



TESIS

Universidad La Salle Noroeste

“Análisis de un método de almacenamiento de energía de generación solar fotovoltaica a través del uso del recurso hidrógeno para sistemas eléctricos aislados”

Que para obtener el título de

Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables

*Con Reconocimiento de Validez Oficial No. 20140183
de fecha 21 de marzo del 2013*

Presentan:

Carlos Eduardo Osuna Cárdenas

Paul Adolfo Preciado Gastélum

Iván Reyes Gastélum

Asesor de Contenido

Dr. Eusebio Jiménez López

Ciudad Obregón, Sonora, México; febrero 2022

ULSA – Biblioteca
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México)

El uso para la reproducción parcial o total del contenido que sea objeto de protección de derechos de autor, se restringe para fines educativos e informativos, citando la fuente de donde se obtuvo y sus autores.

Sanciones pueden resultar aplicables en caso de lucro, reproducción, edición o modificación, sin la autorización del titular de los derechos.

DEDICATORIAS

Carlos Eduardo Osuna Cárdenas:

Dedico esta tesis a mi madre, Lorenia Cárdenas y a mi novia Leticia Campa. Para mi madre por todo el esfuerzo y sacrificio el cual tuvo que hacer para poder darme una educación de calidad, todos esos días de trabajo de estrés para poder pagar todos los gastos que se generan al estar en la escuela, por creer en mí, para poder llegar a ser Ingeniero, gracias por todo la motivación e inspiración para querer salir adelante, ¡Gracias por creer en mí!

Mi novia, la compañera en casi todo el camino de este capítulo en mi vida, gracias por creer siempre en mí, por tu paciencia y tu comprensión, gracias por estar siempre para mí, siempre dándome ánimos para querer salir adelante. ¡Por fin se culmina este ciclo! ¡Gracias por todo!, te amo.

Una especial mención a mis compañeros Paul e Iván, compañeros de toda la universidad y más que nada mis compañeros de tesis, espero que logren todos sus objetivos, gracias por sus enseñanzas y gracias por ser más que mis compañeros, gracias por ser mis amigos.

Paul Adolfo Preciado Gastélum:

Esta tesis está dedicada a mi padre, quien me ha instruido con ejemplo y palabra para convertirme en el hombre que soy hoy día. A mi madre, quien con consuelo y apoyo me ha abrigado y guiado por un camino de autodescubrimiento y autorrealización.

Iván Reyes Gastélum

Dedico este trabajo indudablemente a mi familia que con su gran amor y apoyo forman el impulso más importante dentro de mi crecimiento profesional y personal. María Selena Gastelum Grijalva, Guillermo Reyes Leyva, Guillermo Reyes Gastelum y

Arilene Reyes Gastelum. Este logro es nuestro y es resultado de muchos años de trabajo y esfuerzo.

AGRADECIMIENTOS

Carlos Eduardo Osuna Cárdenas

Le doy las gracias a nuestro asesor el Mtro. Eusebio Jiménez, una de las personas con más conocimiento que pude encontrar en la universidad, por todo lo que nos ha ayudado a culminar este proyecto desde lo más fondo de mi ser, ¡Gracias!

Agradezco a todos nuestros profesores a lo largo de la carrera, pero en especial, para aquellos que fueron pilares en la universidad para mi generación, al Prof. Gerardo Zamorano, gracias por impartir la mayor parte del conocimiento que adquirimos, además de siempre darnos más allá del desarrollo profesional.

A los administrativos y al personal de la universidad, por ayudar y darnos, ese algo más que esta universidad nos brinda, el compañerismo y el ambiente de confianza, especial mención al Mtro. Eduardo Núñez porque más allá de ser nuestro Coordinador en el Área de Ingenierías, por ser alguien, que cuando está disponible te ayuda a solucionar todos los problemas que puedas o tengas.

Por último, pero no menos importante Irineo Meza, ¡Gracias por siempre estar disponible para lo que se necesitara!, por ser un amigo más, pero sobre todo por siempre solucionar el mayor problema que alguien pueda tener, el hambre, gracias.

