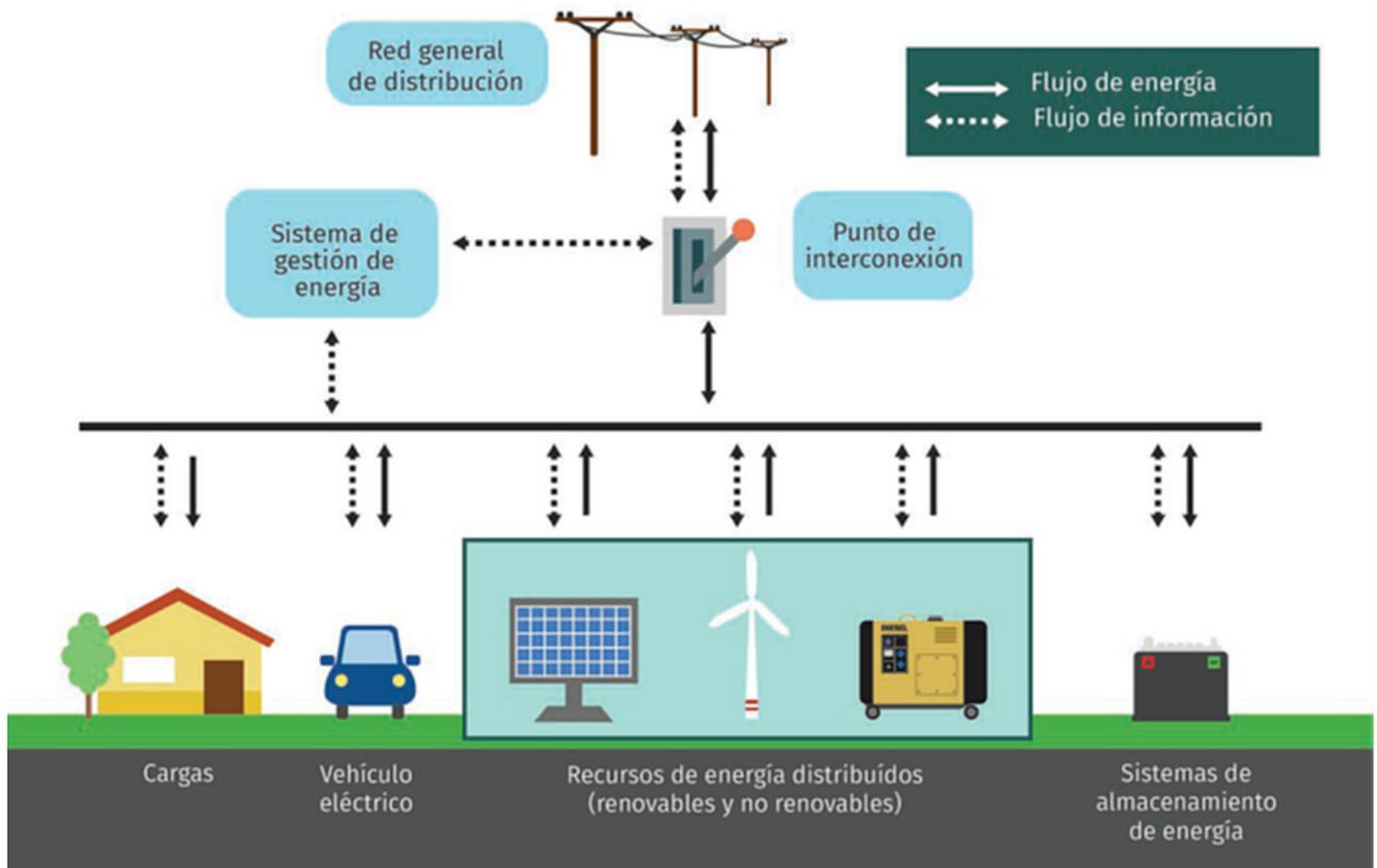


Figura 2. Esquema conceptual de microrred. Tomado de [5].

rancherías, o cabañas aisladas en las que simplemente no se cuenta con electricidad.

