

Análisis de inserción de generación alternativa para una micro-red tipo edificio residencial en la ciudad de Quito

Alternative generation investment analysis for a microgrid type residential building in the city of Quito

Rodrigo Santiago Marcial Medina¹; José Luis Palacios Carrera²; Edwin Marcelo García Torres³
{rsmarcialm@gmail.com; palacios82jose@gmail.com; egarcia@ups.edu.ec}

Fecha de recepción: 1 de junio de 2020 – **Fecha de aceptación:** 8 de julio de 2020

Resumen: En el presente artículo se diseñó un sistema eléctrico híbrido entre generación renovable y convencional con conexión a la red eléctrica pública, para un edificio del tipo residencial en la ciudad de Quito, el mismo que cumple ser factible técnicamente y óptimo económicamente. El sistema fue modelado con la ayuda del software de optimización híbrido para energías renovables eléctricas Homer Pro, el sistema de Micro-Redes es amigable con el medio ambiente y beneficioso para el desarrollo sostenible ahorrando el 39.69% de costos de operación anual y reduce las emisiones de CO₂ en un 18,08% mensual. Se consideró para el diseño la utilización de un generador eléctrico a gas con CHP que permita suministrar al edificio agua caliente de uso sanitario, adicional se aprovechó el amplio espacio en la terraza para la utilización de paneles fotovoltaicos. Los resultados indican que el sistema es óptimo y adaptable para edificios residenciales utilizando el máximo los recursos naturales disponibles.

Palabras clave – *Homer, micro-red, optimización, sistema de energía híbrido, sistema fotovoltaico.*

Abstract: In this article, a hybrid electrical system was designed between renewable and conventional generation with connection to the public electricity grid, for a residential-type building in the city of Quito, which is technically feasible and economically optimal. The system was modeled with the help of Homer Pro hybrid optimization software for electrical renewable energy, the Micro-Grid system is friendly to the environment and beneficial for sustainable development, saving 39.69% of annual operating costs and reducing emissions CO₂ by 18.08% per month. The use of a gas-fired electric generator with CHP was considered for the design, which allows supplying the building with hot water for sanitary use. In addition, the large space on the terrace was used for the installation of photovoltaic panels. The results indicate that the system is optimal and adaptable for residential buildings using the maximum available natural resources.

Keywords – *Homer, micro-grid, optimization, hybrid energy system, photovoltaic system.*

¹Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.
Universidad Politécnica Salesiana.

²Ingeniero Eléctrico.
Universidad Politécnica Salesiana.

³Ingeniero Eléctrico, Magíster en Gestión de Energías.
Universidad Politécnica Salesiana.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la forma convencional de los sistemas eléctricos de potencia consiste en generar electricidad en grandes hidroeléctricas o plantas de generación térmica, en muchos de los casos dichas generadoras están distantes de las cargas (Rueda, David, Henao, Jaime, & Cardona, 2011), por lo que se necesita un sistema robusto de transmisión para transportar la energía generada hacia los centros de consumo, estos sistemas de transmisión normalmente operan a voltajes elevados 230 KV, 500KV, etc, con el propósito de disminuir las pérdidas de transporte. En la actualidad está creciendo lentamente pero a paso firme las Micro-Redes (MR) que son pequeñas redes o circuitos capaces de generar energía de muchas formas entre ellas las energías renovables (Pavan Kumar & Bhimasingu, 2015), existen dos tipos de MR; la primera se llama de modo isla o aislada, significa que solo opera de manera autónoma; la segunda se llama interconectada, esta quiere decir que se encuentra conectada a la red eléctrica pública, pero si la red falla por cualquier problema y se corta el suministro, la MR puede seguir funcionando independientemente de forma aisladas (Peralta Sevilla & Amata Fernández, 2013), dependiendo de la configuración puede funcionar indefinidamente y si la micro generación es a través de energías renovables se la considera limpia (de la Rubia, 2011), de esta manera permite aprovechar los recursos naturales adecuadamente y disminuir el impacto ambiental.

