

Diseño de Sistema de Almacenamiento de Aire Comprimido para la Generación Distribuida en Zonas Residenciales de México

Design of Compressed Air Storage Energy System for Distributed Generation in Residential Area of Mexico

Bristol Echeverria Carlos Abraham¹, Ruelas Amezcua Jaime Alonso¹, González López Juan Miguel*¹, Jiménez Betancourt Ramón O¹, Pérez González Marco Antonio¹.

¹Universidad de Colima, Facultad de Ingeniería electromecánica, Km 20, carretera Manzanillo-Cihuatlán, Manzanillo, Colima, México, C.P.28864.

Autor para la correspondencia: S González López Juan Miguel; jgonzalez71@uacol.mx

Resumen

Los sistemas de almacenamiento de energía están teniendo un auge significativo en la actualidad para mitigar algunos efectos negativos ocasionados en el sistema eléctrico de distribución y de potencia por la intermitencia en la generación de energía de los sistemas alternativos principalmente por el uso de la fotovoltaica y eólica. Debido a esto se han analizado diversas formas de almacenar energía para utilizarse cuando se presenten estas intermitencias, entre estas otras formas de almacenamiento se encuentran la química, térmica, electroquímica y mecánica. Los sistemas de almacenamiento de energía mecánico por aire comprimido se han analizado a gran escala y recientemente se han hecho estudios a pequeña escala. En este trabajo se presenta una idea de utilizar estos sistemas en el contexto de generación distribuida y utilizarlas en zonas residenciales de acuerdo a las características de construcción de las casas de México. Por tal motivo se presentan todos los elementos de un sistema micro-CAES en SOLIDWorks y se presenta la propuesta de cómo se integrarían en la construcción de zonas residenciales. Adicionalmente se realizan algunas pruebas de almacenamiento en un tanque con aire comprimido.

Palabras clave: Micro-CAES, Energías Renovables, Almacenamiento de energía.

Abstract

Energy storage systems are currently studied to mitigate some negative effects caused in the electricity distribution and power system by the intermittency in the generation mainly due to the use of photovoltaics and wind. Due to this, various ways of storing energy have been analyzed to use them when these intermittencies occur; among these other forms of storage are chemical, thermal, electro-chemical, and mechanical. Compressed air mechanical energy storage systems have been analyzed on a large scale, and small-scale have recently analyzed. This paper presents an idea of using these systems in the context of distributed generation and using them in residential areas according to the construction characteristics of houses in Mexico. For this reason, all elements of a micro-CAES system are presented in SolidWorks. The proposal of how they would be integrated into the construction of residential areas is presented. Additionally, some storage tests are performed in a tank with compressed air.

Key words: Desertion, diagnosis, industrial engineering.

DOI 10.46588/invurnus.v17i1.73

Recibido 16/09/2022

Aceptado 22/10/2022

Publicado 31/12/2023

Introducción

Las fuentes de energía renovable tienden a ser intermitentes por naturaleza, y el suministro de energía eléctrica generado a partir de estas fuentes renovables fluctuaría con las condiciones ambientales, por lo que provoca serios problemas para la estabilidad y confiabilidad de la red eléctrica. Por ello, se ha llegado a la necesidad de contar con almacenamientos de energía, para almacenarla durante las condiciones ambientales máximas y reservarla para su uso durante los períodos de menor actividad (Center for Sustainable Systems, 2021). Existe gran variedad de opciones tecnológicas para llevar a cabo el almacenamiento de energía en las redes eléctricas. De acuerdo al tipo de tecnología involucrada, en baterías, almacenamiento térmico, almacenamiento mecánico, hidrógeno y bombeo hidroeléctrico (García, González-López, Betancourt, González, & Laureano, 2021). La Figura 1, ilustra los tipos de almacenamiento de energía que existen en la actualidad.



Figura 1. Tipos de almacenamiento de energía (García, y otros, 2021).

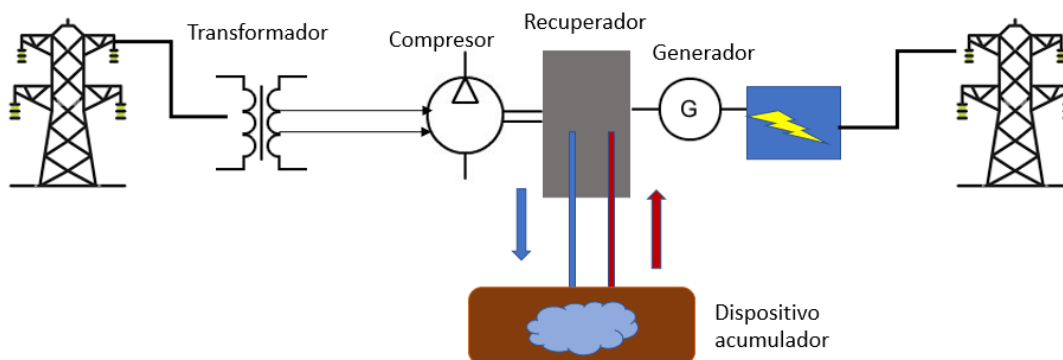


Figura 2. Concepto de sistema CAES (Center for Sustainable Systems, 2021).



