



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**Microrredes con generación  
fotovoltaica en entornos urbanos**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera en Energías Renovables**

**P R E S E N T A**

Carla Sahori Seefoó Jarquín

**DIRECTOR DE TESIS ACADÉMICO**

Dr. Miguel Robles Pérez



**IER**  
Instituto de Energías  
Renovables



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

**Temixco, Mor., a 3 de noviembre de 2017**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



# Microrredes con generación fotovoltaica en entornos urbanos.

por

C. S. Seefoó

Presentado al Instituto de Energías Renovables y al Instituto de Ingeniería  
en cumplimiento con los requerimientos para obtener el título de  
Ingeniera en Energías Renovables

## Resumen

Esta tesis propone una estrategia para el estudio teórico de la geometría, configuración y desempeño en estado estable de microrredes eléctricas urbanas en México. Para tal efecto, se consideran herramientas propias de las ciencias computacionales, aplicando un enfoque multidisciplinario entre la ingeniería en energías renovables y los sistemas de potencia; ciencia de datos y mecánica estadística. Se desarrolló un método que genera ensambles estadísticos de las propiedades de posibles microrredes eléctricas idealizadas con restricciones espaciales, siendo los datos de entrada los mapas de edificaciones y datos reales de consumo y generación eléctricos. Se propone un indicador que evalúa la media del tamaño nodal, cableado y criterio de regulación de voltaje con el fin de seleccionar la mejor configuración.

Mediante la ubicación de 17,131 edificaciones se analizó la topología de Temixco, Morelos y con la estrategia desarrollada se encontró que, dada la dispersión urbana del lugar, los casos críticos tanto de edificaciones aisladas como de microrredes de gran tamaño o con mayores caídas de voltaje, se encuentran en áreas suburbanas en la periferia de la ciudad. Se propone tratar estos casos críticos particularmente con el fin de homogeneizar la configuración de las microrredes formadas y mejorar el soporte de voltaje local. Referente al impacto de la integración de generación fotovoltaica, aún con un índice de penetración bajo, existe un impacto positivo general con la reducción de caídas de tensión. Con respecto a la evaluación de los indicadores, se encontró que una configuración de 9 nodos resulta adecuada pues se cumple con el número de nodos promedio y únicamente 1 de cada 10 microrredes reportó caídas de tensión mayores al 6 %.



## Nota al lector

El presente trabajo se publicará en una revista científica por lo que no se permite la reproducción de su contenido hasta su publicación.

## Agradecimientos y dedicatoria

Este trabajo no sería ni la sombra de lo que es sin todo el apoyo que he recibido. A lo largo de esta aventura de titularme, muchos han permanecido, ido y venido con su ayuda y ánimos así que, como ocurriría en la entrega de los Óscar, debería expresar mi agradecimiento a muchísimas personas. Sin embargo, si escribiera sus nombres uno a uno, tal vez omita alguno y no quisiera arriesgarme a ofender a alguien y meterme en (más) líos, por lo que me limitaré a decir lo siguiente.

A mi familia, en donde incluyo a mis amistades, mil gracias por su apoyo y paciencia, tuvieron que soportar un buen rato a un ente que no paraba de hablar de bolitas agrupadas y de una tesis que nada más no veían. En serio, muchas gracias.

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi paciente asesor de tesis y amigo, Miguel Robles, quien se lanzó con un "*aquí el asunto no es qué investigo yo, sino qué me propones que hagamos*" a esto de la ciencia de datos, las microrredes, más de un año de ser terapeuta y lector de mil versiones de la tesis remasterizada y más documentos que enviaba para su revisión a las 23:00h y recibía con comentarios un par de horas más tarde. Gracias por la valentía.

Gracias a Héctor García quien nos explicó a ambos  $n$  veces la parte que más miedo me daba, la eléctrica, sin perder demasiado la calma, por las heroicas revisiones que realizó de la tesis trabajando en viernes por la noche para enviar comentarios y por dejarme jugar con los juguetes caros del laboratorio. Ya te lo he dicho, eres lo máximo.

Un especial agradecimiento a Jorge Tenorio quien me facilitó toda suerte de juguetes para las mediciones de parámetros eléctricos reales y, sobretodo, me dio esperanzas en que lo que mi trabajo no eran solo vacas esféricas.

Agradezco a Maximiliano Valdéz, quien en momentos de terror revisó mi código.

A mis sinodales: Alberto Reyes, Jesús Mina y Antonio del Río, quienes con amabilidad patearon esta tesis para sacar lo mejor de ella. No sé ustedes, pero estoy muy contenta con los resultados.

Además, intentando coexistir entre la poesía y la técnica, agradezco a mi alma máter, la UNAM, y a su Dirección General de Orientación y Atención Educativa por

hacerme acreedora de la Beca de Titulación para Egresados de Alto Rendimiento, así como al programa Beca Salario del gobierno del Estado de Morelos.

Por último, quiero dedicar este trabajo a todos los entusiastas que forman parte de la comunidad de la licenciatura, a aquellos estudiantes que apenas ingresaron, permanecen, salieron y egresaron, profesores, asistentes, Maribel Fernández y Magali Nieto, es (la carrera) uno de los proyectos más bellos en los que he participado. Si no fuera por ustedes, sin duda, no habría llegado hasta aquí.

¡Hasta la próxima aventura!



# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	2
1.3. Objetivos de la Tesis . . . . .	3
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>5</b>
2.1. Sistemas de suministro eléctrico . . . . .	5
2.1.1. Redes eléctricas inteligentes . . . . .	6
2.1.2. Microrredes eléctricas . . . . .	9
2.2. Ciencia de datos . . . . .	16
2.2.1. Métodos de análisis sin supervisión . . . . .	17
2.2.2. Problema del agente viajero y su aplicación a microrredes . . .	21
<b>3. Metodología</b>	<b>23</b>
3.1. Descripción de datos . . . . .	24
3.2. Formación de ensambles de microrredes . . . . .	26
3.2.1. Configuración de microrredes eléctricas . . . . .	27
3.2.2. Evaluación de desempeño en estado estable . . . . .	29
3.3. Selección de configuración . . . . .	31
<b>4. Resultados y análisis</b>	<b>33</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>43</b>

# Capítulo 1

## Introducción

Las ciudades están creciendo rápidamente a nivel mundial. En 1900, por ejemplo, el 13% de la población mundial vivía en entornos urbanos, mientras que hoy en día es más del 50%. La rápida urbanización nos lleva a enfrentarnos a crecientes problemas relacionados con segregación y tensión sociales, producción de desechos y contaminación ambiental, junto con un gran y a menudo ineficiente consumo de energía y materiales. Hoy en día, aproximadamente el 70% de las emisiones globales de dióxido de carbono asociadas con energía están relacionadas a ciudades y entornos urbanos [1].

Actualmente la matriz de generación energética tiene un perfil marcadamente fósil [2, 3]. Además, con un consumo eléctrico en México y el mundo que ha aumentado históricamente a una tasa promedio anual del 3,0% [4] y 3,4% [5] respectivamente, así como escenarios de planeación para la próxima década que proyectan una tendencia de crecimiento similar [6, 4].

Las energías renovables (ERs) se han vuelto un factor creciente y fundamental en la transformación energética mundial. Tras comprobarse la viabilidad técnica y económica de la integración de las ERs en la red, particularmente de las tecnologías de energía eólica y solar [7], los esfuerzos globales se han dirigido al uso de las renovables para mejorar el acceso a fuentes asequibles, seguras y limpias de servicios energéticos modernos [8, 9, 10, 11] y asegurar el crecimiento económico de los países [12].

## 1.1. Planteamiento del problema

El cambio de paradigma en la matriz de generación, de fósil a híbrida entre fuentes convencionales y renovables, en conjunto con la búsqueda de estrategias para lograr ciudades del futuro con bajas emisiones de carbono hace imperante el rediseño del sistema eléctrico en pro de la eficiencia energética y la integración de fuentes de generación distribuida en el mismo. De esta premisa, aumenta el interés por monitorear en tiempo real lo que sucede en el sistema eléctrico, obteniendo datos de los flujos de información y energía entre cada componente del mismo, volviéndose natural la transición a una red eléctrica inteligente (REI) y creciendo el interés por investigar sobre diferentes temas relacionados con las REIs retos, beneficios, impulsores, evaluación de rendimiento, etc. En México, tras establecerse como prioritarias la creación de una cultura adecuada para el uso eficiente de energía, la responsabilidad social y la reducción de costos de operación a través de la automatización del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), los proyectos en Redes Eléctricas Inteligentes han cobrado mayor interés [13]. Sin embargo, mientras que en otros países existen ya *urban living labs* con microrredes eléctricas en funcionamiento y analizadas, el panorama nacional nos invita primero a la modernización del SEN con proyectos que se enfocan en la instrumentación y monitoreo de este, así como la reconfiguración de las redes de distribución y la instalación de transformadores de distribución monofásicos y trifásicos suficientes para suministrar la demanda de los usuarios regularizados.

## 1.2. Antecedentes

La investigación en la conformación y el impacto de la generación distribuida puede basarse en el análisis intensivo de datos. En 2016, Halu et al. [14] en su artículo *Data-driven modeling of solar-powered urban microgrids*, presentaron un estudio sistémico de microrredes con energía solar en Cambridge, MA. el cual obedece a patrones reales de consumo horario y limitaciones espaciales. Los autores proponen un modelo de microrredes y estudian su implementación en toda la ciudad, identificando la au-

tosuficiencia y comportamiento dinámico de las microrredes. Utilizan un esquema de optimización simple por medio de técnicas propias de las ciencias computacionales, en donde encuentran configuraciones de microrredes que resultan en mayor resiliencia bajo restricciones de costos, caracterizan fallas y comportamiento de robustez usando métodos de percolación. Sus hallazgos sugieren la existencia de un equilibrio entre costo y robustez de las microrredes. Hasta donde sabemos no hay en la literatura un estudio parecido sobre la configuración y rendimiento óptimos de microrredes eléctricas para México.

### 1.3. Objetivos de la Tesis

La meta principal de este trabajo es aplicar técnicas novedosas al análisis de rendimiento y diseño de microrredes eléctricas urbanas en México, desde su configuración de acuerdo a la topología de la ciudad, hasta la evaluación de criterios de regulación de voltaje cuando hay participación de generación con fuentes de energía renovable. Así mismo, se evaluará el cumplimiento de dos estándares de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para sistemas de distribución domésticos relacionados con el tamaño de la red (en nodos) y el cableado necesario para esta (en metros), así como el criterio de regulación de voltaje (en porcentaje). Al hacerlo, reunimos los aspectos de herramientas informáticas, ecuaciones de sistemas eléctricos de potencia, y datos reales de consumo y generación fotovoltaica, tomando un enfoque multidisciplinario entre los sistemas de energía y la ingeniería en energías renovables; ciencia de datos y mecánica estadística. El algoritmo desarrollado para este trabajo ha sido codificado en Lenguaje Wolfram y ejecutado en el software Mathematica; genera un conjunto estadístico de las propiedades de microrredes, las entradas son coordenadas de edificios geográficos y datos de consumo real. El objetivo general del trabajo es:

Evaluar microrredes eléctricas con baja densidad de aporte fotovoltaico en Temixco, Morelos.

Los objetivos específicos son:

1. Analizar la distribución de edificaciones en la ciudad de Temixco, Morelos.

2. Proponer microrredes de acuerdo a la topología de la ciudad de Temixco, Morelos por medio de diferentes métodos de agrupamiento.
3. Evaluar el criterio de regulación de voltaje de las microrredes propuestas con y sin generación fotovoltaica.
4. Evaluar cumplimiento de estándares de tamaño en nodos y cableado de las microrredes.

# Capítulo 2

## Fundamentos teóricos

### 2.1. Sistemas de suministro eléctrico

Prácticamente desde su instalación en el siglo XIX [11], la red eléctrica convencional (REC) se ha compuesto de los sistemas de generación, transmisión y distribución [15]; operando de forma vertical (generación-transmisión-distribución) con flujos de energía unidireccionales entre ellos [16, 2, 17] y con generación centralizada por medio de unas pocas plantas [18, 19] usualmente lejos de los usuarios finales, teniendo así pérdidas de potencia inevitables. La REC cuenta con pocos sensores, monitoreo y restauración manuales, las opciones para los clientes son limitadas, así como el control de la red. Además, es más propensa a presentar fallas y apagones [20]. Sin embargo, como resultado de la incorporación de nuevas tecnologías en la generación de energía eléctrica y de avances en informática y comunicación, este sistema ha comenzado a cambiar, dando lugar a las redes eléctricas inteligentes (REIs) y a un creciente interés en microrredes eléctricas. De esta forma, en la presente sección se expondrá de forma breve lo que es una red eléctrica inteligente y una microrred. De estas, se detallarán arquitectura básica, retos para su implementación y proyectos existentes en México y el mundo.

### 2.1.1. Redes eléctricas inteligentes

En la literatura acerca de REI, existen múltiples definiciones, aunque todas concuerdan en que estas redes son la evolución del sistema convencional en un conjunto de sistemas automático, inteligente y adaptable con intercambio bidireccional de energía e información en tiempo real. De acuerdo al mapa de ruta de la International Energy Agency (IEA), una REI es una red eléctrica que utiliza tecnologías digitales avanzadas para monitorear y administrar el transporte de energía de todas las fuentes de generación para cubrir la demanda variable de los usuarios finales [22]. Este tipo de redes integra las ER en la red con una naturaleza más distribuida ([2], [1]). También incorpora múltiples sensores en sus diversos elementos, monitoreo y restauración automáticos, control generalizado de la red, mejor interacción y mayor gama de servicios para los consumidores de la red [20, 22, 7]. De esta forma, las REIs se caracterizan por flujos bidireccionales de información y energía; y tienen el fin de coordinar las necesidades y capacidades de todos los generadores, operadores de la red, usuarios finales y tomadores de decisiones del mercado eléctrico para operar todas las partes del sistema lo más eficientemente posible, minimizando costos e impactos ambientales mientras se maximiza la confiabilidad del sistema, resiliencia y estabilidad [22, 7]), ayudando así a decarbonizar el sistema económico [1]. En el cuadro 2.1, se presenta una comparación entre una REC y una REI basada en el artículo de [20].

Cuadro 2.1: Comparación entre red eléctrica convencional y red eléctrica inteligente [20]

	REC	REI
Comunicación	Unidireccional	Bidireccional
Generación	Centralizada	Distribuida
Presencia de sensores	Limitada	Múltiple, por toda la red
Monitoreo	Manual	Automático
Reparación	Manual	Automática
Control	Limitado	Generalizado
Interacción consumidor-red	Limitada, pocas opciones	Dinámica, múltiples opciones

## Arquitectura y principales componentes

En la literatura existen diversas clasificaciones, sin embargo, por considerarse de mayor interés, se expone la visión en donde se divide a la red en tres sistemas inteligentes que a su vez se dividen en subsistemas. De acuerdo a Bhatt et al. [18], las REIs están conformadas por tres sistemas principales ilustrados en la Fig. 2-1: infraestructura inteligente, sistema de gestión inteligente y sistema de protección inteligente. El primero, engloba la infraestructura energética, informática y de comunicación; brinda soporte para la generación, transmisión y consumo de energía; medición, monitoreo y gestión de información; así como incorpora tecnologías de la comunicación. Es por esto que puede dividirse, a su vez, en tres subsistemas: energía inteligente, información y comunicación. En el caso del segundo, provee de servicios de administración y control. También es dividido en subsistemas: de administración de objetivos y administración de métodos y herramientas. Por su parte, el sistema de protección inteligente es el encargado de los análisis de confiabilidad de la red, protección de fallas, así como seguridad y protección de privacidad de los servicios de esta. Una vez más, este sistema puede ser dividido en dos subsistemas: sistema de confiabilidad y protección de fallas; y de seguridad y privacidad.

