UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

DISEÑO DE MICRO-REDES URBANAS EN UN ENFOQUE PARA MEJORAR LA RESILIENCIA Y GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: BRYAN ALEXANDER PAILLACHO SIMBAÑA

TUTOR: EDWIN MARCELO GARCÍA TORRES

Quito - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Bryan Alexander Paillacho Simbaña con documento de identificación N° 1725783078 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 10 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Bryan Alexander Paillacho Simbaña
1725783078

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Bryan Alexander Paillacho Simbaña con documento de identificación No. 1725783078, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: "Diseño de micro-redes urbanas en un enfoque para mejorar la resiliencia y garantizar la confiabilidad en la red de distribución eléctrica", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Bryan Alexander Paillacho Simbaña

1725783078

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edwin Marcelo García Torres con documento de identificación N°1803087400, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE MICRO-REDES URBANAS BASADO EN UN ENFOQUE PARA MEJORAR LA RESILIENCIA Y GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA, realizado por Bryan Alexander Paillacho Simbaña con documento de identificación N° 1725783078, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de septiembre del año 2024

Atentamente,

Ing. Edwin Marcelo García Torres, MSc
1803087400

ÍNDICE GENERAL

1 Introducción 2
2 Marco teórico 3
2.1 Micro-redes 3
2.1.1 Micro-redes en AC 3
2.1.2 Componentes de una micro-red 4
2.2 Sistemas Fotovoltaicos 4
2.2.1 Dimensionamiento 5
2.3 Sistemas Eólicos 5
2.3.1 Tipos de Aerogeneradores 6
2.3.2 Modelo de distribución de Weibull 6
2.4 Banco de Baterías 6
2.4.1 Estado de descarga 7
2.4.2 Estado de Carga 7
2.5 Resiliencia 7
2.5.1 Resiliencia en micro-redes 8
2.5.2 Indicadores de Resiliencia 8
2.5.3 Índices de la Resiliencia 8
2.6 Indicadores de confiabilidad 9
2.6.1 Confiabilidad en micro-redes 9
2.6.2 Indicadores de confiabilidad enfocados al consumidor 9
3 Metodología 10
4 Formulación del problema 10
4.1 Densidad Poblacional 11
4.1.1 Factor de Diversidad de Cargas 11
4.1.2 Estimación de la Demanda 12
4.1.3 Pronóstico de la demanda 12
4.2 Implementación de la Micro-red 12
5 Análisis de resultados 13
5.1 Análisis del IEEE de 15 barras sin micro-red. 13
5.2 Análisis con la implementación de la micro-red 14
5.3 Óptima generación de la micro-red 14
5.4 Análisis de los indicadores de confiabilidad y resiliencia. 15
5.4.1 Indicadores de confiabilidad en la micro-red 15
5.4.2 Valoración de los indicadores de resiliencia en la micro-red 16
6 Conclusiones 17

7 Trabajos Futuros 17
8 Referencias 17
8.1 Matriz de Estado del Arte 22
8.2 Resumen de Indicadores 25
8.3 Anexos 26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de una micro-red 3
Figura 2. Sistema de prueba IEEE de 15 Barras 10
Figura 3. Clasificación de los consumidores 11
Figura 4. Pronóstico de consumos 12
Figura 5. Implementación de micro-redes 13
Figura 6. Representación de las caídas de voltaje ordinarias 13
Figura 7. Voltajes [p.u] sin micro-red 14
Figura 8. Datos obtenidos con micro-red 14
Figura 9. Óptima generación del sistema 14
Figura 10. Generación por zonas estratégicas 15
Figura 11. Análisis de situaciones en condiciones normales y carga pico 15
Figura 12. Evaluación del SAIFI con configuración de generación de la micro-red 16
Figura 13. Evaluación del SAIDI con configuración de generación de la micro-red 16
Figura 14. Evaluación del CAIDI con configuración de generación de la micro-red 16
Figura 15. Evaluación de los indicadores de resiliencia 17
Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte 25
Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte. 25
Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte. 25

ÍNDIDE DE TABLAS

Tabla 1. Modalidades 5
Tabla 2. Conexión de voltajes 5
Tabla 3.Densidad Poblacional 11
Tabla 4. Máximas demandas por tipos de consumidores 11
Tabla 5. Resultados del cálculo de factor de diversidad 11
Tabla 6. Antecedentes del sistema IEEE de 15 barras 12
Tabla 7. Componentes de la micro-red 12
Tabla 8. Datos del sistema IEEE de 15 barras 14
Tabla 9. Valores obtenidos del sistema sin micro-red y con micro-red + cargas 15
Tabla 10. Resultados de la confiabilidad 15
Tabla 11.Resultados de indicadores de Resiliencia 16
Tabla 12. Matriz de estado del arte 22
Tabla 13. Indicadores de Resiliencia 26

DISEÑO DE MICRO-REDES URBANAS BASADO EN UN ENFOQUE PARA MEJORAR LA RESILIENCIA Y GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Resumen

El actual documento está enfocado en el diseño de micro-redes urbanas (MC), para un sistema de distribución (SD) modelo radial, con el propósito de mejorar la confiabilidad del suministro en la red, de tal manera, que se implementan tecnologías renovables y estrategias de gestión avanzadas, lo que, a su vez, mejora las situaciones del SD ante el aumento de demanda, considerando factores como la densidad poblaciones del sector y las diversidades de cargas. Se implementa el modelo de prueba IEEE de 15 barras a base de energías renovables y no renovables con fuentes de energía solar y eólica, adicional, consta de sistemas de almacenamiento y grupo electrógenos. Para el proceso de evaluación de los indicadores se tomó condiciones normales y durante cargas pico, en casos de emergencia entra a evaluarse los indicadores de resiliencia en función de los índices para sistemas fiables.

Palabras Clave: Generación distribuida, Micro-redes, Resiliencia, Confiabilidad, densidad poblacional, diversidad de cargas.

Abstract

The current document is focused on the design of urban micro-grids (MC), for a radial model distribution system (DS), with the purpose of improving the reliability of supply in the network in such a way that renewable technologies and advanced management strategies are implemented, which in turn improves the situations of the DS in the face of increased demand considering factors such as population density of the sector and load diversities. The IEEE 15-bar test model is implemented based on renewable and non-renewable energies with solar and wind energy sources, in addition to storage systems and generator sets. For the evaluation process of the indicators, normal conditions and during peak loads were taken, in emergency cases the resilience indicators are evaluated according to the indexes for reliable systems.

Key words: Distributed generation, Micro-grids, Resilience, Reliability, population density, load diversity.

1 Introducción

En la parte de distribución, existen problemas notorios en cuanto a la confiabilidad y eficacia del suministro, dados por problemas como sobrecargas [2]. Apagones y fluctuaciones de voltajes, el aumento de la demanda de consumo de energía se presenta a nivel global, estos inconvenientes son evidentes por la falta de tecnología implementada en algunas partes del mundo, ya que existen naciones con infraestructura eléctrica no capaz de sustentar el abastecimiento eléctrico [3], [4], [5].

Los primeros en implementar el uso de energía solar fue Brooklyn Microgrid en 2016, ayudando a uno de los lugares en Nueva York a producir energía propia y estable en la red, esto llevo a planificar compra y venta en algunas partes del sistema [6]. Hoy en día existen hogares y negocios que constan de otro medio de conexión confiable para así evitar apagones las cuales eran ocasionados por temas climatológicos como tormentas y huracanes que producían daños en la red [7], [8].

En el caso de Alabama desde el 2018 cuenta con su proyecto de micro-red la cual se incorporó en un vecindario que consta de un área de prueba de 62 residencias con sistemas de domótica y enlaces inteligentes [9], [10].

Este tipo de operaciones pueden trabajar en diferentes modalidades sea sola o acompañada de la red, dicho sistema esta constituidos por instalaciones de paneles solares, conjunto de baterías y un generador que funciona con gas natural a la causa de una demanda de energía durante las horas en la noche, creando un soporte para establecer un sistema de energía justo [11]. La capacidad la cual genera de manera consumible es de 1MWp de energía eléctrica, obteniendo así un conjunto de residencias inteligentes capaces de demostrar una interacción más eficiente dentro de la red [6], [7].

Japón es el segundo país con mayor incorporación de micro-redes ya que uno de los problemas similares al artículo es el crecimiento de la densidad poblacional, llevando a adquirir recursos para un desarrollo industrial [11]. Adicional se enfrenta a una de las crisis en la cual la población sufre un envejecimiento notorio, teniendo un impacto en el sector energético ya que ciertos sistemas en los últimos años generaron una producción mínima no consumible en algunas poblaciones [12].

El diseño de micro-redes contempló a concluir con el cierre de centrales térmicas creando un alto impulso de la generación renovable [6], [7]. La red de Colombia priorizó unos de los indicadores en la confiabilidad buscando el mejoramiento necesario como el SAIDI y SAIFI anuales, los operadores de red (OR), en el sector eléctrico se tuvo consideración el aplicar incentivos para aumentar ingresos al autoabastecer y desempeñar una modalidad autónoma frente a la red, logrando cumplir con una calidad de energía necesaria y así alcanzar perfiles de voltajes claros y precisos [13].

Hoy en día este país no cumple con la demanda de energía, teniendo así que implementar tecnologías innovadoras como son las micro-redes, mismo están propensos a efectuar gestión en base a estrategias para un control óptimo de la energía, esto con la intención de minimizar un consumo alto en los usuarios [5].

En los últimos años la culminación de las micro-redes ha ocasionado cambios ventajosos para así lograr aumentar la capacidad de mejora en los voltajes, calidad de energía y así disminuir pérdidas que el sistema provoque a la vez por las emisiones a causa de cambios climáticos siendo un servicio con indicadores sustancialmente fijos y efectivos para lograr parámetros principales como la predicción de tasa de fallas, disponibilidad de la red entre

otros, asimismo obteniendo datos que permitan estimar el tiempo de reparación y tiempo medio de falla del sistema en casos de desconexiones futuras [14].

En la ciudad de Cuenca se obtuvo un bosquejo de una micro-red similar basándose en la aplicación de recursos energéticos renovables en el sector Tablón ubicado en el cantón Santa Isabel provincia de Azuay de la parte sur del Ecuador [15].