En cuanto a sistemas de almacenamiento por aire comprimido (CAES, por sus siglas en inglés), la energía es almacenada en forma de aire –comprimido- en estructuras geológicas debajo de la tierra (PNNL-CAES, 2019). Durante los períodos de menor actividad, se utiliza electricidad para comprimir el aire a alta presión mediante compresores de aire. Durante los períodos pico, el aire comprimido almacenado se libera a través de expansores para generar electricidad para satisfacer las crecientes demandas. La Figura 2 ilustra este concepto del sistema CAES, donde para comprimir aire se consume energía de la red o de algún sistema de energías alternativas y se almacena, para cuando se requiera, éste aire comprimido se libera para generar energía. (Center for Sustainable Systems, 2021)

Actualmente existen plantas de CAES que se encuentran en funcionamiento, una la planta en Huntorf, Alemania y la planta de McIntosh, Alabam. Ambas plantas almacenan aire comprimido en cavidades salinas subterráneas. Ambas se activan en unos 15 minutos y proporcionan servicios de ajuste eléctricos (Crotingo et al., 2001). Otra central con almacenamiento en bolsas bajo el agua situadas a 5km de la costa dentro del lago Ontario, cerca de Toronto. En 2013 empezaron las pruebas con una capacidad de 1 MW con una eficiencia del 70% (Rodríguez, 2014). Esta misma empresa a finales de 2019 inauguró la primera planta de Advanced CAES en Goderich, Ontario con una potencia de turbinas de 1,75 MW y una capacidad de más de 10 MWh.

A diferencia del caso de plantas CAES a gran escala, los de pequeña escala o micro-CAES están siendo analizadas para ver su viabilidad. La ventaja es que son operables sin necesidad de grandes cámaras de almacenamiento y de la combinación concreta de accidentes geográficos para su utilización, pudiendo operar en depósitos creados por el ser humano debido a sus menores dimensiones. Otra ventaja de estos sistemas micro-CAES es su posible hibridación con algunos otros sistemas de generación distribuida. Por esta razón están siendo investigadas, en el año 2013 (Y. Xinghua, P. Jiazhen, W. Jidai y S. Jing, , 2013) se analizó la eficiencia de un compresor Scroll para sistemas micro-CAES arrojando una eficiencia que varía de 23% a 36% a presión de suministro de aire de 0.35 a 0.65 MPa. En 2015 se realizó un análisis energético y termodinámico de un pequeño sistema de almacenamiento de energía de aire comprimido en Matlab/Simulink/Thermolib. Para el análisis de los sistemas CAES se aplicaron distintos modelos de estudios para los distintos ciclos termodinámicos considerando una máquina volumétrica de tipo scroll (R. De Lieto Vollaro, 2015). En 2016 (A.C. Maia, E.M. Barros, Cardoso Filho, & P. Porto, 2016; T. A.C. Maia, 2016) se investigó sobre la fabricación un sistema micro-CAES de bajo costo donde se adaptó una turbina automotriz bocharger, el cual también incluía un generador, un circuito eléctrico y un sistema de lubricación. Una de las características de este trabajo es que abarca un rango entre 1,0 kW y 3,5 kW de salida de potencia, justo como las aplicaciones de generación distribuida. En el 2018 (T. P.L. Camargos, Pottie, Ferreira, & Porto, 2018) presentan resultados experimentales que combina CAES con hidráulica. En este trabajo se contó con dos tanques de almacenamiento, el primero con el aire comprimido y el segundo con agua, los cuales se encontraban separados por una válvula. Cuando se requería energía eléctrica, se abre la válvula y el agua fluye hacia una turbina Pelton, acoplada a un generador eléctrico. La eficiencia de conversión experimental fue del 45%. Igualmente, en el 2018 (G. Venkataramani, 2018) presentó un sistema CAES de pequeña capacidad utilizando un tanque de almacenamiento de 400 L, la eficiencia de carga y descarga revelaron en



el tanque fueron de 41.79%, 54.25% y 68.3% para caudales máxicos de 0.005 kg/s, 0.0075 kg/s y 0.01 kg/s respectivamente.

De acuerdo a lo anterior, en este trabajo se propone la idea de cómo se integraría un sistema micro-CAES para generación distribuida en casas de interés social de México. Se realiza el diseño en SolidWorks de todas las piezas que integrarían la propuesta como el compresor, generador, turbina, tuberías, tanque de almacenamiento y accesorios; además se realiza un análisis de carga/descarga de un compresor de aire de 2.5HP.

Materiales y métodos

Arquitectura del sistema: Propuesta de micro-CAES para residencia

En la Figura 3 se muestra la propuesta de integrar un sistema micro-CAES en una casa de interés social. Se observa una casa típica con un terreno de 6mts de ancho por 16 de largo. El sistema CAES analizado se integra solo en la parte de la cochera sumergido un tanque con capacidad de 11000L, cuenta con un cuarto para aislar ruido, dentro de este se encuentra el compresor que consume 2kW. Un generador trifásico asíncrono de 1kW acoplado a la válvula de salida del tanque acoplada a una turbina.