Paul Adolfo Preciado Gastélum:

Agradezco a mi familia por haberme brindado el apoyo moral y económico posible para obtener una formación académica y de calidad.

A Gerardo, a Eusebio y demás docentes, quienes a través de sus enseñanzas y aliento me han dado la capacidad de la perspectiva para la resolución de mis ideales en el ámbito escolar y profesional.

A Iván, Carlos y cada uno de mis compañeros y amigos, quienes, de manera desinteresada, me brindaron ayuda y amistad, dejándome gratos momentos y sonrisas que difícilmente olvidaré.

A la Universidad La Salle Noroeste y a sus representantes por sembrar en nosotros los valores que nos definen actualmente como hombres y mujeres de bien

Iván Reyes Gastélum

Le quiero agradecer a nuestro asesor de contenido Mtro. Eusebio Jiménez por su disposición, aportes al trabajo y gran sentido de humor.

Le quiero agradecer a Universidad la Salle Noroeste y a todas las personas de gran corazón que forman parte de la institución por brindarnos conocimientos y apoyo a lo largo de nuestra experiencia universitaria.

Le quiero agradecer a mis amigos de universidad Carlos y Paul por hacer de la universidad una gran etapa y por su inmensa aportación en este trabajo.

Sin duda alguna mi más grande agradecimiento es para mi familia. A mi madre Selena, le quiero dar las gracias por apoyarme y empujarme a siempre crecer como persona. Te quiero agradecer por tus cuidados, tus consejos y por tu amor incondicional en todas las etapas de mi vida. Gracias por enseñarnos a ser fuertes y a soportar lo insostenible, gracias por ser el ángel que cuida y mantiene unida a nuestra familia. Te amo mamá.

A mi padre Guillermo le quiero agradecer su gran esfuerzo diario que nos permitió estudiar y crecer como familia. Quiero que sepas que valoro cada golpe, cicatriz y migraña que soportas por nosotros. Eres para mí un gran hombre, amigo y padre. Eres indudablemente la persona que más admiro y mi ejemplo a seguir. Aunque no lo repita a diario quiero que sepas que es un orgullo para mí el llamarte papá. ¡Te amo papá!.

A mi hermano, mejor amigo y compadre Memo te quiero agradecer de todo corazón tu apoyo desinteresado y tu amistad sincera, gracias por estar a mi lado en las buenas y en las malas. Gracias por tus cuidados y enseñanzas. Te quiero recordar que eres un orgullo para nuestra familia y que aun con la distancia siempre tendrás en mí una amistad incondicional. ¡Te amo hermano!.

A mi hermana Arilene, le quiero agradecer su apoyo y cariño de hermana. Eres para mí un gran ejemplo de disciplina y determinación, Te quiero agradecer por cuidar de nuestra familia, por siempre adoptar una postura materna y fuerte cuando lo necesitamos. Te amo hermana.

A mi cuñada y comadre Edith que con su gran corazón me abre, sin pensar, las puertas de su hogar. Te quiero agradecer tu amistad y cuidados. Gracias por unirte con tanto amor a nuestra familia.

Quiero que sepan que, aunque Dios no me dio las fuerzas para gritarles en persona mis sentimientos, siempre están presentes en mi corazón, gracias por todo.