Dicho sector representado por la empresa distribuidora de energía regional Centro Sur C.A. combinando energías convencionales y renovables que posean un alto índice de fiabilidad y eficiencia, ya que, así pueden hacerse costos comparativos en función de otras empresas distribuidoras, estos análisis se realizaron en base a mediciones de parámetros que permitieron la obtención de la curva de demanda, y así concluir con datos estadísticos para el estudio de factores de carga y diseñar un sistema de generación autónomo y confiable para la red [16].

Las micro-redes son consideradas soluciones con el fin de apoyo al punto distribución en su objetivo de entregar y abastecer energía confiable y eficaz al consumidor [17], [18].

2 Marco teórico

2.1 Micro-redes

Son sistemas conformados por generación distribuida con la intensión de operar de forma independiente en caso de apagones, o así mismo en coordinación con la red eléctrica principal para completar los picos de demanda de los consumidores evitando así mayores costos de energía eléctrica [19], [20].

Este método proporciona electricidad eficiente y sostenible en áreas específicas, como instalaciones industriales en redes pequeñas y descentralizadas que combinan varias fuentes de energía renovables, con tecnologías de almacenamiento, como se puede visualizar en esta figura 1 [16].

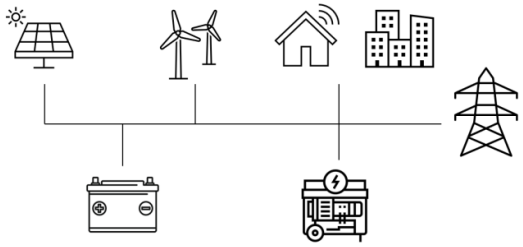

Figura 1. Representación de una micro-red

Una solución innovadora para mejorar la resiliencia, la eficacia activa y la integración de energías renovables en el suministro eléctrico es su flexibilidad, así como su capacidad para funcionar de manera independiente o conectada a una red principal [21], [2].

Son aplicables en sectores residenciales, comerciales e industriales, constantes altos niveles de consumo de energía en donde no se logre abastecer a los consumidores [16].

Hoy en días existen zonas residenciales donde sus consumos son de niveles casi nulos y así mismo donde comprenden a su vez un nivel de eficiencia de energía muy alto [22], debido a que las micro-redes permiten una generación continua en conjunto con las redes convencionales existentes, aun así, hay aplicaciones adicionales relacionadas con la generación distribuida. Al mismo tiempo, al contar con el desabastecimiento de energía en este momento, se puede generar solo en punta [23].

2.1.1 Micro-redes en AC

Sistemas bidireccionales que nos permitan la distribución de electricidad con el objetivo de un manejo operativo idóneo en caso de fallas o eventualidades, la cual nos ayude a contar con un rendimiento confiable y poder acoplar fuentes de generación de origen renovable para así lograr sustentar la alta demanda de energía y a la misma reducir costos [8], [24].

2.1.2 Componentes de una micro-red

Los elementos que constituyen la micro-red están compuestos por:

- Generación distribuida
- Grupos electrógenos
- Sistemas Almacenamiento
- Gestión de cargas
- Sistemas de control

Cada sistema tiene un papel importante en su funcionamiento, para así cumplir con su eficacia y confiabilidad en la red [7].

Sistemas fotovoltaicos, generadores eólicos, pequeñas centrales hidroeléctricas, grupos electrógenos son de mucha importancia en la parte de generación [25].

Los grupos electrógenos se caracterizan por ser máquinas rotativas, mecánicas de combustión la cual funcionan con gasolina o diésel, estos sistemas son usados en casos de emergencia o en ocasiones como punto operativo [7].

Los sistemas de almacenamiento están constituidos por baterías, super-capacitores, con la intención de abastecer de energía por un tiempo determinado [7].

La gestión de cargas son estrategias tecnológicas en donde se busca equilibrar la demanda de electricidad, con la finalidad de reducir demandas pico, y así disminuir costos altos en los diversos tipos de consumidores [6], [26].

Los diversos tipos de cargas vienen dados por una demanda de energía que pueden ser: cargas eléctricas-térmicas, en base a la calidad de suministro como son cargas críticas, cargas controlables o no controlables y así poder tener una operación estable en la red [6], [26].

La conexión con la red permite la compensación de energía o inyectar cuando el balance entre generación y consumo no se logre abastecer [3], [16].

Este tipo de micro-redes; por lo general pueden estar fuera de la red o conectados en ella, y al mismo tiempo estar detrás del medidor como parte del sistema de distribución [16].

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

Aprovechan la luz que emite el sol y la transforman en energía consumible gracias a las celdas fotovoltaicas que están formadas por material semiconductor como el silicio para así generar corriente eléctrica [27].

Estos sistemas están conformados por:

- Generador fotovoltaico
- Reguladores de cargas
- Inversores
- Cargas

Pueden clasificarse en dos tipos de conexión; sistemas autónomos o también conocidos como “off-Grid” y conectados a la red también llamados “On-Grid” [27], [28].

Constan de inversores con el objetivo de consumir corrientes AC ya que cumplen la minimización del rendimiento de operación del sistema con potencias menores en comparación con la potencia nominal del inversor [29].

Estos sistemas también pueden trabajar en combinación con fuentes renovables o no renovables, con la intención de obtener sistemas híbridos más sustentables, aptas de abastecer una alta demanda energética [29].

Para estos sistemas la potencia nominal está limitada por la demanda pico y la capacidad permitida por cada distribuidora, el consumidor queda obligado a instalar sistemas de control y protecciones para reprimir la inyección a la red tales como indica la Norma “Nro. ARCERNNR-008-23” [30].

Los modelos de autoabastecimiento que permite la normativa mencionada se detallan a continuación en la tabla 1 [30]:

Tabla 1. Modalidades

Modalidades	Autoabastecimiento
1a	Individual local
1b	Múltiple local
2a	Individual remoto
2b	Múltiple remoto con consumidores concentrados
2c	Múltiple remoto con consumidores dispersos

Sistemas que inyecten energía eléctrica la potencia referencial quedará limitada a 2 [MW] para medio voltaje [30]. Para conexiones de bajo voltaje existen potencias nominales permitidas indicadas en la tabla 2 [30].

Tabla 2. Conexión de voltajes

$\boldsymbol{P_n \leq 5\ kW}$	Monofásico
$\boldsymbol{P_n \leq 10\ kW}$	Bifásico
$\boldsymbol{P_n \leq 50\ kW}$	Trifásico

Las potencias mayores que no consten en la tabla pueden ser permitidas dependiendo de las empresas distribuidoras que consten con estudios técnicos que demuestren que no abra consecuencias a la red de distribución [30].

Además, se deben cumplir con ciertos permisos de factibilidad y certificados habilitantes para la implementación y funcionamiento de las plantas en base a cada modalidad de autoabastecimiento que se desee instalar esto es normado por la Regulación Nro. ARCERNNR-008-23 [30].

2.2.1 Dimensionamiento

La cantidad de módulos o paneles dependen del espacio de irradiación y la eficiencia impresa del panel. El factor de planta asume en base a las condiciones ambientales que engloba pérdidas por dispersión tomando en cuenta las conexiones propias del lugar y las tipologías del proyecto; para determinar la potencia mínima de planta se considera la siguiente ecuación (1) [31].

$$P_m = \frac{consumo\ anual\left(\frac{kWh}{año}\right) x G_{CEM}\left(1\frac{kw}{m^2}\right)}{HSP_{anual}\ x\ PR} \quad (1)$$

Donde:
$P_{min.gen}$: Potencia mínima generada.
G_{CEM} : Coeficiente de Irradiancia.
HSP : Horas solares Pico.
PR : Factor-pérdidas por dispersión (Rendimiento Energético).

Los módulos solares requeridos son calculados en base a información de la energía máxima demandada del usuario con la siguiente ecuación (2) [31].

$$\#\ paneles\ = \frac{P_{Inversor}\ [KW]}{P_{modulo\ fotovoltaico}} \quad (2)$$

Donde:
$P_{Inversor}$: potencia del inversor
$P_{modulo\ fotovoltaico}$: potencia del panel

Los SFV pueden lograr ser centrales magnas de generación de energía con el fin de suministrar toda la producción eléctrica a la red y así poder distribuirlas a zonas estratégicas que soliciten una alta demanda y evitar un déficit de energía [31].

2.3 Sistemas Eólicos

Un aerogenerador es un dispositivo la cual convierte la energía cinética que se origina con el viento en energía dinámica, esto con la ayuda de las aspas, la ubicación geográfica y la altura de la turbina eólica, así mismo se considera la velocidad del aire y la orientación en la cual se ubique el generador [32], [33].

Un modelo matemático para calcular la potencia nominal en función del viento y la velocidad de corte se representa con las siguientes ecuaciones (3)-(6) en función de la condición del viento[33].

$$P_{wt} = 0 \quad , v < \mathrm{v_c} \tag{3}$$

$$P_{wt} = P_R \frac{v^k - v_c^k}{v_R^k - v_c^k} \quad , v_c \leq v \leq v_R \tag{4}$$

$$P_{wt} = P_R \quad , v_R < v < v_F \tag{5}$$

$$P_{wt} = 0 \quad , v > v_F \tag{6}$$

Donde:
P_R : Potencia nominal
v_c : velocidad del viento-corte inferior
v_R : velocidad referencial-viento
v_F : velocidad-corte superior
k : parámetro-distribución de Weibull (base de datos) [33].

La potencia del viento es igual al cubo de la velocidad, calculada por la siguiente ecuación (7) [32].

$$P_{viento} = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 \tag{7}$$

Donde:
ρ : consistencia del viento
S : área o superficie
v : velocidad del viento

Preexisten factores ambientales que son influyentes en la rapidez del viento como las estaciones del año [32], [33].

2.3.1 Tipos de Aerogeneradores

Para el uso en micro-redes existen diversas tipologías de aerogeneradores, los utilizados son los de eje horizontal y de eje vertical[32]. Los de ejes verticales constan de un eje de rotación en trayectoria del viento en cambio los de tipo horizontal constan con un rotor en paralelo en función a la rapidez de giro, se clasifican en turbinas de modo lento, rápido y de rapidez media [32].

Adicional existen minieólicas que poseen potencias desde 50 w hasta 1000 w, en ciertas ocasiones poseen una cierta cantidad de polos, para tener rapideces nominales mínimas[32].

Para dimensionar este tipo de sistemas se debe tener un estudio previo sobre la contribución del viento en el sector que se va a implementar [32], [33].