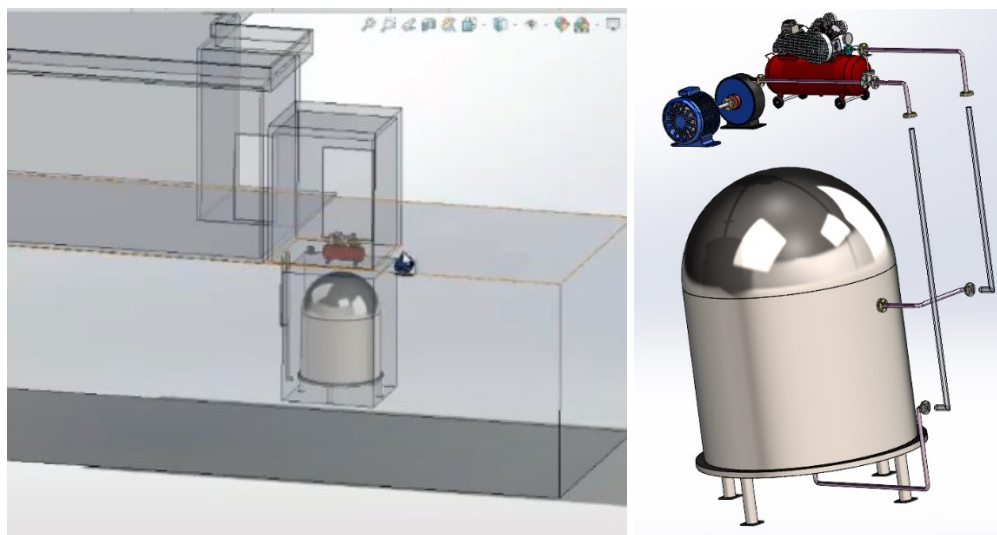


Figura 3. Esquemática del concepto CAES a escala acoplada a casas de interés social (fuente: elaboración propia).

Compresor

En la Figura 4 se muestran medidas y el diseño del compresor; el compresor funciona con pistones, este mueve los pistones hacia arriba y hacia abajo a través de un sistema de válvulas y bielas para comprimir el aire. Para el diseño de este compresor se tomaron en cuenta los que se encuentran en el mercado, considerandolos de fácil acceso de compra. SolidWorks cuenta con un catálogo de pistones estandarizados lo que facilita su diseño acorde a la capacidad de compresión que se requiere. Una de las desventajas que posee este compresor, es que el nivel de ruido que causa es muy elevado, es por ello, que en el diseño final se elaboró un compartimiento como un almacén donde es preferible colocar espumas acústicas, esto con el



fin de reducir el ruido que provocará el compresor y hacer que el usuario no pase molestia. Debido a que este compresor se demorará demasiado en llenar el tanque de almacenamiento este fue diseñado para instalarse bajo el suelo.

Este compresor se apaga automáticamente una vez que llega a los 8.5 bar y se vuelve a encender automáticamente para comprimir cuando llega a los 4 bar. Es por ello, que se acopla a un tanque de almacenamiento que funcionará como una batería en donde el aire será comprimido para almacenar la energía y utilizarse cuando sea requerida.