## Proyectos de redes eléctricas inteligentes

En la actualidad, existen diversos proyectos piloto de REIs concentrados principalmente en la implementación de medidores inteligentes e Infraestructura de Medición Avanzada (AMI por *Advanced Metering Infrastructure*), desarrollo de una regulación adecuada que promueva el monitoreo de los flujos de energía e información, temas de privacidad de datos, legislación y programas de generación distribuida [23]. De acuerdo a Niesten y Alkemadi [24], los temas más prominentes son respuesta y gestión de la demanda, así como en integración de fuentes de energía renovables, con un 39% de los 434 proyectos de su base de datos enfocados al primer tema y un 35% a la integración de energías renovables, mientras que menos de un 2% se refiere

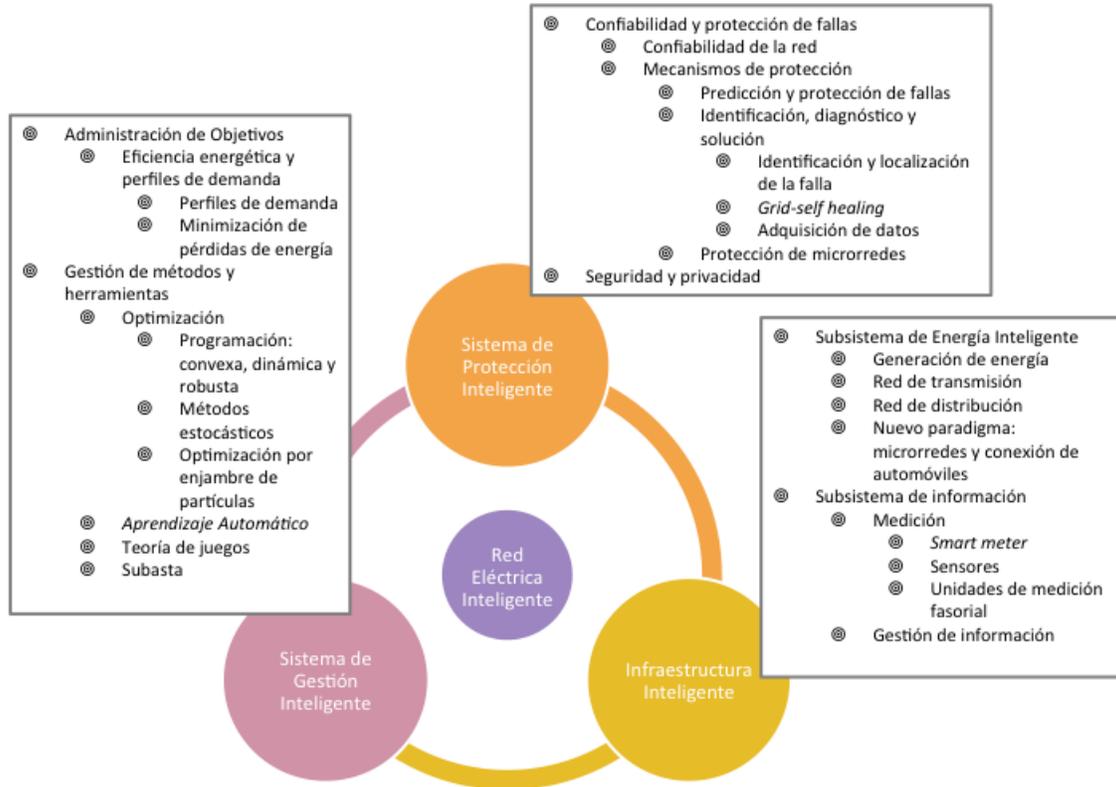


Figura 2-1: Arquitectura y componentes de una red eléctrica inteligente

a modelos de negocio y aquellos que lo hacen, únicamente mencionan que estos se pueden desarrollar a futuro. Los proyectos reportados en la literatura se encuentran diversos países como Estados Unidos ([2, 9, 10, 23, 25, 14, 26]), Canadá, China, India ([10, 9]), distintos países de la Unión Europea [29, 30, 2, 9], Japón, Corea del Sur [9] y Singapur [27, 28]. Esta última nación es un ejemplo interesante con su plan nacional para convertirse en una *Smart city* [27] y los proyectos de la Nanyang Technological University (NTU Singapore) enmarcados dentro de la iniciativa *EcoCampus*, cuyo objetivo es desarrollar un nuevo marco de sustentabilidad para todo el campus con sitios de demostración para lograr una reducción del 35% en consumo de energía, agua y de intensidad de desechos para 2020 (base 2011) y en cuyas fases de desarrollo, entre otras cosas, se contempla integración de energías renovables, así como el estudio e implementación de tecnologías de redes eléctricas inteligentes [28]. Otro caso intere-

sante es el consorcio *Sharing Cities*, proyecto en conjunto entre gobierno, academia e industria de las ciudades de Londres (GBR), Milán (ITA), Lisboa (PRT), Burdeos (FXX), Varsovia (POL) y Burgas (BGR) cuya meta es cambiar el paradigma de las ciudades con el desarrollo e implementación de *smart cities solutions* centradas en ejes como desarrollo urbano, movilidad sustentable, eficiencia energética, economía o consumo colaborativo (*sharing economy*) y ciudades inteligentes, cuyos proyectos dan pie al desarrollo de redes eléctricas inteligentes para estas ciudades y para las otras 100 a las que se espera escalar la implementación de dichas soluciones [31].

En el caso de México, los proyectos de REIs han cobrado interés con el fin de adecuar todos los componentes del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para la penetración de energías renovables, el ahorro energético y la reducción de costos de operación mediante la automatización de procesos. Actualmente, con los proyectos en desarrollo se pretende contar con información de referencia oportuna y en tiempo real que permita conocer y evaluar el desempeño del SEN e identificar las áreas de oportunidad para impulsar el desarrollo de la infraestructura eléctrica y satisfacer las necesidades de energía eléctrica de nuestro país [13].

### **2.1.2. Microrredes eléctricas**

Se ha descrito ya que existe una transición de la red convencional a una inteligente. En esta transición, las microrredes juegan un papel muy importante, ¿por qué? Pensemos en ellas como pequeñas piezas de la red principal que contienen casi todos los elementos de esta pero a pequeña escala [32], son controladas por la misma red y pueden ser diseñadas a la medida del cliente [33] con el principal objetivo de combinar los beneficios de las diferentes fuentes de energía (fósiles y renovables) de forma distribuida, seleccionandolas de acuerdo a las características topológicas y climatológicas de la región; tecnologías de bajas emisiones de carbono y, de ser el caso, sistemas de cogeneración de alta eficiencia [34].

En general, una microrred puede definirse como un sistema activo de distribución de bajo voltaje consistente en un pequeño grupo de generadores de energía distribuida, típicamente de menos de 10 MW de capacidad [35], que pueden utilizar tanto

fuentes renovables como convencionales, incluyendo fotovoltaica, eólica, hidráulica, motores de combustión interna, turbinas de gas; sistemas de almacenamiento, como capacitores o baterías; y un grupo de cargas [36, 37, 38, 32, 39]; puede incluir también la integración de sistemas de cogeneración de forma que provea electricidad y energía térmica útil [36, 33, 34]. Las microrredes pueden operar en conjunto con la red, llamado modo de operación conectado a la red, o de forma independiente, en modo isla o autónomo durante fallas u otras perturbaciones externas [39, 32, 40, 34]. Esta habilidad para cambiar de modo de operación es una característica clave de este tipo de sistemas [32].

Las microrredes ofrecen varias ventajas y beneficios incluyendo mayor flexibilidad local [41, 32], reducción de pérdidas de transmisión [39], mejor soporte de voltaje local, mayor eficiencia, corrección de las caídas de voltaje, alimentación de poder ininterrumpida [34], integración de fuentes de energías renovables, permitiendo el acceso a energía más limpia y, consecuentemente, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero [32]; así como facilidad para implementación de tecnologías de cogeneración [41]. Sin embargo, también introducen una serie de retos en cuanto a su operación, control y protección. De hecho, cada modo de operación (aislado o interconectado) requiere esquemas únicos de control y protección [39].

### **Arquitectura básica de las microrredes**

Las microrredes pueden clasificarse dependiendo del modo de operación o la selección del tipo de fuentes de energía distribuida, presencia de almacenamiento y módulos de comunicación y control [34, 42]. De acuerdo al esquema de conexión, la microrred puede ser aislada o interconectada. Puede ser un sistema monofásico o trifásico que opere en corriente directa (CD) o corriente alterna (CA) [38]. A su vez, una microrred CA puede clasificarse de acuerdo al nivel de frecuencia al que trabaje, de línea (60/50Hz) o CA de alta frecuencia (HFAC, por sus siglas en inglés) [34]. Por otro lado, basada en las fuentes de generación distribuida, ambos tipos, CA y CD, pueden dividirse en tres: convencional, parcialmente convencional y renovable. Asimismo, pueden tener dispositivos de almacenamiento incorporados. A continuación,

se discuten algunos detalles de esta clasificación.

**Fuentes de generación distribuida:** De acuerdo a Mariam et. al [34], las fuentes de generación comúnmente utilizadas son solar fotovoltaica, eólica, micro hidráulica y diesel, en el cuadro 2.2 se resumen las características.

Cuadro 2.2: Características típicas de fuentes de generación distribuida [34].

Características	Solar	Eólica	Microhidro	Diesel
Disponibilidad	DUG	DUG	DUG	En cualquier momento
Potencia de salida	CD	CA	CA	CA
Emisiones de GEI	No	No	No	$CO_2$ , $CH_4$ y $N_2O$
Control de recurso	No	No	No	Si
Interfaz	CD-CD-CA	CA-CD-CA	GS o GI	No
Control de potencia	MPPT y controles de voltaje	MPPT, control de pitch y torque	Controlable	Controlable

DUG: Dependiente de Ubicación Geográfica  
 GS: Generador Síncrono  
 GI: Generador de Inducción

Algunas de las ventajas de generar energía por medio de fuentes renovables son la reducción de electricidad proveniente de combustibles fósiles, generación sustentable de energía limpia y reducción de gases de efecto invernadero. Sin embargo, presentan algunas desventajas como altos costos de instalación, baja eficiencia energética comparada con fuentes convencionales, restricción a ciertas zonas geográficas o condiciones climatológicas. Además, conforme aumenta la integración de fuentes de energía distribuida, lo hacen también algunos problemas relacionados con la calidad de energía [37] apuntados en el cuadro 2.3. Los sistemas solares y aerogeneradores ocasionan una serie de problemas como caídas de voltaje o sobretensiones, armónicos de corriente o voltaje y flickers (perturbaciones instantáneas en ondas de voltaje o corriente). Comparada con estas fuentes, la micro hidráulica presenta menores problemas: sobretensión, armónicos de voltaje y corriente, además de flickers . Por el contrario, el uso de diesel únicamente ocasiona sobretensiones y flickers. Sin embargo, emplear diesel para la generación de electricidad implica emitir gases de efecto invernadero durante este proceso. De acuerdo al Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), por cada TJ generado con la combustión de diésel se emiten  $74,100 \text{ kg}CO_2$  ,  $3 \text{ kg}CH_4$  y  $0,6 \text{ kg}N_2O$  [43]

Cuadro 2.3: Problemas de calidad de la energía relacionados con fuentes de generación distribuida más comunes

Problemas	Solar	Eólica	Microhidro	Diesel
Sobretensión		x	x	x
Sobretensiones o niveles bajos de voltaje		x		x
Desbalance de voltaje	x			
Transitorios de voltaje		x		
Armónicos de voltaje	x	x	x	
Flickers	x		x	
Armónicos de corriente	x	x	x	
Interrupciones	x	x		

**Almacenamiento de energía:** Hasta el momento, existen cuatro metodologías para el almacenamiento de energía: química - baterías y celdas de combustible, eléctrica - superconductores y super o ultra capacitores, mecánica - bombas, volantes o almacenamiento de aire comprimido; o térmica - sales fundidas o aceites supercalentados. Los dispositivos más utilizados son volantes de inercia, baterías, celdas de combustible y super capacitores, en el cuadro 2.4 se resumen algunas de sus características básicas. Los tres tienen una eficiencia parecida de alrededor del 90 a 95%. En términos de precio, de acuerdo a Mariam et al. [37], las baterías comúnmente utilizadas son más baratas que las otras dos opciones con un precio de entre 150 y 900 USD/kWh en 2013. Sin embargo, el tipo de tecnología vigente en esa época presentaba un mayor impacto ambiental, un menor tiempo de vida útil con 5 años y requería mantenimiento anual. En la actualidad, existen en el mercado baterías cuyo tiempo de vida útil es de 10 años, no necesitan de mantenimiento y el precio es de alrededor de 400 USD/kWh [44].

**Sistemas de comunicación:** Para el control y protección de la microrred, los sistemas de comunicación juegan un papel importante. Estos sistemas deben ser económicamente rentables y proveer un buen rango de transmisión, características de seguridad, ancho de banda y calidad de energía. Pueden ser clasificados en dos categorías: tecnologías inalámbricas y alámbricas [32].

Cuadro 2.4: Características básicas de dispositivos de almacenamiento comúnmente utilizados en microrredes [37]

Características Básicas	Baterías	Volantes de inercia	Supercapacitores
Potencia (W/kg)	50-100	200-500	500-200
Tiempo de <i>backup</i>	5-30 min	10-30 s	10-30 s
Pérdidas en <i>standby</i>	Bajas	Variables	Altas
Impacto ambiental	Medio-alto	Bajo	Bajo
Mantenimiento	Anual	Cada 5 años	No
Eficiencia de carga (%)	75-95	90	85-95
Costo energía (USD/kWh)	150-800	3000-4000	4000-5000
Tiempo de vida útil (años)	5	20	>10

### Retos para su implementación

De acuerdo a [32], la implementación de las microrredes presenta retos no sólo técnicos, sino de regularización y por parte de los consumidores.

En general, los desafíos técnicos se pueden dividir en retos de operación, compatibilidad de componentes, integración de fuentes de energía renovable y protección de la microrred. Uno de los retos más grandes es el manejo de los potenciales impactos que pueda tener la gran penetración de nuevas tecnologías a la red [26], entendiéndose por la combinación de tecnologías de generación distribuida (GD) y fuentes de energía renovables. La estabilidad de la Red puede verse afectada, por ejemplo, por la transición entre interconexión y desconexión de una microrred con gran penetración de GD a la Red o debido a los cambios abruptos de potencia que tendrán las fuentes renovables debido a su variabilidad, inestabilidad y dependencia de condiciones climatológicas. Se considera que los mayores retos en la protección y control de las microrredes son los flujos bidireccionales de potencia, capacidad de corto circuito, problemas de estabilidad, baja inercia y la generación con fuentes de energía renovable [39]-la cual suele ser intermitente, impredecible y dependiente de condiciones climatológicas.