2.3.2 Modelo de distribución de Weibull

La complejidad del viento se estipula utilizando la distribución de Weibull la cual logra obtener la energía del año que puede producir el aerogenerador [1].

Los siguientes parámetros de Weibull son encontrados por la siguiente ecuación (8) [32].

$$f(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{8}$$

Donde:
k : Factor de forma (adimensional)
c : Factor de escala $\left(\frac{m}{s}\right)$
v : velocidad del viento $\left(\frac{m}{s}\right)$

El factor de forma es representado por la dependencia entre la energía anual conseguida y la parte que se obtiene con la velocidad del viento no cambiante e igual a la velocidad nominal [34].

2.4 Banco de Baterías

Los bancos de baterías se encargan de acumular energía con la ayuda de módulos fotovoltaicos u otros tipos de energías renovables, con el propósito de compensar la inestabilidad de la radiación del sol y poder distribuir energía que se almacenó durante su periodo de carga [35], [28], [36].

La energía renovable no siempre cumple su producción, ya que se presentan diversos factores climáticos no predecibles, teniendo la obligación de una implementación tecnologías innovadoras la cual debe estar compuesto en una micro-red tales como son los sistemas de almacenamiento [26].

Su objetivo es de aportar cuando el sistema muestre desbalances que se pueden presentar en la obtención y el consumo de energía, para así obtener una apropiada eficacia energética, cabe mencionar que no existen tipos de almacenamientos idóneos ya que constan con limitaciones como son: la densidad de energía, profundidad de descarga, capacidad de almacenamiento, tiempo de autonomía y el lapso de vida útil [35].

El cálculo de la capacidad del banco de baterías cuenta con la siguiente ecuación (9), ya que así se podrá evaluar el aporte de energía almacenada por un cierto ciclo de tiempo [37], [38].

$$\boldsymbol{C} = \int_{t_1}^{t_2} \boldsymbol{i} * \boldsymbol{dt} \tag{9}$$

Donde:
C : Cantidad de energía eléctrica
i : Intensidad de corriente
t_1 : tiempo estado de carga
t_2 : tiempo estado de descarga

2.4.1 Estado de descarga

Teniendo en cuenta el almacenamiento real de la batería, se estima que la descarga a partir de plena carga (SoC 100%) [35], hasta alcanzar un voltaje mínimo, la capacidad de energía se puede obtener con valores mayores o menores en comparación con la capacidad referencial y aun así dependiendo de la carga en descarga y el aumento de temperatura del banco de baterías, tal y como se puede evaluar con la siguiente ecuación (10) [39].

$$SOC(\%) = \left(SOC_0 - \frac{I * t}{Cn}\right) * 100 \tag{10}$$

Donde:
SOC: Estado de carga de la batería (%)
SOC_0 : Tiempo estado inicial batería
i(t) : Velocidad de la carga (A)
t : tiempo por velocidad de descarga
C_n : capacidad nominal de la batería

2.4.2 Estado de Carga

Para el cálculo de la estimación de carga se debe tomar en cuenta situaciones para que el grupo de baterías empiece con la carga que será producida por una planta fotovoltaica, esto sucederá siempre y cuando sobrepase la carga requerida, si sucede lo contrario y la energía de dicha planta no proporciona lo requerido, las baterías proporcionarán energía restante y así iniciara una descarga en la cual se puede apreciar en las siguientes ecuaciones (11) y (12) y (13), [39].

$$SOC(\%) = \left(SOC_0 + \frac{I * t}{Cn}\right) * 100 \tag{11}$$

$$E_w + E_s(t) > E_L(t) \tag{12}$$

$$E_w + E_s(t) < E_L(t) \tag{13}$$

Donde:
E_w : Energía producida por las turbinas eólicas
E_S : Energía emitida por el sol
E_L : Energía almacenada

2.5 Resiliencia

Capacidad de recuperarse ante eventos que puedan afectar la operación de la micro-red, realizando previos análisis de desempeño, para así, obtener resultados para una percepción de su rendimiento y comprender sus nuevas condiciones o mejoras luego de un suceso, esto se puede calcular mediante las ecuaciones (14) y (15), [40].

$$\int_{t1}^{t2} (1 - Q(t)dt) \tag{14}$$

$$Q(t) = \frac{\sum_{n=1}^{N} P_{gen_n}}{P_{demand}} \tag{15}$$

Donde:
$Q(t)$: Inicio de perturbaciones
P_{gen_n} : Potencia generada
P_{demand} : Potencia demandada

2.5.1 Resiliencia en micro-redes

Una micro-red resiliente es comprendida como aquella que posee la capacidad de retornar a un estado de origen aun así cuando esta es alcanzada por perturbaciones de tipo social, ambiental, técnica y/o económica, a pesar obtener información de las condiciones de maniobras en la micro-red previamente a las perturbaciones [40].

Así mismo logra una firmeza durante niveles de alto impacto y de baja posibilidad de operación, con el fin de minimizar posibles cortes de suministro de energía y volver ligeramente a una etapa operativa estable y uniforme del sistema [41].

2.5.2 Indicadores de Resiliencia

Los indicadores muestran el estado en la cual se encuentran el sistema ante fallas o perturbaciones, así mismo la energía idónea de suministrar, el periodo de tiempo en la cual provee energía y la capacidad para recuperarse de dichas interrupciones [42].

Los indicadores que se evaluaran en esta investigación son los siguientes [43].

- Recuperabilidad indicada en la ecuación (16) toma como relación la demanda y la potencia entregada durante el tiempo que presente le interrupción [40].

$$R = 1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{D_t - G_t}{D_t} \qquad (16)$$

Donde:

D_t: Demanda durante el tiempo de interrupción
G_t: Potencia entregada

- Autonomía se enfoca en el tiempo en horas que le toma a la micro-red llegar al 100% de la carga crítica para estabilizarse con la red como se visualiza en la ecuación (17) [40].

$$A \sum_{t=0}^{T} B_{loas}^{load} \begin{cases} B_{loas}^{load}(t) = 1, P_{loas}^{load}(t) = 0 \\ B_{loas}^{load}(t) = 0, P_{loas}^{load}(t) \neq 0 \end{cases} \qquad (17)$$

- En la ecuación (18) nos indica la caída de voltaje durante un evento, para así poder actuar de una manera rápida y solucionar problemas de estabilidad [40].

$$Sag\% = \frac{V_o - V_m}{V_o} \qquad (18)$$

Donde:

V_o: voltaje inicial
V_m: voltaje medido

Algunos indicadores demandan de una base de información respecto de un ciclo de tiempo en la cual buscan estar al tanto del comportamiento operativo, tomando como muestra ciertos estudios como son; frecuencia o duración de las alteraciones, estos se pueden visualizar en el apartado de anexos [42].

El análisis de estas muestras nos ayuda a considerar un desempeño en función de los resultados obtenidos de los índices de percepción como el comportamiento de voltajes, aquellos vinculados con la potencia de carga y el tiempo de recuperación posteriormente de un evento abrupto [42].

2.5.3 Índices de la Resiliencia

Una micro-red resiliente debe cumplir con ciertos índices que se caracteriza en base a sus aspectos según sus indicadores aplicables de resiliencia, a continuación, se describirán las facetas de la resiliencia [40].

- Evitar y anticipar considerado un aspecto preventivo que se enfoca en la seguridad anticipada y habilidad por descubrir desvíos hacia potenciales fallas significativas.

- Soportar diversas perturbaciones con el propósito de mantener la operación de dicha micro-red.
- Recuperación del período perturbado el cual logra la reconfiguración del sistema con el objetivo de retornar a bases del sistema original [40].

2.6 Indicadores de confiabilidad

Los indicadores de confiabilidad son enfocados a una cuantificación de una lista de cortes de energía, con el propósito de obtener un análisis previo de las interrupciones del servicio al cliente [44]. Una de las prioridades del sistema eléctrico es proveer energía eléctrica a usuarios con una alta demanda en su consumo de una manera confiable y económica [45].

Para poder evaluar la confiabilidad de la micro-red a partir de su generación el indicador más común en idioma inglés es: Loss of Load expectation, (LOLE) o expectativa de perdida de cargas, este indicador se lo puede calcular mediante la ecuación (19), así mismo representa el tiempo de generación en días disponibles, siendo el menor a la instancia del sistema y así poder evaluar si es necesario la incorporación de nuevas fuentes para el suministro [32].

$$LOLE = \sum_{i=1}^{n} P_i(C_i - L_i) \qquad (19)$$

Donde:

C_i : Capacidad de generación disponible en el día i.

L_i: Demanda máxima esperada en el día i.

$P_i(C_i - L_i)$: Probabilidad de perdida en el día i.

Estos indicadores están precisamente enfocados en el impacto de micro-redes y orientados al consumo de zonas estratégicas que necesitan dichos análisis de estos indicadores para obtener una mejor eficiencia en el ámbito energético [32].

2.6.1 Confiabilidad en micro-redes

Las micro-redes están compuestas por dispositivos de generación distribuida (DG), sistemas de baterías, sistemas de protección y control, y las cargas ya que son una forma segura para la incorporación de recursos con fuentes de energía renovable [45].

Asimismo, estos sistemas tienen la capacidad de perfeccionar algunos factores como, por ejemplo, la regulación de voltajes, la calidad de energía, los esquemas de protecciones, minimizar las pérdidas del sistema y disminución de emisiones debido a la naturaleza de las tecnologías [46].

Esto nos lleva a obtener un mejor sustento hacia la confiabilidad, gracias a la reconfiguración ante eventos previos y poder ser controladas fuera de la red, tales y como se muestran en la figura 4 [7].

2.6.2 Indicadores de confiabilidad enfocados al consumidor

Los siguientes indicadores de confiabilidad para micro-redes se basa desde un punto de vista de calidad de servicio en la cual mide la constancia y estabilidad de las horas de interrupción de este que distingue cada usuario en un promedio de tiempo en h/año, las ecuaciones (20) y (21) indica el cálculo de dichos indicadores SAIDI y SAIFI. Las condiciones para evaluar el mes se determinarán como, por ejemplo: $enero = 1$ hasta $diciembre = 1$ respectivamente [7].

