



14^{to}. Congreso Internacional de Educación Superior Universidad 2024

Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”

LA CIENCIA UNIVERSITARIA Y EL MODELO DE LAS CUATRO HÉLICES/. CASO DE ESTUDIO: DISEÑO DE SISTEMA ELÉCTRICO DE CAYO CARENAS

Autores: Dr. C Zaid Garcia Sanchez¹, M Sc Isidro Fraga Hurtado², Dr. C Julio Gómez Sarduy³, M Sc Julio Olvera Gambino⁴

¹ zgarcia@ucf.edu.cu, Director del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente

² ifraga@ucf.edu.cu, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente

³ jgomez@ucf.edu.cu, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente

⁴ Centro de Innovación y Gestión para el Desarrollo Local

Resumen

El trabajo desarrollado tributa a las tres dimensiones del desarrollo sostenible, la social, la económica y la medioambiental y se basa en el modelo de las cuatro hélices de la innovación debido a la interacción entre la academia, los gobiernos, la empresa y la sociedad. El objetivo de este trabajo es diseñar una microred eléctrica que permita dotar a una población vulnerable y excluida de un sistema eléctrico capaz de abastecerlos durante 24 horas y que tribute al desarrollo económico de sus habitantes, al mejoramiento de las condiciones de vida y además esté en consonancia con los objetivos de desarrollo sostenible. El trabajo evaluó cuatro alternativas de solución a la red eléctrica de Cayo Carenas, estimando el consumo eléctrico de las viviendas, calculando la alimentación a cada una de las ellas considerando, además, el crecimiento prospectivo de la demanda. Se diseñó una microred eléctrica que permita extender el servicio las 24 horas del día lo que contribuye al desarrollo local del asentamiento. La variante tres permite servir la demanda durante todo el día, reduce la participación del grupo de combustión interna y permite la carga de las baterías durante el horario de máximo aprovechamiento solar lo que reduce los costos de operación y garantiza un control adecuado de la frecuencia.

Palabras claves: Modelo de innovación de tripe hélice, Cayo Carenas, fuentes renovables de energía, baterías.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico y social de un país está estrechamente ligado al incremento de las actividades de innovación tecnológica, lo que representa un crecimiento acelerado en países con altas tasas de innovación y economías rezagadas en aquellos donde la innovación tecnológica no alcanza aún valores apreciables. En este sentido, el modelo de innovación de triple hélice juega un papel fundamental en el impacto de la ciencia en el desarrollo del país, la relaciones Universidad-Empresa-Gobierno son imprescindibles para lograr un resultado científico que se traduzca en

innovación y posteriormente se logre su generalización (Velázquez, 2016). Este trabajo en sus inicios se basó en este modelo, sin embargo, la participación activa de la sociedad civil hizo que se mutara de un modelo triple hélice a un modelo de cuádruple hélice.

En Cuba, desde la máxima dirección del país se apuesta por la aplicación de la ciencia, la tecnología y la innovación al desarrollo económico social (Díaz-Canel, 2021). En este contexto, las universidades cubanas juegan un papel determinante al ser los centros que mayor producción científica, sin embargo, los resultados de la academia deben interactuar de manera armoniosa con los gobiernos y la empresa en aras de su generalización. El trabajo realizado vincula los conocimientos de la academia en el diseño y explotación de sistemas eléctricos, la gestión e interés del gobierno del municipio Cienfuegos, la experticia de la Empresa de Electricidad de Francia, de la Dirección de Fuentes Renovables de Energía de la Empresa Eléctrica de Cienfuegos, la voluntad de la MiPYME Ecosur y el conocimiento de la comunidad de Cayo Carenas. Todos estos actores se integran para diseñar el sistema eléctrico de esta comunidad, principal problema hoy de su población.

Cayo Carenas representa el único islote habitado en medio de la Bahía de Cienfuegos. Una isla de 20 hectáreas donde en la primera mitad del siglo pasado llegaron a edificarse cerca de 40 viviendas y vivir casi 200 personas. Sus condiciones naturales, con sus playas de arena blanca y sus aguas transparentes del mar Caribe, convirtieron a este cayo en uno de los sitios preferidos por las familias más pudientes de Cienfuegos para vacacionar. Las deterioradas condiciones actuales de la comunidad que habita en Cayo Carenas han conllevado a una marcada migración de sus habitantes por lo que en estos momentos se encuentra conformada por 10 viviendas y solo 21 habitantes, el 10% de la población que habitaba a mediados del año pasado. La actividad económica fundamental es la pesca y los servicios, los cuales se han deteriorado en consecuencia a las malas condiciones de vida.