Con respecto a los retos de regulación, existe poco incentivo para invertir en este tipo de tecnologías debido a los esquemas políticos actuales, los altos costos de instalación y al hecho de que, en ocasiones, los tomadores de decisiones no suelen comprender por completo los beneficios sociales asociados a las REI [26].

En cuanto a la perspectiva de los consumidores, actualmente el precio que se paga por la electricidad no refleja el costo marginal de la producción de esta o las condiciones del mercado mayorista de electricidad, lo que ocasiona que el usuario final tenga poco interés en su participación activa en el mercado eléctrico desde el lado de la demanda, y aún menos en invertir tecnologías de REIs o de eficiencia energética.

### **Proyectos de microrredes eléctricas**

Las microrredes están recibiendo atención como soluciones tanto para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico y la calidad de la energía como para satisfacer objetivos de sustentabilidad por lo que varias microrredes reales y de prueba (tipo *living labs*) se están desarrollando alrededor del mundo. Hasta 2010, se habían reportado más de 140 proyectos de microrredes en marcha o en desarrollo con una capacidad de generación de 1800 MW [45] en los cinco continentes y con mayor fuerza en Europa, Asia y Estados Unidos [34, 36]. Uno de los proyectos más interesantes es reportado por Halu et al. [14], donde se realizó un estudio sistemático de microrredes eléctricas con aporte fotovoltaico, los autores proponen un modelo de microrredes que obedece a patrones reales de consumo horario y a las limitaciones espaciales de la ciudad de Cambridge, MA. y estudian su implementación en toda la ciudad, identificando auto-suficiencia y propiedades temporales de las microrredes. Para esto reúnen los aspectos únicos de las redes espaciales, la teoría de percolación, dinámica de flujo de potencia, y la evolución temporal de datos de consumo, tomando un enfoque transdisciplinario entre ingeniería de sistemas de potencia y la física de redes complejas.

En la mayoría de los proyectos reportados se trabaja con combinaciones de fuentes de energía distribuida en las que suele encontrarse aporte fotovoltaico, asimismo los dispositivos de almacenamiento más utilizados son baterías y comúnmente las microrredes reportadas trabajan en corriente alterna. Además, se identifica que los objetivos de estos suelen ser los siguientes [36]:

- Brindar acceso a la electricidad por si mismas en áreas remotas en donde resulta complicado el conectarse a la red principal.

- Desarrollo de microrredes como *living labs* para estudiar esquemas de control (centralizado contra descentralizado), protocolos de comunicación, control de potencia activa y frecuencia, control de potencia reactiva y voltaje, como es el caso de *MORE MICROGRIDS project* [46] o *DISPOWER project*. Además, diversas universidades (NYU, Howard, Drexel [35], Universidad de Sevilla, Queensland, Texas [47], Manchester, KU Leuven, Santa Clara, San Diego [36], NTU Singapur [28], Chinese Academy of Sciences [48]) e institutos (Illinois Institute of Technology [49], British Columbia Institute of Technology, Institute of Nuclear Energy Research [47]) están desarrollando sus propias microrredes para llevar a cabo experimentación con generación *in situ*.
- Mejorar la seguridad en caso de guerras o desastres, este tipo es particularmente común en Estados Unidos, por ejemplo, 40 bases militares operan como microrredes y el departamento de defensa investiga el desarrollo de pequeñas microrredes en puntos clave. Este interés aumentó después de los huracanes Katrina y Sandy que causaron largos periodos sin electricidad.

En el caso de México existen dos proyectos de microrredes que trabajan en el esquema de corriente directa, San Juanico y Xcalak [36] y presumiblemente persiguen el objetivo de brindar acceso a la electricidad a zonas en donde resulta complicado conectarse a la red principal. La primera, San Juanico, cuyas fuentes de generación distribuida son sistemas fotovoltaicos (17kW), aerogeneradores (70kW) y diesel (80kW), no cuenta con sistemas de almacenamiento de energía y se ubica en una comunidad pesquera en Baja California Sur [50]. La segunda, cuenta con aerogeneradores y baterías y se ubica en Xcalak, una población de 252 habitantes sobre la costa caribeña en el municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo [51].

Un enfoque multidisciplinario se vuelve útil para la configuración, estudio y monitoreo de las microrredes eléctricas inteligentes pues se requiere del análisis de grandes cantidades de datos diferentes. La ciencia de datos nos ayuda en estas tareas, por lo que a continuación se discutirá qué es y se detallarán las técnicas de este campo empleadas en este trabajo para configurar y analizar microrredes eléctricas.

## 2.2. Ciencia de datos

¿Qué es la ciencia de datos? Al igual que el concepto de REI, el concepto de ciencia de datos es relativamente nuevo y su definición depende de la fuente consultada. Aquí la palabra clave es ciencia y no datos, se trata de un campo multidisciplinario que toma herramientas, materiales e ideas de otros campos para crear las propias y se vuelve útil cuando se desea contestar una pregunta específica.

Una forma de conceptualizar este término, ilustrado con la Fig. 2-2, es como la intersección de métodos de ciencias computacionales, matemáticas y estadística aplicados a un dominio particular. Con un enfoque multidisciplinario, los métodos estadísticos se vuelven escalables gracias a las ciencias computacionales y prácticos para analizar un tema en específico. La utilidad de la ciencia de datos se hace clara en su aplicación en el análisis de grandes cantidades de datos con el fin de encontrar respuestas a una pregunta en particular.

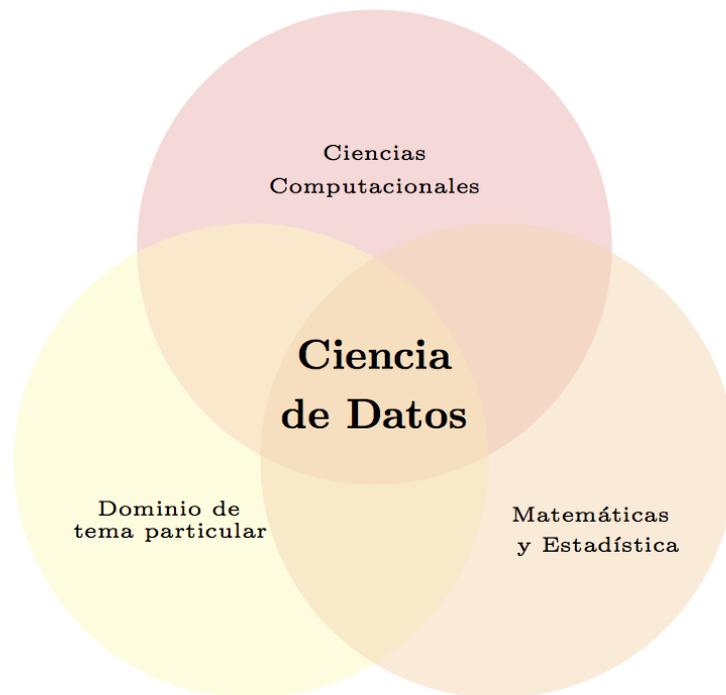


Figura 2-2: Descripción gráfica de la Ciencia de datos.

Enfocándonos en el campo de redes y microrredes eléctricas inteligentes, la correcta implementación de estas con su subsistema de información, particularmente, el de monitoreo inteligente (*smart meter*) con el que se recolectarían datos del consumo de electricidad de los consumidores cada 15 min, implicará una generación masiva de datos del orden de miles Tb anuales. De acuerdo a una estimación de Sagiroglu et al. [52] , si se recolectaran datos de un millón de dispositivos a una frecuencia de un cuarto de hora durante un año, se habrían obtenido 35.04 mil millones de archivos con un volumen de 2920 Tb. Con un volumen así, nos enfrentamos a una problemática de *big data*, en la que se vuelve importante el utilizar técnicas diferentes a las tradicionales que permitan manejar y analizar en un marco de tiempo aceptable esta colección de datos con el fin de generar información útil para la toma de decisiones. Para hacerlo, un recurso útil es importar técnicas de la Mecánica Estadística. como el concepto de ensamble, que es una idealización consistente de numerosas copias virtuales de un sistema, consideradas todas al mismo tiempo, en donde cada una representa un posible estado en el que el sistema real puede estar. En otras palabras, un ensamble estadístico es el conjunto de todos los escenarios posibles, compatibles con una o varias restricciones físicas [53].

En el caso de este trabajo, se aplican herramientas de las ciencias computacionales para configurar microrredes eléctricas dada la topología de la ciudad de Temixco y se construye un ensamble estadístico con todas las posibles microrredes que pueden formarse a partir de agrupamientos con un numero promedio dado de edificaciones. Los agrupamientos se pueden realizar de manera automática utilizando algoritmos del tipo *k-means* y *k-medoids*. Una vez formados los grupos, se encuentra el cableado óptimo para conectar los nodos de cada grupo con el algoritmo de agente viajero. A continuación se detallarán estas herramientas.

### **2.2.1. Métodos de análisis sin supervisión**

Para el manejo de grandes cantidades de datos, una de las grandes problemáticas es el agrupamiento de estos, de hecho, es considerado el problema de aprendizaje sin supervisión (*unsupervised learning*) más importante y es muy útil en la búsqueda

de estructuras y patrones en una gran colección de datos. Con el fin de resolver dicha problemática, se crearon los algoritmos de agrupamiento (clustering, en inglés). En estos, existe similitud entre los datos de un mismo grupo y disimilitud con aquellos pertenecientes a uno diferente. La mayor ventaja de este tipo de técnicas está en encontrar directamente patrones y estructuras interesantes de una gran colección de datos teniendo poco o nulo conocimiento de fondo [54]. De forma que, el objetivo principal de estos algoritmos es determinar el agrupamiento intrínseco en un conjunto de datos no etiquetados. Pero, ¿cómo se determina si es un buen agrupamiento? ¿Qué criterios debe cumplir? De acuerdo a la literatura revisada, no existe tal cosa como el absoluto mejor criterio, pues dependerá del usuario y de las necesidades que busca satisfacer al aplicar el algoritmo. Por ejemplo, podemos estar interesados en encontrar grupos representativos homogéneos (*data reduction*) o en encontrar “grupos naturales” y describir propiedades desconocidas (*natural data type*), en encontrar grupos útiles y adecuados (*useful data classes*) o en encontrar datos inusuales (detección de valores atípicos).

Existen diferentes métodos de agrupamiento, pueden ser jerárquicos o particionales. Los jerárquicos encuentran grupos sucesivamente, usando aquellos previamente formados, mientras que los particionales determinan todos al mismo tiempo. En el caso de los jerárquicos, pueden ser aglomerativos o divisivos, los primeros comienzan con cada elemento como un grupo separado y los fusionan en grupos sucesivamente mayores, mientras que los de división, comienzan con el conjunto completo y proceden a dividirlo sucesivamente en agrupaciones más pequeñas [55].

Los algoritmos particionales se basan en la especificación inicial del número de grupos e iterativamente reagrupan los objetos hasta su convergencia, como se dijo anteriormente, típicamente determinan todos los grupos al mismo tiempo. La mayoría de las aplicaciones adoptan uno de los métodos heurísticos más populares: K-means o K-medoids. En el presente trabajo, se aplican ambos con el fin de agrupar las edificaciones más cercanas entre sí y formar microrredes en donde las caídas de tensión sean mínimas.

## K-Means

Los algoritmos de *k-means* son unos de los más simples [54] y posiblemente más utilizados para resolver el problema de agrupamiento de datos [56]. Siguen un sencillo procedimiento para clasificar los datos en un  $k$  número de grupos, en donde  $k$  es conocido *a priori*, ya sea propuesto por el usuario o por medio de algún método como el coeficiente de silueta (*silhouette coefficient*). La calidad de los grupos que forme el algoritmo dependerá en gran medida de si el valor especificado de  $k$  es el correcto [57]. La idea general de estos algoritmos es definir  $k$ -centroides muestra, uno por cada grupo, en un diagrama  $n$ -dimensional y luego evaluando si moverlos en cualquier dirección resultaría en un grupo con mayor densidad, es decir, con más puntos de datos más cerca del centroide propuesto. Su finalidad es minimizar el error cuadrático medio [54]:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n \|x_i^{(j)} - c_j\|^2$$

En donde,  $\|x_i^{(j)} - c_j\|^2$  es la distancia medida entre un punto  $x_i^{(j)}$  y el centroide  $c_j$ , sirve como indicador de la distancia de los  $n$  puntos a su respectivo centroide. El algoritmo procede seleccionando  $k$  centroides iniciales e iterativamente redefiniendolos [58] con el siguiente proceso [54]:

1. Cada punto  $x_i^{(j)}$  es asignado al centroide más cercano.
2. Cuando todos los puntos han sido asignados, la ubicación de cada centroide  $c_j$  es actualizada para ser la media de las distancias de los casos asignados a este.
3. Se repiten los pasos 1 y 2 hasta que el algoritmo converge, es decir, los centroides no se mueven y, por lo tanto, no hay más cambios en la asignación de casos a cada grupo.

Dado que este tipo de algoritmos es significativamente sensible a la selección aleatoria inicial de centroides, se recomienda ejecutar varias veces el algoritmo para reducir este efecto.

## K-Medoids

Los algoritmos de *k-medoids* se encuentran relacionados con los algoritmos de *k-means* [59]. Al igual que un algoritmo de *k-means*, uno de *k-medoids* es una técnica de partición que divide el conjunto de  $n$  datos en  $k$  grupos con  $k$  conocido *a priori*. Una de las diferencias entre estos dos métodos es que mientras *k-means* intenta minimizar el error cuadrático total, *k-medoids* minimiza la suma de disimilaridades entre los puntos *etiquetados* para pertenecer a un grupo y un punto seleccionado como el centro de ese cluster, llamado medóide. Es decir, un medóide de un conjunto de datos finitos es un punto de este conjunto, cuya disimilitud promedio a todos los demás puntos es mínima, es decir, es el punto más céntrico del grupo [60]. Este tipo de algoritmo es más robusto que *k-means* a la presencia de ruido y valores atípicos pues un médoide es menos influenciado por valores atípicos o extremos que un promedio [55].

Un algoritmo *k-medoids* típico usa como datos de entrada el número de grupos  $k$  y una colección  $D$  de  $n$  datos. Obteniendo como resultado un conjunto de  $k$  grupos que minimiza la suma de disimilaridades de todos los objetos a su medoid más cercano por medio de una selección arbitraria de  $k$  puntos en  $D$  como los objetos representativos iniciales.