El indicador CAIDI o índice de duración media de interrupción del usuario, también puede ser observado como el tiempo medio de restauración de fluctuaciones o fallas que se dan mediante el corte de servicio visualizado en la ecuación (2) [47].

$$SAIDI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\frac{\sum_{i=1}^{n}(D_{i,j,m} * NU_{i,u,m}}{UT_{j,m}}}{60} \quad (20)$$

$$SAIFI_{j,t} = \sum_{m=1}^{12} \frac{\sum_{i=1}^{n}(NU_{i,u,m})}{UT_{j,m}} \quad (21)$$

$$CAIDI_{j,t} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(D_{i,j,m} * NU_{i,u,m}}{\sum_{i=1}^{n} NU_{i,u,m}} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad (22)$$

Donde:

$SAIDI_{j,t}$: indicador de duración promedio anual por el usuario.

$SAIFI_{j,t}$: indicador de frecuencia promedio anual por el usuario.

$CAIDI_{j,t}$: indicador promedio de las interrupciones experimentadas por el usuario.

$D_{i,j,m}$: Duración en minutos del evento

$NU_{i,u,m}$: Número de usuarios.

$UT_{j,m}$: Número de usuarios conectados en el mes.

m : Mes del año.

3 Metodología

En los sectores urbanos se ha presentado un incremento en el índice poblacional, dando como efecto el aumento de las diversidades de cargas que han ocasionado un alto consumo de energía, causando sobrecargas, fluctuaciones y en peores casos inestabilidad en la red.

El diseño de micro-redes plantea proveer la alta demanda de electricidad, enfocados en mejorar la resiliencia y que garanticen la confiabilidad en la red, aquellos estarán integradas de; energías renovables, sistemas de almacenamiento, medidores inteligentes para así poder analizarlas mediante indicadores de desempeño enfocadas en ayudar a desarrollar modelos confiables que puedan ajustarse a futuras cargas y potencias evitando un déficit energético.

4 Formulación del problema

En la propuesta se analizó casos de estudios los cuales nos permitió valorar y asegurar el método, para esto se realiza un estudio previo mediante un sistema de 15 barras de IEEE mostrado en la figura 2.

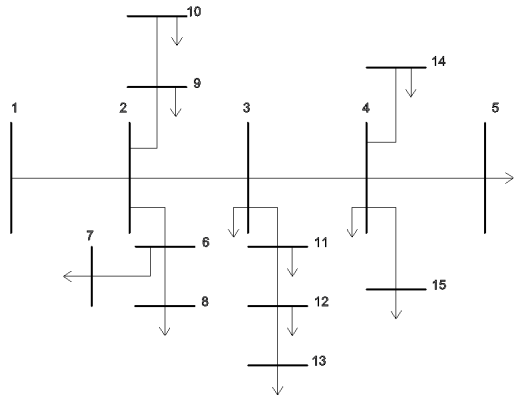

Figura 2. Sistema de prueba IEEE de 15 Barras.

El sistema nos ayudara a modelar simulaciones con el propósito de incorporar micro-redes y así lograr una mejora en la resiliencia en base a ello analizar los indicadores de confiabilidad que se presenten en la red.

Para cumplir con el diseño de micro-redes urbanas y lograr determinar la capacidad óptima del sistema se debe analizar diversos factores que se presentan en la estimación de demanda como son: la densidad poblacional y la diversidad de carga.

Los sectores urbanos constan de una gran demanda lo que con lleva a tener un déficit de calidad de energía eléctrica brindada hacia los usuarios. Los problemas más comunes son las fluctuaciones, sobrecargas y apagones inoportunos, ya que adicional a ellos existen caídas de voltaje los cuales provocan bajas de energía ocasionando daños en el sistema energético y esto a consecuencia de los altos índices de demanda que se dan por diversidad de cargas o el incremento poblacional que se ha dado al pasar de los años.

4.1 Densidad Poblacional

Este factor es importante en el sector energético ya que el incremento de la población son unos de los puntos claves para un análisis de la demanda teniendo en cuenta el consumo y los sectores sea rural o urbano.

Para esta investigación se ha elegido una parroquia que se compone de un 63% zonas rurales y el 40% zonas urbanas, hoy en día a demostrado un aumento en la cantidad de habitantes en el sector urbano.

El sector consta de una superficie de 31.77 km^2, teniendo una densidad poblacional actual de 428 Hab/km^2 registrado en el año 2010, teniendo así un aproximado de 22.000 habitantes, habiendo en cuenta que entre los tipos de usuarios se clasifican en; residenciales, comerciales e industriales tales como se muestra a continuación en la tabla 3.

Figura 3. Clasificación de los consumidores

Se realiza un análisis previo en donde la población ha ido en crecimiento desde 1950 hasta 2010, hoy en día en el presente año 2024 se prevé un incremento del 4.3 habitantes por hectáreas.

Tabla 3.Densidad Poblacional

Densidad Poblacional (Hab/km^2)	Años
59	1950
64	1962
89	1974
134	1982
193	1990
345	2001
428	2010
4.3	2024

Estos valores indican que hasta el tiempo actual sigue en incremento el índice de habitantes en este sector urbano.

4.1.1 Factor de Diversidad de Cargas

Para la planificación del diseño se obtuvo en la tabla 4, la analogía entre la sumatoria de las demandas máximas de energía en base al tipo de usuario y la máxima demanda total del sistema.

Tabla 4. Máximas demandas por tipos de consumidores

Tipo de Consumidor	Consumo kW
Residenciales	108.247.164,6
Comerciales	40.117.085,4
Industriales	117.076.475,3
Total	265.440.725,4

La obtención de resultados de las diversidades de cargas visualizados en la tabla 5 nos lleva a obtener la desviación estándar, para así comprender la dispersión de las cargas de los tipos de consumidores.

Tabla 5. Resultados del cálculo de factor de diversidad

Factor de diversidad	Desviación Estándar
0,407801646	0,158663436
0,151133875	
0,441064479	

Las cargas es lo primordial en un diseño eléctrico, teniendo en cuenta que es una medida inesperada, además es fundamental tener en cuenta los diversos factores de cargas con los cuales se puede obtener la estimación de la demanda máxima, por otro lado, la

densidad de población es un estudio previo que se debe tener en conocimiento, ya que la cantidad de habitantes nos ayuda con indicadores para una estimación de demanda a futuro.

4.1.2 Estimación de la Demanda

Los sectores urbanos desde el año 2014 a enero del 2024 muestran un alto consumo de energía eléctrica La demanda máxima en los usuarios residenciales oscilan entre 1.32MWh en mes de diciembre siendo una de las fechas con mayor consumo.

En la parte de usuarios comerciales la demanda pico de consumo alcanza valores de entre 1,44 MWh. adicional se obtuvo en zonas industriales una demanda de consumo de 1.63 MWh, tomando en cuenta que estos antecedentes al pasar los años se han ido aumentando.

Este sistema muestra valores de voltajes en por unidad (p.u) indicados en la tabla 6, obteniendo así guías previos del funcionamiento operativo.

Tabla 6. Antecedentes del sistema IEEE de 15 barras

Barras	Voltaje [p.u]
1	1,00
2	0,93
3	0,91
4	0,89
5	0,91
6	0,92
7	0,91
8	0,91
9	0,92
10	0,91
11	0,90
12	0,90
13	0,90
14	0,89
15	0,89

4.1.3 Pronóstico de la demanda

Un pronóstico adecuado nos ayuda a diseñar la micro-red en base a los recursos renovables que sean idóneas para el sistema, con la finalidad de satisfacer la demanda máxima sin interrupciones y lograr un sistema estable en condiciones de sobrecargas.

Los datos históricos son de usuarios residenciales, comerciales e industriales en donde estos ayudaron a crear un patrón de consumos específicos y así poder visualizar en la figura (4) el pronóstico de 10 años que se requiere para este sistema.

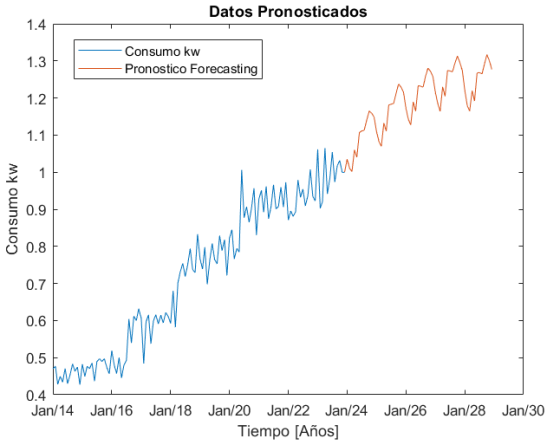

Figura 4. Pronóstico de consumos

4.2 Implementación de la Micro-red

El diseño de la micro-red se analizó desde el primario de la subestación con capacidad de 40 MVA, la cual conecta con una parte del sector que está regulado con un transformador de 75 kva a un circuito primario de medio voltaje de 22.8 kv.

Al diseñar una micro-red se tomó como base el pronóstico y las demandas pico en donde se pueda implementar de recursos renovables tal y como se muestra en la figura (5), las cuales se presentan en la siguiente tabla 7, en donde nos ayudar optimizar el perfil de voltaje minimizando las caídas de voltajes previas.

Tabla 7. Componentes de la micro-red

Elementos	N°	P_N [MW]	Capacidad [MW]
Fotovoltaico	12	0.1	12
Eólico	5	0.5	2.5
Grupos electrógenos	4	2	8
Sistemas de almacenamiento	10	1	10

Es transcendental mencionar que el dimensionamiento de los recursos renovables tomó en consideración los tipos de usuarios con mayor demanda en el consumo. La implementación de estos sistemas ayuda a compensar las caídas de voltaje, para así obtener valores estables, dicha capacidad de los sistemas tiene una potencia nominal los cuales se encuentran en la tabla anterior.

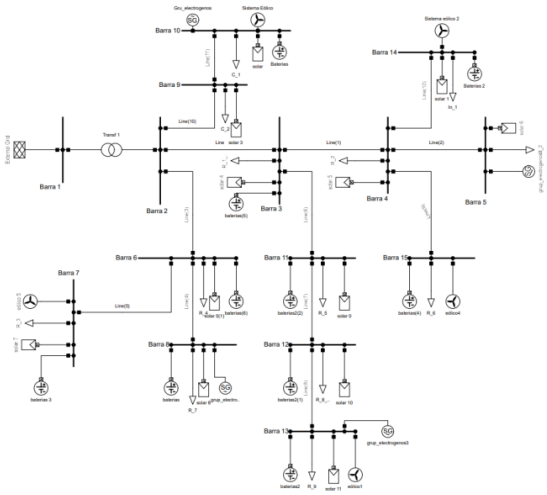

Figura 5. Implementación de micro-redes

Tipo de residencias se dimensionó en función de cada demanda implementando sistemas fotovoltaicos de 60 [kW] con baterías de 500 [kW] y generación eólica de 50 [kW], teniendo como generación total de 610 [kW]

Para cargas comerciales e industriales la distribución de dichos recursos se clasifica entre generación fotovoltaicos de 100 [++], eólico de 50 [kW], baterías de 500 [kW] y grupos electrógenos de 1[MW], ya que ellos presentan una mayor demanda.