La voluntad del Gobierno del municipio Cienfuegos es revertir esta grave situación, apoyados en la agencia Cuba-Cooperación Francia se propone diseñar soluciones amigables con el medio ambiente que permitan un crecimiento económico y social de esta isla. Hoy el principal aspecto a solucionar es el servicio de electricidad, el cual es solo de 10 horas al día y mediante tecnologías contaminantes.

La solución analizada se basa en el uso de fuentes renovables de energía (FRE), la penetración de estas fuentes en la matriz energética de los Sistemas Eléctricos (SEs) marca el desarrollo futuro de estos. Lo anterior hace que disminuya la participación de unidades convencionales en el cubrimiento diario del gráfico de carga (Godoy et al, 2022), (Gallego et al., 2017), (Atwa & El-Saadany, 2010), (Delille et al., 2012). De manera general, las FREs producen múltiples beneficios para los SEs y al Medio Ambiente, sin embargo, algunas de ellas como la solar fotovoltaica y eólica tienen una característica intermitente de generación lo que puede conducir a fluctuaciones en la frecuencia del sistema (Betancourt et al, 2020), (Esmaili et al, 2013), (IEEE, 2008), (Saleh et al., 2019), (Saleh et al, 2020), (Saleh et al, 2017), (Saleh, Aldik and Castillo-Guerra, 2017). Lo anterior define a la inestabilidad de frecuencia como el fenómeno más peligroso en la operación de pequeños sistemas aislados.

A diferencia de los sistemas aislados, los grandes sistemas están caracterizados por la disposición de grandes unidades de generación, cuentan con redes de transmisión fuertemente interconectadas y operan con valores de reserva rodante que garantizan que la estabilidad de frecuencia no sea un fenómeno peligroso en la operación. En estos SEs se presta una mayor atención a los problemas asociados al colapso de voltaje (García Z, 2011), los problemas de inestabilidad de ángulo transitoria y

recientemente a los problemas de inestabilidad de ángulo de pequeñas perturbaciones.

El objetivo de este trabajo es diseñar el sistema eléctrico de Cayo Carenas a partir de la actualización de los datos de la demanda y la definición de un módulo eficiente, se diseña la distribución eléctrica para cada una de las viviendas y se determina el mix de generación que garantice un servicio eléctrico eficiente.

DESARROLLO

Existen cuatro etapas bien definidas en el comportamiento de la frecuencia debido a un desbalance de la generación y la carga. Estas etapas se muestran de manera gráfica en la figura 1. La primera etapa es la respuesta inercial de las unidades, donde la energía cinética almacenada en las unidades rotatorias asume parte del desbalance de potencia y por tanto contiene la desviación de la frecuencia. La segunda etapa es el control primario de frecuencia, donde comienza la actuación de los gobernadores de velocidad de las unidades sincrónicas con el objetivo de restablecer y estabilizar la frecuencia a un valor cercano al valor nominal. La diferencia entre el valor de frecuencia nominal y el valor al cual se estabiliza la misma se denomina el error de estado estable de frecuencia. Estas dos etapas anteriores condicionan el valor mínimo de frecuencia (nadir) en la respuesta del SEP, este punto es relevante para la estabilidad de frecuencia del SEP.

Posteriormente ocurre el control secundario de la frecuencia que permite recuperar la frecuencia a su valor nominal minutos después de la ocurrencia de la perturbación. La cuarta etapa es el control terciario, el cual depende de las características de la matriz de generación del SEP pues depende de la posibilidad de tener unidades de arranque rápido que permitan restablecer las reservas de control secundario en la red.

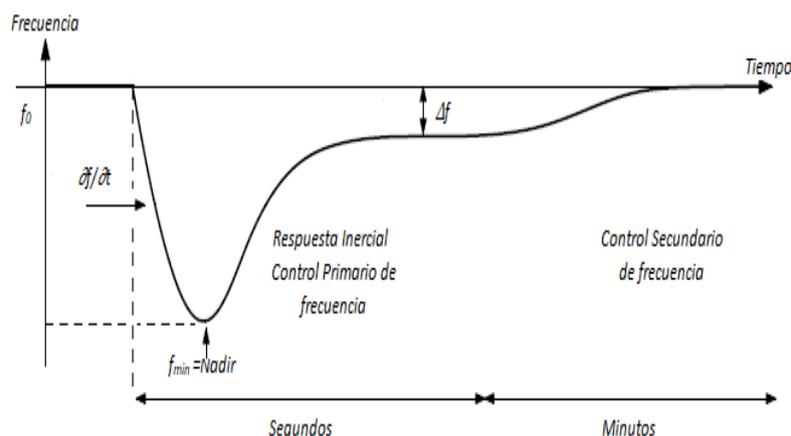


Figura 1. Etapas del comportamiento de la frecuencia ante pérdida de generación. (Godoy et al, 2022),

Comportamiento de la frecuencia en Sistemas Eléctricos Aislados

Los sistemas eléctricos aislados basan usualmente su generación en motores de combustión interna a base de diésel. Estas unidades tienen la particularidad de ser de baja constante H (IRENA, 2018) y además cubren generalmente un alto porcentaje de la demanda por lo que la pérdida de estas unidades puede conllevar a un colapso total del sistema.