El proceso que sigue es:

1. Cada punto restante es asignado al medoid más cercano
2. Se selecciona aleatoriamente un objeto restante, es decir, un no medoid, al que llamaremos  $O_{random}$ ;
3. Se calcula el costo de configuración, es decir, la suma de distancias de los puntos a su medoid, mientras este disminuye:

1. Por cada medoid  $k$ , por cada no medoid  $O_{random}$ :

1. Se intercambian  $k$  y  $O_{random}$ , se recalcula el costo de configuración.
2. Si el costo aumenta, se deshace el intercambio entre  $k$  y  $O$

Se repiten 2 y 3 hasta que el algoritmo converge.

Como se comentaba con anterioridad, una vez formados los grupos de nodos, se procede a calcular el cableado de las microrredes. Esto puede atarse como un problema de optimización combinatoria y una posible solución puede encontrarse por medio de un algoritmo para resolver el problema del agente viajero. En la siguiente sección se detallará en qué consiste este problema, diferentes aplicaciones encontradas en la literatura y, por último, su aplicación a la configuración de microrredes.

### **2.2.2. Problema del agente viajero y su aplicación a microrredes**

El problema del agente viajero (TSP, por sus siglas en inglés) es de decisión no determinístico de tipo N-P duro (al menos tan difícil como un problema NP) y es uno de lo más estudiados en las ciencias computacionales. Dada una colección de ciudades y el costo de viaje entre cada par, los algoritmos creados para resolver este problema buscan encontrar la ruta más corta para visitar cada punto de una selección de ciudades y regresar al punto de inicio (algo muy útil en los tiempos de La vuelta al mundo en 80 días). Tiene gran aplicación en el ámbito de logística y distribución, así como en la programación de curvas de producción, sin embargo, no tiene que acotarse ahí, también es útil en secuenciación del genoma [61, 62]; optimización de la secuencia de objetos celestes a ser visualizados en el programa propuesto de interferometría espacial *Starlight* de la NASA, en donde las ciudades son los objetos celestes y el costo del viaje es la cantidad de combustible necesaria para reposicionar los dos satélites de una imagen a otra [63]; encontrar la mejor ruta a pie para capturar pokemones, en donde las ciudades en este caso serían las pokeparadas y gimnasios y el costo serían los pasos para ir de un punto a otro [64].

Inspirado en lo anterior, en el presente trabajo se aplica el TSP para encontrar el cableado óptimo para microrredes radiales con los algoritmos de agrupamiento desde un punto  $j$  a uno  $k$  del grupo formado, en donde las ciudades son las casas y el costo

de la distancia óptima de una casa a otra calculada por el TSP correspondería al cableado necesario para el modelo de microrred.

A continuación se detalla la metodología seguida en este trabajo, en donde se describen los datos utilizados y se explica cómo se aplicaron los algoritmos agrupamiento, *k-means* y *k-medoids*, así como el algoritmo TSP modificado para la configuración de microrredes eléctricas ideales y el análisis de estas, comparando su rendimiento con y sin la presencia de generación fotovoltaica en un nodo.

# Capítulo 3

## Metodología

En este capítulo se detalla la metodología seguida en este trabajo, describiendo los datos de entrada utilizados; la formación de ensambles de microrredes, en donde se incluye el proceso de modelado, mismo que abarca la configuración y evaluación del desempeño en estado estable de las microrredes con y sin generación distribuida, así como la estrategia seguida para analizar los resultados obtenidos tras la iteración del modelado; por último, se evalúa el indicador establecido para seleccionar su configuración. Primero se describirá la metodología de forma general y posteriormente se explicará el caso aplicado a Temixco, Morelos.

En la figura 3-1 se encuentra la representación esquemática de la metodología seguida en este trabajo. Para generar los datos de entrada, primero, se selecciona un área representativa de la ciudad a analizar y, de las imágenes satelitales correspondientes, se obtienen las coordenadas cartesianas de las edificaciones ahí encontradas. Además, se obtienen mediciones minutas, de al menos una semana, de parámetros eléctricos de una casa con generación fotovoltaica en la misma ciudad. Una vez con los datos, se procede a la configuración de microrredes con  $n$  nodos, por medio de los algoritmos de agrupamiento y de agente viajero, incrementando  $n$  en 3 unidades, desde 3 hasta 36 nodos. A continuación, por medio del modelo de admitancia y el cálculo del criterio de regulación de voltaje, se evalúa el rendimiento de las microrredes con y sin la integración de generación distribuida en uno de sus nodos considerándolas sistemas radiales. El proceso en conjunto de configuración y evaluación de microrredes se repite

diez veces, después de lo cual se procede a calcular la media del número de nodos promedio, cableado promedio y criterio de regulación de voltaje, así como la desviación estándar de cada parámetro antes mencionado, construyendo así los ensambles estadísticos de las microrredes. Por último, se analizan los resultados obtenidos con el fin de encontrar la mejor configuración dadas las variables propuestas para conformar el indicador, evaluando las configuraciones del 0 a 100 de acuerdo al cumplimiento de los criterios de aceptación de las figuras de mérito: nodos, cableado y el porcentaje de microrredes eléctricas con una caída de tensión mayor al 6 %, considerándose aprobatoria una calificación de 70 puntos. Para tal efecto, la puntuación máxima otorgada por el cumplimiento del número de nodos y de cableado fue de 10 puntos y 80 para aquella configuración en donde hasta el 10 % de las microrredes formadas tuviera una caída de tensión mayor al 6 % (ver Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1: Figuras de mérito y criterios de aceptación

Figura de mérito	Criterio de aceptación	Puntuación máxima
$\Delta V_{\text{máx}}$	Hasta un 10 % de MREIs con $\Delta V_{\text{máx}} > 6 \%$	80
Cableado aceptable promedio	$< 80\text{m}$	10
Número de nodos promedio	$< 20$ nodos	10

A continuación, se detallará la metodología aplicada al caso de la configuración y evaluación de microrredes eléctricas en Temixco, Morelos.

### 3.1. Descripción de datos

Para la configuración y evaluación del rendimiento estático de microrredes ideales en Temixco, se consultaron dos fuentes de datos. Por un lado, coordenadas de edificaciones extraídas de imágenes satelitales y, por el otro, datos reales de consumo y generación eléctrica de una casa en Temixco, Morelos.

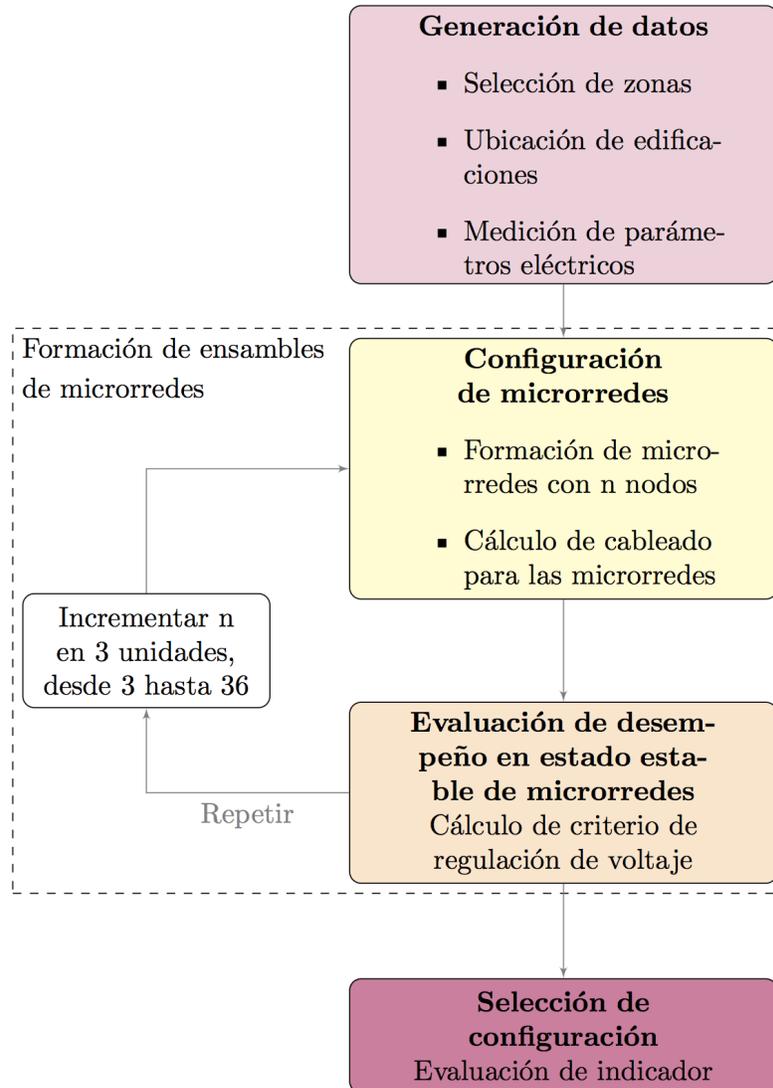


Figura 3-1: Diagrama de metodología seguida para el modelado de microrredes eléctricas urbanas.

Las coordenadas de edificaciones fueron obtenidas de mapas de Google, Digital Globe a través de Google Earth. Se seleccionaron y digitalizaron zonas a analizar por medio de las imágenes satelitales de ahí obtenidas, dichas zonas aparecen marcadas con rectángulos, uno por zona digitalizada, de diferentes colores en la Fig. 3-2. En total, se obtuvieron coordenadas de 17,131 edificaciones, distribuidas en 100 imágenes satelitales.

Con respecto a los datos reales de consumo y generación, corresponden a datos

minutales de parámetros eléctricos medidos durante el mes de Octubre a lo largo de una semana en una casa en Temixco, Morelos que contaba con un sistema fotovoltaico interconectado a la red. Estas mediciones fueron utilizadas para alimentar dos generadores pseudoaleatorios de números reales (GPANs), uno para corrientes de consumo y otro para corrientes de generación.

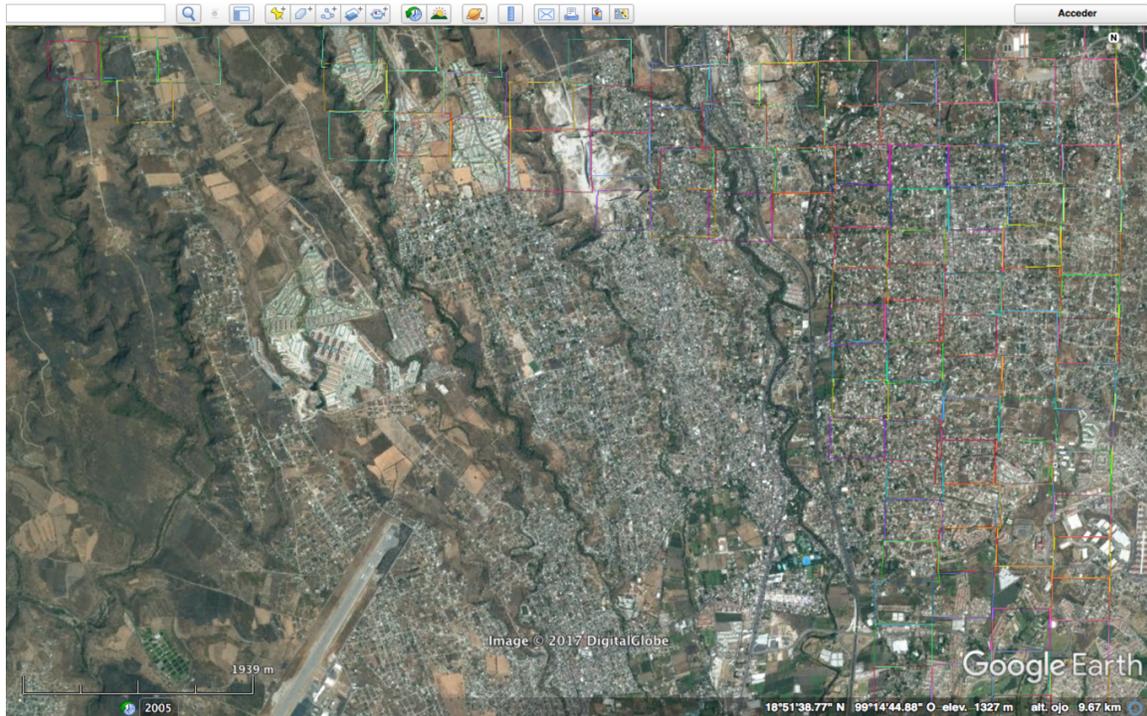


Figura 3-2: Selección de zonas de Temixco a analizar. Cada rectángulo de color es una zona de Temixco digitalizada y analizada. Datos del mapa: Google, DigitalGlobe

## 3.2. Formación de ensambles de microrredes

Como se comentó al inicio del capítulo, los ensambles estadísticos se construyeron a partir de la iteración del proceso de modelado de las microrredes, en donde se incluyen tanto la configuración y como la evaluación del rendimiento estático de estas con y sin la presencia de generación fotovoltaica en uno de sus nodos. De esta forma, los ensambles contienen la información de la media de nodos promedio, cableado promedio y criterio de voltaje máximo con y sin generación distribuida, así como la desviación estándar de los parámetros antes mencionados. En esta sección se

describirán a detalle los procesos de configuración y evaluación de las microrredes.

### 3.2.1. Configuración de microrredes eléctricas

Para configurar las microrredes, primero se ubicaron manualmente las coordenadas cartesianas de las edificaciones como se muestra en la figura 3-3. Cada edificación se consideró un nodo  $n$  al momento de configurar las microrredes.



Figura 3-3: Edificaciones identificadas en la imagen señaladas con puntos naranjas. Datos del mapa: Google, DigitalGlobe.

Mediante la aplicación de los algoritmos de agrupamiento  $k$ -means y  $k$ -medoids, se formaron microrredes con  $n$  nodos en promedio, variando  $n$  en múltiplos desde tres hasta treinta y seis. Como se recordará, para aplicar estos algoritmos se necesita conocer  $k$ , el número de grupos por formar, *a priori*. Para tal efecto, dada la dispersión de la mancha urbana en Temixco, por cada zona digitalizada se contó el número de edificaciones localizadas ( $E_i$ ) y se dividió entre  $n$ :

$$k_i = \frac{E_i}{n} \quad (3.1)$$

En la figura 3-4 se muestran microrredes formadas por medio de  $k$ -means con  $n=36$  a modo de ejemplo.

Posteriormente, se calculó el cableado óptimo necesario para la configuración de las microrredes formadas utilizando algoritmo de agente viajero modificado para encontrar el camino más corto solo entre el primer y último nodo de la microrred. La



Figura 3-4: Microrredes formadas con el algoritmo  $k$ -means con  $n=36$ , nodos pertenecientes a una misma microrred tienen el mismo color. Datos del mapa: Google, DigitalGlobe.

figura 3-5 ilustra el cableado calculado para las microrredes formadas con 36 nodos presentadas en la figura 3-4, en donde cada punto representa un nodo y la línea que une cada uno representa el cableado. A su vez, la figura 3-6 ilustra ejemplos individuales de microrredes formadas en distintas zonas con  $n=3$  y  $n=36$ , respectivamente.