RESUMEN

En esta tesis se analiza la comparación de métodos de almacenamiento energético, uno de los métodos actualmente más explotados, almacenamiento por medio de baterías de ion de litio, en contraste con un sistema basado en la utilización de hidrógeno creado a partir de electrólisis, ambos energizados por medio de energía solar fotovoltaica. Este análisis se fundamenta en bases de datos publicadas para realizar la comparación de manera teórica para así concretar de manera satisfactoria la comparación. Con fines de estandarizar el estudio de ambos métodos de almacenamiento energético se utilizó como común denominador el consumo eléctrico de una residencia ubicada en Cd. Obregón, Sonora, México. Los principales datos que se utilizaron para esta investigación fueron el desarrollo del cálculo del sistema de almacenamiento, la delimitación de la pila de combustible, inversión económica necesaria para cada método, mantenimiento necesario para su correcta operación, tiempo de vida y manejo de los residuos después de su vida útil, concluyendo así con la comparación de las eficiencias de cada uno de los sistemas incluyendo de igual manera las desventajas y ventajas encontradas para cada método. Los resultados indican que actualmente el hidrógeno como método de almacenamiento se encuentra en una fase inicial de desarrollo, por lo que se ve obstaculizado obtener equipos asequibles que generen los suficientes beneficios para que el sistema sea rentable comparándolo con el método de almacenamiento con mayor impacto en el mercado actual el cual, las baterías de ion de litio.

Palabras clave: Almacenamiento energético, Batería de ión de litio, Hidrógeno

Índice

DEDICATORIAS	2
AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN	6
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1 Antecedentes	11
1.2 Planteamiento del problema	15
1.3 Objetivos	16
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4 Justificación	17
1.5 Delimitaciones	18
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Generación de Energía Eléctrica	19
2.1.1 POR MEDIOS CONVENCIONALES	20
2.1.2 POR MEDIOS ENERGÍAS RENOVABLES	23
2.1.3 SISTEMAS ELÉCTRICO AISLADOS	29
2.2 Almacenamiento de energía eléctrica	31
2.2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS	35
2.2.2 BATERÍAS DE IÓN DE LITIO	41
2.3 Hidrógeno	43
2.3.1 PRODUCCIÓN POR ENERGÍA ELÉCTRICA	44

2.3.2 ALMACENAMIENTO	47
2.3.3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	48
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	52
3.1 Tipo de investigación	52
3.2 Diseño de investigación	53
3.3 Hipótesis y Variables	54
3.3.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS	54
3.3.2 VARIABLES DE ESTUDIO	54
3.4 Objeto de estudio	55
3.5 Materiales e Instrumentos	55
3.5.1 MATERIALES	55
3.5.2 INSTRUMENTOS	56
3.6 Procedimiento	56
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	59
4.1 Desarrollo del cálculo para Sistemas de Almacenamiento Energético	59
4.2. Pila de combustible	67
4.3 Inversión Económica	69
4.4 Mantenimiento	70
4.4.1 Mantenimiento de un Sistema de Almacenamiento en Baterías de Litio	70
4.4.2 Mantenimiento de un Sistema de Almacenamiento Energético Basado en la Utilización de Hidrógeno	70
4.5 Tiempo de Vida	71

4.5.1 Durabilidad de los Componentes de un Sistema de Almacenamiento Energético Convencional	71
4.6 Metodología de tratamiento posterior a la vida útil	71
4.6.1 Tratamiento de componentes propios de un sistema de almacenamiento energético convencional	72
4.6.2 Tratamiento de componentes propios de un sistema de almacenamiento energético basado en la utilización hidrógeno	76
4.7 Eficiencias	76
4.7.1 Eficiencias de un sistema de almacenamiento energético convencional	77
4.7.2 Eficiencias de un sistema de almacenamiento energético basado en la utilización de Hidrógeno	77
CAPITULO V. CONCLUSIONES	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curva Teórica del Petróleo de Hubbert (Ferrari, 2013).	23
Figura 2. Fuentes de energías renovables urbanas (Bazzagan, Terrados, Vanegas y Zalamea, 2019).	25
Figura 3. Modelo propuesto para generación solar fotovoltaica (Castillo, 2018).	31
Figura 4. Tecnologías de almacenamiento en la red eléctrica (García, 2017).	33
Figura 5. Ejemplo de almacenamiento de hidrógeno a través de un parque eólico (García, 2017).	35
Figura 6. <i>Instalación de Caes</i> (Escobar, 2011).	40
Figura 7. <i>Electrólisis del agua</i> (Carl, 2005).	47