Lo anterior se acentúa con la inserción de FRE con tecnologías desacopladas de la red a través de convertidores que hace que el SEP disminuya aún más la energía almacenada en las unidades sincrónicas.

Soluciones a estas problemáticas hay varias, recientemente el uso de batería contribuye a un mejoramiento de la estabilidad de frecuencia, proporcionando al sistema control primario de la frecuencia o inercia virtual.

Modelado de sistemas de baterías

El modelado de la batería es uno de los aspectos importantes en los estudios de estabilidad y control de frecuencia. Existen modelos bien detallados en la bibliografía, algunos considerando el desempeño de la batería solo en la respuesta inercial y otros considerando su influencia en la respuesta inercial y el control de frecuencia primario.

Modelo de potencia vs. Frecuencia

La Figura 2 muestra el diagrama de bloques típico del control de frecuencia de la batería. Una vez realizada la medición de frecuencia, se produce una salida de potencia proporcional al valor del valor de frecuencia siempre que este valor exceda el ancho de banda muerta. Existen limitadores de potencia que garantizan que no se supere el valor máximo de potencia a entregar.

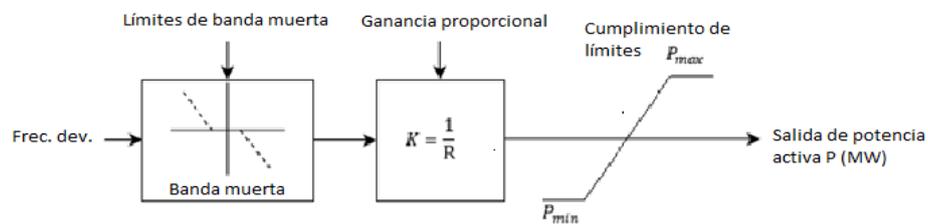


Figura.2 Diagrama de bloques del control de potencia de la batería. (Betancourt et al, 2020)

La siguiente figura muestra la característica F vs P que describe la entrega de potencia en función del valor de frecuencia en el sistema eléctrico.

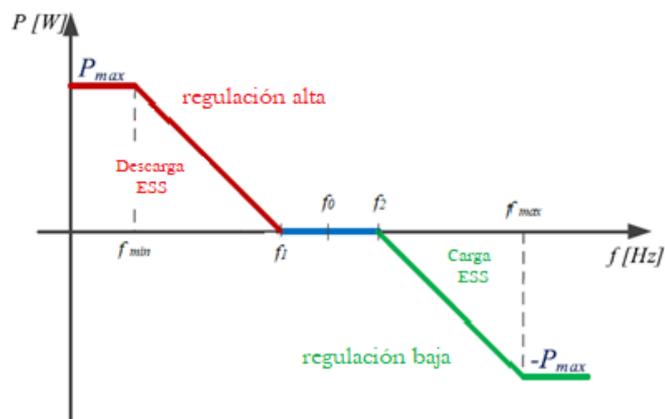


Figura 3 Característica de control de potencia entregada en función de la frecuencia de la red. Sistema de almacenamiento de energía (ESS), carga y descarga. (Betancourt et al, 2020)

Análisis del caso base para la alimentación mediante sistemas híbridos de Cayo Carenas. Estudio de flujo de potencia.

El sistema bajo estudio está compuesto por 21 viviendas, las cuales se alimentan solamente en determinados horarios mediante un generador diésel de 10 kW de potencia. Se realizó una estimación de la demanda eléctrica en función de un módulo a entregar para mejorar las condiciones de vida de la población del islote. La siguiente figura muestra el comportamiento de los flujos de potencia por los alimentadores del Cayo según la distribución realizada.