La electrificación de comunidades remotas es costosa por la infraestructura requerida desde la red más cercana. En muchos casos, esto puede requerir tendidos de energía de decenas de kilómetros, lo que incrementa significativamente la inversión económica necesaria.

Existen programas que pretenden contribuir a cerrar la brecha en torno a la pobreza energética. El Fondo de Servicio Universal Eléctrico (FSUE) tiene el objetivo de ampliar la electrificación de comunidades rurales y zonas urbanas marginadas. Para el 2024-2025 se tiene la meta de realizar 9,18 obras de extensión de red y 1,727 obras de sistemas aislados, lo que beneficiará a 585 mil habitantes, mediante una inversión de 7,865 millones de pesos [3].

De acuerdo con información disponible en bases de datos de CFE [4], el costo de electrificación ronda los \$395,521.00 por kilómetro de línea construida en media tensión, con tres fases a 13 mil volts, usando cable de aluminio en calibre 1/0 AWG. Adicionalmente deberán incluirse los costos de la red de distribución en baja tensión y subestación reductora al voltaje de utilización (127V, 220V). Haciendo un ejercicio en donde se tome como caso base una pequeña comunidad, distanciada de la red de distribución más próxima por 40 kilómetros, el costo de electrificación podría estar en el orden de 15.7 millones de pesos. Cabe mencionar que estos montos representan el costo de instalación de la infraestructura de transporte y suministro de energía, y debe agregarse el costo de la energía consumida por cada usuario.

Es aquí donde las microrredes eléctricas presentan una oportunidad para lograr la electrificación de aquellos sitios donde por su lejanía o bien por la cantidad reducida de usuarios, resulta poco conveniente implementar toda la infraestructura requerida para llevar energía eléctrica mediante las redes de distribución de CFE.

Una microrred eléctrica es un sistema energético descentralizado diseñado para operar de manera autónoma o interconectado a las redes de distribución eléctrica. Este tipo de sistema combina diversas fuentes de generación de energía, como energía renovable (solar, eólica, biomasa) y convencional (diésel, gas natural) con soluciones avanzadas de almacenamiento en baterías. Además, cuenta con su propia red de distribución para garantizar un suministro confiable de electricidad a las cargas conectadas.

Dependiendo de su nivel de complejidad, las microrredes integran tecnologías de control avanzadas incluyendo algoritmos basados en inteligencia artificial, que optimizan la producción, el almacenamiento y el consumo de energía. Estas capacidades permiten no solo gestionar los recursos energéticos de manera eficiente, sino también generar datos predictivos que mejoran la toma de decisiones en tiempo real.

En la Figura 2 puede observarse un esquema conceptual de la topología general de una microrred básica, que integra las cargas o puntos de consumo de energía, las fuentes de generación de energía, sistemas de almacenamiento y un control o sistema de gestión del comportamiento de todos estos componentes. Las microrredes pueden clasificarse por el tipo de energía utilizada, ya sea corriente directa (CD), corriente alterna (CA), o una combinación de ambas [5]:

- **Microrredes de corriente alterna**, utilizan un bus de conexión común en CA en donde se conectan todas las cargas. Son compatibles con la red convencional, lo que facilita la integración de cargas como electrodomésticos e iluminación.

- **Microrredes de corriente directa**, las microrredes que funcionan sólo con corriente directa son más eficientes porque no requieren convertidores de energía, lo que simplifica su operación; en este tipo de microrredes las cargas conectadas, es decir, iluminación,

electrodomésticos, etc., se conectan mediante convertidores CD/CD de alta eficiencia.

- **Microrredes híbridas de corriente alterna-directa**, que operan con una combinación de los otros dos tipos mencionados, por lo que pueden integrar cargas tanto en CA como en CD así como recursos de generación de energía y de almacenamiento; pueden integrarse también a las redes de distribución y logran reducir pérdidas por conversión de energía al conectar los elementos en la forma más eficiente posible.