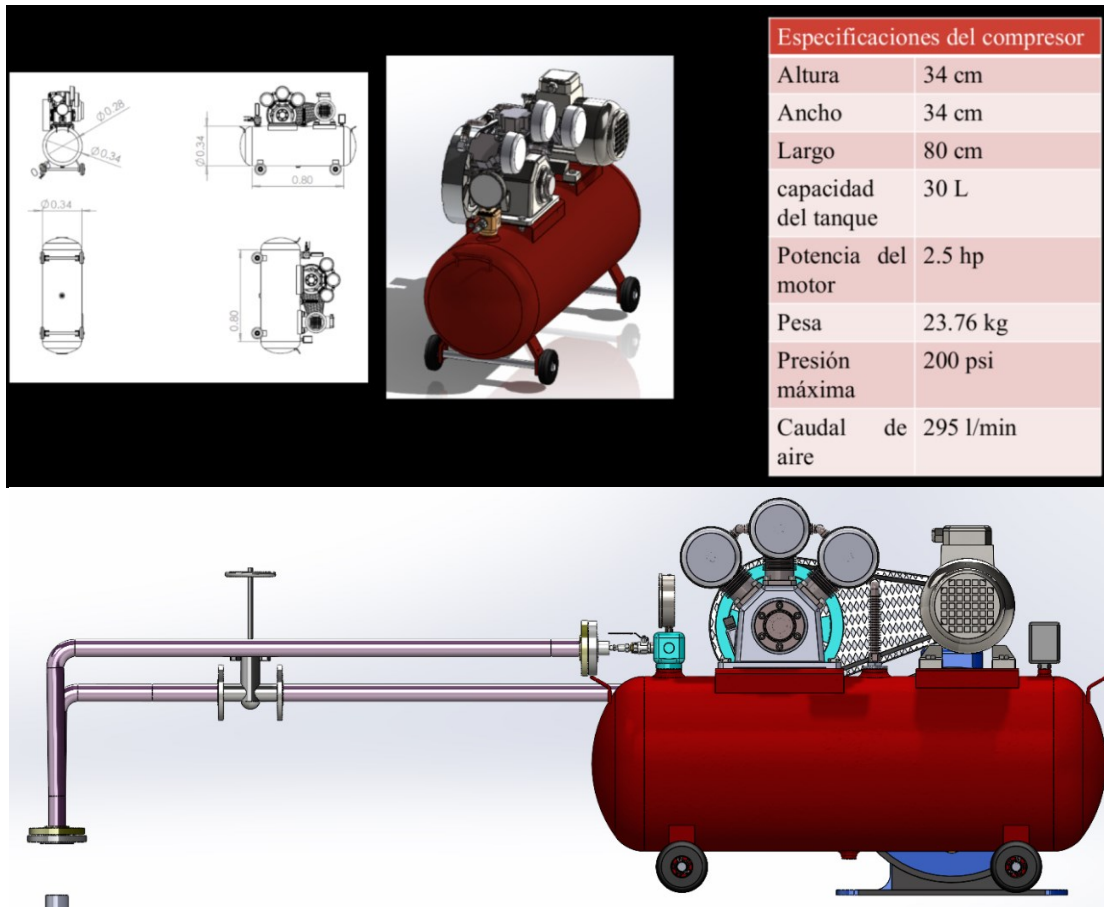


Figura 4. Compresor de aire diseñado en SolidWorks (fuente: elaboración propia).

Tanque de almacenamiento

El tanque de almacenamiento diseñado es de una capacidad de 11000 litros, dicho tanque es de acero inoxidable y soporta una presión máxima de 175 bar para el almacenamiento del aire comprimido, para la realización del tanque se calculó el volumen que tendría en proporción al espacio donde se colocaría, el almacenamiento de energía únicamente se realiza en el depósito de aire, todos los demás componentes de la instalación micro CAES, en la Figura 5 se pueden observar las medidas que el tanque de almacenamiento maneja. Este tanque de almacenamiento se colocará bajo el suelo con el fin de que sea seguro para el usuario y no existan problemas de seguridad, de igual forma en la ubicación donde se colocará el tanque estará aislado por un muro de concreto para una mejor eficiencia. El tanque de almacenamiento se encontrará

conectado al compresor y a la turbina con dos tuberías de cobre con la misma medida, del compresor al tanque se colocará una tubería de cobre de 1 pulgada. Del tanque de almacenamiento a la turbina se colocará una tubería de cobre de 1 pulgada con el fin de que la presión enviada sea mayor y que dicha presión otorgue una mejor eficiencia en la turbina; las medidas mostradas en el croquis están dadas en metros.

Turbina

Para la elaboración del diseño de la turbina es necesario conocer cómo es que trabajaba dicha turbina y las medidas aunque dichas medidas se tuvieron que adaptar a las del generador; ya que el eje se acoplaría al generador, debido a que la turbina le daría el movimiento al generador para que este último genere energía eléctrica. La turbina tendrá una presión de entrada relativamente idéntica a la presión de entrada que existe del compresor al tanque de almacenamiento (P_2), y tendrá una presión de salida igual a la presión inicial (P_1), completando de esta manera el diagrama P-V del ciclo Brayton. Las medidas mostradas en el diseño son en milímetros.