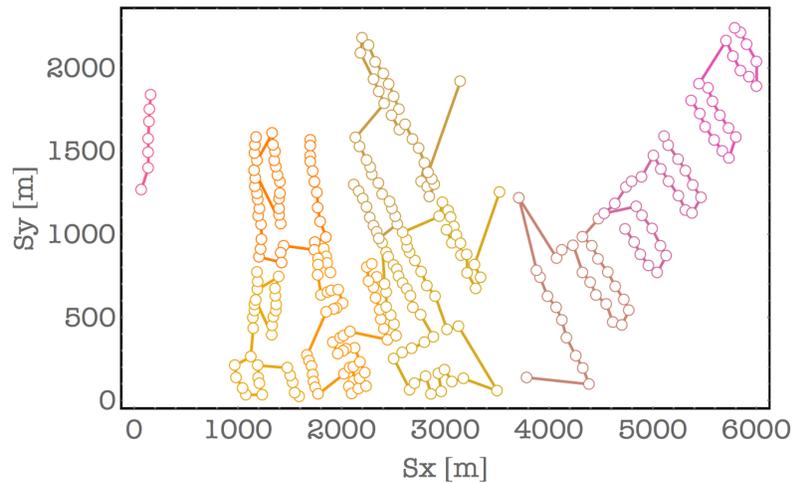


Figura 3-5: Cableado óptimo calculado para microrredes con  $n=36$ . Fuente: Elaboración propia.

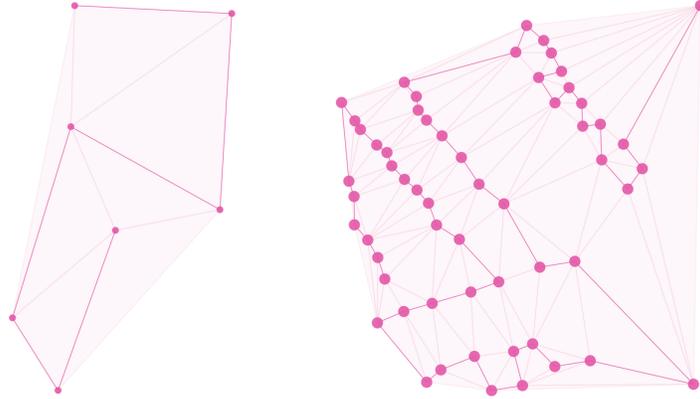


Figura 3-6: Ejemplo de microrredes con cableado óptimo resaltado en rosa. Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.2. Evaluación de desempeño en estado estable

Posterior a la configuración, se evaluó el desempeño en estado estable de microrredes ideales con baja densidad de aporte fotovoltaico. Dicho de otra forma, se modelaron como circuitos trifásicos balanceados y, por medio del modelo de admitancia, se calcularon las caídas de voltaje con y sin la integración de generación fotovoltaica en uno de los nodos, siendo este seleccionado de forma pseudoaleatoria. Considerándose a cada nodo carga o generador, dependiendo de la presencia de generación distribuida.

Dada las admitancias  $Y_a$  de cada bus, se conformó la matriz de admitancias ( $Y_{bus}$ ), siendo:

$$Y_a = \frac{1}{Z_a} = \frac{1}{R + jX} \quad (3.2)$$

En donde  $Y_a$  es la admitancia del conductor y  $Z_a$  es la impedancia del conductor. En este caso, se contempló un conductor 8AWG cuya impedancia por kilómetro es de  $2.56 + 0.171 \frac{\Omega}{km}$  [65].

Una matriz  $Y_{bus,j}$  se construye de acuerdo a la topología del sistema analizado, de forma que para una microrred de  $n$  elementos, se formará una matriz de  $m \times m$ , siendo  $m = n - 1$ . En donde la diagonal principal ( $y_{ii}$ ) tendrá en signo positivo la suma de las admitancias de los elementos conectados a un mismo nodo, mientras que

en  $y_{ij}$  se encontrarán las admitancias de los elementos que unen a los nodos entre sí. De esta forma, considerando las microrredes como sistemas de distribución radiales, se formó una matriz  $Y_{bus,j}$  tridiagonal por cada microrred ( $j$ ). Tras formar la matriz, se resolvió el sistema lineal de ecuaciones en su forma matricial para encontrar los voltajes para cada nodo de la microrred:

$$[Y_{bus,j}] [V_j] = [I_j] \quad (3.3)$$

Siendo  $V_j$ , el vector de voltajes, cuyas componentes son las incógnitas de nuestro sistema y el vector de corrientes,  $I_j$ , resultado de la diferencia entre la corriente proveniente de la fuente y la suma de las corrientes de consumo y generación en caso de existir una fuente de generación distribuida,  $\vec{I}_j = \vec{I}_{j,s} - (\vec{I}_{j,cons} + \vec{I}_{j,gen})$ . En este trabajo, el vector de corrientes para cada microrred,  $\vec{I}_j$ , fue conformado por medio de dos generadores pseudoaleatorios de números reales (GPANs) alimentados con las mediciones de corriente de consumo y generación eléctrica como se mencionó en la sección 3.1. Uno correspondiente al vector de corriente consumida,  $\vec{I}_{j,cons}$ , y el otro al de corriente generada,  $\vec{I}_{j,gen}$ . Ambos con tantas componentes como nodos tuviera la microrred. De esta forma, gracias al primer GPAN, se conformaría un vector con valores pseudoaleatorios de corriente de consumo para cada nodo. Mientras que con el segundo algoritmo, de forma pseudoaleatoria, se seleccionaría el nodo generador, se produciría un valor a partir de las mediciones de generación el cual sería asociado a la componente correspondiente a dicho nodo y el resto, al ser cargas, serían ceros.

Una vez resuelto el sistema, se calculó el criterio de regulación de voltaje para cada nodo,

$$\Delta V_i = \frac{V - V_i}{V} \cdot 100 \% \quad (3.4)$$

En donde  $V$  es el voltaje de la fuente (220V) y  $V_i$  el voltaje calculado para cada nodo. De manera arbitraria el modelado de microrredes fue repetido diez veces para cada  $n$ . Por lo que los datos analizados corresponden a la media de:

1. Número de nodos promedio por microrred
2. Cableado óptimo promedio por microrred
3. Criterio de voltaje máximo por microrred
4. Desviación estándar de cada parámetro antes mencionado

### 3.3. Selección de configuración

Con la finalidad de analizar los ensambles de microrredes y seleccionar la mejor propuesta, se estableció el indicador para evaluar el número de nodos promedio, cableado promedio y criterio de regulación voltaje máximo de cada microrred ( $\Delta V_{\text{máx}}$ ). En el caso del primero, se considera aceptable un promedio de 20 nodos por grupo; para el cableado, el criterio de aceptación establecido fue que el cableado promedio resultara menor a 80m; por último, solo el 10 % de las microrredes formadas presente un  $\Delta V_{\text{máx}} > 6\%$ . Tanto el método de agrupamiento como  $k$ , serán seleccionados basados en el cumplimiento de los requerimientos antes mencionados y para esto se establecieron tres indicadores cuya evaluación se encuentra detallada en el cuadro 3.2. De forma que para seleccionar la mejor configuración, las diferentes propuestas fueron evaluadas del 0 al 100, considerándose aprobatoria una calificación de al menos 70 puntos. Para otorgarlos, las figuras de mérito se ponderaron de la siguiente forma: máximo 80 puntos serían por el cumplimiento del criterio de aceptación de hasta un 10 % de MREIs con  $\Delta V_{\text{máx}} > 6\%$ , 10 puntos por el cumplimiento de un cableado óptimo promedio menor a 80m y 10 puntos por un número de nodos promedio menor a 20.

Cuadro 3.2: Ponderación de indicadores

Figura de mérito	Descripción	Prueba	Puntuación
Nodos	Media del número de nodos promedio ( $n$ ) por microrred	$n < 20$	10
		$20 < n < 35$	$10 - \frac{10}{15}(x - 20)$
		$n > 35$	0
Cableado	Media del cableado promedio ( $c$ ) de las microrredes	$c < 80$	10
		$80 < c < 200$	$10 - \frac{1}{12}(x - 80)$
		$c > 200$	0
Criterio de regulación de voltaje	Media del porcentaje de microrredes que exceden $\Delta V_{\text{máx}} > 6\%$ ( $p$ )	$p < 10$	80
		$10 < p < 20$	$80 - \frac{80}{10}(x - 80)$
		$cab > 200$	0

# Capítulo 4

## Resultados y análisis

En este capítulo se presentarán los resultados encontrados, así como su análisis. Se analizaron 17,131 edificaciones y se propusieron microrredes con diferente número de nodos, desde 3 hasta 36. Evaluando tamaño nodal y cableado promedio obtenidos para las microrredes propuestas con los algoritmos de k-means y k-medoids, así como sus caídas de voltaje máximas y desviación estándar de los parámetros listados.

Tras aplicar los algoritmos de agrupamiento, se encontró que tanto k-means como k-medoids brindan resultados similares acerca de la configuración de microrredes en Temixco, Morelos. Con ambos métodos, se obtienen resultados parecidos en tamaño, cableado y rendimiento eléctrico de las microrredes formadas. En la figura 4-1, se muestra que el número de microrredes formadas sigue una distribución Gamma con ambos métodos, cuyos parámetros son  $\alpha = 2,1$  y  $\beta = 678,802$  para k-means, y  $\alpha = 2,1$  y  $\beta = 688,512$  para k-medoids. La similitud de los resultados entre ambos algoritmos se explica porque su principio de funcionamiento es parecido. Ambas técnicas de partición dividen el conjunto de  $n$  datos en  $k$  grupos, conociendo  $k$  a *a priori*, solo siendo diferente la forma de selección del centroide de cada grupo, en donde el objetivo de *k-means* es minimizar el error cuadrático total, mientras que *k-medoids* minimiza la suma de disimilaridades entre los puntos pertenecientes a un grupo y el medóide.

La mancha urbana de Temixco se ha desarrollado entre zonas accidentadas formadas por barrancas, zonas semiplanas dedicadas al cultivo y zonas planas urbanizadas,

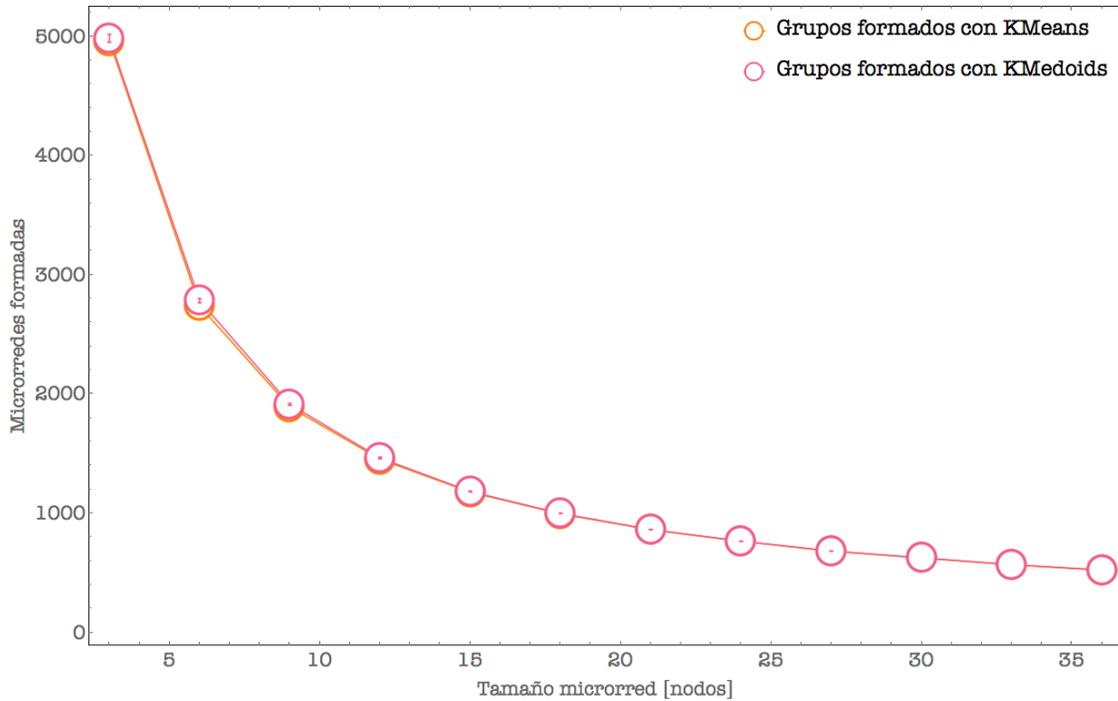


Figura 4-1: Distribución de microrredes formadas con diferente número de nodos con los métodos de agrupamiento k-means y k-medoids.

por lo que es caracterizado por una marcada dispersión urbana y se han generado zonas densamente pobladas en algunas partes de la ciudad y otras con edificaciones alejadas unas de otras. Estas características se volvieron notorias al aplicar los algoritmos de agrupamiento, pues se encontró que independientemente del número de nodos propuestos y del algoritmo aplicado, se presentaron casos de edificaciones que no fueron integradas a ningún grupo debido a su lejanía con otros edificios, así como los casos de microrredes con altas densidades nodales en zonas altamente pobladas. Sin embargo, conforme aumentó el número de nodos propuestos para cada microrred, el porcentaje de edificaciones aisladas disminuyó hasta casi llegar a 0% para ambos algoritmos como se muestra en la fig. 4-2, pues conforme aumenta el número de nodos permitidos por grupo, la flexibilidad para agrupar nodos es mayor.

En la Fig. 4-3, se presenta el número de nodos promedio contra el tamaño esperado de la microrred, junto con sus respectivas barras de error, las cuales indican la desviación estándar promedio de las diez veces que se repitió el proceso de modela-

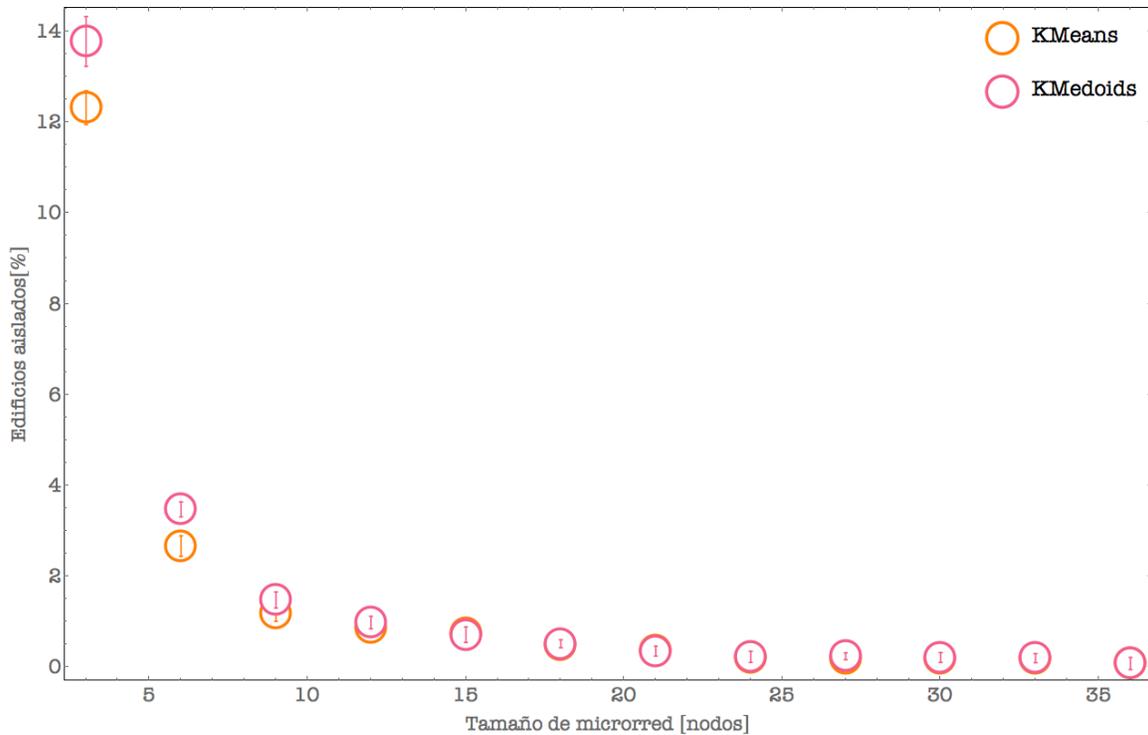


Figura 4-2: Porcentaje de edificaciones aisladas por tamaño propuesto de microrred

do de microrredes para un mismo número de nodos. Puede observarse que conforme aumentan los nodos permitidos, lo hace su varianza, pues las microrredes resultantes comienzan a ser muy diferentes entre sí. El crecimiento de la incertidumbre se debe a que comienzan a acentuarse las diferencias en tamaño nodal (lo que se refleja también en la cantidad de cableado necesaria) en las microrredes configuradas, así como siguen existiendo casos de edificios aislados, también aparecen microrredes de más de 100 nodos.