Se pueden enumerar varias ventajas de las MR por ejemplo: producir energía eficiente a bajo costo (Chiradeja, 2005), logra seguir funcionando si falla la red pública, reduce las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero (Ghoshl, Sun, & Zhang, 2012), aumenta la resiliencia local, esto quiere decir que de existir un corte de suministro eléctrico los usuarios no tendrán que esperar largos periodos de tiempo para volver a tener electricidad; al ser un sistema inteligente (Smart) las MR permite un funcionamiento autónomo y óptimo debido a la interconexión constante de sus controladores (Zakariazadeh, Jadid, & Siano, 2014), mismos que puede analizar en tiempo real los requerimientos de energía y dotar exactamente la demanda del edificio, con una óptima administración y generación, evitando pérdidas de energía en el proceso.

Las MR para ser consideradas como tales deben tener las siguientes características (de la Rubia, 2011): tener límites eléctricos claramente definidos, deben ser controladas por un controlador y un operador maestro, y la capacidad de generación debe exceder la carga máxima crítica si es aislada. También, las cargas de las MR se clasifican en dos tipos (Benalcazar & Garcia Torres, 2017): Las cargas fijas no se pueden modificar y operan en condiciones normales de funcionamiento, y las cargas flexibles que pueden ser ajustadas y responden a una señal de control.

El presente artículo busca optimizar a través de un sistema híbrido de MR del tipo residencia para el Edificio Versalles en la ciudad de Quito, se considera las necesidades energéticas del inmueble, así como la ventaja de ciertos recursos naturales para planificar el tipo de micro generación, adicional se analiza utilizar el calor remanente del proceso de generación eléctrica con gas natural para producir agua caliente sanitaria del tipo residencial, para la modelación y simulación se utilizará el software HOMER PRO. En base a los antecedentes y a través de varios escenarios propuestos, que busca como objetivo un sistema híbrido de MR confiable y rentable con menos emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero.

El documento tiene la siguiente organización: La sección II, trata sobre el análisis del problema y recursos; la sección III, presenta el análisis de resultados con métricas; y en la sección IV, conclusiones de la investigación.

ANÁLISIS DEL PROBLEMA Y RECURSOS

Se analizó la información del proyecto, el alcance y las características constructivas del edificio, es así como se dispone de los siguientes datos:

- **Ubicación**

Calle Selva Alegre y Versalles, Quito, Ecuador.
 Altura con respecto al nivel del mar: 2,829 metros.
 Coordenadas: -0.193771, -78.496532

- **Descripción del edificio**

El inmueble proyecta un área total de construcción de 4,671 m² en 9 pisos y 2 subsuelos como lo muestra la figura 1, con una distribución interna de 21 departamentos residenciales, 3 oficinas, 24 bodegas y 40 parqueaderos.



Figura 1. Fachada del Edificio Versalles

- **Demanda eléctrica**

Tabla 1. Demanda de diseño del Edificio Versalles

Cantidad	Descripción	Demanda unitaria (kW)	Demanda total (kW)	Demanda total (kVA)
21	Departamentos Residenciales	2.18	45.78	49.76
3	Oficinas	1.70	5.10	5.54
1	Servicios Generales	13.52	13.52	14.70
Demanda de diseño			64.40	70.00

En base a la normativa del código nacional vigente se determina la demanda del diseño del edificio Versalles como lo muestra la Tabla 1, teniendo como valor 64,40 kW.

• **Recursos naturales**

Los datos estadísticos de radiación solar y velocidad del viento se obtuvieron con el programa Homer, que en su versión pro permite descargar esa información, para ello se indicó la ubicación de la edificación por medio de las coordenadas, comparando los recursos disponibles para el sitio se llega a determinar: El promedio anual de la velocidad del viento para este sitio es de 2.34 m/s, por lo tanto, con dicho promedio no se puede considerar generación eólica; El promedio anual de radiación solar es de 4.25 kWh/m²/día como lo muestra la figura 2, el cual es apropiado para generar electricidad utilizando paneles fotovoltaicos.