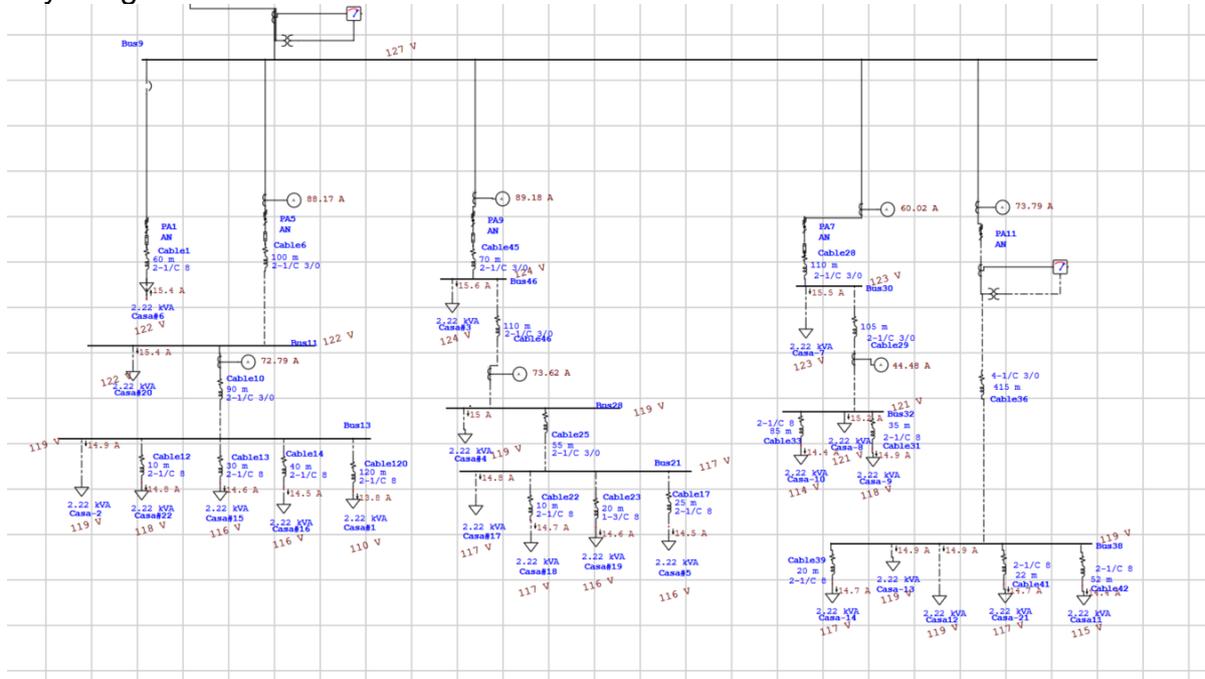


Figura 4. Flujo de potencia por los alimentadores. Elaboración propia

La siguiente figura muestra una distribución espacial del sistema de distribución propuesto para la alimentación de cada una de las viviendas.

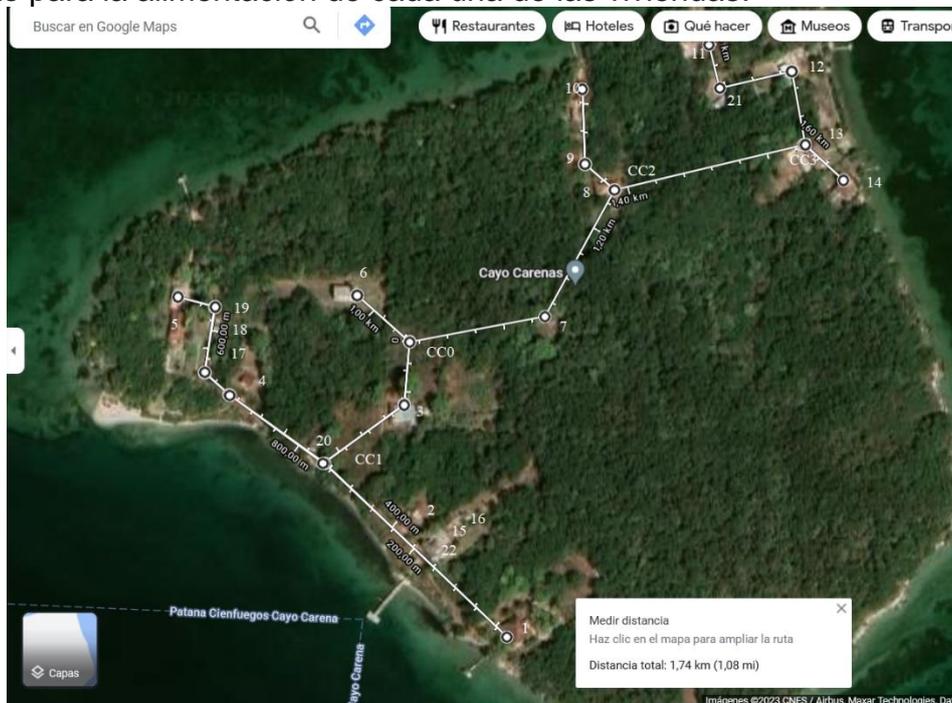


Figura 5. Disposición física de la alimentación de cada uno de los clientes. Elaboración propia

Es importante señalar que el objetivo principal de esta inversión es mejorar sustancialmente las condiciones de vida de la comunidad por lo que indispensablemente es necesario la adquisición de equipos eléctricos. Todos los casos tienen en común el uso de:

1. ventilador,
2. televisor,
3. cargadores de celular,
4. dos luminarias led (modelos 20W).