Las microrredes eléctricas ofrecen la posibilidad de crear sistemas energéticos autónomos, conocidos como “*off-grid*” por su capacidad de operar desconectados de la red principal. Las microrredes *off-grid*, típicamente utilizan fuentes de energía renovable como el sol, el viento, el agua, la biomasa y la energía geotérmica, combinadas con sistemas de almacenamiento en baterías. Gracias a esta configuración, proporcionan electricidad confiable y económica en áreas donde extender la infraestructura convencional resulta inviable.

En aplicaciones industriales, donde los cortes de energía afectan gravemente la producción, las microrredes reducen la dependencia de la red eléctrica convencional al ofrecer seguridad y estabilidad en procesos que requieren un suministro continuo de energía. Además, representan una solución estratégica para alcanzar el 100% de electrificación en México, especialmente en zonas rurales y aisladas donde la expansión de la red eléctrica no es viable en el corto plazo.

Los avances tecnológicos recientes han potenciado la eficiencia y sostenibilidad de las microrredes en varias áreas clave:

- **Optimización mediante inteligencia artificial (IA)**: las microrredes incorporan algoritmos avanzados y aprendizaje automático (*machine learning*) que ajustan en tiempo real la distribución y el consumo de energía. Esta tecnología mejora la

integración de energías renovables y reduce emisiones de carbono al maximizar la eficiencia operativa.

- **Integración de fuentes de energía distribuida y renovable**: al producir energía cerca del punto de consumo, las microrredes minimizan las pérdidas en la transmisión y permitiendo una mayor integración de fuentes renovables, como la solar, eólica, minihidráulica, así como biodigestores, fomentando un modelo más sostenible y descentralizado.

- **Configuraciones aisladas (*off-grid*)**: en áreas remotas o con acceso limitado a la red eléctrica, las microrredes *off-grid* están permanente desconectadas de otras redes, por lo que operan como una isla energética.

- **Aplicaciones específicas**: las microrredes se adaptan a necesidades particulares, como reducir la demanda de energía de las redes de distribución, actuar como respaldo en casos de interrupciones en el suministro de energía o garantizar energía confiable en sectores educativos e industriales con alta demanda.

A nivel global las microrredes han demostrado su eficacia en proyectos de diversa escala, beneficiando desde pequeñas comunidades hasta grandes instalaciones industriales. Estas implementaciones subrayan el potencial transformador de las microrredes para construir un futuro energético más resiliente y sostenible. En México existen diversos casos de éxito en la implementación de microrredes que han permitido el acceso a la electricidad a comunidades alejadas de las redes de distribución de CFE:

- **Microrred de Puertecitos**. El poblado Puertecitos en el municipio de Ensenada, Baja California está a 60 km del poste de distribución más cercano. En el año 2016 se evaluó la posibilidad de extender la infraestructura eléctrica para conectarlo a la red de suministro de la CFE, con un costo estimado de 7.91 millones de pesos [6].

Se consideraron tres opciones de inversión:

1. Extender 60 km de líneas de distribución de CFE.
2. Instalar un generador diésel con un costo inicial aproximado de 500,000 pesos.
3. Construir una microrred.}

Finalmente, gracias al financiamiento del fondo de sustentabilidad energética SENER-CONACYT se logró la construcción de una microrred. Esta incluye 55.2 kilowatts (kW) de potencia en CD partir de módulos fotovoltaicos, 5 kW de generación eólica, un generador diésel de respaldo de 75 kilo voltamperios (kVA) y un sistema de almacenamiento en baterías de 522 kilowatts-hora (kWh). El proyecto requirió una inversión total de 4 millones de pesos.

El análisis comparativo muestra que, aunque los costos iniciales de un generador diésel son los más bajos, las microrredes tienen ventajas a largo plazo. El cálculo del costo nivelado de la energía, que incluye la vida útil de los equipos y los costos de operación y mantenimiento, revelan lo siguiente:

- Las redes de distribución tienen un alto costo inicial, aunque el costo de su operación es el más bajo.
- Las microrredes representan un costo intermedio.
- Los generadores diésel requieren menor inversión inicial, pero son los más costosos, principalmente debido al precio del combustible.

Es así como, mediante el análisis realizado al caso de implementación en Puertecitos presentado en [6], se llegó a la conclusión que la microrred tiene un costo nivelado de energía 30% menor en comparación a la inversión en red eléctrica de distribución desde el punto de acceso más cercano, y que es 45% más económica que emplear un generador diésel.

