
Artículos

Inserción de micro-red de generación distribuida para reducción de costos en una carga industrial



Insertion of Distributed Generation Micro-Grids for Cost Reduction in an Industrial Load

Edisson Javier Barbecho Jimbo

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
ebarbechoj@est.ups.edu.ec

Hassan David Ortega Escobar

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
hortegae@est.ups.edu.ec

Juan Carlos Velecela Chichay

Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
jvelecela@est.ups.edu.ec

Ciencia e Ingeniería

vol. 12, núm. 2, e15708755, 2025
Universidad de La Guajira, Colombia
ISSN-E: 2389-9484
Periodicidad: Semestral
revistas@uniguajira.edu.co

Recepción: 11 julio 2024
Aprobación: 14 marzo 2025

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15708755>

URL: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/690/6905375003/>

Resumen: Con la creciente demanda de energía eléctrica del siglo XXI, este trabajo se enfoca en el análisis de la implementación de una micro-red al sistema que suministra el servicio de energía eléctrica a una pequeña fábrica dedicada a la elaboración de material de construcción, prestación de servicios de maquinarias y encofrados para construcción, la fábrica está ubicada en la ciudad en Azogues- Ecuador. Esta se encuentra clasificada como servicio de bajo voltaje industrial artesanal por el ARCERNNR y actualmente se encuentra abastecida por la red eléctrica trifásica de la empresa distribuidora, donde presenta una demanda energética variable con picos mensuales de hasta 10.525 kW y un consumo promedio diario de 34.30 kWh. El horario de trabajo es de 07:00 a 18:00, donde lo que se busca es ver la factibilidad de la incorporación de energías renovables, para esto se usa datos históricos de la NASA donde indican condiciones favorables para paneles solares y aerogeneradores. La micro-red propuesta combina estos recursos con almacenamiento de energía mediante baterías y una conexión a la red externa. Simulaciones que se realizaron con HOMER Pro identificando soluciones óptimas, con un costo de energía (COE) tan bajo como \$0.09/kWh y una contribución renovable de hasta 78.2%. Escenarios alternativos confirmaron la robustez de esta configuración. La implementación de la micro-red garantiza un suministro estable de energía, reduce emisiones de carbono, mejora la independencia energética y es financieramente atractiva a largo plazo.

Palabras clave: Palabras clave: energía, fabrica, micro red, renovables, simulación, energía, fabrica, micro red, renovables, simulación.

Resumen: Con la creciente demanda de energía eléctrica del siglo XXI, este trabajo se enfoca en el análisis de la implementación de una micro-red al sistema que suministra el servicio de energía eléctrica a una pequeña fábrica dedicada a la elaboración de material de construcción, prestación de servicios de maquinarias y encofrados para construcción, la fábrica está ubicada en la ciudad en Azogues- Ecuador. Esta se

encuentra clasificada como servicio de bajo voltaje industrial artesanal por el ARCERNNR y actualmente se encuentra abastecida por la red eléctrica trifásica de la empresa distribuidora, donde presenta una demanda energética variable con picos mensuales de hasta 10.525 kW y un consumo promedio diario de 34.30 kWh. El horario de trabajo es de 07:00 a 18:00, donde lo que se busca es ver la factibilidad de la incorporación de energías renovables, para esto se usa datos históricos de la NASA donde indican condiciones favorables para paneles solares y aerogeneradores. La micro-red propuesta combina estos recursos con almacenamiento de energía mediante baterías y una conexión a la red externa. Simulaciones que se realizaron con HOMER Pro identificando soluciones óptimas, con un costo de energía (COE) tan bajo como \$0.09/kWh y una contribución renovable de hasta 78.2%. Escenarios alternativos confirmaron la robustez de esta configuración. La implementación de la micro-red garantiza un suministro estable de energía, reduce emisiones de carbono, mejora la independencia energética y es financieramente atractiva a largo plazo.

Palabras clave Palabras clave: energía, fabrica, micro red, renovables, simulación, energía, fabrica, micro red, renovables, simulación.

Abstract: With the growing demand for energy in the XXI century, it is necessary to analyze a micro-grid that provides service to a small factory dedicated to the manufacture of construction materials and the provision of services of machinery and formwork for construction, the factory is located in the city of Azogues-Ecuador. It is classified as a low voltage industrial artisanal service by the ARCERNNR and is currently supplied by the three-phase electrical network of the Distribution Company, where it has a variable energy demand with monthly peaks of up to 10,525 kW and an average daily consumption of 34.30 kWh. The working hours are from 07:00 to 18:00, where the aim is to see the feasibility of incorporating renewable energies, using historical data from NASA where they indicate favorable conditions for solar panels and wind turbines. The proposed micro-grid combines these resources with energy storage by means of batteries and a connection to the external grid. Simulations were performed with HOMER Pro identifying optimal solutions, with a cost of energy (COE) as low as \$0.09/kWh and a renewable contribution of up to 78.2%. Alternative scenarios confirmed the robustness of this configuration. The implementation of the Micro-Grid guarantees a stable energy supply, reduces carbon emissions, improves energy independence and is financially attractive in the long term.

Keywords Keywords: energy, factory, microgrid, renewables, simulation, energy, factory, microgrid, renewables, simulation.

Abstract: With the growing demand for energy in the XXI century, it is necessary to analyze a micro-grid that provides service to a small factory dedicated to the manufacture of construction materials and the provision of services of machinery and formwork for construction, the factory is located in the city of Azogues-Ecuador. It is classified as a low voltage industrial artisanal service by the ARCERNNR and is currently supplied by the three-phase electrical network of the Distribution Company, where it has a variable energy demand with monthly peaks of up to 10,525 kW and an average daily consumption of 34.30 kWh. The working hours are from 07:00 to 18:00, where the aim is to see the feasibility of incorporating renewable energies, using historical data from NASA where they indicate favorable conditions for solar panels and wind turbines. The proposed micro-grid combines these resources with energy storage by means of batteries and a connection to the external grid. Simulations were performed with HOMER Pro identifying optimal solutions, with a cost of energy (COE) as low as \$0.09/kWh and a renewable contribution of up to 78.2%. Alternative scenarios confirmed the robustness of this configuration. The implementation of the Micro-Grid guarantees a stable energy supply, reduces carbon emissions, improves energy independence and is financially attractive in the long term.

KeywordsKeywords: energy, factory, microgrid, renewables, simulation, energy, factory, microgrid, renewables, simulation.

INTRODUCCIÓN

Con el pasar del tiempo se ha venido teniendo la necesidad de mejora frente a los estándares presentes en la generación y distribución de energía para los sistemas eléctricos necesarios para el desarrollo de los pequeños y medianos mercados industrializados a nivel mundial (Zhao et al., 2020). Para esto también se percibe el problema que conlleva el estar en regiones aisladas y remotas donde el acceso a redes del servicio público es muy limitado, en la mayoría de los casos incluso con varios índices de déficit de calidad de energía, esto presenta un desafío significativo para los consumidores finales por satisfacer la demanda industrial de energía eléctrica de manera confiable y sostenible (Loh et al., 2013). La dependencia tradicional de generadores diésel para la generación distribuida ha sido prevalente debido a la falta de infraestructura eléctrica convencional, a pesar de sus costos operativos elevados y su impacto ambiental adverso (Zhang et al., 2022). Este enfoque plantea una necesidad urgente de buscar alternativas que no solo mejoren la eficiencia y reduzcan los costos operativos, sino que también mitiguen las emisiones contaminantes asociadas con la combustión de diésel (Dautzenberg et al., 2024). Desde el punto de vista operacional se tiene que el funcionamiento de las microredes está ligado con la dependencia a los generadores distribuidos para que estos satisfagan la demanda industrial direccionada y operar en forma aislada "isla", aislándose así de la red de distribución convencional (Huang et al., 2019).

Cuando la generación o distribución convencional no alcanza las necesidades de carga, es de vital importancia la inyección o inserción de cualquier otro tipo de alimentación desde la red para cubrir el déficit, o a su vez se exporta el exceso generado de vuelta hacia la red. Así mismo la integración de almacenamiento de energía permite utilizar el exceso de energía durante períodos de déficit, reduciendo así la dependencia de la microred de las conexiones externas de la red (Mirzaeva & Miller, 2023).

Para implementar esta estrategia operativa de manera efectiva, se requiere un sistema de control del microredes cuidadosamente diseñado, inspirado en conceptos exitosos de las redes eléctricas tradicionales como el control de caída de frecuencia y estructuras de control jerárquicas (Muzzammel et al., 2024). Este enfoque es crucial debido a las similitudes fundamentales entre las microredes y los sistemas energéticos convencionales.

Al problema del abastecimiento continuo y mejoramiento de estándares de calidad de energía para el sector industrial, a partir de la aparición de los beneficios ambientales y reducción de costos por pagos en la parte de planillaje energético, se encuentra a la vanguardia las microredes híbridas, mismas que han surgido para dar solución direccionada, al complementar la generación convencional mediante combustión de recursos fósiles con fuentes generacionales amigables con el medio ambiente, como son la generación solar, eólica o hidroeléctrica, paralelamente y complementariamente con sistemas de almacenamiento de energía por medio de bancos de baterías (Ninad et al., 2020). Esta unión no solo amplía la variedad de fuentes energéticas disponibles, lo cual fortalece la capacidad del sistema para adaptarse a cambios en el entorno y en la economía, sino que además disminuye la necesidad absoluta de depender de combustibles fósiles, alineándose con los objetivos de sostenibilidad ambiental y económica a largo plazo. Uno de los puntos a destacar de la inclusión de microredes a los sistemas eléctricos de alimentación eléctrica industrial, es la inserción de un sistema que este compuesto por múltiples microredes, ya que con esto se ha logrado comprobar que se obtiene un sistema mucho más robusto que favorece a la eficiencia energética y mejoramiento de estándares de producción (Datta & Das, 2023). En términos de la coordinación entre múltiples micro-redes, se destaca su capacidad para reducir los costos de generación al optimizar la selección de la unidad más económica para regular el suministro de energía, sin estar limitadas por los recursos disponibles en una sola micro-red (Chen et al.,

2024). La investigación ha demostrado que las múltiples microredes son más ventajosas que una única microred operando de manera independiente. Por consiguiente, este estudio se centra en explorar cómo las plantas de energía virtuales pueden integrar múltiples microredes para participar conjuntamente en los mercados de energía eléctrica y servicios complementarios. Dentro de una planta de energía virtual, las múltiples microredes pueden intercambiar energía entre sí, mitigando así los efectos adversos de las predicciones erróneas sobre la energía renovable (L.Yan et al., 2022).