5 Análisis de resultados

En este apartado se muestran los efectos logrados del dimensionamiento de micro-redes para diversos tipos de consumidores que se presentan comúnmente en la red de distribución, esto en función de la confiabilidad y resiliencia que provoque dicha implementación.

Para comprender los cambios en cada caso se muestra el análisis del sistema de 15 barra del IEEE en su estado actual, antes de cualquier implementación.

5.1 Análisis del IEEE de 15 barras sin micro-red.

Estos valores nos representan un alto índice de caídas de voltaje, tanto que se muestran pérdidas de energía y perfiles de voltajes muy bajos para el suministro eléctrico.

En la figura 6 se presenta una caída de voltaje notoria en la cual se muestra voltajes fuera del rango de voltaje nominal de la red, estos voltajes varían en base a las condiciones de cargas que posea el sistema.

Adicional a ello nos ayudó a identificar las áreas que requieren de recursos idóneos y estrategias de gestión avanzadas.

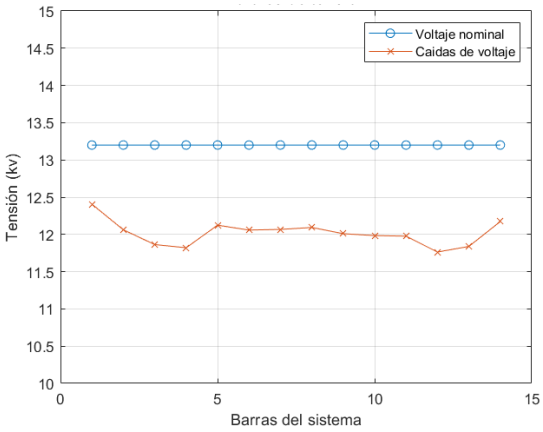

Figura 6. Representación de las caídas de voltaje ordinarias

Adicional se consigue visualizar en la figura 7 los valores de voltajes en p.u, cuando el sistema no posee generación renovable, indicando que los perfiles de voltajes son muy bajos para este sistema analizado.

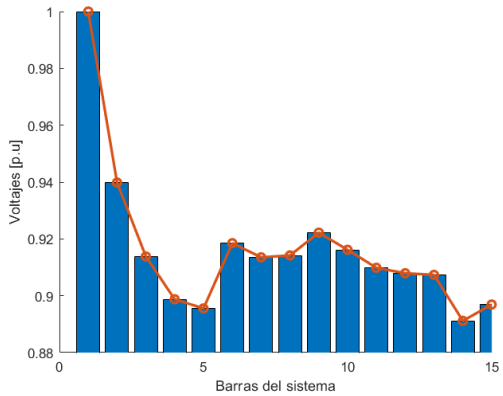

Figura 7. Voltajes [p.u] sin micro-red

5.2 Análisis con la implementación de la micro-red

Para los consumidores residenciales las micro-redes ayudaron a mejorar los valores mínimos en caídas de voltaje y valores inferiores a uno en por unidad en función de los valores reales, tanto en los usuarios residenciales, comerciales e industriales se implementó estos recursos renovables no convencionales, obteniendo así un incremento como compensación de energía en el sistema.

Los valores por unidad son más altos que los valores que no constan con una micro-red, comprendiendo que ayuda mucho para la compensación de voltajes y evitando fluctuaciones de dicho sistema esta representación se puede visualizar en la figura 8.

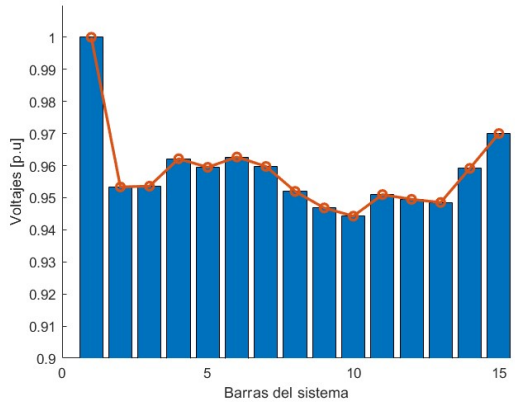

Figura 8. Datos obtenidos con micro-red

5.3 Óptima generación de la micro-red

El modelo al implementar el sistema visualizado en la figura 9 de gestión permite, una optimización de tal manera, que el sistema cumpla con la demanda de consumo en circunstancias de desconexión.

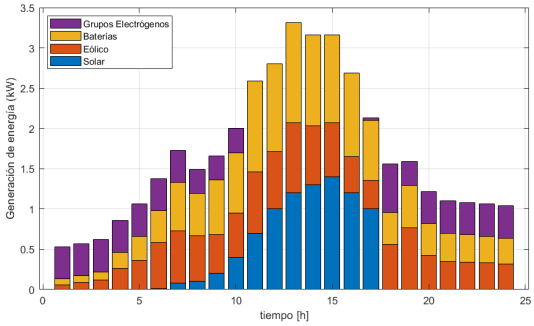

Figura 9. Óptima generación del sistema

Cada zona del sistema consta con un dimensionamiento de recursos renovables los cuales están indicados en la tabla 8, estos datos son estimaciones promedio de cada recurso.

Tabla 8. Datos del sistema IEEE de 15 barras

Zonas de desconexión	Capacidad de Generación [MW]
1	2.45
2	3.30
3	4.90

La capacidad de generación total de la micro-red es de 10.65 MW, cubre de manera proporcional a la demanda de los diversos tipos de consumidores que se presenten en la red.

Los recursos implementados están diseñados para subsistir en situaciones de aislamiento con la red.

En la figura 10 se presentan las zonas de optimización de generación de recursos renovables en donde cada uno toma su punto de demanda máxima estimada para continuar con el suministro y evitar pausas innecesarias.

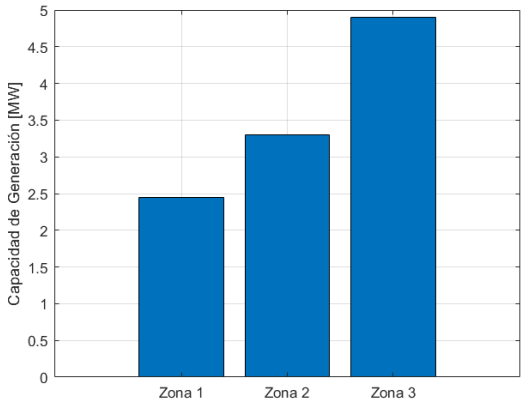

Figura 10. Generación por zonas estratégicas

5.4 Análisis de los indicadores de confiabilidad y resiliencia.

Al incorporar recursos renovables nos lleva a demostrar una comparación de los indicadores de confiabilidad y los de la resiliencia cuando se implementan las micro-redes y así probar su eficiencia en horas pico o alguna interrupción en la red.

5.4.1 Indicadores de confiabilidad en la micro-red

Se realizó un estudio previo de las cargas pico en función de la demanda, para comprender de mejor manera el análisis de sus indicadores de confiabilidad, los cuales se muestran a continuación en la tabla 9 y en la figura 11.

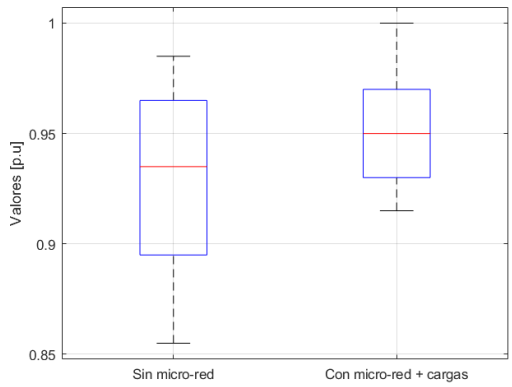

Figura 11. Análisis de situaciones en condiciones normales y carga pico

Para cargas pico se obtuvo una comparación de los valores en ambas condiciones sea con la micro-red y sin la implementación de esta, dicho datos se puede visualizar en la siguiente tabla.

Tabla 9. Valores obtenidos del sistema sin micro-red y con micro-red + cargas

	Sin micro-red	Con micro-red
Máxima	0.985	1.000
Media	0.935	0.955
Mínimo	0.855	0.915

A continuación, se evalúan los indicadores de confiabilidad desde interrupciones que han suscitado en la red por desabastecimiento o por fallas en línea de distribución que han dejado sin energía eléctrica a los consumidores.

Tabla 10. Resultados de la confiabilidad

Indicador	Unidad	Valor
N	Usuarios	30
SAIFI	1/yr	0,1397
SAIDI	min/yr	0,1425
CAIDI	h	1,0200

SAIFI menos interrupciones en el suministro eléctrico, por otro lado, el indicador SAIDI muestra que tenemos un valor bajo en cuanto al tiempo de interrupción, siendo otro punto favorable para nuestro sistema. Así mismo el indicador CAIDI enseña que hay un tiempo propicio para la restauración del sistema siendo de rápida restauración en un tiempo aceptable para su operatividad.

El indicador de confiabilidad LOLE no se muestra ya que no hay déficit de energía, debido a que la capacidad de generación es suficiente para cumplir con la demanda total del sistema que es de 15 MW.

A continuación, se evalúan los indicadores en función de fallas o interrupciones para así comprender la capacidad de óptima generación en función de los indicadores de confiabilidad.

En la figura 12, SAIFI indica menores eventos de interrupciones o fallas con el sistema implementado.

