



ARTÍCULO TÉCNICO DE VERTIV

Evaluación del potencial de las celdas de combustible para la alimentación principal y de respaldo del centro de datos

Resumen ejecutivo

Las celdas de combustible y el centro de datos carbono neutral

El aumento de la capacidad se ha convertido en un desafío constante para la industria de centros de datos. A pesar de las enormes inversiones en nueva capacidad hechas durante los pasados cinco años, se necesita más capacidad para soportar la continua digitalización de las empresas y la sociedad. [Dell'Oro Group](#) estima que las inversiones en proyectos de centros de datos de hiperescala se duplicarán en los próximos cinco años.

Este crecimiento amenaza con aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero atribuibles a los centros de datos; a pesar de la eficiencia de las instalaciones actuales, inherentemente consumen mucha energía. La [Agencia Internacional de la Energía](#) estima que los centros de datos consumieron entre 200 y 250 teravatios-hora (TWh) de energía en 2020. Gran parte de esta electricidad es generada a partir de combustibles a base de carbono, los cuales contribuyen con las emisiones de Alcance 2 para operadores de centros de datos.

Además, los grandes centros de datos dependen de generadores diésel que se suman a la huella de carbono de las instalaciones a través de emisiones de Alcance 1. Las revisiones mensuales de los generadores diésel [contribuyen con 9,2 kilogramos \(kg\) por kilovatio-hora \(kWh\) de dióxido de carbono \(CO2\)](#) en la atmósfera, en el supuesto de que se consuman 2 litros de diésel.

Esto ha llevado a muchos operadores a adoptar medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con el fin de proteger el medio ambiente y demostrar su compromiso con los clientes, asociados y accionistas. Varios operadores de hiperescala se han fijado los objetivos de convertirse en carbono neutral o carbono negativo para finales de esta década, y los operadores de servicios de ubicaciones les ofrecen entornos carbono neutrales a sus clientes.

En muchas instalaciones, hay oportunidad de reducir las emisiones por medio de aumentar la eficiencia del centro de datos y la utilización del equipo. Si bien es un paso fundamental, este no hace que los centros de datos alcancen sus objetivos de carbono neutralidad. Para compensar su dependencia de combustibles a base de carbono, los operadores dependen de los Acuerdos de Compra de Energía (PPA) y los Certificados de Energía Renovable (REC). En 2021, [los PPA de energía limpia aumentaron en un 24%](#) desde 2020 para alcanzar un nuevo máximo de 37,1 gigavatios (GW).

Algunos hiperescaladores importantes como Amazon, Microsoft y Meta han sido los mayores compradores de estos acuerdos en todas las industrias, pero también hay señales de que los operadores están buscando abandonar los PPA. Google —que en 2020 invirtió más que cualquier otra organización en PPA— redujo su inversión en 2021, ya que busca fuentes de energía libres de carbono a través de otros métodos.

La solución a largo plazo buscada por muchos operadores es alimentar los centros de datos directamente con energía limpia. Sin embargo, debido a que es poco probable que las redes eléctricas de servicios públicos en la mayoría de las regiones puedan ofrecerles energía 100% renovable a todos los clientes en el futuro previsible, los operadores tienen la responsabilidad de trabajar con sus socios para desarrollar soluciones que permitan una operación libre de carbono.

La generación de energía local por medio de fuentes solares o eólicas renovables no resulta práctica en muchas ubicaciones de centros de datos y la intermitencia de la energía renovable presenta desafíos para los centros de datos que necesitan funcionar ininterrumpidamente. Sin embargo, el hidrógeno producido con energía renovable es una solución viable para la generación de energía in situ en una gran cantidad de ubicaciones.

Este artículo analiza los recientes avances en la tecnología de celdas de combustible que han mejorado el rendimiento y reducido los costos, como las celdas de combustible alimentadas por hidrógeno, las cuales surgen como una solución para reemplazar los generadores diésel. Asimismo, analiza la razón por la cual las celdas de combustible son una solución prometedora a largo plazo para la alimentación principal del centro de datos con cero emisiones de carbono.

¿Qué son las celdas de combustible?

Las celdas de combustible no son dispositivos de almacenamiento de energía como las baterías. Generan energía eléctrica a partir de reacciones químicas creadas por una fuente de combustible y oxígeno. Las fuentes más comunes para las celdas de combustible son el hidrógeno y el gas natural. Cuando el hidrógeno se utiliza como una fuente de combustible, los únicos subproductos son agua y calor.