El avance tecnológico ha logrado que sea más común el interés por las pequeñas y medianas industrias por implementar microredes con características favorables con el ambiente, no solo por este motivo, sino también por el beneficio dentro de la calidad de energía y sin interrupciones en su abastecimiento. Esta evolución en el panorama energético está transformando los sistemas tradicionales de servicios eléctricos, especialmente con la creciente adopción de microredes autónomas e independientes (Men et al., 2023). Los mecanismos convencionales de control de frecuencia y los mercados energéticos están diseñados para sistemas con generación centralizada y cargas predecibles (Cintuglu & Mohammed, 2017). Sin embargo, los patrones variables de generación provenientes de fuentes renovables plantean desafíos significativos para mantener la estabilidad operativa. Este estudio investiga nuevas estrategias de control de frecuencia y modelos de mercado desarrollados para mitigar los impactos negativos de las fluctuaciones imprevisibles en la generación y los desequilibrios de la demanda. Se analizan enfoques como la implementación de sistemas automáticos basados en agentes inteligentes y la integración de microredes para ofrecer servicios adicionales en mercados desregulados, utilizando métodos de control cooperativo inspirados en la teoría de juegos y sistemas multiagente (Mehrizi-Sani & Iravani, 2012).

La tecnología emergente de redes inteligentes ofrece soluciones innovadoras a los problemas de las infraestructuras eléctricas obsoletas, permitiendo la cooperatividad, la automatización y la eficiencia a través de la integración de energía bidireccional, sistemas inteligentes y fuentes renovables.(Powell et al., 2024). La falta de acceso a la electricidad en comunidades rurales de países en desarrollo es un obstáculo para el desarrollo sostenible. Se propone un cambio de paradigma y modelos alternativos de diseño de redes que consideren los diversos estatus económicos y sociales de los consumidores rurales (Onu et al., 2024). Se revisan políticas recientes y se presentan demostraciones prácticas, concluyendo las tendencias y necesidades en aplicaciones de microrredes.(Zeng et al., 2014).

La cuarta revolución industrial permite un despliegue sistemático de redes inteligentes, integrando TIC avanzadas para mejorar la generación, transmisión y distribución de energía donde según el estudio realizado se presenta componentes críticos, aplicaciones, beneficios y desafíos de las redes inteligentes en el contexto de la Industria 4.0.(Faheem et al., 2018). En China un estudio revela que el efecto negativo del desarrollo de energías renovables sobre la confiabilidad del suministro eléctrico está disminuyendo, destacando la importancia de un desarrollo racional y la estabilidad de factores como los precios del carbón y los desastres naturales (Zhou & Tang, 2024). Donde se presenta una revisión exhaustiva de fuentes de energía renovable, sus clasificaciones, sistemas y aplicaciones, destacando la necesidad de soluciones únicas y herramientas de evaluación basadas en energía y exergía. En la industria textil se revisa el consumo de energía, el impacto ambiental y la implementación de energía renovable en la industria textil, proponiendo la eliminación gradual de combustibles fósiles y el uso de fuentes alternativas para mejorar la sostenibilidad (Farhana et al., 2022). Dentro el análisis de redes inteligentes existe tecnologías donde se utiliza la fuerza animal para generar electricidad de manera económica y sin emisiones (Chandrakar et al., 2013). No solo la generación por medios ambientales ayudado al ámbito eléctrico en países de medio oriente se utiliza en denominado Belan, siendo este el encargado de aprovechar la fuerza generada por un animal fuerte que por medio ingeniería

mecánica se convierte esa fuerza en una fuente de generación, canalizando a través de un casing alargado hacia el mecanismo encargado en esta etapa del proceso de incrementar la velocidad (Cayetano-Jiménez et al., 2024). Como es de esperarse la transformación de alta potencia de torsión venerada por el movimiento del animal a baja velocidad, esto gracias al sistema de engranajes específicos. Las poleas entran en acción en conjunto con correas para transferir esta energía de alta velocidad y bajo torque a un generador, el cual convierte la energía mecánica en energía eléctrica para ser almacenada.

En su diseño óptimo, el Belan es operado por uno o dos bueyes como fuente principal de potencia (Silva et al., 2023). Se ha realizado una considerable investigación sobre la gestión energética de las Micro-redes, enfocándose en mejorar la operación en condiciones de incertidumbre (Bagheri et al., 2022). Varios estudios han explorado métodos de optimización estocástica para microredes, abordando tanto la planificación a corto plazo como la operación en tiempo real (Wang et al., 2024). Algunos investigadores han propuesto sistemas jerárquicos de gestión energética para hogares inteligentes, mientras que otros han desarrollado enfoques que combinan programación lineal entera mixta (MILP) y optimización robusta para manejar la incertidumbre asociada con la generación renovable y los precios del mercado en tiempo real (Alam et al., 2024).

La generación y reducción de escenarios han sido técnicas comunes utilizadas para manejar la incertidumbre en la operación de microredes, destacando el uso de árboles de escenarios y métodos como la evolución diferencial. Además, se han investigado algoritmos de control basados en aprendizaje en línea y modelos predictivos estocásticos para optimizar la distribución de energía en microredes, considerando tanto la generación renovable aleatoria como los patrones de uso de vehículos eléctricos (Xu, Liu, et al., 2018). La importancia de los microgrids para asegurar que las redes eléctricas del futuro puedan funcionar de manera resistente y confiable (Liu et al., 2021). Se mencionan diferentes estudios que proponen métodos para crear microgrids dinámicos utilizando generadores distribuidos, con el objetivo de maximizar la capacidad para restaurar el suministro eléctrico después de desastres (Rahmati et al., 2023; Xu, Li, et al., 2018). Se destaca la utilidad del hidrógeno como una fuente de energía con alta densidad y sin emisiones de carbono, ideal para mantener operativos los microgrids en situaciones de emergencia tanto a corto como a largo plazo (Rehman et al., 2024).

Por otro lado, ya con visión directa hacia la inserción de microredes, poniendo como punto fijo proponer objetivos concisos para las microredes inteligentes a integrarse. Estos objetivos incluyen mejorar la eficiencia energética, maximizar el uso de energías renovables confiables, reducir la contaminación ambiental y minimizar costos operativos o maximizar ingresos según las condiciones del mercado eléctrico. Se exploran diferentes estrategias y tecnologías de control, como la simulación utilizando MATLAB/Simulink (Universiti Tunku Abdul Rahman & Institute of Electrical and Electronics Engineers, n.d.). Un método muy útil para este tipo de análisis es el método de análisis de escenarios el mismo que se centra en verificar el parámetro de la incertidumbre referente a la generación energética de carácter eólicos, esto se da por la facilidad que brinda la creación de múltiples situaciones posibles y la selección de las más relevantes esto se presenta en (Cheng et al., 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las microredes son como sistemas eléctricos de vecindario y se han podido hacerles operando en bajos o medios niveles de voltaje, por lo que se ven limitadas a transportar la energía a grandes distancias. (IEEE Power & Energy Society. & Institute of Electrical and Electronics Engineers, n.d.) En su gran mayoría, se encuentran en áreas específicas y pueden dividirse en dos tipos: aquellas conectadas a la red principal y las independientes. (Ahshan et al., 2020). Estas redes están compuestas por recursos energéticos dispersos y las cargas que alimentan, todas gestionadas de manera coordinada para satisfacer diversas necesidades de energía de manera efectiva (Butt et al., 2024).

Al referirse a una microred eficiente, hay que tomar en cuenta que uno de los puntos importante a tener en consideración es el despacho constante e interrumpido que esta pueda brindar al sistema que se esté alimentando (Universitatea Politehnică București et al., n.d.). Para esto es necesario contar con un respaldo de energía, estos sistemas de almacenamiento de utilizan reacciones químicas reversibles para facilitar los procesos de carga y descarga. Durante la carga, la electricidad se convierte en energía química para almacenamiento, y en períodos de demanda, esta energía se transforma nuevamente en electricidad para su uso final. Según el departamento de energía de EE.UU., las tecnologías de baterías más comunes a nivel mundial son el Ion de Litio (Li-Ion), Plomo-Ácido, Sodio-Sulfuro y Vanadio Redox. En este estudio, se ha optado por utilizar baterías de Ion de Litio (Li et al., 2017).

La integración eficiente de la programación en tiempo real juega un papel fundamental en la gestión contemporánea de la producción y la carga eléctrica, especialmente en el contexto de la reconexión fluida de los recursos de energía renovable (Liang et al., 2013). Esta necesidad de respuesta ágil ha impulsado el desarrollo de estrategias avanzadas de gestión energética, como la gestión de la respuesta a la demanda. En particular, la integración óptima de diversos RERs y Sistemas de Almacenamiento de Energía con baterías en redes específicas para adaptarse a patrones de carga específicos ha dado lugar al concepto emergente de microredes Inteligentes (Irfan et al., 2024). Las investigaciones actuales exploran las complejidades operativas, los mecanismos de control y la resiliencia tanto de las Microredes convencionales como de las SMGs, destacando un cambio paradigmático hacia marcos de control distribuido basados en sistemas multiagente para la gestión energética y la optimización de microredes (Wu & Mei, 2024).

Un caso de negocio en la India demuestra cómo las microrredes ofrecen una alternativa sostenible a una fábrica afectada por cortes recurrentes (University of Buner. Department of Electronics & Computer Science & Institute of Electrical and Electronics Engineers, n.d.). Se desarrollaron y optimizaron cuatro escenarios utilizando el software HOMER Pro, considerando la actualización de una planta C&I con un generador diésel, un sistema de almacenamiento de energía de batería (BESS) y/o generación solar fotovoltaica, además de un análisis de sensibilidad para las soluciones más rentables. (X. Yan et al., 2016). En Brasil se analizó el impacto de la inserción de BESS en diferentes clases de consumo (residencial, comercial e industrial) en Brasil, todo esto evaluando la viabilidad del uso de BESS para reducir costos de energía con el software HOMER Grid (Bacha et al., 2024).

Al hablar de energía renovable en Pakistán donde es muy dependiente de combustibles fósiles costosos, tiene un gran potencial para las FER. Un estudio utiliza el software HOMER para analizar seis escenarios de sistemas híbridos conectados a la red, mostrando una reducción en costos de energía y emisiones ambientales. (Khan et al., 2022). De forma similar en áreas de Pakistán sin exceso de electricidad y sin una red de servicios públicos adecuada, se están utilizando generadores diésel. Las tecnologías de energía renovable pueden satisfacer la demanda eléctrica en estas áreas (Yi et al., 2018). Un estudio analiza un sistema híbrido de energía renovable (HRES) en el polígono industrial Gadoon, utilizando recursos solares, eólicos y diésel. El

Las actividades que desarrolla la industrial tienen el horario de producción desde las 07:00 hasta las 18:00. El consumo de energía en kWh y de la potencia en kW de los 12 meses del año 2023 de la industria es;

Tabla 1
Consumo de la industria del año 2023, tanto de energía como potencia.