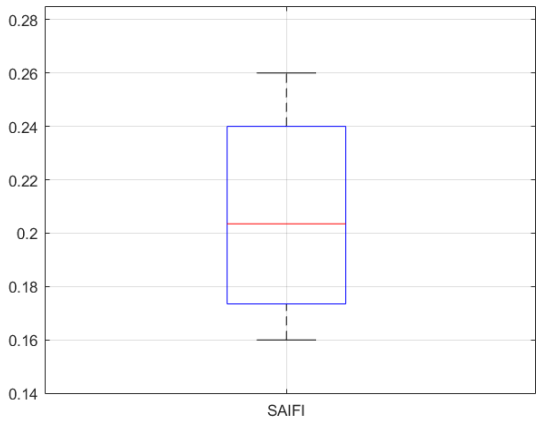

Figura 12. Evaluación del SAIFI con configuración de generación de la micro-red

SAIDI con valores mínimos de 0.14 como indicador de tiempo promedio de interrupción demostrado en la figura 13.

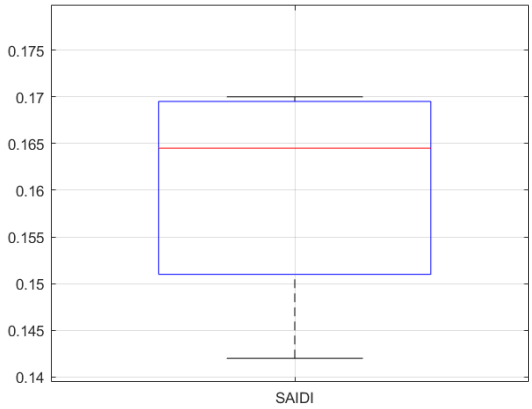

Figura 13. Evaluación del SAIDI con configuración de generación de la micro-red

En el caso del indicador CAIDI, figura 14, el tiempo de restauración y recuperación es de 0.75 para casos bajos, para ocasiones medias toma valores de 0.9 y casos de extremo de 1, dichos valores están dados en [p.u] alcanzando así una rápida reintegración en el suministrar de energía.

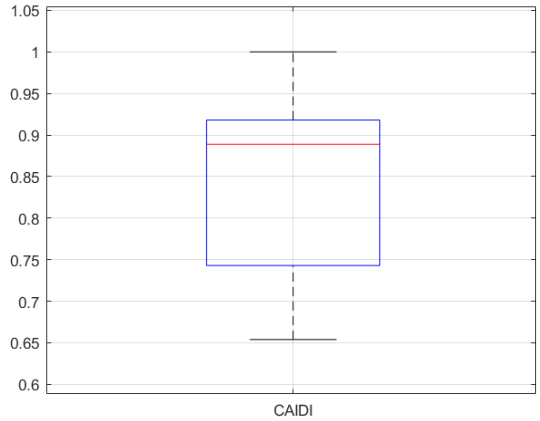

Figura 14. Evaluación del CAIDI con configuración de generación de la micro-red

5.4.2 Valoración de los indicadores de resiliencia en la micro-red

Para evaluar los indicadores se debe tener un estudio previo del consumo de energía por fuentes, la calidad o eficiencia energética, y la capacidad por usuarios tales como se muestra en la siguiente tabla 11.

Tabla 11.Resultados de indicadores de Resiliencia

Índices valores [p.u]			
Indicadores	**Evitar**	**Soportar**	**Recuperar**
Consumo de energía	0,766	0,534	0,642
Caídas de Voltaje	0,923	0,943	0,975
Recuperabilidad	0,456	0,385	0,457

En la figura 15, se demuestra que al contar con recursos renovables de generación con un índice medio de 76% en función de la capacidad de energía, la cual nos ayuda a resistir mediante una presencial de alguna perturbación en la red. Al implementar micro-redes las caídas de voltaje seria mínimas dado que soportan niveles altos de perturbación, teniendo de manera ventajosa un sistema eficiente y apto para futuras demandas de energía.

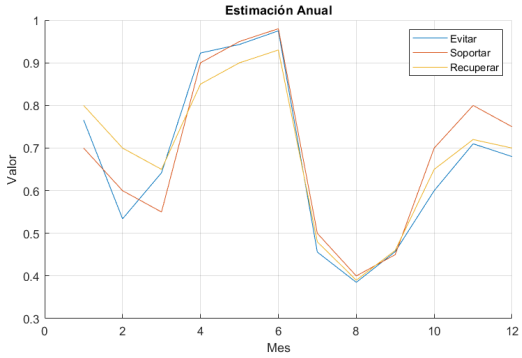

Figura 15. Evaluación de los indicadores de resiliencia

La recuperabilidad del sistema está dada en unidades de tiempo la cual indica que al presentarse una falla o perturbación el sistema logra restablecerse en un tiempo mínimo la cual es óptimo para su funcionamiento estable.

6 Conclusiones

Después de simular y analizar cada uno de los estudios presentados anteriormente se concluye:

El dimensionamiento de la micro-red con generación de renovables concluyo que su confiabilidad en el abastecimiento de energía cumple con mejorar la estabilidad en momentos de cargas pico y emergencia.

- La capacidad óptima de generación y de almacenamiento, cuyos rangos de valores entregados al sistema fueron del 69,3%, 45.2 % y 26.3% en función de gestión de cargas con respaldos de energía en baterías, eólicas, y fotovoltaicas respectivamente, la demanda de energía en sectores con mayor consumo mostró eficiencia del 75% con generación no convencional.

- La estimación de la demanda indica la diversidad de carga que se presenta en una urbanización, cargas con mayor consumo, residenciales, comerciales e industriales suman una demanda total 266 MW, la densidad poblacional de la urbanización complemento con el análisis para la realización del modelo de estimación por forescast con un pronóstico de 10 años de demanda para los diferentes tipos de usuarios.

-En el modelo de prueba se evaluaron indicadores de confiabilidad, SAIDI mostro valores promedios menores a un minuto de interrupciones o fallos, SAIFI indicó frecuencias promedio de interrupciones evaluados entre 0.26-0,16 al año.

Por otro lado, CAIDI presenta valores entre 0.17-0,14 [h] en restablecer el suministro de energía, estos resultados se analizaron en condiciones normales o cargas picos simulados, la resiliencia de la micro-red evaluó indicadores que van de la mano con los índices que se adaptan a nuevas tecnologías.

El sistema muestra características altas de evitar algún fallo en el sistema, además soporta cualquier cambio o perturbación en la red, siendo lo contrario puede recuperarse ante cualquier contingencia en la red de distribución.

7 Trabajos Futuros

Con los resultados conseguidos en este artículo se confía concluir con la indagación de diseños de las micro-redes para sistemas de distribución en sectores rurales, adicional el estudio de óptima generación da como lugar de partida para estudios más detallistas en busca de metodologías más eficientes.

8 Referencias

[1] D. J. T. Sandoval, F. I. M. Velásquez, and E. M. García Torres, “Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales,” *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 2, pp. 19–36, jul. 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.734.

[2] Tipán Charro Luis Esteban, “Estimación de la demanda para micro-zonas basado en el modelo

autorregresivo integrado de promedio móvil," Quito, Feb. 2022. Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21696

[3] G. Xavier, Á. Yanchapanta, H. Israel, and V. Vallejo, "Diseño de una microred híbrida a base de energía fotovoltaica y energía térmica diésel para reducir la contaminación ambiental," p. 5, 2014. Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9068

[4] E. García, A. Águila, L. Ortiz, and D. Carrión, "Optimal Resource Assignment in Hybrid Microgrids Based on Demand Response Proposals," *Sustainability (Switzerland)* , vol. 16, no. 5, Jul. 2024, doi: 10.3390/su16051797.

[5] Roberto Álvaro Hermana and Jaime Menéndez Sánchez, "Casos de Microrredes," *Cuadernos Orkestra*, p. 155, 2020, Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: https://www.orkestra.deusto.es/es/investigacion/publicaciones/informes/cuadernos-orkestra/2031-200028-casos-microrredes

[6] Alcarruz Cristian, "Micro-redes urbanas comunitarias para aumentar confiabilidad en la red de distribución," Universidad de Chile, Santiago de chile, 2021. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: URI: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/181839

[7] J. J. Justo, F. Mwasilu, J. Lee, and J. W. Jung, "AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources: A review," 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.067.

[8] D. J. T. Sandoval and M. E. García Torres, "Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte Response of demand for energy by electric vehicles introduction: state of the art," *Revisa de I+D tecnológico*, vol. 16, no. 1, 2020.

[9] W. M. V. Robalino and E. M. García Torres, "Review of Electricity Markets for Smart Nano-Grids," *Ingeniería Y Competitividad*, vol. 21, no. 2, pp. 1–9, 2019, doi: 10.25100/iyc.v21i2.7462.

[10] B. D. Benalcázar López, "Asignación de precios dinámicos en tiempo real para micro-redes con recursos energéticos renovables distribuidos basado en la desviación de la demanda.," p. 16, 2022, [Online]. Available: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22054

[11] E. M. García Torres and I. A. I. Millan, "Energy Management in Micro Grids Based on the Optima Demand Response by Real Price of Energy," *Proceedings - 2019 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2019*, pp. 124–130, 2019, doi: 10.1109/inciscos49368.2019.00028.

[12] D. J. T. Sandoval, F. I. M. Velásquez, and E. M. García Torres, "Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales," *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 2, pp. 19–36, jul. 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.734.

[13] E. M. Diego Salazar Jair; García Torres, "Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda," *I+D Tecnológico*, vol.

16, no. 2, pp. 0–6, 2020, [Online]. Available: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

[14] J. David Mina-Casaran, D. Fernando Echeverry, and C. A. Lozano, "Modelo conceptual para la concepción técnica de micro-redes: un caso de estudio en Colombia Conceptual model for technical microgrids conception: a case study in Colombia," 2021.

[15] E. M. García Torres, "Estimated cost of electricity with time horizon for micro grids based on the policy response of demand for real price of energy," *Enfoque UTE*, vol. 11, no. 1, pp. 41–55, 2020, doi: 10.29019/enfoque.v11n1.579.

[16] D. De, U. M. Basada, G. Sánchez, C. Fernando, V. Salgado, and C. Afranio, "Diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la empresa regional centro sur," 2017. Accessed: Nov. 18, 2023. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10251/83964

[17] D. Trujillo and E. M. García Torres, "Demand response due to the penetration of electric vehicles in a microgrid through stochastic optimization," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 4, pp. 651–658, 2022, doi: 10.1109/TLA.2022.9675471.

[18] D. J. T. Sandoval, F. I. M. Velásquez, and E. M. García Torres, "Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales," *Enfoque UTE*, vol. 12, no. 2, pp. 19–36, 2021, doi: 10.29019/enfoqueute.734.