El gas natural frente a las celdas de combustible

Las celdas de combustible alimentadas con gas natural aprovechan una infraestructura sólida y madura de producción y distribución que ofrece un suministro continuo de gas natural en muchas áreas. Las celdas de combustible alimentadas con gas natural son relativamente limpias, pero generan emisiones de gases de efecto invernadero. Actualmente, algunos fabricantes de celdas de combustible que utilizan gas natural están adaptando sus diseños para aumentar la flexibilidad del combustible a múltiples aplicaciones.

El hidrógeno tiene una capacidad de producción limitada y carece de una red de distribución sólida, pero hay iniciativas en curso para corregir estas limitaciones. Las celdas de combustible de hidrógeno pueden soportar una verdadera operación carbono neutral, según la manera como se produzca el hidrógeno.

Actualmente, la mayoría del hidrógeno proviene de combustibles fósiles a partir del reformado con vapor de gas natural, la oxidación parcial de hidrocarburos más pesados o la gasificación de carbón. Al hidrógeno producido a través de estos métodos se le conoce comúnmente como “hidrógeno gris” debido a su dependencia de combustibles fósiles. Las emisiones producidas durante el proceso deberían incluirse en la huella ambiental de la aplicación de celdas de combustible. Por otro lado, el hidrógeno también puede producirse a partir de energía renovable por medio de la electrólisis del agua y se le conoce como “hidrógeno verde” debido a que no genera emisiones de gases de efecto invernadero durante el proceso de producción. Gracias a que las celdas de combustible de hidrógeno no generan emisiones, el uso de hidrógeno verde para alimentar las celdas de combustible permite una generación de energía in situ con cero emisiones de carbono.

Debido a la falta de una red de distribución de hidrógeno, puede que el hidrógeno utilizado para alimentar las celdas de combustible en las aplicaciones de potencia estacionarias necesite transportarse por camión desde donde se produce hasta el sitio donde será utilizado y almacenado. Esto hace que no sea práctico usar celdas de combustible de hidrógeno para la alimentación principal del centro de datos. Sin embargo, resulta viable para un suministro eléctrico de respaldo, ya que es posible almacenar el hidrógeno necesario en el sitio para soportar 48 horas de operación continua de un centro de datos.

Tipos de celdas de combustible para la alimentación del centro de datos

Tal y como ocurre con las baterías, existen múltiples tipos de celdas de combustible disponibles, las cuales se clasifican principalmente según el electrolito utilizado, el cual a su vez determina las características del combustible, las temperaturas operativas, las condiciones transitorias y, en última instancia, el rendimiento eléctrico del sistema. En el caso de las aplicaciones de centros de datos, dos tipos de celdas poseen las características obligatorias: las celdas de combustible con membrana intercambiadora de protones (PEM) y celdas de combustible de óxido sólido (SOFC).

Las celdas de combustible con PEM utilizan hidrógeno como su principal fuente de combustible y cuentan con un electrolito polimérico sólido, el cual ofrece una alta densidad de potencia que ocupa un menor espacio en comparación con otras celdas de combustible. Únicamente necesitan hidrógeno y oxígeno del aire para generar electricidad y operar a temperaturas relativamente bajas (hasta 80° C/176° F).

Debido a que no tienen que alcanzar las altas temperaturas que son necesarias en otros tipos de celdas de combustible, pueden arrancar rápidamente, lo cual las hace ideales para las aplicaciones de energía de respaldo. Las celdas de combustible con PEM requieren un catalizador de metal noble como el platino para separar los electrones y los protones del hidrógeno, lo cual exige protecciones de seguridad especiales al ser peligroso para los humanos.

Las SOFC utilizan un compuesto cerámico como el electrolito. Operan a temperaturas mucho más altas (800-900 °C/1472-1652 °F) que las celdas de combustible con PEM, lo cual elimina la necesidad de un catalizador de metal precioso, pero aumenta los tiempos de arranque y apagado, y las hace ideales para las aplicaciones de servicio continuo.

Además, son más flexibles que el combustible de entrada, utilizan principalmente gas natural y algunos diseños son capaces de procesar hidrógeno puro. Las SOFC tienen una alta eficiencia operativa que puede aumentarse aún más por medio de capturar y reutilizar el calor generado durante la operación. Su elevada temperatura operativa hace que sea necesaria una protección térmica considerable para retener el calor y proteger al personal. Esto puede limitar el número de ciclos de encendido/apagado en la vida útil de un sistema debido al estrés térmico sufrido por el material de las celdas.