Meses	Consumo-Energía [kwh]	Potencia [kw]
1	1220	7,625
2	1228	7,675
3	1356	8,475
4	1004	6,275
5	1076	6,725
6	1236	7,725
7	1424	8,9
8	1412	8,825
9	1684	10,525
10	1432	8,95
11	1388	8,675
12	1500	9,375

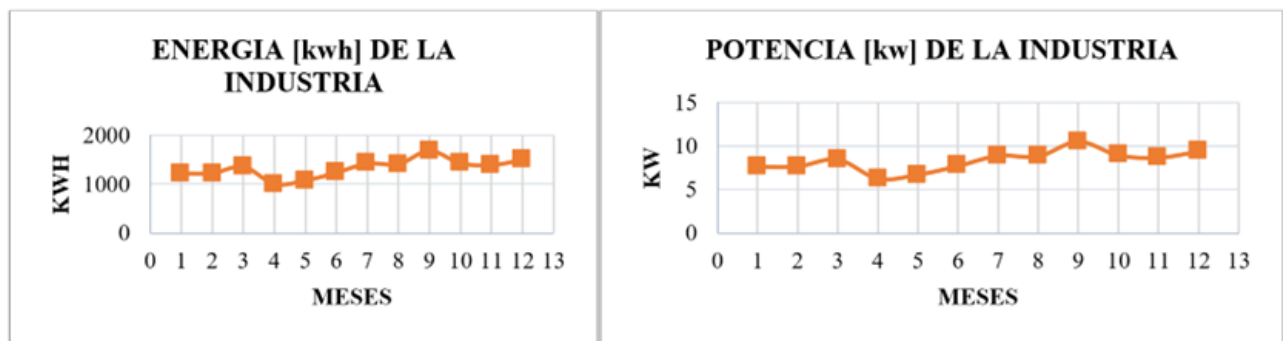


Figura 2
(a) Curva del consumo de energía [kwh]. (b) Curva de la potencia en [kW]. En un periodo de 12 meses.

Figura 2. (a) Curva del consumo de energía [kwh]. (b) Curva de la potencia en [kW]. En un periodo de 12 meses.

De la tabla 1 se determina que el consumo pico en kW es de 10.525, con una demanda anual promedio diario de 34.30 [kWh/día]. Una vez definido la ubicación, se obtienen los valores de irradiación solar, del viento y de la temperatura diaria del lugar establecido para el proyecto, con la ayuda del aplicativo de la NASA se selecciona el sitio y nos brindan los datos necesarios para determinar lo parámetros que se requiere para poder implementar la micro-red en la Industria.

Consideraciones técnicas de los recursos para la Micro-Red caso industrial



Figura 3
Datos recurso irradiación solar de la NASA, en Azogues.
HOMER Pro



Figura 4
Datos recurso velocidad del viento de la NASA, en Azogues.
HOMER Pr



Figura 5
 Datos recurso temperatura ambiente de la NASA, en Azogues.
 HOMER Pro

Según la base de datos de la NASA del periodo de 22 años desde Julio del 1983 al junio del 2005, en la ciudad de Azogues se dispone de: 4,40 [kWh/m²/dia] de promedios mensuales de radiación horizontal mundial; 4.87 [m/s] de promedios mensuales de velocidad de viento en un periodo de enero del 1984 hasta diciembre del 2013; 12.19 [°C] de promedio mensuales de temperatura en un periodo de 30 años desde enero del 1984 hasta diciembre del 2013. Orientación de los paneles. - Debido a que el sitio se en la ciudad de Azogues misma que esta hacia la parte sur de la línea ecuatorial, por lo tanto, los paneles que se implementaran en el sistema fotovoltaico, se colocaran en dirección hacia el norte de la ciudad.

Inclinación de los paneles. – En virtud que la ubicación del sistema fotovoltaico es Azogues-Ecuador la inclinación recomendada es de 0°-5°, pero por situaciones de contaminación que se presente en los paneles, se establecerá para el dimensionamiento de sistema fotovoltaico 10° mismo que ayudaran para el mantenimiento de los paneles.

Consideraciones técnicas para la implementación de la Micro-Red para el caso Industrial

En virtud que la industria realiza su producción en el horario de 07:00 a 18:00. La Micro- Red se conformó por; red externa (Grid), paneles solares (PV), Inversor de energía, baterías y aerogeneradores, y para el análisis de la micro-red se utilizó una tasa de discontinua del Banco Central de 13%, la tasa de inflación de 2.5% y a 25 años de vida útil del proyecto. El costo de la red externa (Grid), se estableció un costo de 0.100 (\$/kWh).

Características técnicas para la implementación de la Micro-Red para el caso Industrial

- Característica de la carga industrial

De las planillas del consumo de energía se obtiene una curva tipo diaria en kW/dia, misma que se utiliza para ingresar los datos en Homer Pro.

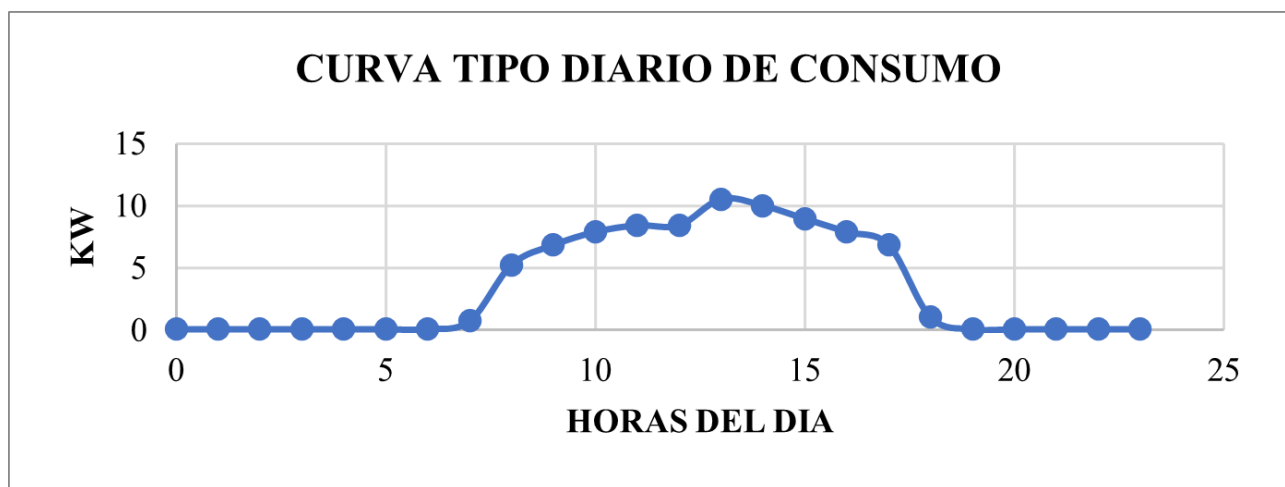


Figura 6
Curva de consumo de energía día [kw]. Periodo de 24 horas.

- **Característica de la Red Externa (Empresa Distribuidora)**

El costo de la red externa (Grid), se estableció un costo de 0.100 (\$/kWh).

- **Sistema paneles fotovoltaicos**

Se considera que para cubrir 1kW se debe colocar 3 paneles solares de 325 W. Con un capital inicial por cada 1kW de \$960.00 y por costo de reemplazo de \$320.00, y un consto de 0.100 (\$/año) por operación y mantenimiento. Para el sistema de paneles fotovoltaicos, se dispone de 4,40 [kWh/m2/día] de radiación horizontal. Se considera el panel de 325 W ya que se colocará en la losa la industria. Una vida útil de 25 años.

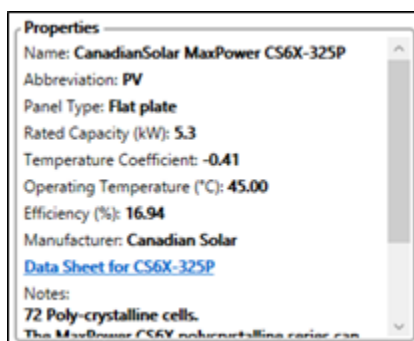


Figura 7
Características del Panel Fotovoltaico, Canadian Solar Max Power CS6X-325P.
HOMER Pro

- **Aerogeneradores, Turbina Eólica**

Se considera un aerogenerador de 10 kW. Para cubrir una potencia de diseño de 10,52 kW, con un capital inicial de \$5000.00, por costo de reemplazo de \$5000.00, y un consto de 0.100 (\$/año) por operación y mantenimiento. Para el sistema los aerogeneradores, se dispone de 4.87 [m/s] de velocidad de viento. Y se colocara a una altura de 15 metros desde los obstáculos más altos de la industria. La altura sobre el nivel de mar de Azogues es de 2518m. La vida útil 20 años.

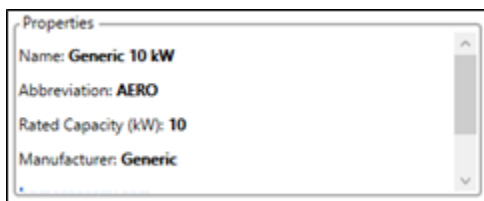


Figura 8

Características de la Turbina Eólica, Genérica 10 kW.
HOMER Pro

- Banco de Baterías

El banco de baterías para el almacenamiento de energía de la micro-red fue de plomo acido con una capacidad nominal de almacenamiento de 10.5 (kWh) a 12 V. Para cubrir una potencia de diseño de 10.52 kW. Con un capital inicial de \$6000.00, por costo de reemplazo de \$6000. El dimensionamiento del banco de baterías fue conforme la potencia de los paneles solares. Vida útil de 15 años.

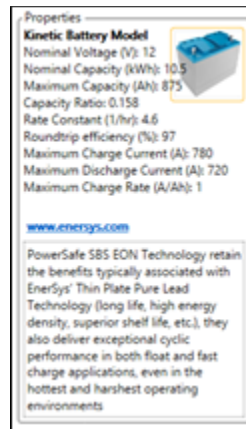


Figura 9
Características del Banco de Baterías, EnerSys.
HOMER Pro

- Inversor AC - DC

El inversor que se empleara es el Sola X X3-hybrid10, capacidad de 13 kW máx. entrada de 1000 V, 15 Amperios. MPPT de eficiencia de 99.9%. Para cubrir una potencia de diseño de 10.52 kW. Con un capital inicial de \$3500.00, por costo de reemplazo de \$4000.00. Vida útil de 25 años.