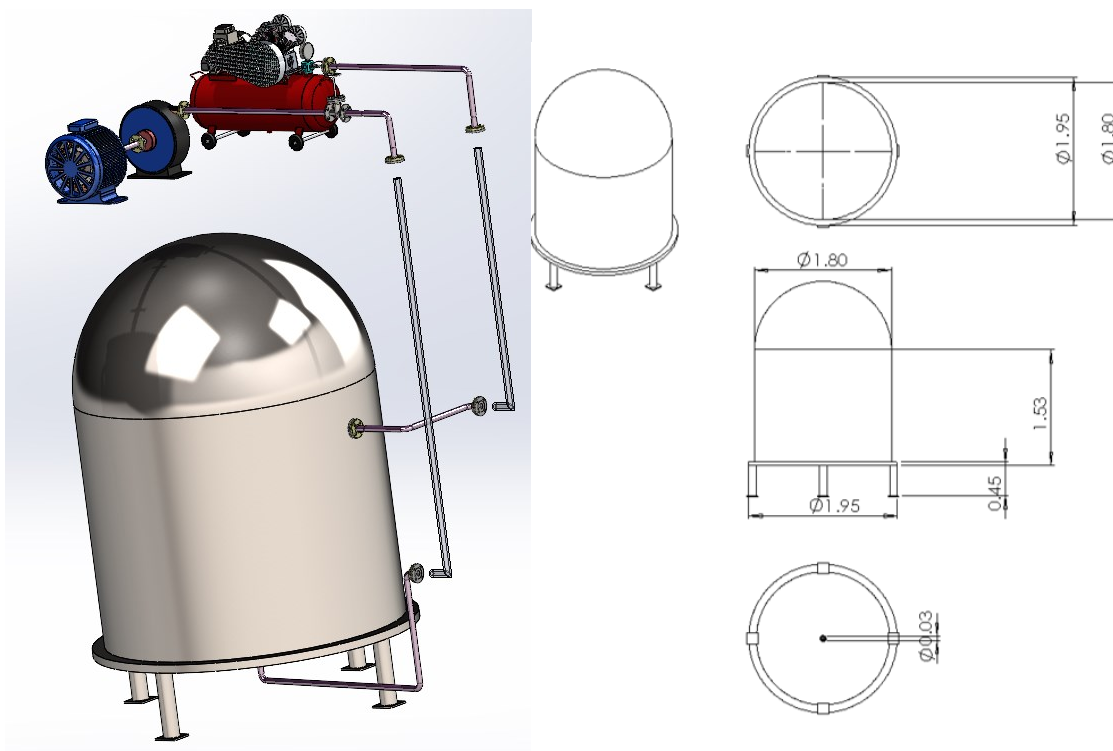


Figura 5. Tanque de almacenamiento en SolidWorks (fuente: elaboración propia).

Generador

La energía mecánica generada en la turbina se convierte en rotación y transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Lo consigue gracias a la interacción de sus componentes principales en el rotor acoplada a la turbina. Se diseñó un generador eléctrico en SolidWorks con las mediciones mostradas en milímetros en la Figura 7. con el propósito de integrar todas las piezas del sistema en un solo diagrama, el generador corresponde a una capacidad de 1kW trifásico de bajas velocidad de corriente alterna. Para el diseño del generador se tomó como base los generadores que se encuentran en el mercado y se pueden adaptar fácilmente a la generación distribuida.



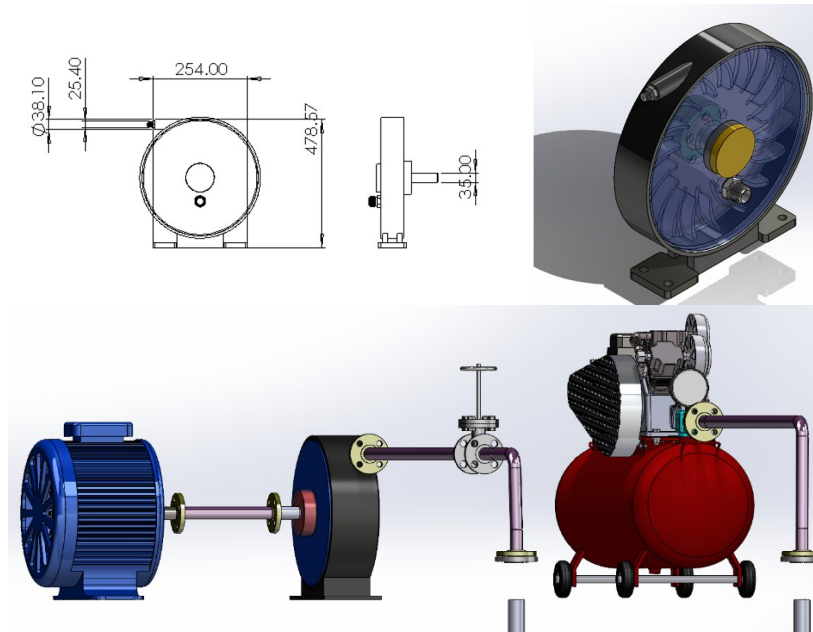


Figura 6 Turbina del sistema CAES en SolidWorks (fuente: elaboración propia).

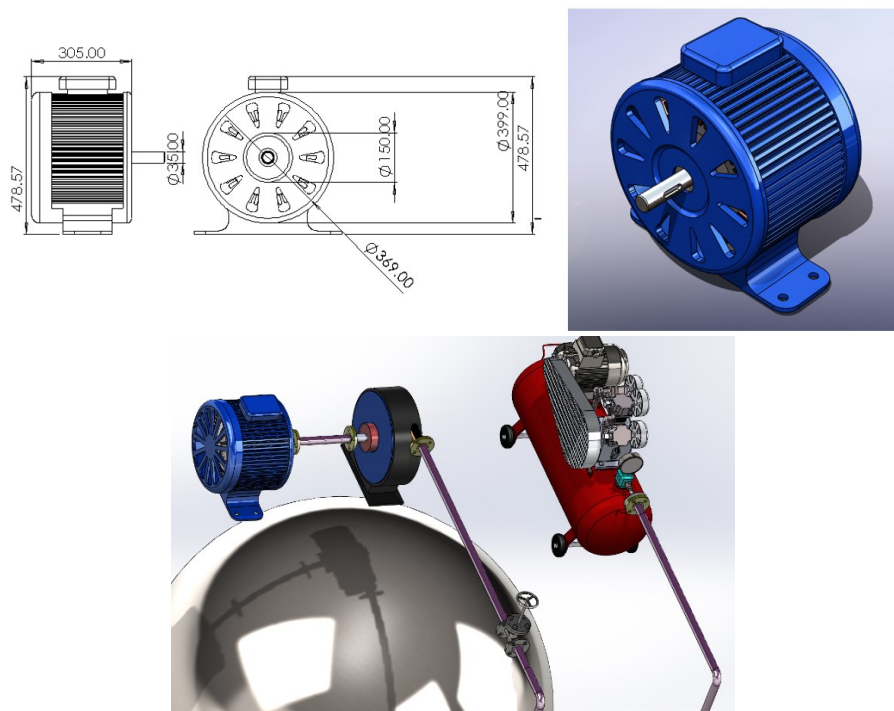


Figura 7. Generador trifásico (fuente: elaboración propia).