El centro de datos alimentado por celdas de combustible

Con base en el estado actual de la tecnología de celdas de combustible, así como otras evoluciones en la tecnología de potencia crítica para centros de datos, es posible imaginar un futuro en el que las celdas de combustible ofrezcan un suministro eléctrico principal y secundario limpio para el centro de datos. Hoy, las celdas de combustible con PEM ofrecerían un suministro eléctrico de respaldo mientras que las SOFC serían utilizadas para el suministro eléctrico principal. Sin embargo, las celdas de combustible con PEM tienen el potencial de ofrecer un suministro eléctrico principal en el caso de que no todas las SOFC puedan reacondicionarse para funcionar con hidrógeno puro.

Vertiv ha llevado a cabo una investigación exhaustiva sobre el uso de las celdas de combustible en centros de datos y participa en múltiples proyectos piloto enfocados en garantizar que las celdas de combustible puedan satisfacer las necesidades de confiabilidad y rendimiento de los centros de datos.

Las celdas de combustible para la alimentación del centro de datos

Los generadores diésel contribuyen en gran medida con las emisiones de Alcance 1 en los centros de datos actuales y algunos operadores buscan activamente soluciones para reducir su dependencia de estos sistemas. Una posible solución es aumentar los tiempos de operación de las baterías para permitir que el sistema de baterías pueda soportar cortes eléctricos más prolongados.

Las celdas de combustible son una solución más comprobada y consolidada, al haber sido utilizadas en aplicaciones militares, marinas y de transporte, entre otras. Además, los costos de las celdas de combustible han disminuido considerablemente en los últimos cinco años y se espera que la tendencia se mantenga en el futuro.

Sin embargo, aunque se utilizan celdas de combustible en múltiples aplicaciones al momento de escribir este documento, no han sido utilizadas en grandes aplicaciones de potencia estacionarias como las que se encuentran en centros de datos y estas aplicaciones presentan algunos desafíos técnicos.

Específicamente, las celdas de combustible tienen una respuesta relativamente lenta a los cambios de carga, lo cual crea transientes y, por lo tanto, necesitan una manera de disipar el exceso de energía. Esto es posible a través de unidades de suministro ininterrumpido de energía (UPS). Al configurar en paralelo las celdas de combustible y las baterías de iones de litio del sistema de UPS, las celdas de combustible pueden disipar el exceso de energía, lo cual da como resultado cambios en la carga al almacenar energía en el sistema de baterías.

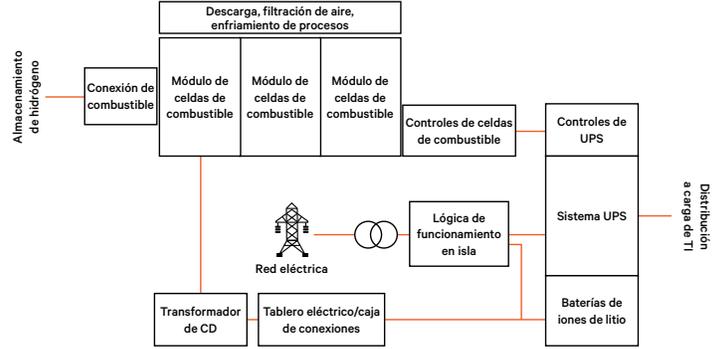
Con esta configuración, el sistema no tiene que transferir la carga a la fuente de alimentación de respaldo. Más bien, el sistema transfiere la carga a las baterías cuando ocurre un corte eléctrico y las baterías son cargadas de forma continua por las celdas de combustible hasta que el hidrógeno almacenado se agote. Además, las capacidades de gestión energética de los UPS se utilizarán para aumentar el valor de las celdas de combustible al facilitar la nivelación de picos y otros servicios de la red eléctrica. A continuación, encontrará los componentes clave de una solución de alimentación de respaldo capaz de reemplazar un generador diésel:

- **Almacenamiento de hidrógeno:** una cantidad suficiente de hidrógeno para soportar los tiempos de respaldo deseados se almacena en el sitio en remolques. Aproximadamente, se requieren cuatro remolques para ofrecer 48 horas de energía de respaldo para una instalación de 1 megavatio (MW).
- **Sistema de celdas de combustible con PEM totalmente contenido:** los módulos de celdas de combustible con PEM pueden alojarse en un gabinete externo con gerenciamiento térmico, filtración de aire y salida de CD al UPS, y baterías de iones de litio. La mayoría de las celdas de combustible también se encuentran certificadas para funcionar en interiores, lo cual puede eliminar el costo de un gabinete externo. Según los requisitos de la aplicación, las celdas de combustible pueden permanecer inactivas cuando no operan, lo cual puede resultar en un tiempo de arranque de un minuto o pueden mantenerse en suspensión para un arranque inmediato y potencia plena en pocos segundos.
- **UPS con baterías de iones de litio:** el UPS debería tener la capacidad de controlar las celdas de combustible y contar con un convertidor CD a CD integrado, capaz de funcionar ininterrumpidamente por muchas horas. Por lo general, se requiere capacidad adicional de las baterías para absorber la energía disipada de las celdas de combustible cuando las baterías se encuentran totalmente cargadas.