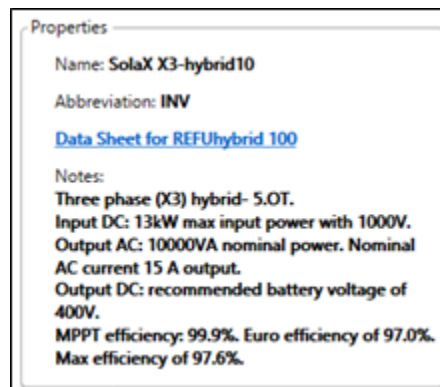


Figura 10
Características del Inversor CA - DC.
HOMER Pro

Análisis del Caso del estudio aplicado en una Industria

Simulación de la Micro-Red para el caso Industrial en Homer Pro

En Homer Pro se procede a realizar la simulación del modelo de la Micro-Red para el caso industrial, y así determinar la optimización y viabilidad técnica del caso de estudio. Ya que la optimización busca la configuración más eficiente de la micro-red propuesta y que cumplan los requisitos y necesidades de la industria, todo ello a un menor costo posible. Para el caso de estudio de la industria para la Micro-Red, estará compuesta por: red externa (Grid), Sistema de Paneles Fotovoltaicos (PV), Turbina Eólica (AERO), Almacenamiento de energía-Banco de baterías (BESS), Inversor AC – DC, y la carga Industrial (Load Industrial).

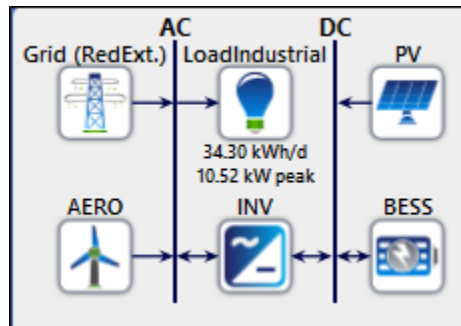


Figura 11
Micro-Red del caso Industrial.
HOMER Pro

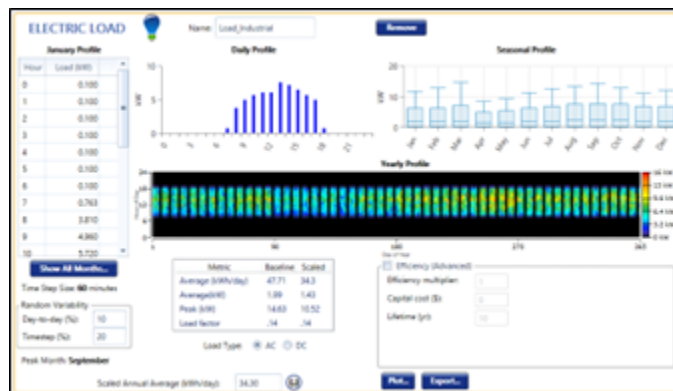


Figura 12
Parámetros de la carga Industrial.
HOMER Pro

Se procede a cargar los recursos de radiación solar, velocidad del viento, temperatura, y cada uno de los componentes que forman parte la micro-red para el caso de estudio Industrial conforme sus características. En HOMER Pro se realiza las simulaciones de optimización y se obtienen 4 resultados favorables de optimización con los respectivos costos por cada kWh (COE), cabe recalcar que HOMER Pro, para determinar los resultados óptimos realizado varios análisis con los distintos componentes de la micro-red. A continuación, se describen los más relevantes.

Tabla 2. Soluciones optimas de la Micro-Red del caso de estudio Industrial, realizada en HOMER Pro.

Tabla 2

Soluciones optimas de la Micro-Red del caso de estudio Industrial, realizada en HOMER Pro.

Resultados de la Optimización de la Micro-Red Industrial

Ítem Optim.	Arquitectura					Indicadores financieros			Indicadores operativos	
	PV	AERO	BESS	GRID	NCP [\$]	Costo		Inicial Capital [\$]	PV	AERO
						COE [\$]	Operación [\$/AÑO]		Producción [kWh/año]	Producción [kWh/año]
1	10,5	1		1	16302,36	0,09	-3682,52	16630,45	14,71	11.504
2	10,5			1	21167,57	0,18	1065,54	11674,2	14,71	
3	10,5	1	1	1	23517,17	0,13	9461,55	22674,2	14,71	11.504
4	10,5			1	28382,34	0,24	1201,89	17674,2	14,71	

Análisis de los resultados de la Optimización de la Micro-Red Industrial

Análisis del Ítem Optimización 1, COE de \$ 0.09

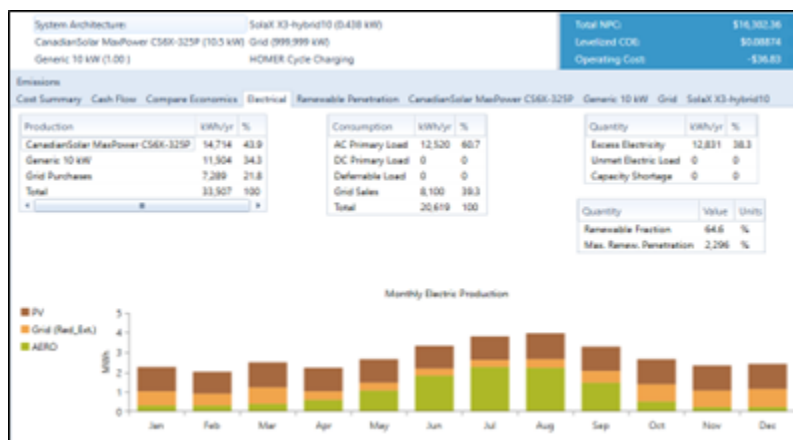


Figura 13
Simulación de resultado Optimo 1 de la Micro-Red para el caso Industrial.
HOMER Pro

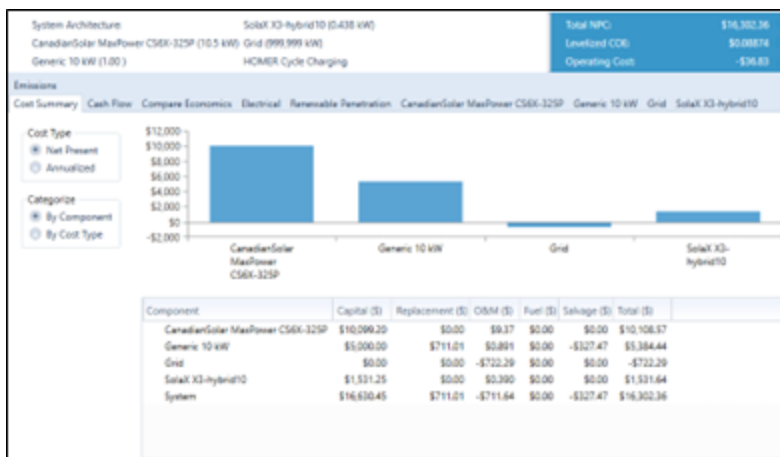


Figura 14
 Resumen de costos de la simulación Optima 1 de la Micro-Red Industrial.
 HOMER Pro

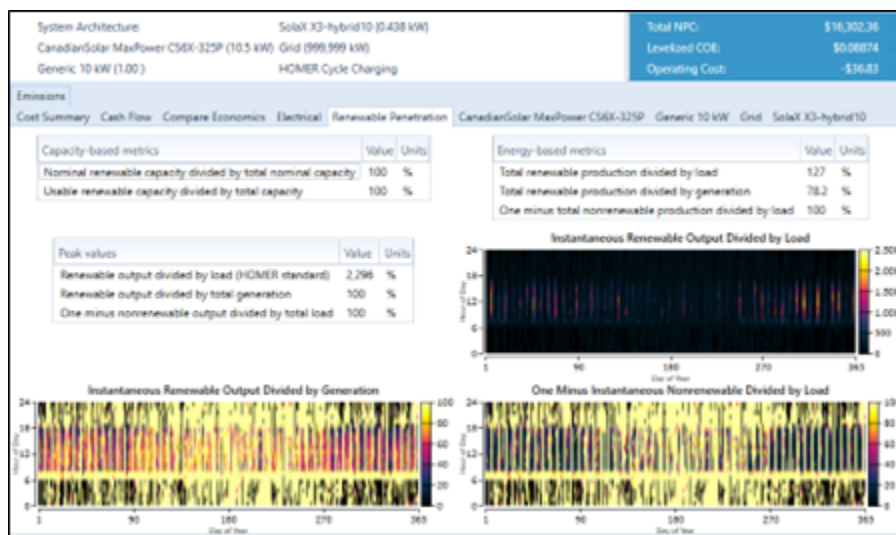


Figura 15
 Penetración energías renovables en la Micro-Red Industrial.
 HOMER Pro

De la tabla 2 se puede evidenciar que la solución óptima 1 para la micro-red es la que está conformada por paneles fotovoltaicos de capacidad de 10,5 kW, 1 aerogenerador y conectado a la red externa de la empresa distribuidora. Ya que el resultado brinda un valor de COE de 0,09 [\$/kWh], que es un valor por debajo del valor del kWh de la red externa. A su vez, en cuanto a la energía renovables de paneles fotovoltaicos representa un valor de 14,714 [kWh/año] mismo que equivale a un 43,9%; el aerogenerador aporta un 11,504 [kWh/año] mismo que equivale a 34,3%; y la red externa de la empresa distribuidora incorporara a la Micro-Red 7,289 [kWh/año], que representa el 21.8%. Por lo cual el sistema planteado abastera a la Industrial, lo que para su implementación requeriría un costo de \$ 16302.36 dólares. En la figura 13, figura 14, figura 15, se puede visualizar que el aporte de recursos renovables en la micro-red aplicado al caso Industrial representa un 78.2% y solo el 21.8% de la Red Externa. La solución óptima está conformada por paneles fotovoltaico, aerogeneradores y red externa, no se requiere la incorporación del banco de baterías.

Análisis de las curvas de las fuentes de energía en la Micro-Red caso Industrial

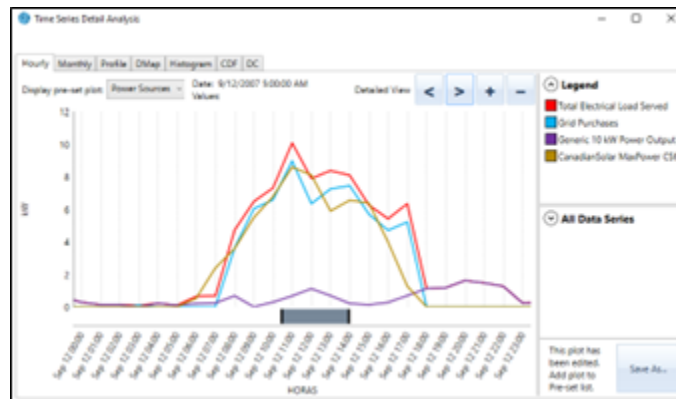


Figura 16
Curvas de las fuentes de energía de la Micro-Red Industrial.
HOMER Pro

De la Figura 16 se detalla el aporte de las fuentes de energía renovables y la red externa, para poder abastecer la demanda que requiere la industria que corresponde a 10.52kW, en el cual la Micro-Red cumple con las condiciones requeridas por la Industrial.