Caso 1: Incluyendo cocción

El primer caso tiene en cuenta la concepción de un sistema híbrido solo basado en generación solar fotovoltaica y la generación diésel. La siguiente figura muestra el esquema de generación propuesto para esta variante.

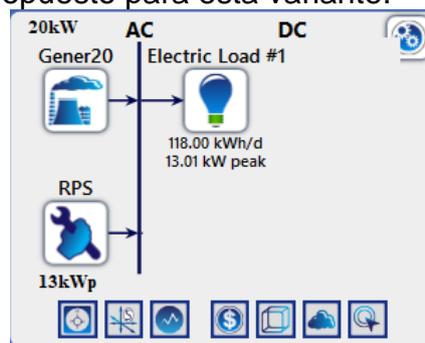


Figura 6. Esquema de generación variante 1. Elaboración propia

Los resultados de la simulación del comportamiento se muestran en la figura 7. Este caso tiene una particularidad que atenta contra su implantación y es que el grupo diésel debe trabajar 21 horas al día.

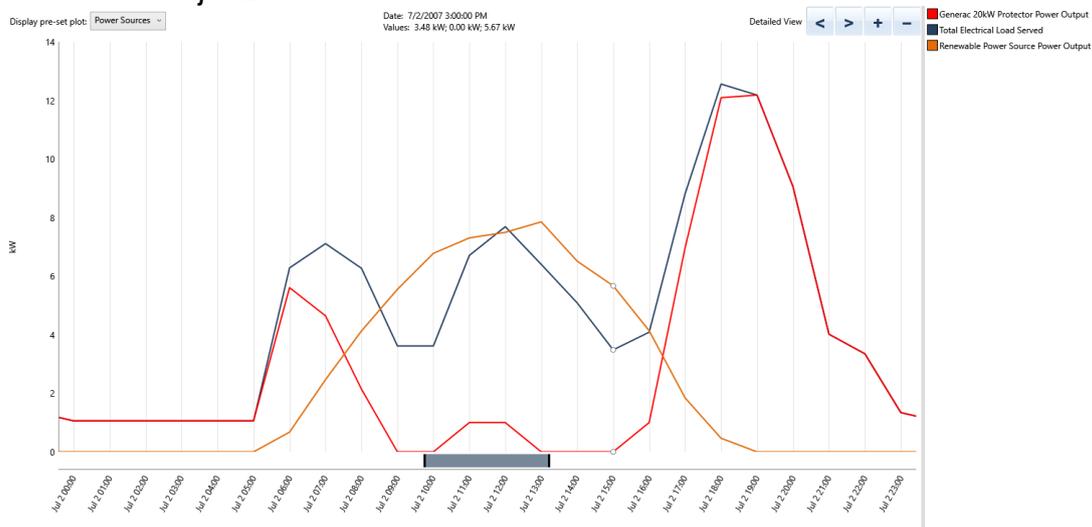


Figura 7. Comportamiento de la generación para la variante 1. Elaboración propia

Para este caso pueden enumerarse las siguientes desventajas:

1. Horas de trabajo del grupo Diesel (21 h/día)
2. Consumo de combustible (40 L/día)
3. Pérdidas de potencia fotovoltaica en determinado horario del día

Caso 2 Incluyendo cocción y sistemas de baterías

Este caso coincide en demanda con el caso anterior, se incorpora en el sistema híbrido el uso de sistemas de almacenamiento.

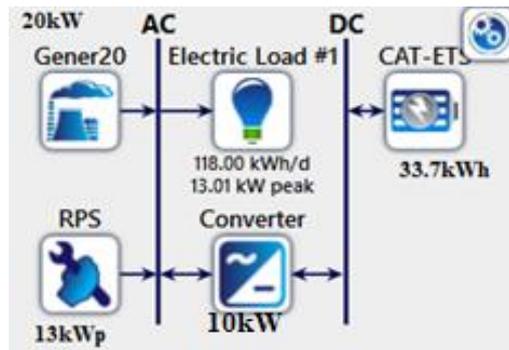


Figura 8. Esquema de generación variante 2. Elaboración Propia

Los resultados de la simulación del comportamiento se muestran en la figura 9. Obsérvese el comportamiento del grupo electrógeno que reduce su tiempo de trabajo a 7 horas diarias. La operación de la batería cubre las horas de la madrugada y la noche trabajando 8 horas seguidas, existe algo importante a considerar, durante el horario de mayor participación solar, existe disponibilidad en la batería para asumir las variaciones aleatorias de la generación solar.