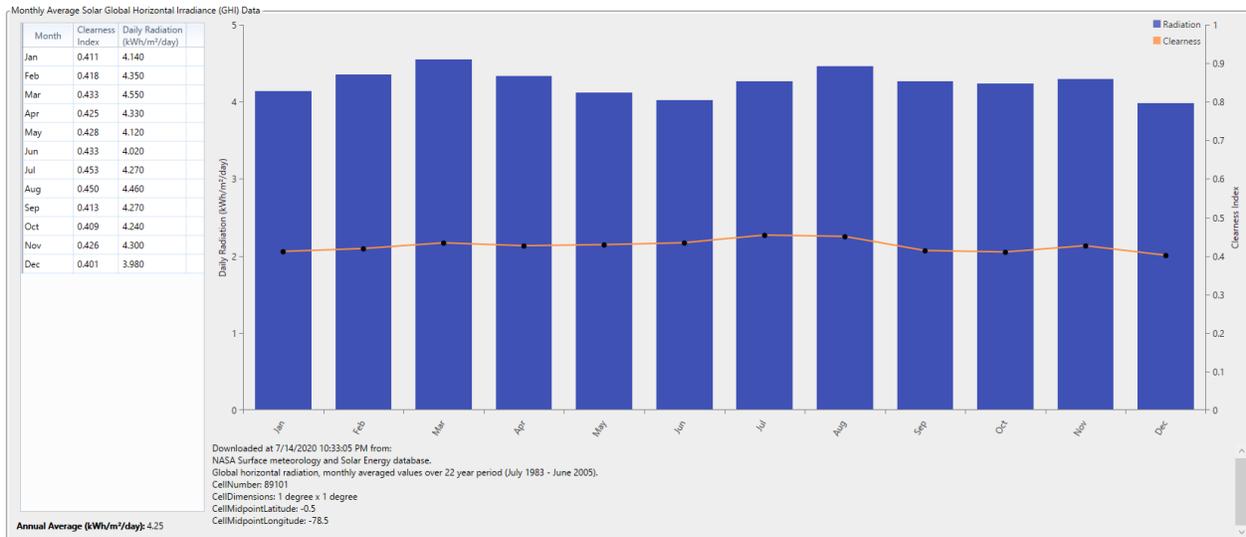


Figura 2. Recurso solar

Dentro del mercado nacional se encuentran paneles solares de 365Wp /24VDC monocristalino, el costo aproximado es de \$250.00, estos deben estar interconectados al mismo sistema a través de inversores DC-AC.

En Ecuador y en la mayoría países se utiliza el gas licuado de petróleo (GLP) para la cocción de alimentos, calentamiento de agua, climatización entre otros usos. Para el presente caso se propone utilizar un generador eléctrico a gas con un dispositivo CHP (Cooperation Heat and Power), el equipo CHP es capaz de transformar el combustible en calor y electricidad con la máxima eficiencia, para ahorrar recursos y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero, cabe resaltar que convierten el calor de desecho en energía útil que para el presente caso se lo utilizará para calentar el agua sanitaria residencial. Como resultado de ello se reducen el desperdicio y la huella de carbono, se obtiene hasta un 80% de eficiencia energética, esto sumado a la generación renovable y a la interconexión a la red eléctrica pública, se espera llegar a valores de carbono neutro.

Considerando que el generador eléctrico a gas a través del CHP dotará de agua caliente para uso residencial, como criterio de diseño se planifica que operará entre las 5 AM y las 11 PM, quedando el resto de tiempo fuera de servicio, en este periodo si se requiere se utilizará un controlador de carga térmica de 10 KW.

Ya que se tendrá un tanque de almacenamiento de gas, se propone la utilización del GLP a través de tuberías internas del edificio para uso residencial, es decir, para cocción de alimentos en cada uno de los departamentos, con ello se pretende disminuir la utilización de cocinas eléctricas o de inducción que con elementos considerados de alto consumo.

La empresa eléctrica local factura un costo aproximado para uso residencial en la ciudad de Quito de \$0.095 considerando la comercialización (ARCONEL, 2019), siempre y cuando este en un rango de consumo mensual entre 101 y 150 KWh, se consideraron estos valores por que la medición de cada departamento será independiente. La cantidad de emisiones de CO₂ de la red se obtuvo del documento Informe del Factor de Emisión de CO₂ 2018 del CENACE (CENACE, 2018), el cual muestra una participación del margen de operación y mantenimiento con un valor de 0.6004 Toneladas de CO₂/MWh equivalente a 600.40 g/kWh.

RESULTADOS

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de modelar varias alternativas se llegó a determinar el diagrama esquemático propuesto como se aprecia en la figura 3.