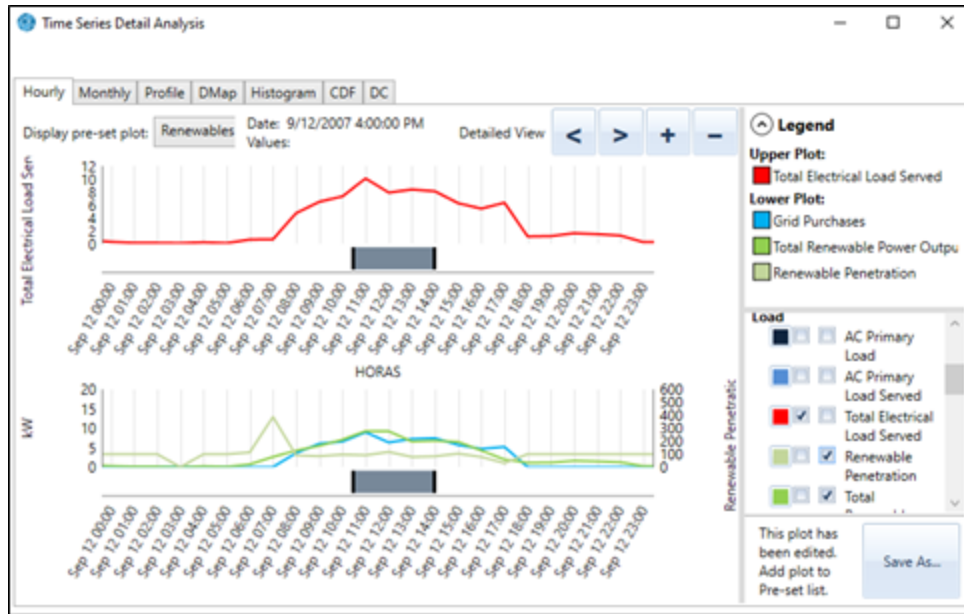


Figura 17
Curvas de la Load vs Penetración energía renovables de la Micro-Red Industrial.
HOMER Pro

De la Figura 17 se detalla el comportamiento de las fuentes de energía renovables y la red externa, conforme el requerimiento de la carga industrial en un periodo de tiempo.
Análisis del Ítem Optimización 2, COE de \$ 0.18

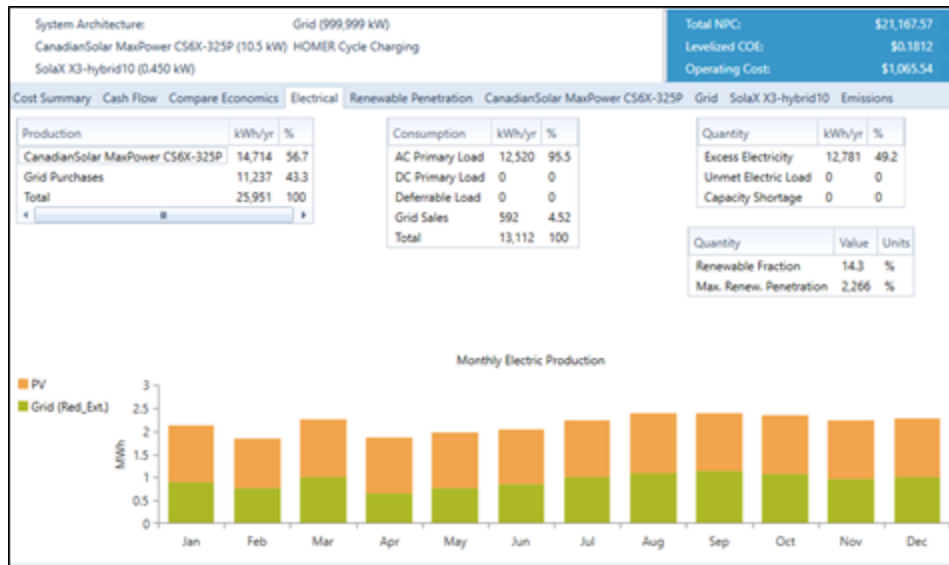


Figura 18
Simulación de resultado Optimo 2 de la Micro-Red para el caso Industrial.
HOMER Pro

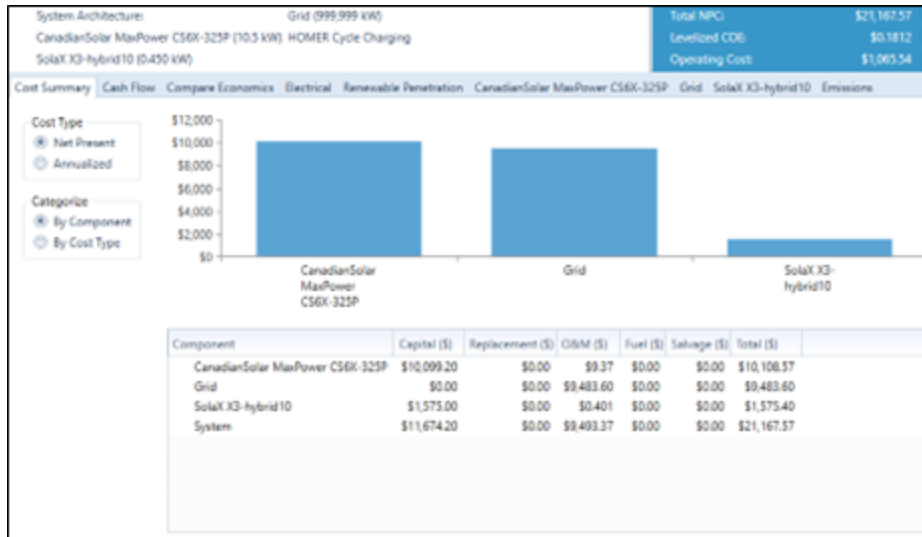


Figura 19
 Resumen de costos de la simulación Optima 2 e la Micro-Red Industrial.
 HOMER Pro



Figura 20
 Penetración energías renovables en la Micro-Red Industrial.
 HOMER Pro

De la tabla 2 se puede evidenciar que la solución óptima 2 para la micro-red es la que está conformada por paneles fotovoltaicos de capacidad de 10,5 kW, y conectado a la red externa de la empresa distribuidora. El resultado brinda un valor de COE de 0,18 [\$/kWh], que es un valor por encima al valor referencia de kWh de la red externa. A su vez, en cuanto a la energía renovables de paneles fotovoltaicos representa un valor de 14,714 [kWh/año] mismo que equivale a un 56.7%; y la red externa de la empresa distribuidora incorporara a la micro-red 11,237 [kWh/año], que representa el 43,3%. Por lo cual el sistema planteado abastecerá a la Industrial, y se requiere un costo de \$ 21167,57 dólares.

Análisis del Ítem Optimización 2, COE de \$ 0.12

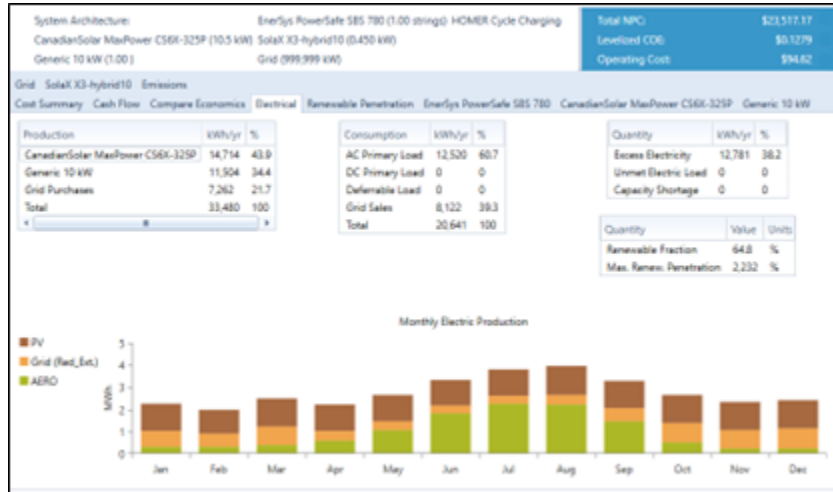


Figura 21
Simulación de resultado Optimo 3 de la Micro-Red para el caso Industrial.
HOMER Pro

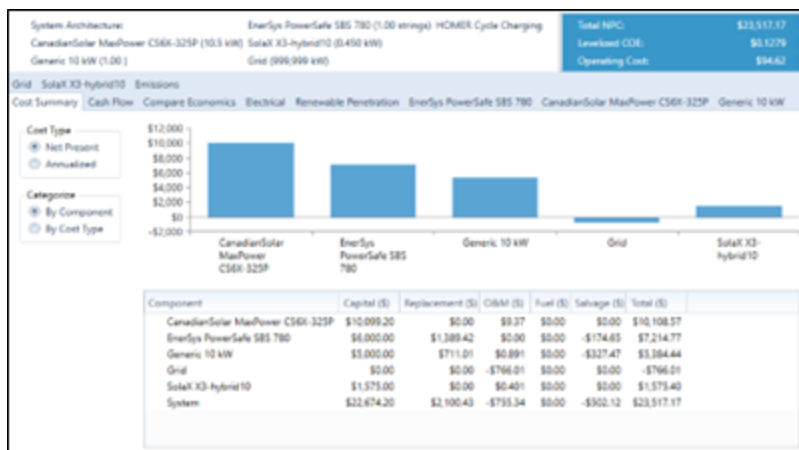


Figura 22
Resumen de costos de la simulación Optima 3 de la Micro-Red Industrial.
HOMER Pro

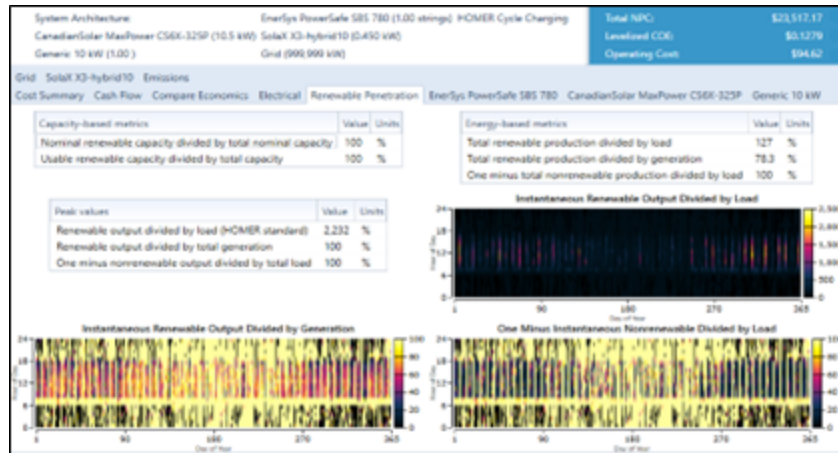


Figura 23
Penetración energías renovables en la Micro-Red Industrial.
HOMER Pro

De la tabla 2 se puede evidenciar que la solución óptima 3 para la micro-red es la que está conformada por paneles fotovoltaicos de capacidad de 10,5 kW, 1 aerogenerador, banco de baterías, y la red externa de la empresa distribuidora. El resultado brinda un valor de COE de 0,12 [\$/kWh], que es un valor aproximado al valor referencia de kWh de la red externa. A su vez, en cuanto a la energía renovables de paneles fotovoltaicos representa un valor de 14,714 [kWh/año] mismo que equivale a un 56.7%; aerogeneradores con un valor de 11,504 [kWh/año] representa el 34,4%, y la red externa de la empresa distribuidora incorporara a la micro-red 7,262 [kWh/año], que representa el 21,7%. Por lo cual el sistema planteado abastecerá a la Industrial, y se requiere un costo de \$ 23517.17 dólares.