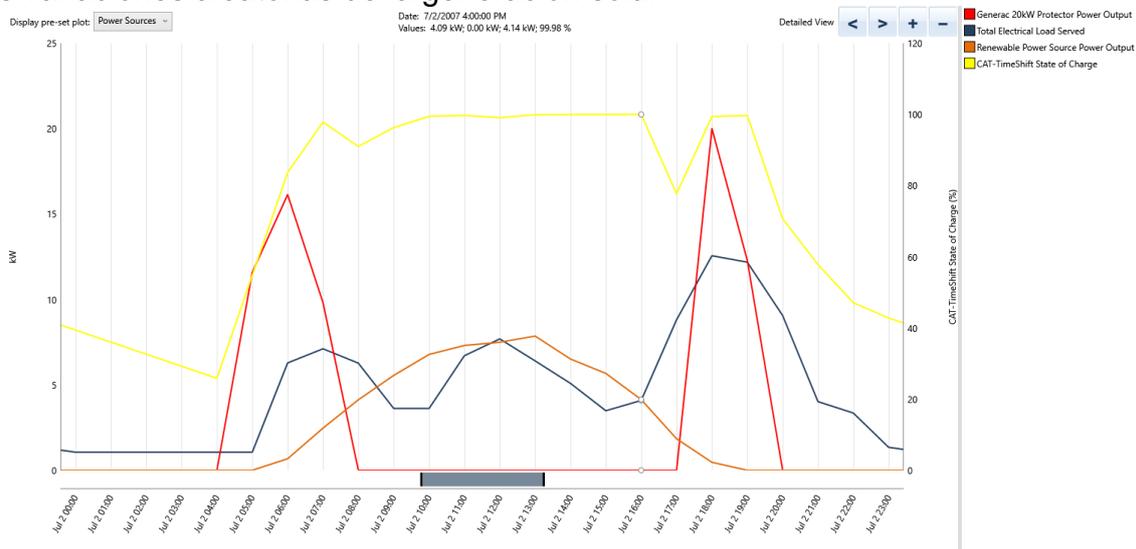


Figura 9. Comportamiento de la generación para la variante 2. Elaboración propia
Esta variante presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

1. Consumo de diésel (28 L/día)
2. Horas de trabajo (7 h/Día)
3. Disponibilidad de control primario y secundario de frecuencia.

Desventajas:

1. Mayor inversión inicial

Caso 3: Incluyendo refrigeración, sin cocción y almacenamiento

El esquema de generación se muestra en la siguiente figura, nótese que es igual al caso anterior, solo varía la característica y valor de la demanda al no tener cocción.

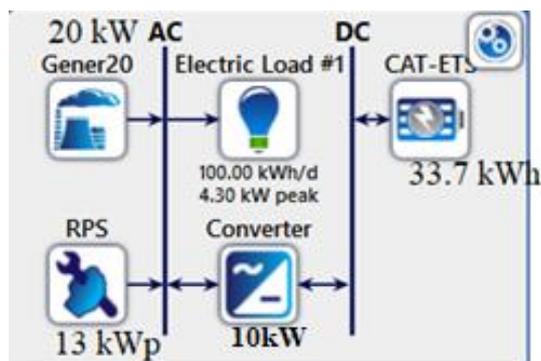


Figura 10. Esquema de generación variante 3. Elaboración propia

Los resultados de la simulación del comportamiento se muestran en la figura 11. Obsérvese el comportamiento del grupo electrógeno que reduce su tiempo de trabajo una hora con respecto a la variante 2 y 15 horas diarias a la variante 1. La operación de la batería cubre las horas de la madrugada y el pico nocturno, cargándose con energía solar principalmente, existe algo importante a considerar, durante el horario de mayor participación solar, existe disponibilidad en la batería para asumir las variaciones aleatorias de la generación solar.