El software Homer considero las posibles combinaciones como se muestra en la Tabla 2, para formar la MR y comprueba la viabilidad de la configuración para cada sistema, imponiendo todas las restricciones especificadas por el usuario. Desde el resultado de la optimización, está claro que la configuración del sistema más beneficiosa es el conjunto del segundo ítem que consiste en: 96 paneles fotovoltaicos de 365Wp con una potencia instalada de 35.04 kW, un inversor DC-AC de 22.53 kW, un generador eléctrico a gas con CHP de 30 kW, un controlador de carga térmica de 10 kW y una interconexión a la red pública. El COE del sistema ha nivelado en 0.069 \$/kWh como se muestra en la tabla 2.

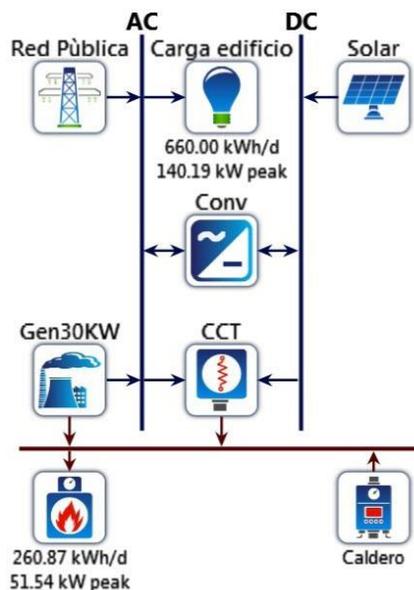


Figura 3. Esquemático de la microred del edificio Versailles

Tabla 2. Resultados de la optimización

Fotovoltaico (kW)	Generador con CHP (kW)	Red pública (kW)	Controlador de carga térmica (kW)	Inversor (kW)	Costo de Capital (\$)	Costo de Operación (\$/año)	NPC Costo Actual Neto (\$)	COE Costo de Operación de Energía (\$/kWh)
	30	999999	10		\$ 39,500.00	\$ 19,402.14	\$ 264,182.20	\$ 0.0746
35.04	30	999999	10	22.53	\$ 90,810.91	\$ 15,653.28	\$ 272,080.30	\$ 0.0692
		999999	10		\$ 2,000.00	\$ 25,956.21	\$ 302,580.00	\$ 0.0972
35.04		999999	10	22.53	\$ 53,310.92	\$ 22,178.94	\$ 310,149.20	\$ 0.0997

Es importante mencionar la inserción de las energías involucradas para abastecer la demanda del sistema como se muestra en la figura 4, la línea roja representa la generación fotovoltaica y se aprecia su máxima generación alrededor del medio día que se tiene la radiación solar más alta, la línea celeste representa el generador eléctrico a gas con CHP y debido a los bajos costos de generación funciona constantemente a su máxima capacidad, excepto a la madrugada que se restringe su operación, la línea verde representa la red eléctrica pública que abastece las deficiencias de la autogeneración para compensar la demanda, y la línea negra representa la sumatoria de todas las fuentes de energía. Se puede comparar con la curva de la demanda que se muestra en la figura 5, de darse el caso en ciertos momentos donde existe mas autogeneración que demanda en teoría se podría vender esos excedentes a la red.