[19] P. De Vega, S. Tutor, M. Rodrigo, and F. Departamento, "Micro Redes y Redes Inteligentes," Valladolid, Jul. 2018.

[20] S. F. R. Medina and E. M. García Torres, "Asignación de recursos distribuidos de una microred eléctrica destinada al autoconsumo de una clínica utilizando el algoritmo de colonia de hormigas," 2024.

[21] Katherine Martínez, "Dimensionamiento óptimo de bancos de batería para micro-redes conectadas al sistema de distribución de energía eléctrica, con participación en programas de respuesta de la demanda," Quito, jul. 2021. Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20546

[22] T. I. Tolón Martín, "Operación y gestión de microrredes energéticas urbanas en un entorno de sostenibilidad energética y ambiental," Barcelona, España, jun. 2013. Accessed: nov. 14, 2023. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/2099.1/19411

[23] Andrade Katherine, "Sistema optimo de gestión de micro-redes distribuidas geográficas que permitan maximizar la venta de energía basados en programas de respuesta de la demanda," Quito, jul. 2021. Accessed: Oct. 19, 2023. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20494

[24] D. Javier, T. Sandoval, and E. M. García Torres, "Response of demand for energy by electric vehicles introduction: state of the art," 2020. [Online]. Available: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

[25] E. M. García Torres, I. Amin, I. Millan, J. Gonzales, and G.

Lopez, "Efficient scheme model for electric power tariffs with distributed generation, based on demand response," *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE)*, pp. 1–8, 2019.

[26] Abarca Andrea, "Implementación de un sistema de gestión de la demanda eléctrica basado en la caracterización de los recursos en micro-redes," Universidad Politécnica Salesiana, Quito. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19895

[27] C.-M. A. Abella and M. A. Abella, "Sistemas fotovoltaica."

[28] D. Salazar and E. M. García Torres, "Estimation and Comparison of SOC in Batteries Used in Electromobility Using the Thevenin Model and Coulomb Ampere Counting," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15197204.

[29] McGraw Hill, "Componentes de una instalación solar fotovoltaica," vol. Unidad 1, pp. 1–24. Accessed: Nov. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf

[30] ARCERNNR, "Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables el directorio de la agencia de regulación y control de energía y recursos naturales no renovables," Quito. [Online]. Available: www.controlrecursosyenergia.gob.ec

[31] A. Sánchez Juárez *et al.*, *Aplicaciones fotovoltaicas de la energía solar en los sectores residencial, servicio e industrial*, Primera edición. México: 2017, 2017. Accessed: Nov. 25, 2023. [Online]. Available: https://www.soltuyo.com/libros/esf_imgr-051tco-4.pdf

[32] Rodríguez Fabian, "Análisis de Confiabilidad de Múltiples micro-redes en sistemas de distribución basada en teoría de redes complejas," Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2020. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79855

[33] W. Daniel and G. Gómez, "Metodología para la gestión óptima de energía en una micro red eléctrica interconectada," 2016.

[34] C. A. Ruales Rosero and E. M. García Torres, "Gestión optima de energía eléctrica en micro redes inteligentes con respuesta de la demanda usando algoritmos bipartitos y modelos dinámicos," p. 12, 2021, [Online]. Available: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22642

[35] U. Profesional, A. López Mateos, and I. Electricista Presentan Iván Corona Arriaga Ignacio Gutiérrez Arvizu Mario Alberto Seydlitz Rivera, "Gestión de la demanda en una micro red eléctrica inteligente utilizando lógica difusa," Instituto Politécnico Nacional, México, 2019. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/29003

[36] J. J. S. López, E. M. García Torres, and D. F. C. Galarza, "Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 0–6, 2020, doi: 10.33412/idt.v16.2.2837.

[37] Severino Bernando, "Modelación de generador fotovoltaico y banco de baterías de plomo ácido elementos de una microrred," p. 24, jun. 2011, Accessed: oct. 23, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104082

[38] Romero Giovanny, "Optimización del proceso de carga y descarga de bancos de baterías en sistemas de generación fotovoltaica," 2018, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2018. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16068

[39] J. Li, W. Wei, and J. Xiang, "A simple sizing algorithm for stand-alone PV/Wind/Battery hybrid microgrids," *Energies (Basel)*, vol. 5, no. 12, pp. 5307–5323, 2012, doi: 10.3390/en5125307.

[40] T. Para, O. Al, G. De, and M. En, "Metodología para el monitoreo de microrredes por medio de indicadores de resiliencia," Santiago de Chile, Mar. 2014. Accessed: nov. 18, 2023. [Online]. Available: https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/115966

[41] L. A. Paredes1, B. R. Serrano2, and M. G. Molina3, "Revista CIEPPI resiliencia de los sistemas eléctricos," Argentina, 2020. Accessed: Oct. 21, 2023. [Online]. Available: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/143568/CONICET_Digital_Nro.9b7279fe-698b-409e-aaf8-513f53c28b35_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

[42] J. M. Rey, Osma-Pinto German, and García-García Jersson, "Evaluación del desempeño de microrredes una revisión," *Articulo*, vol. 26, 2023, doi: 10.22430/22565337.2656.

[43] E. Marcelo García Torres, I. Issac, G. Lopez, and J. Gonzales, "Allocation of distributed energy resources in microgrids based on optimal demand response," *Energy*, 2021.

[44] N. Y. González Castro, C. A. Cusguen Gómez, E. A. Mojica Nava, and F. A. Pavas Martínez, "Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, no. 2, pp. 93–104, Sep. 2017, doi: 10.18273/revuin.v16n2-2017009.

[45] R. Y. Enmalladas, L. Jairo, and C. Jiménez, "Metodología para la evaluación de la confiabilidad en redes radiales y enmalladas," Medellín, 2016. Accessed: Nov. 28, 2023. [Online]. Available: https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4033

[46] L. Rocío, L. Chinchilla, M. Alejandro, S. Sierra, O. David, and F. Cediel, "Evaluación de la confiabilidad de microrredes eléctricas aisladas por el método de árbol de fallas," Enero-junio, Bogotá, May 2015.

[47] Villamizar Jesús, "Análisis costo-beneficio aplicado al diseño de Microrredes resilientes," Colombia, 2019. Accessed: nov. 28, 2023. [Online]. Available: http://hdl.handle.net/1992/45031

8.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 12. Matriz de estado del arte.

DISEÑO DE MICRO-REDES URBANAS BASADO EN UN ENFOQUE PARA MEJORAR LA RESILIENCIA Y GARANTIZAR LA CONFIABILIDAD EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA																							
	DATOS			TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
ITEM	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	TIPOS DE MICRO-REDES	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	BANCO DE BATERIAS	SISTEMAS EÓLICOS	CONFIABILIDAD	DESPACHO DE GENERACIÓN	ESTIMACIÓN DE LA DEMANA	ESTUDIO DE CONFIABILIDAD	INDICADORES DE LA RESILIENCIA EN MICRO-REDES	CONSUMOS POR DIVERSIDAD DE CARGAS	TECNICAS DE DETECCION DE FALLAS	DIAGNOSTICO PARA ESTIMACIÓN DE LA DEMANA	INDICE POBLACIONAL	MICRO-REDES AISLADAS	METODO DE PRONOSTICOS DE DEMANDA	TIPOS DE CONSUMIDORES	DIMENSIONAMIENTO DE LA MICRO-RED	ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE ENRGÍA	ANALISIS DE LOS INDICADORES DE RESILIENCIA	INDICADORES DE CONFIABILIDAD
1	2021	Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales	5	✠		✠		✠				✠				✠		✠		✠			✠
2	2022	Estimación de la demanda para micro-zonas basado en el modelo autorregresivo integrado de promedio móvil	2						✠		✠										✠		
3	2024	Optimal Resource Assignment in Hybrid Microgrids Based on Demand Response Proposals	7	✠					✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠		✠						
4	2021	Micro-redes urbanas comunitarias para aumentar confiabilidad en la red de distribución	8	✠	✠			✠						✠		✠	✠	✠	✠		✠	✠	✠
5	2020	Respuesta de demanda de energía por introducción de vehículos eléctricos: estado del arte Response of demand for energy by electric vehicles	10			✠	✠		✠	✠		✠		✠		✠	✠		✠				
6	2019	Review of Electricity Markets for Smart Nano-Grids	11	✠	✠	✠					✠	✠				✠					✠		
7	2022	Asignación de precios dinámicos en tiempo real para micro-redes con recursos energéticos renovables distribuidos basado en la desviación de la demanda	9			✠	✠						✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠			

8	2019	Energy Management in Micro Grids Based on the Optima Demand Response by Real Price of Energy	4	✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠		✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠		✠	✠
9	2021	Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas: caso de estudio condominios residenciales	3	✠	✠	✠	✠	✠									✠				✠		
10	2020	Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda	5	✠	✠											✠	✠		✠	✠			
11	2021	Modelo conceptual para la concepción técnica de micro-redes: un caso de estudio en Colombia Conceptual model for technical microgrids conception: a case study in Colombia	7				✠	✠	✠	✠	✠	✠						✠			✠	✠	
12	2020	Estimated cost of electricity with time horizon for micro grids based on the policy response of demand for real price of energy	8		✠	✠	✠	✠						✠				✠			✠	✠	
13	2017	Diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la empresa regional centro sur	4	✠		✠	✠		✠	✠			✠	✠		✠		✠	✠	✠	✠		
14	2022	Demand response due to the penetration of electric vehicles in a microgrid through stochastic optimization	7	✠	✠	✠			✠							✠	✠	✠		✠			
15	2021	Análisis de viabilidad de microrredes eléctricas con alta penetración de recursos renovables en zonas urbanas	8		✠		✠	✠		✠		✠				✠				✠	✠	✠	✠
16	2018	Micro Redes y Redes Inteligentes	9				✠	✠	✠	✠		✠						✠				✠	
17	2024	Asignación de recursos distribuidos de una microred eléctrica destinada al autoconsumo de una clínica utilizando el algoritmo de colonia de hormigas	4		✠	✠	✠	✠					✠	✠	✠			✠			✠	✠	
18	2021	Dimensionamiento óptimo de bancos de batería para micro-redes conectadas al sistema de distribución de energía eléctrica, con participación en programas de respuesta de la demanda	6	✠		✠	✠		✠	✠	✠		✠	✠		✠		✠	✠	✠			
19	2021	Sistema optimo de gestión de micro-redes distribuidas geográficas que permitan maximizar la venta de energía basados en programas de respuesta de la demanda	3	✠	✠	✠			✠		✠	✠				✠	✠	✠		✠	✠		
20	2020	Response of demand for energy by electric vehicles introduction	5		✠		✠	✠		✠		✠				✠				✠		✠	✠
21	2019	Efficient scheme model for electric power tariffs with distributed generation, based on demand response	6				✠	✠	✠	✠		✠			✠			✠				✠	✠
22	2023	Implementación de un sistema de gestión de la demanda eléctrica basado en la caracterización de los recursos en micro-redes	4		✠	✠	✠	✠			✠			✠	✠			✠			✠	✠	✠
23	2022	Estimation and Comparison of SOC in Batteries Used in Electromobility Using the Thevenin Model and Coulomb Ampere Counting	5	✠		✠	✠		✠	✠	✠		✠	✠	✠	✠		✠	✠	✠			✠
24	2023	Componentes de una instalación solar fotovoltaica	4	✠	✠	✠			✠		✠		✠			✠	✠	✠		✠			