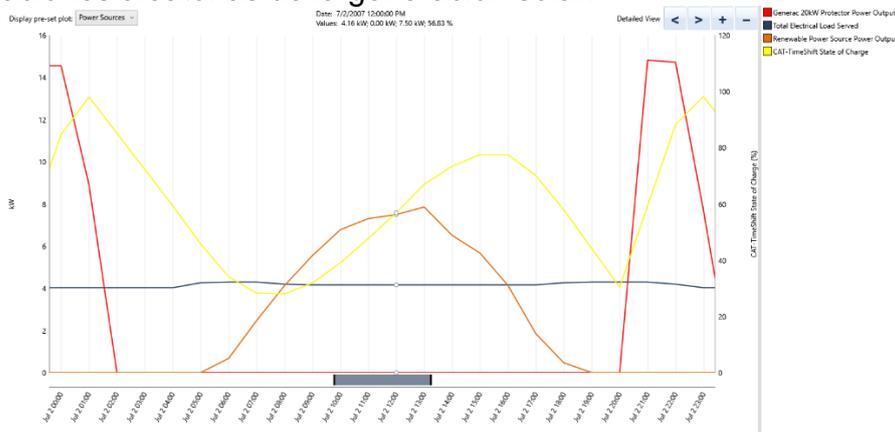


Figura 11. Comportamiento de la generación para la variante 3. Elaboración Propia
Esta variante presenta ventajas con respecto a las anteriores que la hacen atractiva para su implantación

Ventajas:

1. Consumo de diésel (24 L/día)
2. Horas de trabajo (6 h/Día)
3. Disponibilidad de control primario y secundario de frecuencia.

Desventajas:

2. Mayor inversión inicial (Menor que la variante 2 pues no considera equipos de cocción)

Caso 4: incluyendo cocción, con almacenamiento, incluyendo refrigeración

El esquema de generación se muestra en la siguiente figura, nótese que es igual al caso anterior, solo varía la característica con respecto al caso 3 debido a la utilización de la cocción. Es válido señalar que esta es la variante de mayor confort brinda a los habitantes.

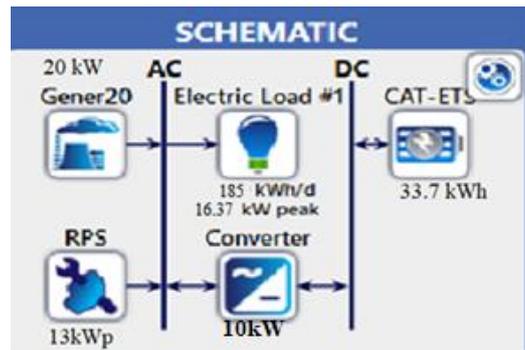


Figura 12. Esquema de Generación caso 4. Elaboración propia

Los resultados de la simulación del comportamiento se muestran en la figura 13. Obsérvese el comportamiento del grupo electrógeno que incrementa su tiempo de trabajo 5 horas con respecto a la variante 2 y 6 horas con respecto a la variante 3. La operación de la batería cubre parte de las horas de la madrugada, el pico diurno y las primeras horas de la noche, cargándose con energía principalmente con energía proveniente del grupo electrógeno, encareciendo la operación.

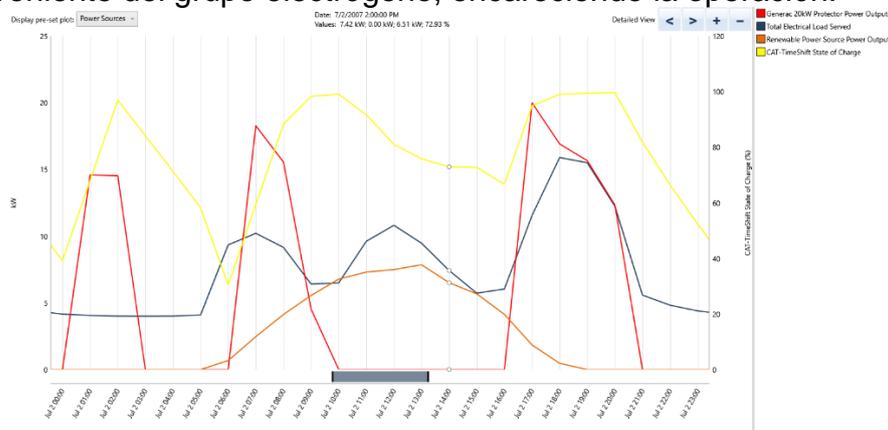


Figura 13. Comportamiento de la generación para la variante 4. Elaboración propia

Ventajas:

1. Disponibilidad de control primario y secundario de frecuencia.

Desventajas:

1. Mayor inversión inicial
2. Consumo de diésel (50 L/día)
3. Horas de trabajo (12 h/Día)

Conclusiones

En el trabajo se realiza una evaluación del sistema eléctrico del sistema aislado Cayo Carenas así como un diseño del sistema de alimentación futuro, se arriban a las siguientes conclusiones:

1. Se realizó una actualización de los consumos de las viviendas del cayo, proponiéndose un módulo para el mejoramiento de las condiciones de vida de la población
2. Se diseñó el sistema de distribución del cayo garantizándose condiciones de voltaje adecuadas para cada una de las viviendas del lugar.
3. Se propone un sistema híbrido de generación que incluye el uso de energía solar fotovoltaica, el incremento de la disponibilidad de generación diésel y el uso de sistemas de almacenamiento a base de baterías.
4. De las variantes analizadas, la variante 3 garantiza el mejoramiento de las condiciones de vida de la población y la operación adecuada del sistema

teniendo un menos impacto para el medio ambiente pues reduce el consumo de diésel solamente a 24 litros al día.

Referencias

- Atwa, Y. M.; El-Saadany, E. F. (2010). Optimal Allocation of ESS in Distribution Systems with a High Penetration of Wind Energy, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 25, No. 4, pp. 1815–1822.
- Betancourt, O. A.; García, Z.; Saleh, A.; Hill, E. F.; Zhao, X.; Sánchez, F. P. (2020). Battery Energy Storage Systems for Primary Frequency Regulation in Island Power Systems. *Proceeding 2020 IEEE/IAS 56th Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, Las Vegas, NV, USA, 2020, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICPS48389.2020.9176784.
- Delille, G.; Franois, B.; Malarange, G. (2012). Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System's Inertia. *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 4, pp. 931–939.
- Díaz-Canel Bermúdez M. M y Delgado Fernández, M. (2021). Gestión de gobierno orientado a la innovación. Contexto y caracterización del modelo. *Universidad y Sociedad*, 13(1). 6-16. Recuperado a parti de <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1892>.
- Gallego, Y.; Casas, L.; García, Z.; Rivas, Y. (2017). Impacto de la implementación de paneles fotovoltaicos en el sistema eléctrico Cayo Santa María. Vol 38, no 2 issn: 1815-5901.
- García Z, (2011) Metodología para estudios estáticos de la estabilidad de tensión. Tesis para optar por el grado de Doctor en Ciencias Técnicas. UCLV
- Godoy, M.; García, Z.; Hernández, H.; Cueto, J.A.; Silva, J. I.; Crespo, G. (2022). Frequency response analysis under faults in weak power systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering IJECE*. Vol 12, No 2, pp 1077-1088. Abril 2022. <http://doi.org/10.11591/ijece.v12i2.pp1077-1088>.
- Gómez Rodríguez, M. A., Gómez Sarduy, J. R., Lorenzo Ginori, J. V., Fonte González, R., & García Sánchez, Z. (2021). Pronóstico de la generación eléctrica de sistemas fotovoltaicos. Un inicio en cuba desde la universidad. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(1), 253-265.
- IEEE (2008). Application Guide for IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547.2-2008, 2008.
- IRENA. (2013). *SMART GRIDS AND RENEWABLES A Guide for Effective Deployment* (Issue November). www.irena.org
- IRENA. (2018) "Transforming Small-Island Power Systems" Technical Planning Studies for Integration of Variable Renewables.
- Kundur et al. (2004) Classification and definition of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. *IEEE transactions on Power Systems*.
- Saleh, S. A.; Pijnenburg, P.; Castillo-Guerra, E. (2017). Load Aggregation From Generation-Follows-Load to Load-Follows-Generation. *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 53, No. 3, pp. 833–842.
- Saleh, S. A.; Aldik, A. A.; Castillo-Guerra, E. (2017). Distributed Energy Storage Unit-Based Active Demand Response for Residential Loads. *Proceeding of the 52nd IEEE IAS Annual Meeting Conference (IAS'17)*, Cincinnati, OH, October 2017.
- Saleh, A.; Meng, R. J.; García, Z.; Betancourt, O. A.; Ozkop, E. (2019). The Selection of Locations and Sizes of Battery Storage Systems Using the Principle

Component Analysis and Center-of-Inertia. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 1-10S. doi: 10.1109/IAS.2019.8911980.

Saleh, A.; Ozkop, E.; Meng, R. J.; García, Z.; Betancourt, O. A. (2020). Selecting Locations and Sizes of Battery Storage Systems Based on the Frequency of the Center of Inertia and Principle Component Analysis. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 2, pp. 1040-1051, March-April 2020/S. doi: 10.1109/TIA.2019.2960003.

Velázquez-Juárez, J., Valencia-Pérez, L. y Peña Aguilar, J (2016) El papel del modelo de la triple hélice como sistema de innovación para aumentar la rentabilidad de una PYME comercializadora. Revista CEA, 2 (3), 101-112.