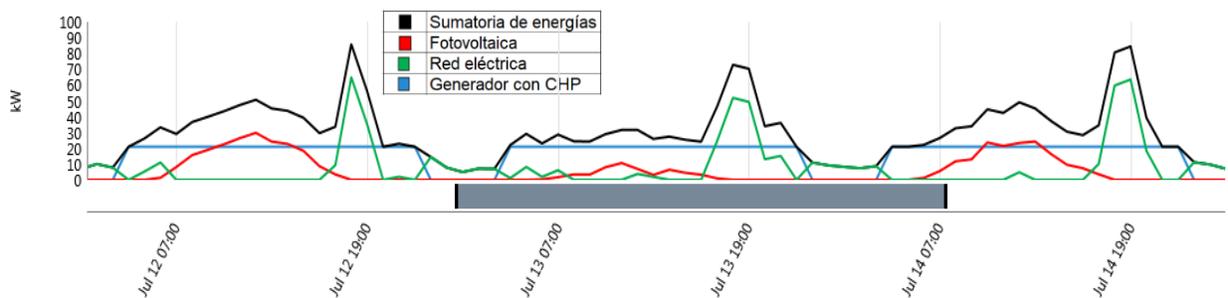


Figura 4. Inserción de energías de tres días

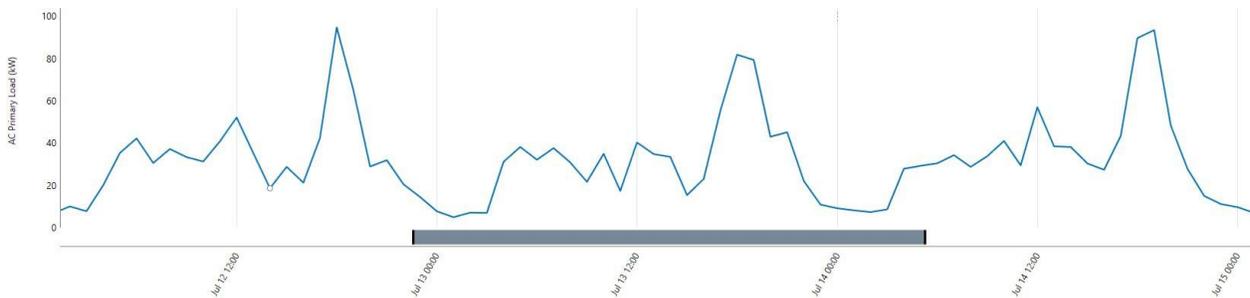


Figura 5. Carga demanda de tres días

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, la variabilidad de la generación fotovoltaica y la demanda diaria causa mayor inserción de la red pública al sistema, sin embargo, en la figura 6 se puede observar el promedio de aporte de cada tipo de generación. También en la tabla 3 se puede observar la capacidad de generación al año y su porcentaje, demostrando que con la configuración propuesta solo se requiere un 17% de la red eléctrica pública al año, esto quiere decir, que en más del 80% el edificio se abastece de energía eléctrica de los recursos propuestos.

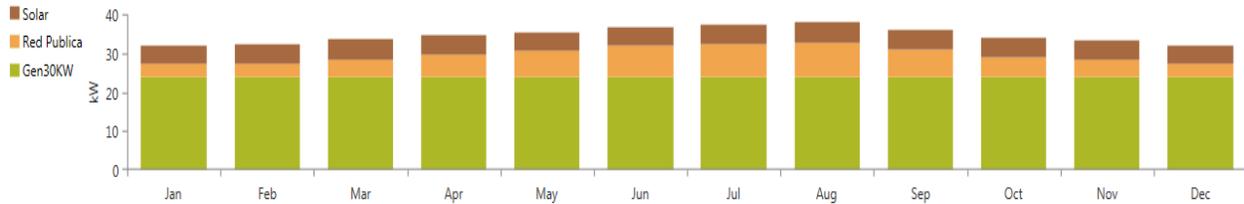


Figura 6. Producción eléctrica mensual por tipo de generación

Tabla 3. Resumen de la producción eléctrica anual

Producción	KWh/año	Porcentaje %
Fotovoltaica	43,448	14.30
Generador eléctrico a gas con CHP	208,050	68.60
Red eléctrica pública	51,671	17.00
Total	303,169	100.00

Un plus importante es que, con el sistema de la MR, se tiene un excedente de generación del 19.7% como se expone en la tabla 4, de existe un mercado eléctrico en el país se podría comercializar a la red y eso generaría ingresos para el edificio.

Tabla 4. Comparación de generación solo red vs Micro-Red

Detalle de Consumo	Solo con la Red		Sistema con Micro-Red	
	KWh/año	Porcentaje %	KWh/año	Porcentaje %
Carga del edificio	240,900	100	240,900	80.3
Venta a la red			59,108	19.7
Total	240,900	100	300,008	100

El flujo de caja nos permite determinar la inversión y los gastos producidos anualmente, si bien es cierto la inversión inicial es alta alrededor de \$ 90,810.92, el sistema tendrá un desarrollo sostenible ahorrando el 39.69% de costos de operación anual.