Esta evaluación destaca a las microrredes como una solución eficiente y sostenible para comunidades remotas. La electrificación mediante microrredes eléctricas en zonas rurales no solo mejoraría la calidad de vida de los habitantes al proporcionarles un servicio básico, sino que también impulsaría el desarrollo económico local. Al tener acceso a electricidad confiable, las comunidades podrían desarrollar actividades productivas más eficientes, como la agricultura tecnificada, el comercio y la manufactura a pequeña escala.

Por otro lado, se facilita el acceso a servicios básicos como la salud y la educación, permitiendo el uso de tecnologías médicas, sistemas de comunicación y equipamiento educativo. Así mismo, al disminuir la dependencia de combustibles fósiles para la generación de energía, se reducen las emisiones contaminantes, lo que contribuye no solo al cumplimiento de los compromisos de México en materia de sostenibilidad y mitigación del cambio climático, sino también a la reducción en la incidencia de enfermedades asociadas con la exposición a partículas contaminantes, provocado por la falta de acceso a métodos de cocción de alimentos empleando combustibles más limpios [1].

La implementación de microrredes eléctricas comunitarias de baja complejidad, orientadas a suministrar las necesidades primarias para impulsar la economía en pequeñas comunidades rurales ya existen. Su evolución hacia modelos más disruptivos podría transformar aún más el panorama energético. Por ejemplo, el desarrollo de microrredes inteligentes basadas en *blockchain* permitiría gestionar de manera descentralizada la generación y el consumo de energía, reduciendo costos administrativos y fomentando un intercambio energético entre comunidades. Este modelo, conocido como 'prosumidor energético', permite a los usuarios generar, consumir y vender electricidad dentro de una red local, promoviendo la autosuficiencia energética.

En conclusión, las microrredes eléctricas representan una solución innovadora y sostenible para enfrentar el desafío de electrificar comunidades aisladas. Además de ofrecer acceso confiable y económico a la electricidad, estas tecnologías fomentan la integración de energías renovables e impulsan el desarrollo social y económico. En un contexto de cambio climático, las microrredes pueden desempeñar un papel crítico como sistemas resilientes ante eventos extremos.

Los casos de éxito demuestran una y otra vez que las microrredes pueden ser una alternativa viable frente a las redes tradicionales y los generadores diésel, no solo por sus menores costos nivelados a largo plazo, sino también por los beneficios ambientales y la mejora en la calidad de vida que ofrecen. Es hora de que gobiernos, empresas y ciudadanos se unan para llevar electricidad limpia y accesible a cada rincón del país.

Referencias

- [1] IEA, "World Energy Outlook 2023", Paris, 2023. Consultado: el 29 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: www.iea.org
- [2] CFE, "Boletín de Prensa CFE-BP-088/24vF 16 de agosto de 2024", ago. 2024. Consultado: el 29 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=7125>
- [3] Secretaría de Energía, "PRODESEN 2024-2038", may 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/es/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2024-2038?idiom=es>
- [4] CFE, "LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN, PARA REDES AÉREAS EN MEDIA TENSIÓN, CON POSTES DE CONCRETO, EN ÁREA RURAL; COSTO POR KILÓMETRO". Consultado: el 29 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Aportaciones/Paginas/05_lineasDistribucionAereas/concuotK008.aspx
- [5] J. Meneses Ruiz, J. C. Montero Cervantes, y H. Godínez Enríquez, "Las Microrredes Eléctricas y la Transición Energética de México", vol. 1, pp. 18–23, noviembre de 2018. [En línea]. Disponible en: <https://transicionenergetica.ineel.mx>
R. Cota, N. Velázquez, E. Gonzalez San Pedro, y J. A. Aguilar-Jiménez, "MICRORRED AISLADA PARA UNA COMUNIDAD PESQUERA DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO: CASO DE ESTUDIO", en IV Congreso Iberoamericano Sobre Microrredes con Generación Distribuida de Renovables, Concepción, Chile, oct. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/309486824>