Análisis del Ítem Optimización 4, COE de \$ 0.24.

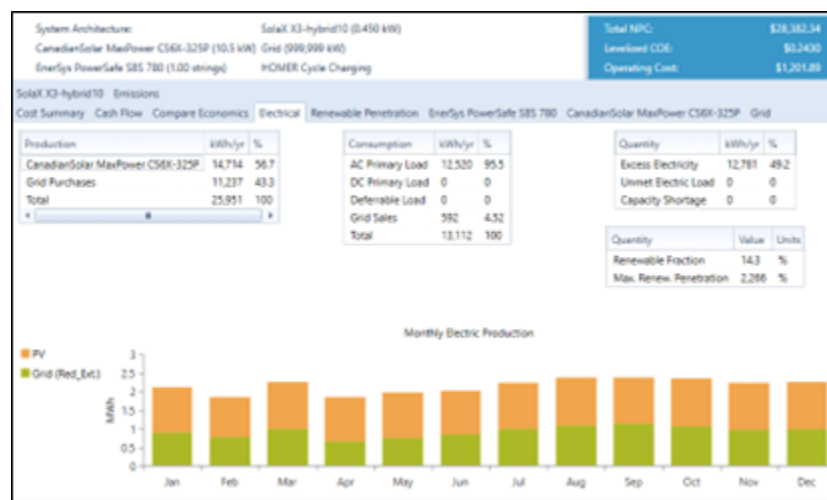


Figura 24
Simulación de resultado Optimo 4 de la Micro-Red para el caso Industrial.
HOMER Pro

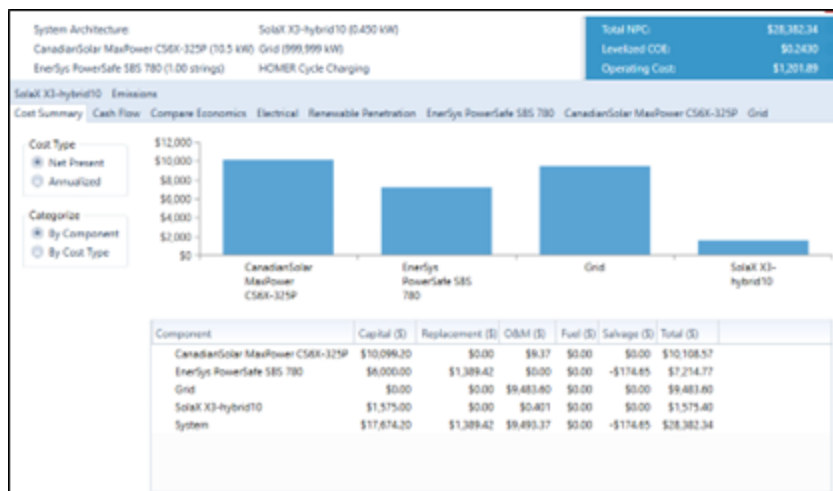


Figura 25
Resumen de costos de la simulación Optima 4 de la Micro-Red Industrial.
HOMER Pro



Figura 26
Penetración energías renovables en la Micro-Red Industrial.
HOMER Pro

De la tabla 2 se puede evidenciar que la solución óptima 4 para la micro-red es la que está conformada por paneles fotovoltaicos de capacidad de 10,5 kW, banco de baterías, y la red externa de la empresa distribuidora. El resultado brinda un valor de COE de 0,24 [\$/kWh], que es un valor aproximado al doble del valor referencia de kWh de la red externa. A su vez, en cuanto a la energía renovables de paneles fotovoltaicos representa un valor de 14,714 [kWh/año] mismo que equivale a un 56.7%; y la red externa de la empresa distribuidora incorporara a la micro-red 11,237 [kWh/año], que representa el 43.3%. Por lo cual el sistema planteado abastecerá a la Industrial, y se requiere un costo de \$ 28382.34 dólares.

De las 4 soluciones optimizadas por HOMER pro con respecto de la micro-red para el caso Industrial se obtiene que la solución óptima 1 y la 3 son los costos más bajos por cada [\$/kWh] con un costo de 0.09 y 0.12 respectivamente. Ya que sus fuentes de aporte a la micro-red en el primer caso son por PV, aerogeneradores y red externa y el segundo aporte más bajo está conformado por PV, aerogeneradores, red externa y banco de baterías, con un costo de inversión de \$ 16302.36 dólares y \$ 23517.17 dólares.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de la micro-red para el caso de la industria, se obtuvieron las siguientes simulaciones optimas en el cual se evidencia los valores de lo COE en [\$/kWh].

Tabla 3. Costos de las fuentes de las soluciones Optimas determinadas para la Micro-Red Industrial.

Fuentes	Solución Óptima 1 [\$] COE=\$ 0.09	Solución Óptima 2 [\$] COE=\$ 0.18	Solución Óptima 3 [\$] COE=\$ 0.12	Solución Óptima 4 [\$] COE=\$ 0.24
Panales Fotovoltaicos (PV)	\$ 10108.57	\$ 10108.57	\$ 10108.57	\$ 10108.57
EnerSys PowerSafe (BESS)			\$ 7214.77	\$ 7214.77
Aerogeneradores (AERO)	\$ 5384.44		\$ 5384.44	
Fuente Externa (Grid)	-\$ 722.29	\$ 9483.60	-\$ 766.01	\$9483.60
Inversor	\$ 1531.64	\$ 1575.40	\$ 1575.40	\$ 1575.40
TOTAL	\$ 16302.36	\$ 21167.57	\$ 23517.17	\$ 28382.34

De la tabla 3 se determina que en la solución óptima 1 y 3, el pago en dólares que se debe realizar a la empresa distribuidora por la fuente de red externas será mínimo, ya que el mayor aporte de la micro-red está siendo abastecida por energía renovables. Una vez realizado las soluciones de optimización de la micro-red del caso Industrial y se determina que la Micro-Red debe estar compuesto por: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y red externas y así despacha con un COE de 0.09 [\$/kwh]. Valor que representa la penetración de energías renovables del 78.2% (paneles fotovoltaicos, aerogeneradores) y solo el 21. 8% de la energía a través de la red externa de la empresa distribuidora. Por lo que la micro-red estaría conformada solo la carga, PV, aerogenerador, red externa.

Para realizara un análisis de resultados óptimos se realizar las simulaciones de optimización en HOMER Pro en los siguientes casos para la micro-red Industrial como es: sin la fuente aerogenerador (Eólica), Sin los paneles fotovoltaico, Solo con la fuente externa, Con generador. Con la finalidad de evidencias lo aportes de cada una de las fuentes que conforma la micro-red Industrial.

Caso 1.- Micro-Red Industrial, sin la fuente Eólica

Para el análisis del caso de estudio 1, se considera la micro-red Industrial, pero sin el aporte del recurso renovable Eólico (Aerogenerador). Como se detalla en la figura a continuación detallada. Para el caso de estudio 1 de la industria para la Micro-Red, estará compuesta por: Red externa (Grid), Sistema de paneles fotovoltaicos (PV), Almacenamiento de energía-Banco de baterías (BESS), Inversor AC – DC, y la carga Industrial (Load Industrial).

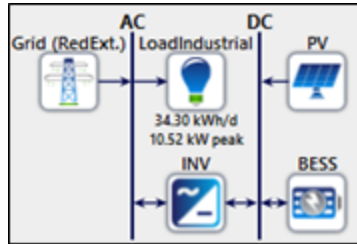


Figura 27
Micro-Red del caso Industrial, sin Aerogenerador.
HOMER Pro

Se procede a cargar los recursos de radiación solar, velocidad del viento, temperatura, y cada uno de los componentes que forman parte la Micro-Red para el caso de estudio Industrial conforme sus características. En HOMER Pro se realiza las simulaciones de optimización y se obtienen 2 resultados favorables de optimización con los respectivos costos por cada kWh (COE), cabe recalcar que HOMER Pro, para determinar los resultados óptimos realiza 120 análisis con los distintos componentes de la micro-red. A continuación, se describen los más relevantes.

Tabla 4. Soluciones optimas casos estudio 1 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.

Tabla 4
Soluciones optimas casos estudio 1 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.
Resultados de la Optimización de la Micro-Red Industrial, Sin Aerogenerador

Ítem Optim.	Arquitectura					Indicadores financieros			Indicadores operativos	
	PV	AERO	BESS	GRID	NCP [\$]	Costo COE [\$]	Operación [\$/AÑO]	Inicial Capital [\$]	PV Producción [kWh/año]	AERO Producción [kWh/año]
1	10,5			1	21168.00	0,18	1066.00	11674.00	14,71	
2	10,5		1	1	28382.00	0,24	1202.00	17674.00	14,71	

Para el caso de estudio 1 de la micro-red Industrial, está compuesto por paneles fotovoltaicas, banco de baterías, red externa, Inversor y la carga. El COE más óptimo es 0.18 [\$/kwh].

Caso 2.- Micro-Red Industrial, sin Paneles Fotovoltaicos

Para el análisis del caso de estudio 2, se considera la micro-red industrial, pero sin el aporte del recurso renovable (paneles fotovoltaicos). Como se detalla en la figura 28 a continuación detallada.

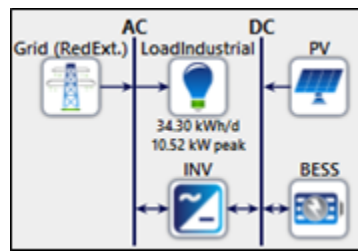


Figura 28
Micro-Red del caso Industrial, sin Paneles Fotovoltaicos.
HOMER Pro

Para el caso de estudio 2 de la industria para la micro-red, estará compuesta por: red externa (Grid), aerogeneradores, almacenamiento de energía-banco de baterías (BESS), inversor AC – DC, y la carga industrial (Load Industrial). Se procede a cargar los recursos de radiación solar, velocidad del viento, temperatura, y cada uno de los componentes que forman parte la micro-red para el caso de estudio Industrial conforme sus características. En HOMER Pro se realiza las simulaciones de optimización y se obtienen 4 resultados favorables de optimización con los respectivos costos por cada kWh (COE), cabe recalcar que HOMER Pro, para determinar los resultados óptimos realiza 140 análisis con los distintos componentes de la micro-red. A continuación, se describen los más relevantes.