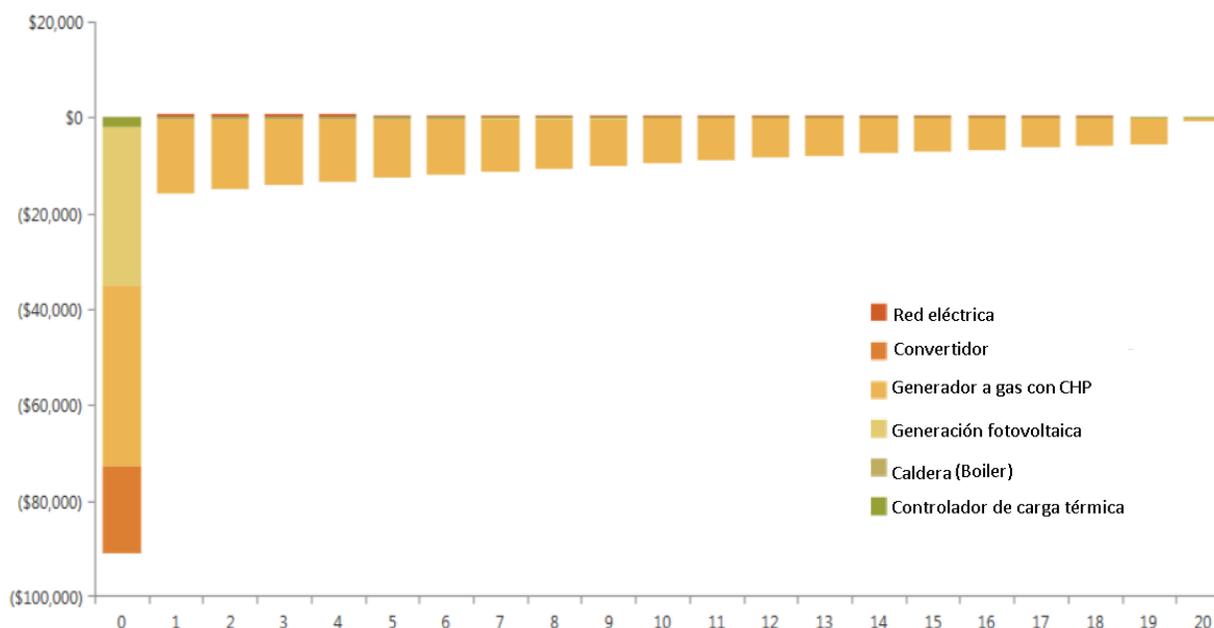


Figura 7. Flujo de caja por componente

En la tabla 5, se presenta la cantidad de emisiones de gas contaminantes, comparando el funcionamiento de la red pública con el sistema propuesto, la reducción es significativa considerando que con la configuración de la MR se produce al año un excedente de 59,108 kW, que se podría comercializar o inyectar a la red.

Tabla 5. Comparación de emisión de gases

Descripción	Red pública	Configuración propuesta	Unidad
Dióxido de carbono	166,652	154,993	kg/año
Monóxido de carbono	0	0.405	kg/año
Hidrocarburos no quemados	0	0.0454	kg/año
Materia particular	0	0.0309	kg/año
Dióxido de sulfuro	660	142	kg/año
Óxido de nitrógeno	323	70.4	kg/año

El sistema eléctrico interconectado del Ecuador para su operación genera emisiones de CO₂, por lo que se comparó las emisiones del escenario funcionando con la conexión únicamente a la red con el proyecto planteado. Para obtener los resultados de neutralizar el gas CO₂ se restó las emisiones provocadas considerando solo la conexión a la red eléctrica, menos las emisiones del escenario planteado y menos la energía vendida ya que es un excedente que se enviará a la red, utilizando la calculadora de equivalencia de gases de efecto invernadero de EPA (United States Environmental Protection Agency) (EPA, n.d.), para transformar los kWh enviados a la red a emisiones de CO₂, se obtiene:

$$59108KWh / \text{año} = 41792kgCO_2$$

$$CO_2\text{neutralizadoAnual} = 166652kgCO_2 - 154993kgCO_2 - 41792kgCO_2$$

Los valores anuales obtenidos se pasaron a valores mensuales:

$$CO_2\text{neutralizadoMensual} = 13887.667kgCO_2 - 12916.08kgCO_2 - 3482.667kgCO_2$$

Como todos los datos se encuentran en las mismas unidades, el resultado es:

$$CO_2\text{neutralizadoMensual} = -2511.08kgCO_2$$

Las emisiones que mensualmente se evitan arrojar al ambiente son 2511.08 kg de CO₂ equivalente al 18.08%, con lo que se puede decir que el proyecto es carbono neutro y con un margen a favor.