Tuberías y válvulas

El acoplamiento entre los elementos principales del sistema micro-CAES se deben realizar mediante tuberías y válvulas. Los diseños de tuberías mostradas en la Figura 8 son de cobre de 1 pulgada para la conexión del micro-CAES, los diseños realizados van desde codos hasta tuberías rectas, estos diseños conectarían todo el sistema logrando así completar el ciclo Brayton, pero dichos diseños llevarían acoplamiento con bridas, los cuales permiten acoplar de manera más sencilla todo el sistema y evita la necesidad de realizar operaciones destructivas al momento de desmontar o montar.

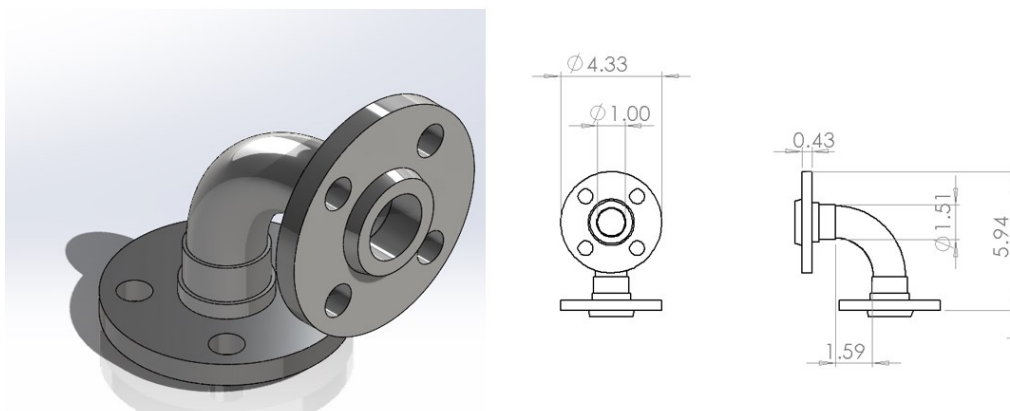


Figura 8. Diseño de codos en SolidWorks (fuente: elaboración propia).

De igual forma, se diseñaron diversas válvulas, ver Figura 9, para el control y manipulación de la salida del aire comprimido, una de estas válvulas se encuentra conectada a la salida del compresor y otra se encuentra conecta en medio del tanque de almacenamiento y de la turbina, donde en este último se le coloca un medidor de presión que indique cuanta presión circula por la tubería y cuanta presión se encuentra almacenado en el tanque, cabe aclarar que las válvulas también ayudan como medio de seguridad para el usuario. El diseñado de estas piezas fue de suma importancia ya que con ellas se determinó las medidas que tendría la salida de cada pieza del sistema micro CAES. Las medidas mostradas en la Figura 10 están dadas en pulgadas.



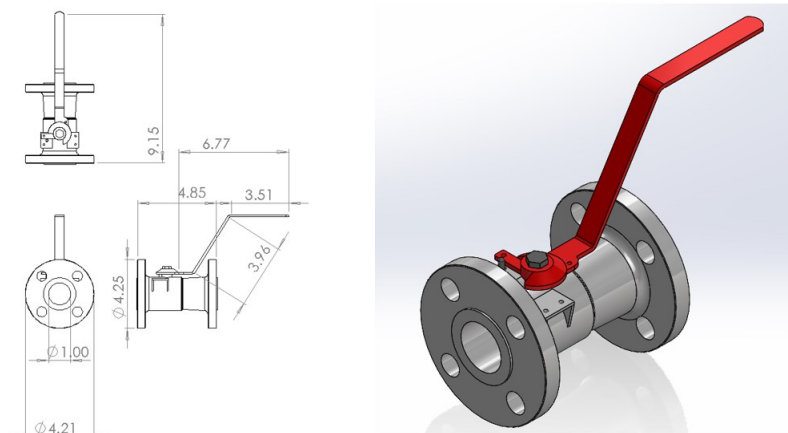


Figura 9. Válvula de aire en SolidWorks (fuente: elaboración propia).