Tabla 5. Soluciones optimas casos estudio 2 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.

Tabla 5
Soluciones optimas casos estudio 2 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.
Resultados de la Optimización de la Micro-Red Industrial, Sin Paneles Fotovoltaicos (PV)

Ítem Optim.	Arquitectura				Indicadores financieros			Indicadores operativos	
	PV	AERO	BESS	GRID	NCP [\$]	Costo		PV	AERO
						COE [\$]	Operación [\$/AÑO]	Inicial Capital [\$]	Producción [kWh/año]
1	1			1	6289.00	0.04	144.88	5000.00	11.504
2				1	11154.00	0.10	1252.00	0.00	
3	1	1		1	13577.00	0.08	281.00	11073.00	11.504
4			1	1	18442.00	0.17	1388.00	6073.00	

Para el caso de estudio 2 de la micro-red industrial, está compuesto por aerogeneradores y red externa, inversor y la carga, con un COE óptimo es 0.04 [\$/kwh].

Caso 3.- Micro-Red Industrial, sin Paneles Fotovoltaicos y sin Aerogeneradores (Conectada directo a la red)

Para el análisis del caso de estudio 3, se considera la micro-red industrial, conectada directo a la red externa, sin el aporte del recurso renovable (paneles fotovoltaicos y aerogeneradores). Como se detalla en la figura a continuación detallada.

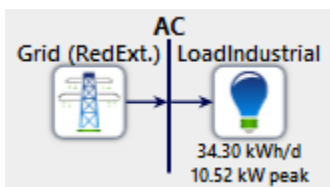


Figura 29
Micro-Red del caso Industrial, red externa.
HOMER Pro

Para el caso de estudio 3 de la industria para la micro-red, estará compuesta solo por la red externa (Grid), y la carga Industrial (Load Industrial). Se procede a cargar los recursos de cada uno de los componentes que forman parte la micro-red para el caso de estudio Industrial conforme sus características. En HOMER Pro se realiza las simulaciones de optimización y se obtienen 1 resultados favorables de optimización con los respectivos costos por cada kWh (COE), A continuación, se describen los más relevantes.

Tabla 6. Soluciones optimas casos estudio 3 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.

Tabla 6
Soluciones optimas casos estudio 3 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.
Resultados de la Optimización de la Micro-Red Industrial, Solo Red Externa (Grid)

Ítem Optim.	Arquitectura				Indicadores financieros			Indicadores operativos	
	PV	AERO	BESS	GRID	NCP [\$]	Costo	Inicial Capital [\$]	PV Producción [kWh/año]	AERO Producción [kWh/año]
					COE [\$]	Operación [\$/AÑO]			
1				1	11154.00	0.10	1252.00	0.00	

Para el caso de estudio 3 de la Micro-Red Industrial, está compuesto solo por la red externa de la empresa distribuidora por lo que el COE es de 0.10 [\$/kWh].

Caso 4.- Micro-Red Industrial con energías renovables y generador

Para el análisis del caso de estudio 4, se considera la Micro-Red Industrial, con el aporte del Recurso Renovables (Paneles Fotovoltaicos, Aerogenerador) y generador. Como se detalla en la figura a continuación detallada. Para el caso de estudio 4 de la industria para la Micro-Red, estará compuesta por: Red externa (Grid), Sistema de Paneles Fotovoltaicos (PV), Aerogeneradores, Generador, Almacenamiento de energía-Banco de baterías (BESS), Inversor AC – DC, y la carga Industrial (Load Industrial).

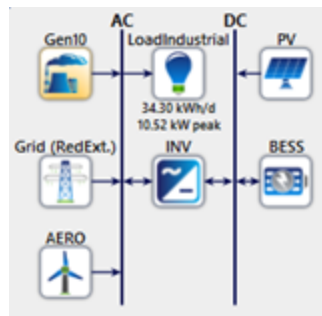


Figura 30
Micro-Red del caso Industrial, con generador.
HOMER Pro

Se procede a cargar los recursos de radiación solar, velocidad del viento, temperatura, y cada uno de los componentes que forman parte la Micro-Red para el caso de estudio Industrial conforme sus características. En HOMER Pro se realiza las simulaciones de optimización y se obtienen 8 resultados favorables de optimización con los respectivos costos por cada kWh (COE), cabe recalcar que HOMER Pro, para determinar los resultados óptimos realiza 480 análisis con los distintos componentes de la Micro-Red. A continuación, se describen los más relevantes.

Tabla 7. Soluciones optimas casos estudio 1 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.

Tabla 7
Soluciones optimas casos estudio 1 de la Micro-Red Industrial, realizada en HOMER Pro.
Resultados de la Optimización de la Micro-Red Industrial, Incluye generador

Ítem Optim.	Arquitectura						Indicadores financieros			
	PV	AERO	BESS	GENERADOR	GRID	NCP [\$]	COE [\$]	Operación [\$/AÑO]	Inicial Capital [\$]	
1	10,5	1				1	16302.00	0.09	-36.83	16630.00.00
2	10,5	1		1		1	20877.00	0.11	-89.51	21674.00
3	10,5					1	21168.00	0.18	1066.00	11674.00
4	10,5	1	1			1	23517.00	0.13	94.62	22674.00
5	10,5			1		1	25742.00	0.22	1018.00	16674.00
6	10,5	1	1	1		1	28091.00	0.15	46.83	27674.00
7	10,5		1			1	28382.00	0.24	1202.00	17674.00
8	10,5		1	1		1	32957.00	0.28	1154.00	22674.00

Para el caso de estudio 4 de la micro-red Industrial, en el cual incluye una fuente de energía adicional (Generador) el COE más óptimo es 0.09 [\$/kwh], el cual Incluye la operación mediante los paneles fotovoltaicos y conectado a la red externa.

CONCLUSIONES

Del análisis para el estudio sobre la implementación de una micro-red en una pequeña fábrica industrial en Azogues ofrecen varias conclusiones;

La fábrica, categorizada como BT industrial artesanal, presenta una demanda energética que varía a lo largo del año, con picos mensuales de hasta 10.525 kW y un consumo promedio diario de 34.30 kWh. Por lo que la variabilidad es crucial para dimensionar adecuadamente la infraestructura de la Micro-Red. Ya que la industrial tiene un horario de producción de 07:00 a 18:00, es por ello que favorece la incorporación de las energías renovables aún más. Se evaluaron los recursos naturales disponibles como la radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente, utilizando datos históricos de la NASA para Azogues, obteniendo valores favorables y así viabiliza la implementación de las tecnologías renovables (paneles solares y aerogeneradores) propuestas en la micro-red.

La micro-red propuesta incluye una combinación de recursos renovables (paneles solares y aerogeneradores), un sistema de almacenamiento de energía mediante baterías y una conexión a la red eléctrica externa. Por lo que la selección de esta configuración se basó en simulaciones realizadas con HOMER Pro, que permitieron identificar varias soluciones óptimas en términos de costos de energía (COE) y operación.

Las simulaciones mostraron que las soluciones que combinan paneles solares, aerogeneradores y la red externa son las más rentables, con un COE tan bajo como \$0.09/kWh. Estas soluciones no solo reducen significativamente los costos operativos anuales, sino que también aumentan la penetración de energías renovables en la matriz energética de la fábrica, alcanzando hasta un 78.2% de contribución renovable.

Se evaluaron escenarios alternativos excluyendo componentes como los aerogeneradores o los paneles solares, lo que permitió entender el impacto de cada tecnología en los costos y la sostenibilidad energética a largo plazo. Estos análisis reafirmaron la robustez de la configuración seleccionada de la micro-red industrial, que equilibra eficiencia económica con sostenibilidad ambiental.

La implementación de la micro-red propuesta no solo garantiza el suministro estable de energía para la fábrica, adaptándose a sus necesidades específicas de producción diurna, sino que también contribuye significativamente a la reducción de emisiones de carbono y a la independencia energética. Además, los resultados económicos positivos sugieren que esta inversión no solo es técnica y ambientalmente viable, sino también financieramente atractiva a largo plazo.

El estudio detallado del caso de estudio industrial en Azogues demuestra que la implementación de una micro-red basada en energías renovables es una solución eficaz para satisfacer las demandas energéticas de la industria mientras se promueve la sostenibilidad y se reducen los costos operativos.

LITERATURA CITADA

- Ahshan, R., Al-Hanshi, A. M., Al-Naabi, M. A., Al-Hashmi, H. A., & Al-Badi, A. H. (2020). Design and Economic Analysis of a Grid-connected Rooftop Solar PV System for Typical Home Applications in Oman. *Electrical Science & Engineering*, 2(2), 15–23. <https://doi.org/10.30564/ese.v2i2.2188>
- Alam, M. S., Hossain, M. A., Shafiullah, M., Islam, A., Choudhury, M. S. H., Faruque, M. O., & Abido, M. A. (2024). Renewable energy integration with DC microgrids: Challenges and opportunities. In *Electric Power Systems Research* (Vol. 234). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110548>
- Baccouche, G., Saidi, A. S., Falama, R. Z., & Salah, C. Ben. (2022). Analysis of microgrid with wind-turbine and batteries optimized for load shedding in Tunisia. *2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, STA 2022 - Proceedings*, 471–475. <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019031>
- Bacha, B., Ghodbane, H., Dahmani, H., Betka, A., Toumi, A., & Chouder, A. (2024). Optimal sizing of a hybrid microgrid system using solar, wind, diesel, and battery energy storage to alleviate energy poverty in a rural area of Biskra, Algeria. *Journal of Energy Storage*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110651>
- Bagheri, F., Dagdougui, H., & Gendreau, M. (2022). Stochastic optimization and scenario generation for peak load shaving in Smart District microgrid: sizing and operation. *Energy and Buildings*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112426>
- Butt, H. M. M., Khan, I., & Xia, E. (2024). Impact of energy imports, renewable electricity production, alternative, and nuclear energy sources on natural gas resource rents. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33854-1>
- Cayetano-Jimenez, I. U., Martinez-Rios, E. A., Bustamante-Bello, R., Ramirez-Mendoza, R. A., & Ramirez-Montoya, M. S. (2024). Experimenting With Soft Robotics in Education: A Systematic Literature Review From 2006 to 2022. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 17, 1261–1278. <https://doi.org/10.1109/TLT.2024.3372894>
- Chandrakar, S. K., Yadav, D. K., Singh, J., Verma, D. K., & Khan, A. (2013). Experimental study of micro industry of animal and human powered mechanical device for battery charging. *International Journal of Applied Engineering Research*, 8(17 SPEC. ISSUE), 1953–1961. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.035>
- Chen, Y., Li, Z., Yu, S. S., Liu, B., & Chen, X. (2024). A profitability optimization approach of virtual power plants comprised of residential and industrial microgrids for demand-side ancillary services. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 38. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101289>
- Cheng, D., Xing, F., Su, R., Qi, H., Ma, L., Ma, H., Wang, T., Zhou, N., & Li, C. (2023). Multiple Wind Farms Power Generation Scenario Generation and Reduction Based on Multivariate Copula Function and Greedy Strategy. *2023 7th International Conference on Power and Energy Engineering, ICPEE 2023*, 337–342. <https://doi.org/10.1109/ICPEE60001.2023.10453696>
- Cintuglu, M. H., & Mohammed, O. A. (2017). Behavior modeling and auction architecture of networked microgrids for frequency support. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(4), 1772–1782. <https://doi.org/10.1109/TII.2016.2612648>
- Datta, J., & Das, D. (2023). Energy management of multi-microgrids with renewables and electric vehicles considering price-elasticity based demand response: A bi-level hybrid optimization approach. *Sustainable Cities and Society*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104908>