Con respecto a configuración de las microrredes, se recordará que se estableció como aceptable que en promedio no pasaran de 20 nodos y que el nodo más lejano no se encontrara a más de 80m de la fuente. Ahora bien, debido a la distribución de las edificaciones en Temixco, los resultados obtenidos muestran que para cumplir estrictamente los anteriores requisitos, las microrredes tendrían que conformarse de 3 nodos y el cableado promedio necesario sería de alrededor de 41.4m, pues a partir de 6 esta magnitud sobrepasa los 80m (el promedio es de 97.06m). La demanda de cableado promedio aumenta linealmente con el número de nodos propuestos como

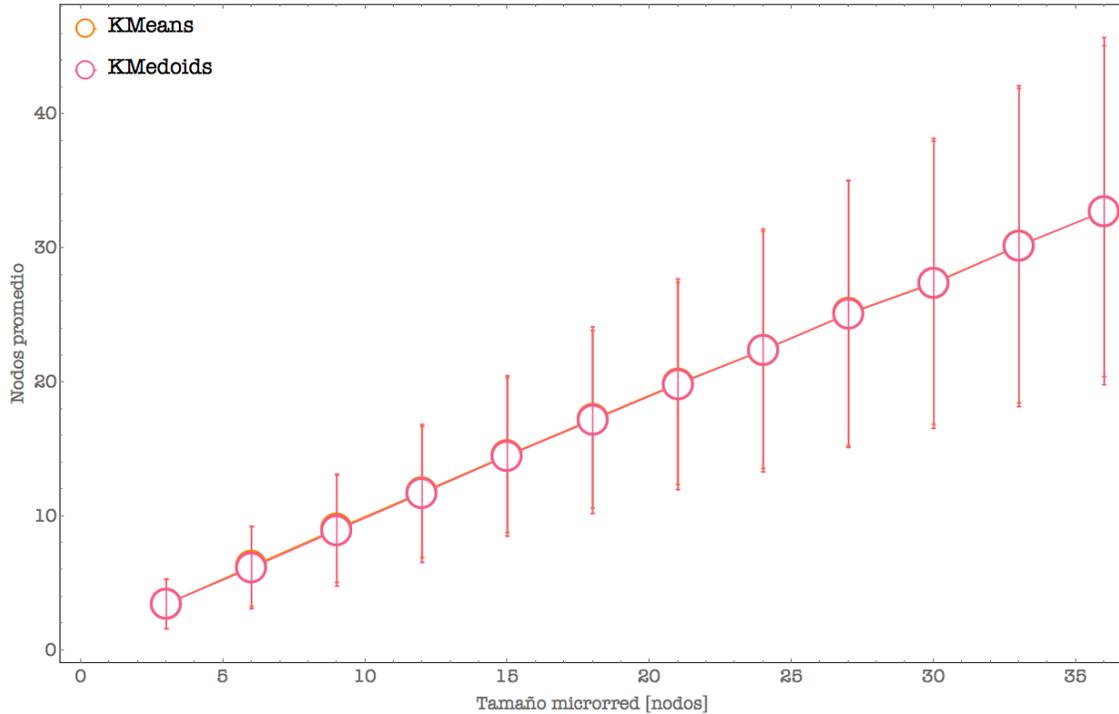


Figura 4-3: Número de nodos promedio con barras de incertidumbre para microrredes de diferentes tamaños.

puede observarse en la figura 4-4. Tal y como se encontró en la Fig. 4-3, la desviación estándar promedio del cableado también aumenta conforme lo hace el tamaño de la microrred.

Se ubicaron los resultados obtenidos de casos extremos de las microrredes más grandes tanto en número de nodos como en cableado con las imágenes satelitales obtenidas. En el caso de las microrredes con mayor número de nodos, estas parecen ubicarse en áreas suburbanas de Temixco, es decir, en barrios residenciales establecidos en las periferias de la ciudad y densamente poblados; o cercanas a la franja periurbana (Fig. 4-5). Dado el tamaño que presentan y la baja frecuencia de estos casos, podrían ser analizados particularmente para ser divididos en microrredes más pequeñas.

Al analizar particularmente los casos que exigen mayor cableado, se encontró que estaban ubicados en la misma zona periurbana (Fig. 4-6). Además, en algunos casos,

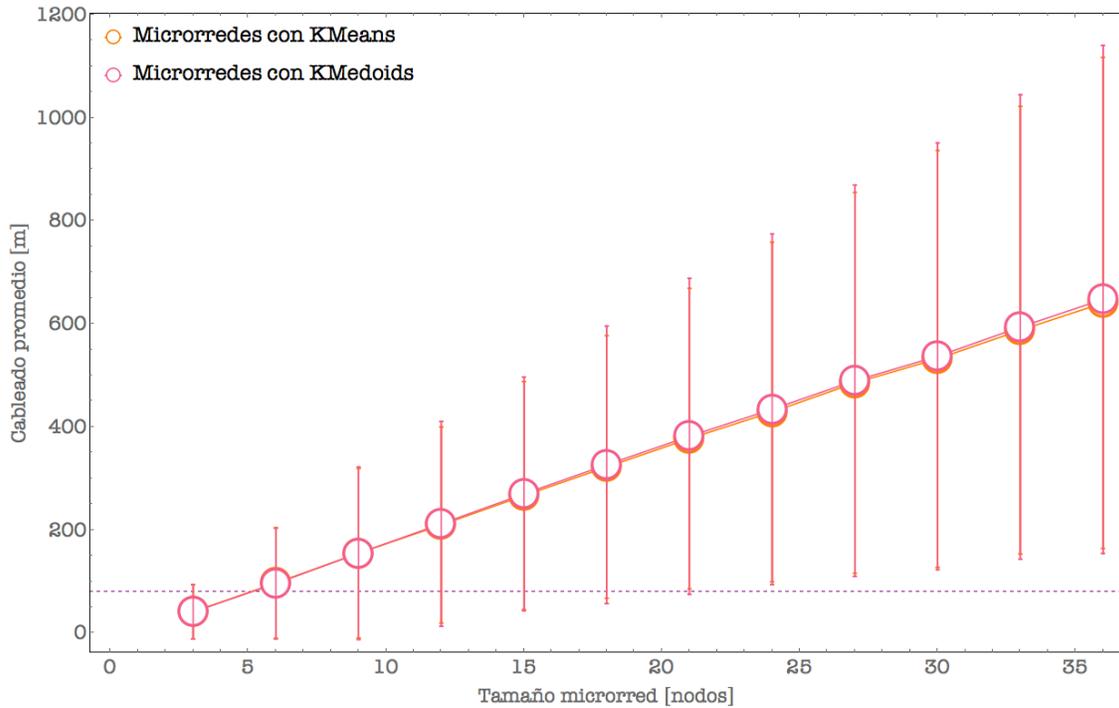


Figura 4-4: Cableado promedio necesario para microrredes propuestas con diferente número de nodos.

coincidieron también en la misma zona las microrredes con mayores caídas de voltaje (Fig. 4-7). En la figura 4-6, se muestran 6 mapas que ilustran la ubicación de las microrredes con mayor cableado configuradas con *k-means* y *k-medoids* con 3, 9 y 36 nodos. Mientras que en la figura 4-7, se señala la ubicación de aquellas con mayores caídas de voltaje. En cada mapa, se resaltan los casos extremos de cableado o caída de voltaje respectivamente.

Se encontró que en los casos extremos, las conformadas con *k-medoids* demandaban menor cantidad de cableado máxima y tenían caídas de voltaje máximas menores que aquellas configuradas con *k-means*. Para analizar esto, en la figura 4-8 se comparan las caídas de voltaje máximas para los casos extremos de cableado. Tomemos como ejemplo las configuradas con  $n = 36$ , el caso extremo con *k-medoids* estaba conformado por 67 nodos, necesitaba 5595m de cableado y la caída de voltaje máxima calculada fue de 93.04 % sin generación fotovoltaica, reduciéndose en casi dos puntos porcentuales, 91.72 %, al integrar SFV en un nodo. En cambio, para el mismo caso

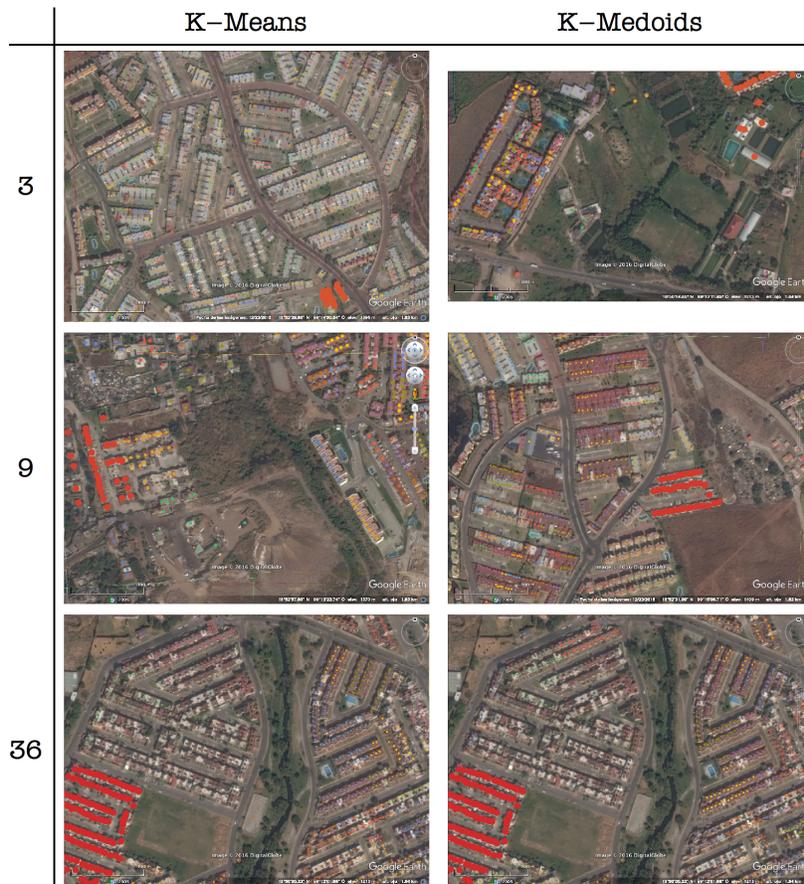


Figura 4-5: Microrredes eléctricas ubicadas en el mapa de Temixco. Con puntos rojizos se resaltan los casos extremos de tamaño nodal máximo.

de  $n = 36$ , aunque la microrred conformada con k-means reporta un tamaño nodal menor, 58 nodos, demanda un cableado de 6489m y se reportan caídas de voltaje de hasta 93.23% , mismas que se solo se reducen a 93.05% con aporte fotovoltaico. Otro ejemplo es el caso de  $n = 3$ , con k-medoids la mayor demanda de cableado era de 10 nodos y 1295m, con una caída de voltaje máxima del 17.56% sin generación y del 2.84% integrando un sistema fotovoltaico en alguno de los nodos. Mientras que con k-means, la microrred con el máximo cableado se conformó con 13 nodos en total, un cableado de 1644m y una caída de voltaje máxima del 31.30% sin aporte fotovoltaico y del 30.19% integrando generación solar en una casa.