Utilizar las celdas de combustible para la alimentación principal del centro de datos

El camino hacia el uso de celdas de combustible como una fuente de alimentación principal para centros de datos con cero emisiones de carbono es más largo que el de las aplicaciones de alimentación de respaldo, debido en gran medida a las limitaciones actuales de la distribución del hidrógeno. Sin embargo, se han logrado avances y las celdas de combustible alimentadas con gas pueden utilizarse como una solución de puente que reduce las emisiones y ofrece otros beneficios mientras la distribución del hidrógeno se amplía.

Vertiv forma parte de un proyecto fundado por la asociación Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking con el apoyo del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, Hydrogen Europe y Hydrogen Europe Research. Esta iniciativa está poniendo a prueba el uso de SOFC alimentadas con gas natural como la principal fuente de alimentación para centros de datos de borde hiperlocales con el objetivo de reducir el impacto ambiental de estos sitios y fomentar un estándar abierto acreditado para las aplicaciones de celdas de combustible en centros de datos.



En esta aplicación, las SOFC constituyen la principal fuente de alimentación con la red eléctrica que ofrece un suministro eléctrico de respaldo junto con baterías de iones de litio. Al igual que las aplicaciones de energía de respaldo, el UPS eventualmente controlará la interfaz entre las baterías y las celdas de combustible, para gestionar los puntos de ajuste y el exceso de potencia de los transientes. En el futuro, el UPS podría actuar como un gestor de energía al coordinar múltiples fuentes de alimentación; al incluir las instalaciones, las celdas de combustible y un generador de respaldo, si lo hubiese; al elegir continuamente la mejor fuente con base en el costo, la confiabilidad y otros factores; y al gestionar las transiciones entre las fuentes.

Aunque esta iniciativa se enfocó en los centros de datos hiperlocales, se espera que sus aprendizajes fomenten el progreso relacionado con el uso de SOFC alimentadas con gas natural como una fuente de alimentación principal para centros de datos grandes. A medida que el costo del hidrógeno disminuye y aumenta su disponibilidad, las SOFC pueden hacer la transición a la energía de hidrógeno, lo cual permite una operación carbono neutral.

Evaluación de la viabilidad de las celdas de combustible para la alimentación del centro de datos

Desde un punto de vista técnico, las celdas de combustible gestionadas adecuadamente por medio de un sistema de UPS inteligente cuentan con las características de rendimiento necesarias para ofrecer un suministro eléctrico de respaldo limpio y confiable para centros de datos. Con base en los proyectos piloto actuales, no resulta razonable esperar la comercialización de las soluciones de celdas de combustible con PEM para la alimentación de respaldo de centros de datos en los próximos años.

Sin embargo, estas soluciones necesitan demostrar que pueden ser rentables para lograr un apoyo generalizado en la industria. Esto no significa necesariamente que tienen que ser menos costosas que los generadores diésel, ya que existe un valor real en su potencial de reducir las emisiones de Alcance 1 y dicho valor puede incrementarse en el futuro si aumenta el costo del carbono. Además, las nuevas capacidades ofrecidas por las celdas de combustible, como la nivelación de picos, también agregan valor.

Hoy, resulta difícil prever los costos durante la vida útil para una solución comercializada de celdas de combustible con PEM, ya que los costos de los módulos de celdas de combustible y el combustible de hidrógeno son dinámicos y se espera que disminuyan en los próximos años.

Estados Unidos ha hecho un esfuerzo considerable por disminuir los costos del hidrógeno por medio de la Iniciativa Earthshot del Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE).