- Dautzenberg, A., Kaiser, M., Weibelzahl, M., & Weissflog, J. (2024). Industrial multi-energy communities as grid-connected microgrids: Understanding the role of asymmetric grid-charge regulation. *Journal of Cleaner Production*, 466. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142738>
- Faheem, M., Shah, S. B. H., Butt, R. A., Raza, B., Anwar, M., Ashraf, M. W., Ngadi, M. A., & Gungor, V. C. (2018). Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges. In *Computer Science Review* (Vol. 30, pp. 1–30). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2018.08.001>
- Farhana, K., Kadirgama, K., Mahamude, A. S. F., & Mica, M. T. (2022). Energy consumption, environmental impact, and implementation of renewable energy resources in global textile industries: an overview towards circularity and sustainability. *Materials Circular Economy*, 4(1). <https://doi.org/10.1007/s42824-022-00059-1>
- Firdouse, F., & Sharma, P. (2022). Energy Systems using PS and PSO for a Micro-grid Applications. *Proceedings of 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics, IC3I 2022*, 1105–1110. <https://doi.org/10.1109/IC3I56241.2022.10072887>
- Huang, X., Wang, K., Qiu, J., Hang, L., Li, G., & Wang, X. (2019). Decentralized Control of Multi-Parallel Grid-Forming DGs in Islanded Microgrids for Enhanced Transient Performance. *IEEE Access*, 7, 17958–17968. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2896594>
- Hussain, M. N., Janajreh, I., & Ghenai, C. (2016). Multiple Source Sustainable Hybrid Micro-grid for Urban Communities: A Case Study in UAE. *Energy Procedia*, 103, 419–424. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.309>
- IEEE Power & Energy Society., & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *IEEE PES GTD 2019: Grand International Conference & Exposition Asia: conference: March 19-23; exposition: March 21-23, Bangkok International Trade & Exhibition Centre (BITEC), Bangkok, Thailand.*
- Irfan, M., Deilami, S., Huang, S., Tahir, T., & Veettil, B. P. (2024). Optimizing load frequency control in microgrid with vehicle-to-grid integration in Australia: Based on an enhanced control approach. *Applied Energy*, 366. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123317>
- Khan, M. A., Zain Yousaf, M., Raza, A., Tahir, M. F., Ali, M., & Qadeer, A. (2022). The Optimized Model of Hybrid Grid Connected System for Power Generation of the University of Lahore, Pakistan. *2022 International Conference on Electrical Engineering and Sustainable Technologies, ICEEST 2022 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ICEEST56292.2022.10077845>
- Lessons_learned_from_microgrid_implementation_at_electric_utility.* (n.d.).
- Li, Z., Shahidehpour, M., Aminifar, F., Alabdulwahab, A., & Al-Turki, Y. (2017). Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience. In *Proceedings of the IEEE* (Vol. 105, Issue 7, pp. 1289–1310). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2685558>
- Liang, H., Choi, B. J., Zhuang, W., & Shen, X. (2013). Stability enhancement of decentralized inverter control through wireless communications in microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1), 321–331. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2226064>
- Liu, J., Cao, X., Xu, Z., Guan, X., Dong, X., & Wang, C. (2021). Resilient operation of multi-energy industrial park based on integrated hydrogen-electricity-heat microgrids. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(57), 28855–28869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.229>

- Loh, P. C., Li, D., Chai, Y. K., & Blaabjerg, F. (2013). Hybrid AC-DC microgrids with energy storages and progressive energy flow tuning. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1533–1543. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2210445>
- Mehrizi-Sani, A., & Iravani, R. (2012). Constrained potential function - Based control of microgrids for improved dynamic performance. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), 1885–1892. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2197424>
- Men, Y., Ding, L., Zhang, J., & Lu, X. (2023). Secondary control fusion in inverter intensive dynamic microgrids for distribution system resiliency enhancement. *IEnergy*, 2(1), 9–13. <https://doi.org/10.23919/ien.2023.0011>
- Mirzaeva, G., & Miller, D. (2023). DC and AC Microgrids for Standalone Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(6), 7908–7918. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3299906>
- Muzzammel, R., Arshad, R., Raza, A., & Altalbe, A. (2024). Empirical design and comprehensive analysis of multiport converter in distributed generation enabled microgrids. *Energy Reports*, 12, 708–735. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.06.050>
- Ninad, N., Turcotte, D., & Poissant, Y. (2020). Analysis of PV-Diesel Hybrid Microgrids for Small Canadian Arctic Communities. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 43(4), 315–325. <https://doi.org/10.1109/CJECE.2020.2995750>
- Onu, U. G., de Doile, G. N. D., Zambroni de Souza, A. C., & Balestrassi, P. P. (2024). Economic sustainability and social inclusion in rural electrical grid design. *Utilities Policy*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.jup.2024.101779>
- Powell, J., McCafferty-Leroux, A., Hilal, W., & Gadsden, S. A. (2024). Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends. In *Energy Reports* (Vol. 11, pp. 5760–5785). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.05.051>
- Rahmati, K., Ebrahimi, R., & Darabad, V. P. (2023). Optimal dynamic multi-microgrid structuring for improving distribution system resiliency considering time-varying voltage-dependent load models. *Electric Power Systems Research*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109488>
- Rehman, T., Khan, M. A., Hussain, A., & Kim, H. M. (2024). Optimal sizing of multi-energy microgrid with electric vehicle integration: Considering carbon emission and resilience load. *Energy Reports*, 11, 4192–4212. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.001>
- Sen, R., & Bhattacharyya, S. C. (2014). Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy*, 62, 388–398. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.07.028>
- Silva, N., Fuinhas, J. A., Koengkan, M., Kazemzadeh, E., & Kaymaz, V. (2023). Renewable energy deployment in Europe: Do politics matter? *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03839-0>
- Universitatea Politehnică București, IEEE Power & Energy Society, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *Proceedings of 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe): Bucharest, Romania, 29 September-2 October 2019*.
- Universiti Tunku Abdul Rahman, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *ICSGCE 2018 : 2018 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies : 29 May - 1 June, 2018, Tunku Abdul Rahman, Sungai Long Campus, Kajang, Malaysia*.

- University of Buner. Department of Electronics & Computer Science, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (n.d.). *1st International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering (ICECCE 2019) : 24th - 25th July 2019, Swat, Pakistan.*
- Wang, Y., Wang, Z., & Sheng, H. (2024). Optimizing wind turbine integration in microgrids through enhanced multi-control of energy storage and micro-resources for enhanced stability. *Journal of Cleaner Production*, 444. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140965>
- Wu, P., & Mei, X. (2024). Microgrids energy management considering net-zero energy concept: The role of renewable energy landscaping design and IoT modeling in digital twin realistic simulator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103621>
- Xu, Y., Li, Y., Ren, L., Xu, C., Tang, Y., Li, J., Chen, L., & Jia, B. (2018). Research on the Application of Superconducting Magnetic Energy Storage in Microgrids for Smoothing Power Fluctuation Caused by Operation Mode Switching. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 28(4). <https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2808454>
- Xu, Y., Liu, C. C., Schneider, K. P., Tuffner, F. K., & Ton, D. T. (2018). Microgrids for service restoration to critical load in a resilient distribution system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(1), 426–437. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2591531>
- Yan, L., Sheikholeslami, M., Gong, W., Shahidehpour, M., & Li, Z. (2022). Architecture, Control, and Implementation of Networked Microgrids for Future Distribution Systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 10(2), 286–299. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000669>
- Yan, X., Abbas, D., Francois, B., & Bevrani, H. (2016, October 25). Day-ahead optimal operational and reserve power dispatching in a PV-based urban microgrid. *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe*. <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7695614>
- Yi, Z., Dong, W., & Etemadi, A. H. (2018). A unified control and power management scheme for PV-Battery-based hybrid microgrids for both grid-connected and islanded modes. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6), 5975–5985. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2700332>
- Zeng, Z., Zhao, R., Yang, H., & Tang, S. (2014). Policies and demonstrations of micro-grids in China: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 29, pp. 701–718). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.015>
- Zhang, R., Zhou, N., Meng, X., Chi, Y., Wang, Q., & Zhang, M. (2022). A new starting capability assessment method for induction motors in an industrial islanded microgrid with diesel generators and energy storage systems. *Electric Power Systems Research*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108099>
- Zhao, Z., Zhang, J., Yan, B., Cheng, R., Lai, C. S., Huang, L., Guan, Q., & Lai, L. L. (2020). Decentralized finite control set model predictive control strategy of microgrids for unbalanced and harmonic power management. *IEEE Access*, 8, 202298–202311. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034947>
- Zhou, W., & Tang, S. (2024). Is renewable energy development endangering power supply reliability? *Environmental Science and Pollution Research*, 31, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33204-1>

AmeliCA

Disponible en:

<https://portal.amelica.org/amei/amei/journal/690/6905375003/6905375003.pdf>

Cómo citar el artículo

Número completo

Más información del artículo

Página de la revista en portal.amelica.org

AmeliCA

Ciencia Abierta para el Bien Común

Edisson Javier Barbecho Jimbo,
Hassan David Ortega Escobar, Juan Carlos Velecela Chichay
**Inserción de micro-red de generación distribuida para
reducción de costos en una carga industrial**
**Insertion of Distributed Generation Micro-Grids for Cost
Reduction in an Industrial Load**

Ciencia e Ingeniería
vol. 12, núm. 2, e15708755, 2025
Universidad de La Guajira, Colombia
revistas@uniguajira.edu.co

ISSN-E: 2389-9484

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15708755>



CC BY-NC-ND 4.0 LEGAL CODE

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.