Observando el panorama general del comportamiento de las microrredes, aquellas conformadas con k-means o k-medoids presentan configuraciones nodales y de cableado, así como caídas de voltaje de órdenes de magnitud similares. En la gráfica 4-9,

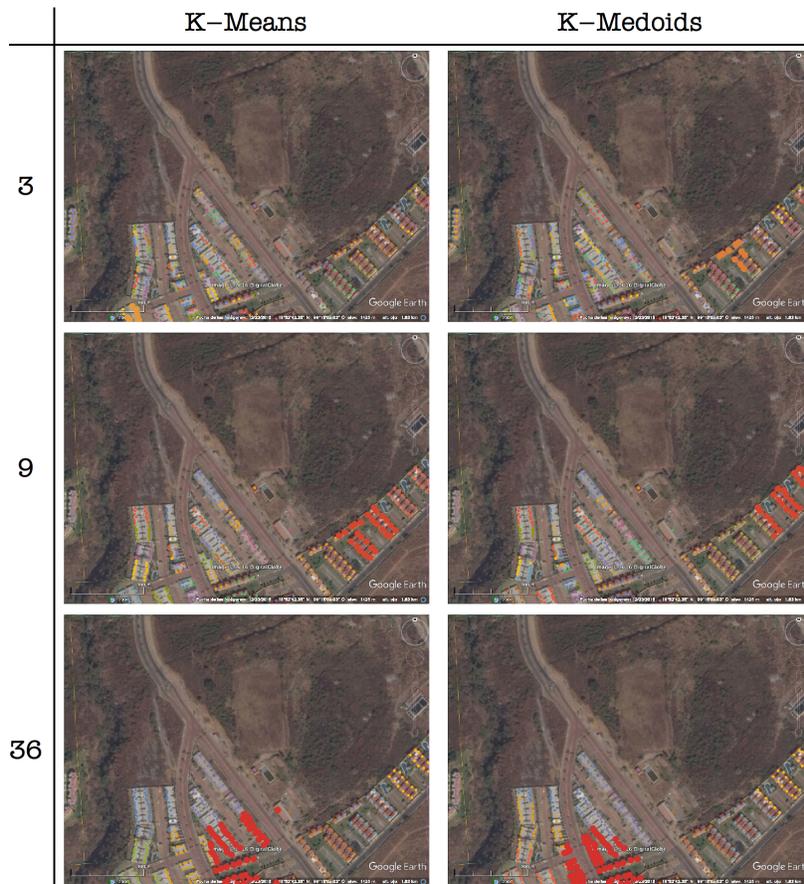


Figura 4-6: Microrredes ubicadas en el mapa de Temixco, configuradas por medio de k-means y k-medoids, para 3, 9 y 36 nodos. Con puntos rojos se resaltan los nodos pertenecientes a la microrred con mayor cableado para su configuración.

se presentan las curvas de porcentaje de microrredes conformadas con k-means y k-medoids cuyo criterio de regulación de voltaje sobrepasa el 6%; la línea punteada paralela al eje de las abscisas señala el criterio de aceptación para evaluar el desempeño de las microrredes: solo 1 de cada 10 formadas puede tener caídas de voltaje mayores al 6%. Se puede apreciar que, con o sin generación fotovoltaica, las cuatro curvas siguen la misma tendencia y que hasta 9 nodos, estas cumplen con el criterio de aceptación en desempeño. Por otra parte, es posible observar que el impacto que tiene el integrar aporte SFV es positivo pues aun con un bajo índice de penetración en las microrredes, el porcentaje de microrredes con grandes caídas de voltaje disminuye, siendo de mayor importancia en las propuestas desde 9 y hasta 33 nodos. Como se observa en la figura y con lo encontrado analizando los casos extremos, al integrar un

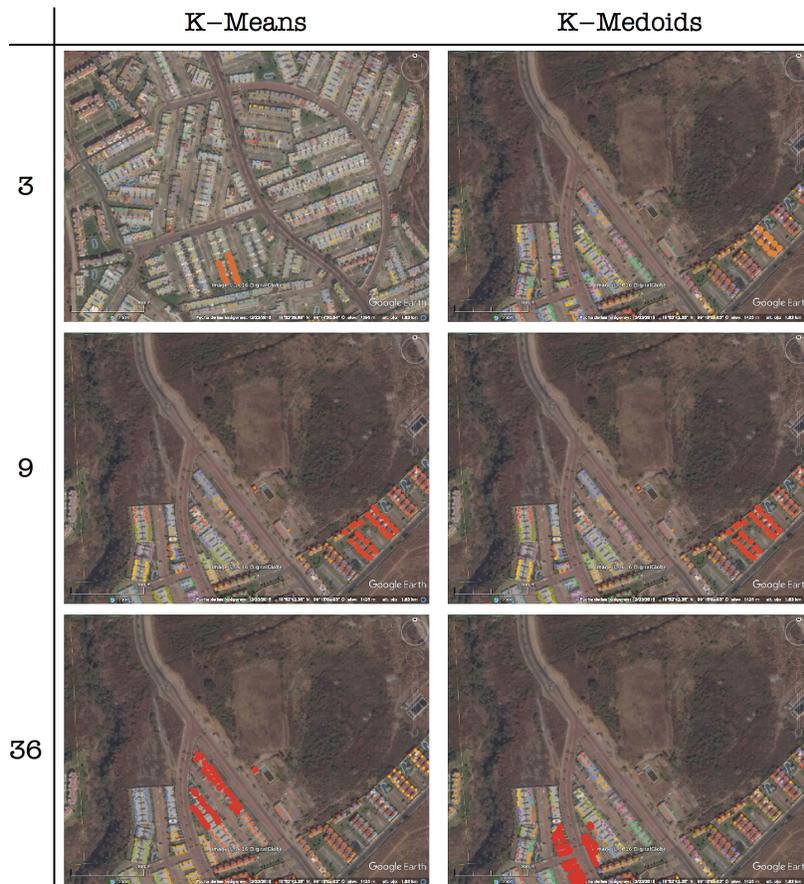


Figura 4-7: Microrredes eléctricas ubicadas en el mapa de Temixco, configuradas por medio de *k-means* y *k-medoids* para un tamaño de 3, 9 y 36 nodos. Con puntos rojos se resaltan los nodos pertenecientes a la microrred con mayor caída de voltaje

SFV en microrredes de 36 nodos, el soporte de voltaje local no mejora demasiado y la mayoría de estos sistemas no cumple con el criterio de caídas de voltaje.

Por último, en la figura 4-10 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la configuración de microrredes. Se observa que aquellas con hasta 9 nodos obtienen una calificación aprobatoria de  $95,42 \pm 0,01$  puntos tanto configuradas con *k-means* como *k-medoids* con y sin la integración de generación fotovoltaica en uno de los nodos. En el caso específico de 12 nodos, puede notarse una gran mejora en la puntuación obtenida por las microrredes con generación distribuida contra aquellas sin aporte fotovoltaico. Como puede observarse en la figura, sin SFV las microrredes de 12 nodos obtuvieron 13.47 puntos, mientras que con aporte solar, suben su puntuación sube a 55.98 y 46.93 configuradas con *k-means* y *k-medoids* respectivamente. Sin embargo,

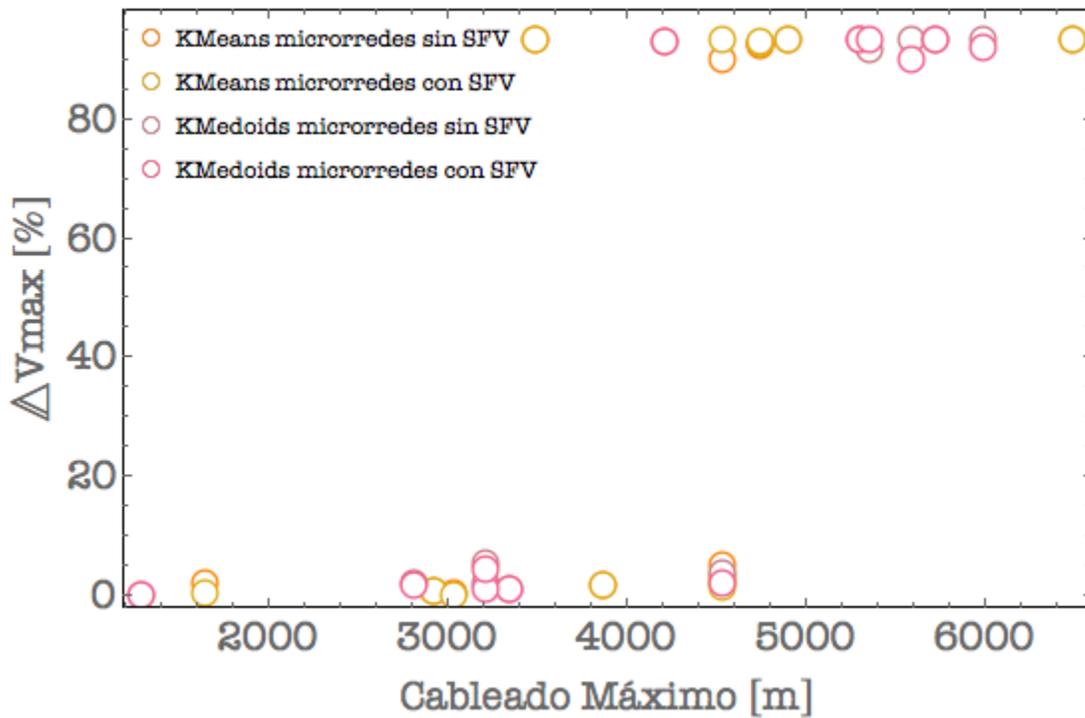


Figura 4-8: Comparación de caídas de voltaje máximas y cableado máximo entre microrredes con y sin generación fotovoltaica configuradas con k-means o k-medoids.

no logran una calificación aprobatoria pues aunque mejora el soporte de voltaje local, aún más del 10 % de las microrredes sigue teniendo caídas de tensión mayores al 6 % como ilustra la figura 4-9.

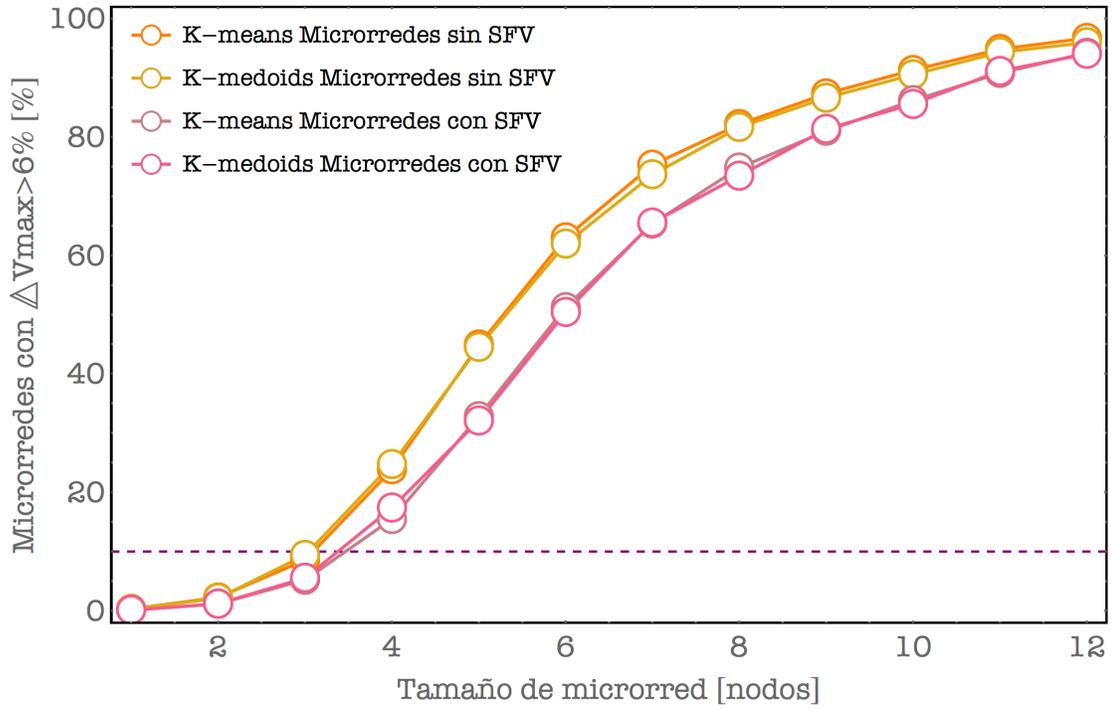


Figura 4-9: Porcentaje de microrredes cuya caída de voltaje máxima excede el 6 %

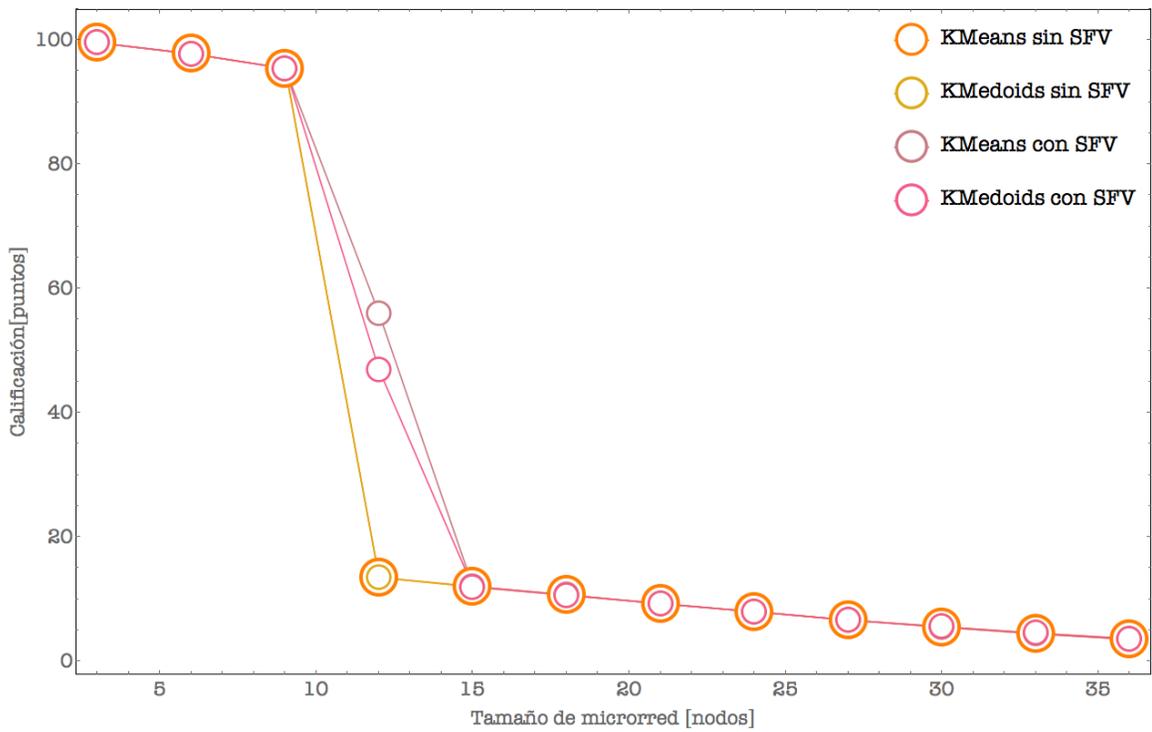


Figura 4-10: Puntuación de configuraciones de microrredes

# Capítulo 5

## Conclusiones

En el marco de los Objetivos de Desarrollo Sustentable, el escenario de generación eléctrica está cambiando en pro de un sistema eléctrico sustentable, resiliente y confiable. Como parte de este cambio de paradigma, las redes y microrredes eléctricas inteligentes han adquirido importancia. Estas son la evolución del sistema convencional a un conjunto de sistemas inteligentes de infraestructura eléctrica, protección y gestión de energía, y con el fin de asegurar un suministro de energía de calidad, son diseñados de acuerdo a las características topológicas y climatológicas de la región, incorporando tecnologías de bajas emisiones de carbono y, de ser posible, sistemas de cogeneración. Tras la revisión de la literatura, se encontró que existen más de 140 proyectos de microrredes en el mundo, ya sea en marcha o en desarrollo, con una capacidad de generación de 1800MW. Se reporta que integran una combinación de fuentes de energía distribuida, en su mayoría incluyendo energía solar fotovoltaica; trabajan en un esquema de corriente alterna, lo que facilita su integración a la red, y aquellas que incluyen almacenamiento utilizan baterías.

Se ha presentado un estudio básico del rendimiento de microrredes eléctricas urbanas con y sin aporte fotovoltaico para una parte representativa de Temixco, Morelos. Se propone una estrategia para configurar y evaluar el desempeño en estado estable de microrredes ideales con baja densidad de aporte fotovoltaico, donde solo un nodo por microrred integra SFV, así como una estrategia para seleccionar la mejor configuración proponiendo un indicador para evaluar tamaño nodal, cableado y criterio

de regulación de voltaje. Para esto, se desarrolló un algoritmo que utiliza como datos de entrada la ubicación de las edificaciones en la ciudad seleccionada, así como datos reales parámetros eléctricos medidos en una residencia en la misma ciudad. Capturando así características esenciales de las microrredes como lo son restricciones espaciales y una configuración de red idealizada. Las figuras de mérito seleccionadas y sus criterios de aceptación fueron: tamaño en nodos promedio menor a 20, cableado promedio menor a 80m y solo una de cada diez microrredes formadas debía reportar un criterio de voltaje máximo superior al 6 %, otorgando un máximo de diez puntos el cumplimiento del tamaño en nodos, otros diez puntos al cableado y ochenta al cumplimiento de la última figura de mérito.