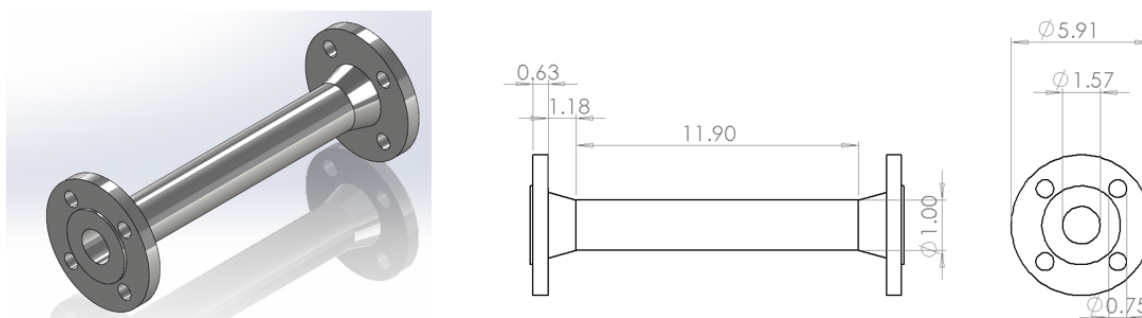


Figura 10. Tubería de cobre (fuente: elaboración propia).

Resultados y Discusión

Pruebas y análisis de presión

Con la finalidad de analizar tiempos de carga y descarga de un compresor de aire de 2.5Hp similar al de la Figura 4. La Figura 11a ilustra el tiempo versus presión en el tanque observándose que para llenarlo basta con un minuto y medio a una presión de 8Bars. Por otro lado, la Figura 11b muestra el tiempo de descarga a presión constante. Tabla 1 muestra datos obtenidos para un compresor de 2.5Hp similar al de la Figura 4.

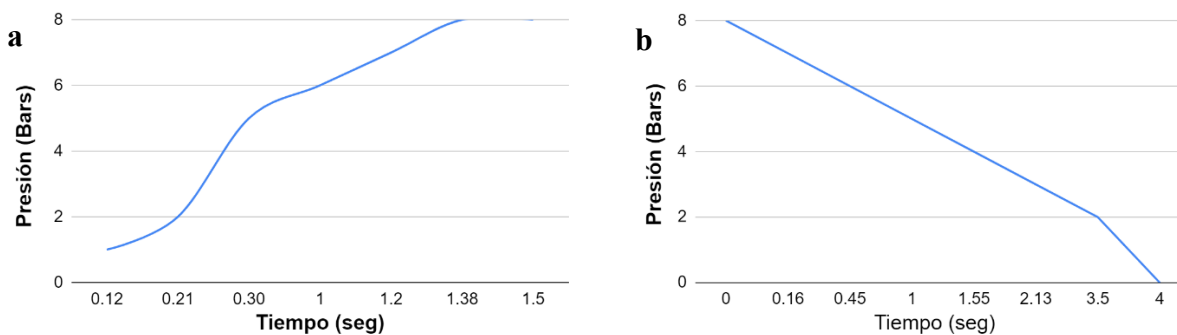


Figura 11. a) Tiempo de llenado vs Presión; b) Tiempo de descarga vs Presión

Si estos valores se extrapolan del tanque de 300Litros a 8 bars al de 11000 Litros que estaría por debajo del suelo, se esperaría que el tanque se llene en una hora y se descargue en dos horas y 50 minutos aproximadamente.

Trabajo Futuro

Para realizar un estudio más detallado es necesario realizar mediciones con equipo especializado tanto para la presión como para el consumo de energía que se requiere para comprimir el aire. También es necesario analizar el ciclo Brayton para determinar su eficiencia y al mismo tiempo acoplar físicamente un prototipo de turbina-generador para medir la generación de energía y determinar correctamente su eficiencia y tener un cálculo apropiado de cuanta carga y en cuanto tiempo podría abastecer una carga eléctrica.

Conclusiones

Se ha presentado el diseño detallado de un sistema micro-CAES en SOLIDWorks, cada dispositivo que lo integra se presenta a detalle desde el grupo turbina-generador, tuberías, tanque de almacenamiento de aire comprimido y su compresor. Se ha presentado una idea innovadora de como este tipo de sistemas de almacenamiento se integraría en el contexto de generación distribuida y como pudieran ser utilizadas en zonas residencial de interés social en México. Se realizaron algunas pruebas de carga y descarga de un compresor de aire de 5hp para extrapolar sus resultados y realizar un cálculo aproximado del tiempo de autonomía que tendría el sistema propuesto. Se ha plasmado el trabajo futuro de lo que se ha presentado en este trabajo para realizar un análisis más detallado en próximas investigaciones.

Referencias

1. Center for Sustainable Systems, U. o. (2021). U.S. Grid Energy Storage Factsheet. *Factsheets energy*, 1-2.
2. García, M. F., González-López, J. M., Betancourt, R. O., González, M. A., & Laureano, E. V. (2021). Análisis de convertidores bidireccionales cc-cc en representación de espacios de estado. *Difu100ci@ Revista de difusión científica, ingeniería y tecnologías*, 155-161.
3. PNNL-CAES. (08 de 2019). *Compressed Air Energy Storage*. Obtenido de Pacific Northwest National Laboratory: <https://caes.pnnl.gov/>