CONCLUSIONES

El estudio realizado a un edificio residencial en la ciudad de Quito basado en un sistema híbrido de MR, con una demanda de diseño de 64.4 kW presenta los siguientes beneficios:

- Se logra la configuración del sistema más económica con capacidad de generación fotovoltaica de 35.04 kW, un generador eléctrico a gas de 30 kW con CHP y contribución a la red pública.
- El costo de energía de dicho sistema es de \$ 0.0692 por cada kWh y es inferior al costo si solo estuviera conectada la red pública.
- Se observó que el sistema funciona satisfactoriamente con un rango de variación debido a la radiación solar.
- También, el sistema de MR es favorable al medio ambiente y beneficioso para el desarrollo sostenible ahorrando el 39.69% de costos de operación anual y reduce las emisiones de CO₂ en un 18,08%.
- El recurso que genera más energía es el generador eléctrico a gas con CHP, considerando las restricciones de funcionamiento en las horas de la madrugada, al año se producirá 208,050 kWh, con un consumo de combustible de 63,877 m³ equivalente a \$15,330.00; por lo tanto, el costo de generación térmica con gas es de \$0.0736/ kWh, inferior al costo de la red pública.
- Es importante resaltar que el generador a gas con CHP permitirá abastecer al edificio con agua caliente para uso sanitario, que representa un gran ahorro en comparación con otros métodos de calentar agua.

Cuando se desarrolla un proyecto y se trata el tema de su abastecimiento energético, es importante determinar los recursos disponibles, en el caso de Ecuador el GLP para uso residencial es muy accesible, al estar en la zona ecuatorial la radiación solar es fuerte, y la electrificación en el territorio ecuatoriano es muy alta, por tal motivo se consideraron estos recursos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCONEL. (2019). Pliego Tarifario Para Las Empresas Eléctricas de Distribución - Servicio Público de Energía Eléctrica. *Resolución Nro. ARCONEL – 035/19, 19*, 1–19.
- Benalcazar, B., & Garcia Torres, E. M. (2017). *Óptima Respuesta a La Demanda Para Estaciones De Carga De Vehículos Eléctricos Con Alta Incertidumbre Considerando El Perfil De Voltaje En La Red De Distribución*. Universidad Politecnica Salesiana.
- CENACE. (2018). *Informe del Factor de Emisión de CO2 2018*. 14.
- Chiradeja, P. (2005). Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis. *2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/TDC.2005.1546964>
- De la Rubia, J. L. (2011). Estudio sobre el estado actual de las Smart Grids. *Universidad Carlos III de Madrid*. Retrieved from http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12120/PFC_Javier_Lorente_de_la_Rubia.pdf?sequence=1
- EPA. (n.d.). greenhouse-gas-equivalencies-calculator @ www.epa.gov. Retrieved July 20, 2020, from <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Ghoshl, S., Sun, X. A., & Zhang, X. (2012). Consumer Profiling for Demand Response Programs in Smart Grids. *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2012.6303309>
- Pavan Kumar, Y. V., & Bhimasingu, R. (2015). Renewable energy based microgrid system sizing and energy management for green buildings. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 3(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0101-7>
- Peralta Sevilla, A. G., & Amata Fernández, F. (2013). Evolución de las Redes Eléctricas hacia Smart Grid en Países de la Región Andina. *Revista Educación En Ingeniería*, 8, 1–14.
- Rueda, V. M., David, J., Henao, V., Jaime, C., & Cardona, F. (2011). *ELECTRICIDAD USANDO MODELOS NO LINEALES RECENT ADVANCES IN LOAD FORECASTING USING NONLINEAR MODELS*. 36–43.
- Zakariazadeh, A., Jadid, S., & Siano, P. (2014). Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 63, 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.037>