A través de la estrategia desarrollada, se analizó la topología de la ciudad de Temixco y se encontró que en máximos de cableado y tamaño nodal las microrredes configuradas con k-medoids presentan menores caídas de voltaje con y sin generación SFV integrada. Cabe destacar que en el panorama general del comportamiento de las microrredes, k-means y k-medoids presentan configuraciones nodales y de cableado, así como caídas de voltaje de un orden similar. Por lo que puede optarse por aplicar cualquiera de estos dos o estudiar la posibilidad de aplicar algún algoritmo distinto.

Dada la dispersión urbana de la ciudad, los casos extremos de edificaciones aisladas, de microrredes grandes o con mayores caídas de voltaje, se encuentran en áreas suburbanas en la periferia de la ciudad. Una propuesta para tratar las microrredes de mayor tamaño (en nodos o cableado), es analizarlas particularmente y generar microrredes más pequeñas con el fin de homogeneizar la configuración de las microrredes formadas y mejorar el soporte de voltaje local.

Referente a la integración generación fotovoltaica en las microrredes, aún con un índice de penetración bajo, existe un impacto positivo general en el soporte de voltaje local, pues las caídas de voltaje disminuyen al integrar SFV especialmente en aquellas propuestas para tener 9 y hasta 33 nodos. Y siendo de mayor importancia en los casos extremos con mayor necesidad de cableado.

Con respecto al cumplimiento de los estándares seleccionados de cableado y criterio de voltaje máximo; estrictamente, para cumplir con el criterio de cableado igual o

menor a 80m, las microrredes en Temixco deberían configurarse de 3 nodos en promedio. Sin embargo, al evaluar las tres variables (nodos, cableado y caídas de tensión) para el indicador propuesto, configurar las microrredes con hasta 9 nodos resulta adecuado en Temixco pues esta configuración obtuvo alrededor de 95.4 puntos tanto con y sin generación fotovoltaica. Esto debido al cumplimiento del parámetro de regulación de voltaje, en donde, sin importar la presencia de generación distribuida, cumplían con que solo 1 de cada 10 microrredes reportó caídas de voltaje máximas mayores al 6%, aún con un cableado promedio de 155m aproximadamente.

El alcance de este estudio se ha limitado a un análisis del desempeño en estado estable de microrredes eléctricas sin almacenamiento y con baja densidad de aporte fotovoltaico; por lo que existen diversas formas de enriquecer este trabajo. El mismo estudio puede ser replicado para diferentes ciudades con el fin de generar ensambles estadísticos únicos de las propiedades de las microrredes para otras partes del mundo. Además, datos reales sobre la topología de la red de distribución pueden ser incorporados fácilmente para analizar su rendimiento actual y contrastar contra microrredes propuestas; también pueden incorporarse una o más fuentes de generación distribuida, así como dispositivos de almacenamiento; más variables para el análisis pueden ser tomadas en cuenta como costos, potencia activa, potencia reactiva y frecuencia, por mencionar algunas, lo que serviría para obtener una evaluación más completa de la configuración de las microrredes; igualmente se puede explorar la posibilidad de implementar todo lo anterior y analizar el rendimiento eléctrico dinámicamente con la perspectiva a futuro de desarrollar un algoritmo de optimización dinámico. Por otro lado, el algoritmo puede ser modificado para analizar otros escenarios de optimización tales como rutas transporte, distribución y consumo de recursos hídricos, gestión de residuos sólidos urbanos, etc.



# Bibliografía

- [1] Lena Neij, Harriet Bulkeley, and Kes McCormick. Cities and climate change: The great decarbonisation challenge. pages 1–4, 11 2015.
- [2] Dawood Al Abri, Arif Malik, Mohammed Albadi, Yassine Charabi, and Nasser Hosseinzadeh. Smart Grid. In *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, pages 1–30. Springer New York, 2015.
- [3] IEA. *World Energy Statistics 2016*. OECD Publishing, aug 2016.
- [4] SENER. *Prospectiva del Sector Eléctrico 2016-2030*, 2016.
- [5] IEA. IEA - Electricity Information - 2016 edition - Key Electricity Trends, 2016.
- [6] EEA. Total electricity consumption - outlook from IEA. Disponible en <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/total-electricity-consumption-outlook-from-iea/total-electricity-consumption-outlook-from-1> (2017/06/20), 2015.
- [7] Ruud Kemepener, Paul Komor, and Anderson Hoke. Smart grids and renewables: A guide for effective deployment. Report, IRENA, nov 2013.
- [8] OECD. Fragmentation in clean energy investment and financing. In *OECD Business and Finance Outlook 2016*, pages 141–170. OECD Publishing, 2016.
- [9] EIA/SAIC. Smart Grid Around The World: Selected Country Overviews, October 2011.
- [10] Mohamed E. El-Hawary. The Smart Grid—State-of-the-art and future trends. In *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEP-CON)*. IEEE, dec 2016.
- [11] Yan Du, Matthew Turner, Adel Elmaghraby, James Graham, Yuan Liao, John Naber, and Mahendra Sunkara. Kentucky’s Smart Grid Roadmap, S/F.
- [12] Subhes C. Bhattacharyya. *Energy Economics*. Springer Science + Business Media, 2011.
- [13] SENER. Programa de Redes Eléctricas Inteligentes, 2016.

- [14] A. Halu, A. Scala, A. Khiyami, and M. C. Gonzalez. Data-driven modeling of solar-powered urban microgrids. *Science Advances*, 2(1):e1500700–e1500700, jan 2016.
- [15] T. Gönen. *Electric power distribution system engineering*. McGraw-Hill Series in Electrical Engineering. McGraw-Hill, 1986.
- [16] Ilhami Colak, Seref Sagiroglu, Gianluca Fulli, Mehmet Yesilbudak, and Catalin-Felix Covrig. A survey on the critical issues in smart grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54:396–405, feb 2016.
- [17] Marilyn A. Brown and Shan Zhou. Smart-grid policies: an international review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2(2):121–139, oct 2012.
- [18] Jignesh Bhatt, Vipul Shah, and Omkar Jani. An instrumentation engineer’s review on smart grid: Critical applications and parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40:1217–1239, dec 2014.
- [19] Tao Jiang, Liang Yu, and Yang Cao. *Energy Management of Internet Data Centers in Smart Grid*. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [20] Xi Fang, Satyajayant Misra, Guoliang Xue, and Dejun Yang. Smart Grid - The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 14(4):944–980, 2012.
- [21] CFE. CFE y la electricidad en México. Disponible en [http://www.cfe.gob.mx/conocecfe/1\\_acercadecfe/cfe\\_y\\_la\\_electricidad\\_en\\_mexico/paginas/cfeylaelectricidadmexico.aspx](http://www.cfe.gob.mx/conocecfe/1_acercadecfe/cfe_y_la_electricidad_en_mexico/paginas/cfeylaelectricidadmexico.aspx) (2017/07/10), 2014.
- [22] David Elzinga. *Technology Roadmap: Smart Grids*. OECD Publishing, apr 2011.
- [23] Pierluigi Siano. Demand response and smart grids—A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:461–478, feb 2014.
- [24] Eva Niesten and Floortje Alkemade. How is value created and captured in smart grids? A review of the literature and an analysis of pilot projects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53:629–638, jan 2016.
- [25] Y. Du, M. Turner, Y. Liao, M. Sunkara, J. DeRouen, A. Greenwell, J. Rogness, K. Cole, and J. Gardner. Kentuc Smart Grid roadmap initiative. In *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. IEEE, jan 2012.
- [26] Marilyn A. Brown and Shan Zhou. Sustainable Smart Grids Emergence of a Policy Framework. In *Electrical Transmission Systems and Smart Grids*, pages 271–318. Springer New York, nov 2012.
- [27] Jake Maxwell Watts and Newley Purnell. Singapore is taking the smart city to a whole new level, 2016.

- [28] Nanyang Technological University. EcoCampus - About EcoCampus, 2017.
- [29] M. Coppo, P. Pelacchi, F. Pilo, G. Pisano, G.G. Soma, and R. Turri. The Italian smart grid pilot projects: Selection and assessment of the test beds for the regulation of smart electricity distribution. *Electric Power Systems Research*, 120:136–149, mar 2015.
- [30] João Crispim, José Braz, Rui Castro, and Jorge Esteves. Smart Grids in the EU with smart regulation: Experiences from the UK Italy and Portugal. *Utilities Policy*, 31:85–93, dec 2014.
- [31] Nathan Pierce and Bernadett Köteles-Degrendele. Sharing Cities, 2016.
- [32] Yeliz Yoldaş, Ahmet Önen, S.M. Muyeen, Athanasios V. Vasilakos, and İrfan Alan. Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72:205–214, may 2017.
- [33] R.H. Lasseter. MicroGrids. In *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*. IEEE.
- [34] Lubna Mariam, Malabika Basu, and Michael F. Conlon. Microgrid: Architecture policy and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:477–489, oct 2016.
- [35] S.A. Hammer and M.A. Hyams. Smart energy for cities: decentralized supply resources and their link to the modern grid. In *Metropolitan Sustainability*, pages 520–555. Elsevier, 2012.
- [36] F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, and M. Rivier. A literature review of Microgrids: A functional layer based classification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62:1133–1153, sep 2016.
- [37] Lubna Mariam, Malabika Basu, and Michael F. Conlon. A Review of Existing Microgrid Architectures. *Journal of Engineering*, 2013:1–8, 2013.
- [38] Seyed Amir Hosseini, Hossein Askarian Abyaneh, Seyed Hossein Hesamedin Sadeghi, Farzad Razavi, and Adel Nasiri. An overview of microgrid protection methods and the factors involved. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64:174–186, oct 2016.
- [39] Faisal Mumtaz and Islam Safak Bayram. Planning Operation, and Protection of Microgrids: An Overview. *Energy Procedia*, 107:94–100, feb 2017.
- [40] R.H. Lasseter and P. Paigi. Microgrid: a conceptual solution. In *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*. IEEE.

- [41] Iacopo Rossi, Larry Banta, Alessandra Cuneo, Mario Luigi Ferrari, Alberto Nicola Traverso, and Alberto Traverso. Real-time management solutions for a smart polygeneration microgrid. *Energy Conversion and Management*, 112:11–20, mar 2016.
- [42] A. Mahieux, C. & Oudalov. Microrredes: Integración de microrredes con tecnologías de ABB, 2014.
- [43] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Disponible en [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2\\_Volume2/V2\\_2\\_Ch2\\_Stationary\\_Combustion.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf) (2017/07/21), 2006.
- [44] TESLA. Powerwall. Disponible en <https://www.tesla.com/powerwall?redirect=no> (2017/07/21), 2017.
- [45] P. Asmus, B. Davis, and C. Wheelock. EXECUTIVE SUMMARY: Microgrids Smart Energy Aggregation Platforms for Distributed Power Generation, Safe Grid Islanding, Reliability, Security, and Emergency Services, 2010.
- [46] SmartGrids. More Microgrids Project, 2013.
- [47] Eklas Hossain, Ersan Kabalci, Ramazan Bayindir, and Ronald Perez. Microgrid testbeds around the world: State of art. *Energy Conversion and Management*, 86:132–153, oct 2014.
- [48] Xue Zhang, Wei Pei, Wei Deng, Yan Du, Zhiping Qi, and Zuomin Dong. Emerging smart grid technology for mitigating global warming. *International Journal of Energy Research*, 39(13):1742–1756, feb 2015.
- [49] Robert W. Galvin Center for Electricity Innovation. . [Microgrid at Illinois Institute of Technology.
- [50] R. Taylor. Renewable Hybrid System Applications around the World Natural Gas/Renewable Energy Hybrids Workshops, 2001.
- [51] Wikipedia. Xcalak, 2017.
- [52] Seref Sagiroglu, Ramazan Terzi, Yavuz Canbay, and Ilhami Colak. Big data issues in smart grid systems. In *2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE, nov 2016.
- [53] Wikipedia. Statistical ensemble (mathematical physics). Disponible en [https://en.wikipedia.org/wiki/Statistical\\_ensemble\\_\(mathematical\\_physics\)#cite\\_note-gibbs-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Statistical_ensemble_(mathematical_physics)#cite_note-gibbs-1) (2017/07/21), 2017.
- [54] Velmurugan. Computational Complexity between K-Means and K-Medoids Clustering Algorithms for Normal and Uniform Distributions of Data Points. *Journal of Computer Science*, 6(3):363–368, mar 2010.

- [55] T. Soni Madhulatha. AN OVERVIEW ON CLUSTERING METHODS. *IOSR Journal of Engineering*, 02(04):719–725, apr 2012.
- [56] T. Kanungo, D.M. Mount, N.S. Netanyahu, C.D. Piatko, R. Silverman, and A.Y. Wu. An efficient k-means clustering algorithm: analysis and implementation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(7):881–892, jul 2002.
- [57] L. Pierson. Data clustering with the k-means algorithm, S/F.
- [58] Kiri Wagstaff, Claire Cardie, Seth Rogers, and Stefan Schroedl. Constrained K-means Clustering with Background Knowledge. In *In ICML*, pages 577–584. Morgan Kaufmann, 2001.
- [59] Hae-Sang Park and Chi-Hyuck Jun. A simple and fast algorithm for K-medoids clustering. *Expert Systems with Applications*, 36(2):3336–3341, mar 2009.
- [60] E.M. Mirkes. K-means and K-medoids applet, 2011.
- [61] R. Agarwala. A Fast and Scalable Radiation Hybrid Map Construction and Integration Strategy. *Genome Research*, 10(3):350–364, mar 2000.
- [62] Philip Avner, Thomas Bruls, Isabelle Poras, Lorraine Eley, Shahinaz Gas, Patricia Ruiz, Michael V. Wiles, Rita Sousa-Nunes, Ross Kettleborough, Amer Rana, Jean Morissette, Liz Bentley, Michelle Goldsworthy, Alison Haynes, Eifion Herbert, Lorraine Southam, Hans Lehrach, Jean Weissenbach, Giacomo Manenti, Patricia Rodriguez-Tome, Rosa Beddington, Sally Dunwoodie, and Roger D. Cox. A radiation hybrid transcript map of the mouse genome. *Nature Genetics*, 29(2):194–200, 2001.
- [63] Christopher Bailey, Timothy McLain, and Randal Beard. Fuel saving strategies for separated spacecraft interferometry. In *AIAA Guidance Navigation, and Control Conference and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, aug 2000.
- [64] University of Waterloo. Pokemon Go and the Traveling Salesman Problem. Disponible en <http://www.math.uwaterloo.ca/tsp/poke/index.html> (2017/06/20), 2016.
- [65] DOF. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (utilización). Disponible en [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=35280607&fecha=29/11/2012](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=35280607&fecha=29/11/2012) (2017/07/11), 2012.