Implementada en junio de 2021, esta iniciativa busca reducir el costo del hidrógeno limpio a \$1/kg para finales de esta década. A continuación, se encuentran los factores económicos clave que podrían influir en la adopción de celdas de combustible como fuente de energía de respaldo en centros de datos:

- **Gastos de capital:** hoy, las celdas de combustible con PEM necesitan una mayor inversión de capital en comparación con un generador diésel similar. Nuestra investigación muestra que las celdas de combustible con PEM varían entre \$1800-\$2000/kW en comparación con los casi \$450/kW de un generador diésel. Se espera que esta brecha se cierre a medida que disminuyan los costos de las celdas de combustible, pero podrían no alcanzar la paridad cuando las soluciones comerciales estén disponibles por primera vez.
- **Costos de combustible:** los costos de combustible varían según la demanda y la región. Actualmente, los costos del combustible de hidrógeno oscilan entre \$4,84 y \$6,68/kg. En EE. UU., el costo promedio de un galón de diésel —el cual ofrece poco más de un kilogramo de hidrógeno de energía— es de \$3,29. Si la Iniciativa Earthshot del DOE llega a alcanzar su objetivo, el hidrógeno será menos costoso que el diésel a lo largo de la vida útil de un sistema.
- **Eficiencia:** en comparación con los generadores diésel, ambos tipos de celdas de combustible muestran una mayor eficiencia, especialmente las SOFC. Además, los generadores diésel operan con corriente alterna (CA) que está sujeta a conmutación, lo cual puede disminuir la eficiencia. Como alternativa, las celdas de combustible que utilizan corriente directa (CD) para el UPS mejoran la eficiencia del sistema en general. Al eliminar el uso de energía de CA, los operadores tienen más probabilidades de ver los beneficios en términos de costos y sostenibilidad.
- **Mantenimiento:** los procesos electroquímicos utilizados en las celdas de combustible necesitan menos mantenimiento que los procesos mecánicos utilizados en los generadores.
- **Flexibilidad operativa:** debido a que las celdas de combustible con PEM pueden ser controladas por el UPS, estas permiten nuevas capacidades de gestión energética que no estaban disponibles con los generadores diésel, lo cual ofrece ahorros en costos energéticos.
- **Entorno normativo:** algunas localidades han creado normativas que restringen o prohíben el uso de motores de combustión interna para la generación de energía. Los operadores que buscan expandirse a estas áreas deberán encontrar enfoques alternativos para mantener la continuidad durante los cortes eléctricos y las soluciones de celdas de combustible deberían compararse favorablemente con las alternativas.

Puede que el uso inicial de las celdas de combustible para reemplazar o complementar los generadores diésel sea impulsado por los operadores de hiperescala, quienes ocupan una posición de liderazgo en la reducción de las emisiones de carbono. Sin embargo, a medida que avanzan, las celdas de combustible se convertirán en una solución más atractiva para centros de datos de todos los tipos y tamaños.

Conclusión

Con el fin de permitir un crecimiento continuo y a la vez reducir el impacto ambiental, los operadores de centros de datos están analizando alternativas a los generadores diésel y las redes eléctricas a base de carbono.

Las celdas de combustible se encuentran entre las soluciones más prometedoras para permitir que los operadores alcancen sus objetivos de carbono neutralidad. Por medio del hidrógeno limpio, las celdas de combustible con PEM pueden eliminar las emisiones de CO₂ de las revisiones mensuales y la operación de los generadores durante los cortes eléctricos. Las celdas de combustible con PEM están siendo puestas a prueba en esta aplicación y podrían estar disponibles en soluciones comerciales en los próximos años.

Las celdas de combustible alimentadas con gas natural están siendo puestas a prueba como una fuente de alimentación principal para los centros de datos en el borde y los aprendizajes de este proyecto piloto fomentarán el uso de esta tecnología en los grandes centros de datos. A medida que los productores de hidrógeno y los gobiernos inviertan más en la producción y la distribución del hidrógeno, estas celdas de combustible pueden convertirse en hidrógeno para permitir una operación libre de carbono.

Los esfuerzos actuales por implementar celdas de combustible están siendo impulsados por organizaciones que dan prioridad a la reducción de las emisiones de carbono. Desde un punto de vista de costos, las celdas de combustible no pueden competir con los generadores diésel ni con la red eléctrica, pero se espera que los costos de los componentes principales y el combustible de hidrógeno disminuyan en los próximos años, lo cual cerrará la brecha y hará que las celdas de combustible sean una solución de alimentación para centros de datos viable y económicamente factible.

Vertiv ha asumido un papel protagónico en promover el uso de las celdas de combustible en aplicaciones de centros de datos por medio de ofrecer soluciones de infraestructura crítica que permiten el uso efectivo de celdas de combustible y son compatibles con funcionalidades adicionales, como la nivelación de picos, el uso de energías renovables y los servicios de red eléctrica.