4. Y. Xinghua, P. Jiazhen, W. Jidai y S. Jing, . (2013). Simulation and experimental research on energy conversion efficiency of scroll expander for micro-Compressed Air Energy Storage system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 1-12.
5. R. De Lieto Vollaro, F. F. (2015). Energy and thermodynamical study of a small innovative compressed air energy storage system (micro-CAES). *ScienceDirect*, , 1-7.
6. A.C. Maia, T., E.M. Barros, J., Cardoso Filho, B. J., & P. Porto, M. (2016). Experimental performance of a low cost micro-CAES generation system. *Applied Energy*, 1, 1-7.
7. T. A.C. Maia, J. E. (2016). Experimental performance of a low cost micro-CAES generation system. *Applied Energy*, 1-7.
8. T. P.L. Camargos, Pottie, D. L., Ferreira, R. A., & Porto, T. A. (2018). Experimental study of a PH-CAES system: Proof of concept. *Energy*, 1-9.
9. G. Venkataramani, R. E. (2018). Experimental investigation on small capacity compressed air energy storage towards efficient utilization of renewable sources. *Journal of Energy Storage*,, 1-7.
10. Peña, A. C., & Sanchez J., M. G. (2012). Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora. *AENOR*.
11. Román, R. (2011). Diseño de un sistema domótico para control de iluminación y monitoreo de consumo energético. *Trabajo de grado UIS*.
12. Mahecha Chaux, J. O. (2018). Diseño e implementación de una aplicación domótica para iluminación usando inteligencia artificial. *Ciencia Unisalle*.
13. Duque Alas, A. (2014). Optimización del sistema de monitorización remota de medidores de energía eléctrica. *Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador*.
14. Peirotén, M. (2013). Sistema domótico para una casa inteligente. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI) Ingeniero Industrial*.
15. Yanza, C. W., & Chafla , A. S. (2011). Estudio Comparativo de Sistemas Informáticos Domóticos para Viviendas u Oficinas, Caso Práctico: Empresa Computadoras y Servicios. *Tesis de Licenciatura*.
16. Soto , L. A., & Velásquez , D. D. (2012). Control de iluminación y temperatura por medio de un sistema domótica para habitación de hospital Framework para aplicaciones web. *Tesis Doctoral. Administrativa, Financiera, Sistemas y Computación*.
17. Humberto, S., Jesus, A. M., Alberto, M. G., & Kenny, R. M. (2014). Diseño e implementación de un prototipo para automatización de vivienda. *INGENIERÍA ELECTRÓNICA*.
18. Bordons, C., Torres, F. G., & Valverde, L. (2015). Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable. *renovable. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 117-132.
19. IEEE Std, 1.-2. (2000). Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Std 1459-2010*, 1-50.
20. Bordons, C., Torres, F., & Valverde, L. (2015). Gestión óptima de la energía en microrredes con generación renovable. *renovable. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 117-132.
21. Duque, A. (2014). Optimización del sistema de monitorización remota de medidores de energía eléctrica. *Doctoral dissertation, Universidad de El Salvador*.
22. IEEE. (2010). Ieee standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. *IEEE Std 1459-2010*, 1-50.
23. Mahecha, J. (2018). Diseño e implementación de una aplicación domótica para iluminación usando inteligencia artificial. *Ciencia Unisalle*.
24. Peña, A., & Sanchez, J. (2012). Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora. *AENOR*.



25. Soto, A., & Velásquez, D. (2012). Control de iluminación y temperatura por medio de un sistema domótica para habitación de hospital Framework para aplicaciones web. *Tesis Doctoral. Administrativa, Financiera, Sistemas y Computación.*
26. Yanza, W., & Chafra, S. (2011). Estudio Comparativo de Sistemas Informáticos Domóticos para Viviendas u Oficinas, Caso Práctico: Empresa Computadoras y Servicios. *Tesis de Licenciatura.*
27. Saavedra, C., Aguirre, M., Mejia, G., & Riaño, M. (2014). *Diseño e implementación de un prototipo para automatización de vivienda.* Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Diego_Tibaduiza_Burgos/publication/278029276_Memorias_encuentro_nacional_de_semilleros_de_investigacion_en_ingenieria_electronica_Tendencias_en_Investigacion_de_los_semilleros_de_investigacion_en_ingenieria_electronica
28. Xinghua, Y., Jiazhen, P., Jidai, W., & Jing, S. (2013). Simulation and experimental research on energy conversion efficiency of scroll expander for micro-Compressed Air Energy Storage system. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, 1-12.
29. De Lieto Vollaro, R., Faga, F., Tallini, A., Cedola, L., & Vallati, A. (2015). Energy and thermodynamical study of a small innovative compressed air energy storage system (micro-CAES) . *ScienceDirect*, 1-7.
30. P.L. Camargos, T., L.F. Pottie, D., A.M. Ferreira, R., A.C. Maia, T., & P. Porto, M. (2018). Experimental study of a PH-CAES system: Proof of concept. *Energy*, 1-9.
31. Venkataramani, G., E., R., Ram Sharma, M., Hari Bhaskaran, A., Kumar Dash, P., Ramalingam, V., & Wang, J. (2018). Experimental investigation on small capacity compressed air energy storage towards efficient utilization of renewable sources. *Journal of Energy Storage*, 1-7.