25	2020	Análisis de Confiabilidad de Múltiples micro-redes en sistemas de distribución basada en teoría de redes complejas	7		✠		✠	✠		✠		✠	✠	✠	✠	✠			✠	✠		✠	✠
26	2021	Gestión optima de energía eléctrica en micro redes inteligentes con respuesta de la demanda usando algoritmos bipartitos y modelos dinámicos	8				✠	✠	✠	✠	✠	✠		✠	✠			✠			✠	✠	✠
27	2019	Gestión de la demanda en una micro red eléctrica inteligente utilizando lógica difusa	8		✠	✠	✠	✠		✠			✠	✠	✠	✠		✠				✠	✠
28	2018	Optimización del proceso de carga y descarga de bancos de baterías en sistemas de generación fotovoltaica	9	✠		✠	✠		✠	✠	✠		✠	✠	✠	✠		✠	✠	✠			✠
29	2023	Metodología para el monitoreo de microrredes por medio de indicadores de resiliencia	4	✠	✠	✠			✠		✠				✠	✠	✠	✠		✠			
30	2023	Evaluación del desempeño de microrredes una revisión	3		✠		✠	✠		✠		✠	✠	✠	✠	✠				✠		✠	✠
31	2021	Allocation of distributed energy resources in microgrids based on optimal demand response	4		✠		✠	✠		✠	✠	✠	✠	✠	✠			✠			✠	✠	✠
32	2019	Evaluación de la confiabilidad de microrredes eléctricas aisladas por el método de árbol de fallas	5	✠			✠		✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠		✠	✠	✠			✠
33	2019	Análisis costo-beneficio aplicado al diseño de Microrredes resilientes	4	✠	✠				✠		✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠	✠		✠	✠		
			CANTIDAD:	17	19	18	22	17	18	18	15	17	15	19	16	22	12	23	11	18	14	15	15

8.2 Resumen de Indicadores

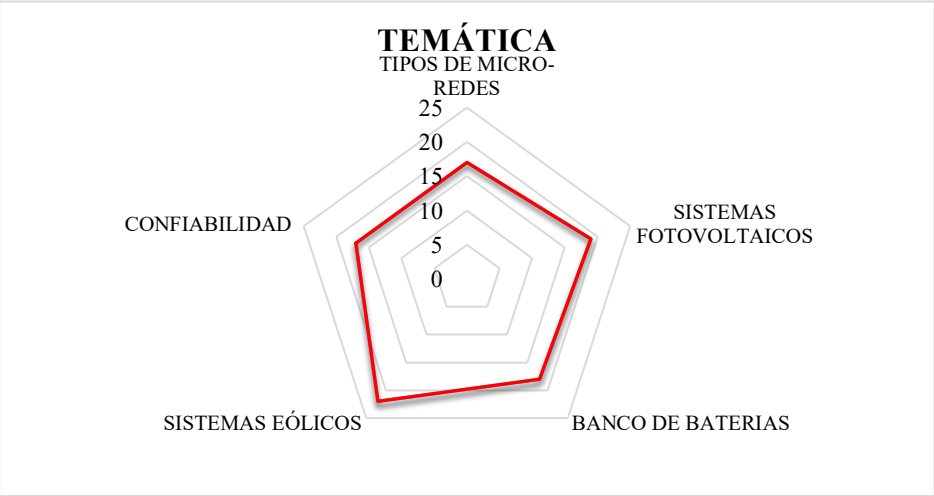

Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

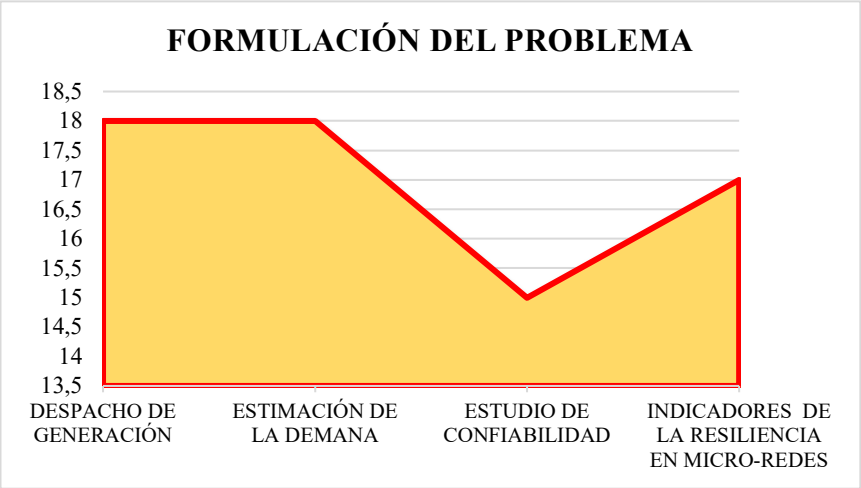

Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

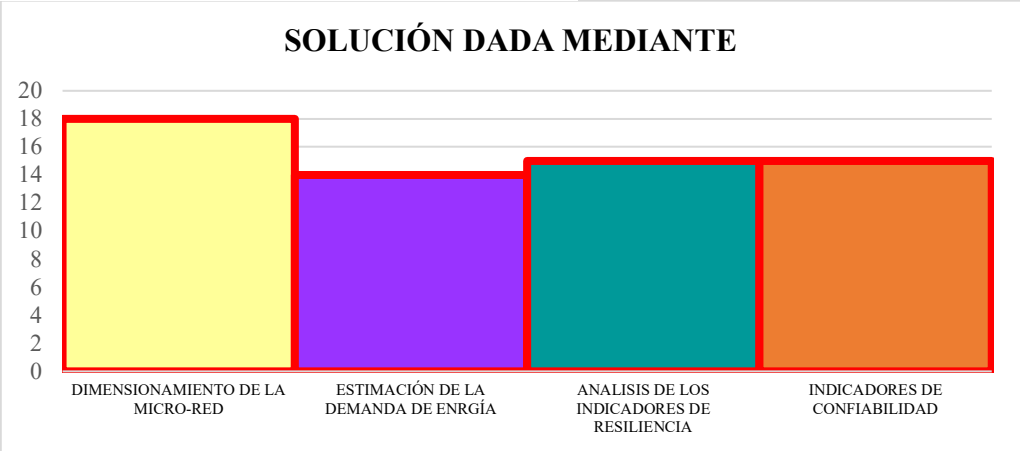

Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte.

8.3 Anexos

Tabla 13. Indicadores de Resiliencia

Capacidad de supervivencia	$S_h(t,Q) = \sum_{h=0}^{8760} q_h S_h(t)$	Probabilidad medio de mantenerse a un evento de isla durante un año
Autonomía	$A \sum_{t=0}^{T} B_{loas}^{load} \begin{cases} B_{loas}^{load}(t) = 1, P_{loas}^{load}(t) = 0 \\ B_{loas}^{load}(t) = 0, P_{loas}^{load}(t) \neq 0 \end{cases}$	Tiempo en horas que la micro-red tiende al 100% de la carga critica
Consumo de combustible	$F_{con,tot}^{g} = \sum_{t=0}^{T} \left[\sum_{g=0}^{N^g} F^g(t,g) \right]$	Conjunto de combustible consumido en un periodo de tiempo
Recuperabilidad	$R = 1 = \sum_{i=1}^{n} \frac{D_t - G_t}{D_t}$	Relación entre demanda y la potencia entregada durante el tiempo de interrupción
Carga recuperada	$ENS = \sum_{i=1}^{n} ENS$	Energía no entregada
Carga crítica suministrada	$CCS = \sum_{i=1}^{n} CCS$	Suministro máximo de carga critica
Tiempo de Recuperación	Valor a partir de medición	Tiempo ocurrido desde el momento del evento hasta la recuperación
Índice de calidad de voltaje de la barra	$Dl_i = \frac{V_i - V_i^{sp}}{\Delta V_i^l}$	Determina el estado de voltaje en la barra
Índice de flujo de potencia de línea	$OL_i = \frac{P_{li}}{P_{li}^{lim}}$	Indicador utilizado para certificar la transmisión de energía en un evento
Hueco de voltaje	$Sag\% = \frac{V_o - V_m}{V_o}$	Indica la caída de voltaje durante un evento

Reducción del nivel de rendimiento	$L_oP_R = \frac{\sum P(loads)I - \sum P(loads)m}{\sum P(loads)I}\%$	Muestra el porcentaje de carga durante el evento
Proporción de deslastre de carga	$\frac{SD - AC}{SD}\%$	Relación entre la carga reducida y la demanda total del sistema
Resiliencia	$\int_{t1}^{t2}(1 - Q(t)dt)$ $Q(t) = \frac{\sum_{n=1}^{n} P_{gen_n}}{P_{demand}}$	Es la habilidad de recuperarse luego de un evento
Resistencia	$\frac{\sum i\epsilon NNot - Interrupted(Pr_{i,t}^{L} x\ Load_{i,t})}{\sum i \in N(Pr_{i,t}^{L} x\ Load_{i,t})}$	relación entre la potencia de los clientes no interrumpidos y la potencia total de carga
Recuperación	$\frac{LPR}{\sum i\epsilon N_interrupted(Pr_{i,t}^{L} x\ Load_{i,t})}$	relación entre la energía restaurada y energía total de las cargas interrumpidas