Figura 8. Celda de combustible de membrana de intercambio de protones (Buchanan, Crabtree y Dresselhaus, 2014).	51
Figura 9. Proceso de análisis de sistema. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 10. Diagrama de grupo primario de baterías. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 11. Diseño campo fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 12. Campo fotovoltaico adicional. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 13. Componentes principales en baterías de litio. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 14. Método de reciclaje de baterías de litio. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 15. Separación de materiales de módulos fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 16. Clasificación de residuos de un módulo solar fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 17 Eficiencia y tiempo de vida de baterías de ion de litio. Fuente: Elaboración propia	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables para el estudio. Fuente: Elaboración propia	54
Tabla 2. Consumo real para ejemplo. Elaboración propia	60
Tabla 3. Demanda máxima en consumo. Fuente: Elaboración propia	68
Tabla 4. Estimado de costos. Fuente: Elaboración propia.	70
Tabla 5. Resultados. Fuente: Elaboración propia.	79
Tabla 6. Conclusiones. Fuente: Elaboración propia.	80

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los antecedentes, la problemática, los objetivos, la justificación y las delimitaciones relacionadas con el presente trabajo de tesis.

1.1 Antecedentes

Desde su primera implementación, la producción continua de energía eléctrica se ha posicionado con un alto grado de importancia para los países en desarrollo. Aunque el tipo energía que el usuario consume se mantiene constante, los métodos, las tecnologías y los medios de producción utilizados en cuanto a energía eléctrica, están en constante cambio. La posibilidad de mejorar las antiguas prácticas en cuanto a eficiencia, así como el ligamiento de los gases producidos en la generación de electricidad por combustibles fósiles al incremento de la temperatura global y sus grandes impactos negativos al ambiente, tuvieron como resultado este interés de buscar nuevas alternativas y cambios en relación a la producción eléctrica.

Las fuentes de producción de menor impacto ambiental son las energías renovables. La generación por energías renovables está formada por sistemas sustentables de producción de energía que representan un mínimo impacto final al medio ambiente

y eliminan la preocupación por agotamiento de combustibles de origen fósil. De hecho:

La generación de energía eléctrica en el mundo depende principalmente de combustibles fósiles. En 1999, el 63.7% de la electricidad se produjo en centrales térmicas (con combustión de derivados del petróleo, gas natural y carbón), el 17.2% en centrales nucleares, 17.5% en hidroeléctricas y 1.6% mediante otras fuentes de energía. En ese mismo año, el principal energético utilizado para la generación eléctrica fue el carbón con 38.1%, seguido del gas natural con 17.1% y los derivados del petróleo con 8.5% (op.cit.). Se espera que en el año 2020 la participación del gas natural se incremente a escala mundial en un 26.5% y que la participación del carbón y de la energía nuclear se reduzca en un 31.7% y 12.2%, respectivamente. Por su parte, las energías renovables representarán el 20% de la producción de la energía eléctrica (Laguna, 2002, pág. 53, párr. 1).

Por lo tanto, se observa como la tendencia en cuanto a la producción de energía está dirigida hacia la producción eléctrica con base en energías renovables y a la minimización de la dependencia de combustibles de origen fósil.

Actualmente el uso de energías renovables (ER) en el mundo aumenta de manera notable en la industria de la producción eléctrica. El uso de las ER o energías limpias enfrenta el considerable factor de que no presentan una producción eléctrica continua sino intermitente. Al contar con interrupciones en la producción los sistemas de ER dependen de manera agregada con sistemas de almacenamiento de energía para poder suministrar con electricidad en momentos donde la producción eléctrica no es posible.

Haciendo referencia a la dependencia de los sistemas de almacenamiento de energía por parte de la producción energética con ER un equipo de investigadores de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, realizó un análisis acerca de los procesos de producción de energía mediante ER y la factibilidad de almacenar la

energía producida por este tipo de fuentes. “Los *energy storage system* (ESS) no solamente son útiles para compensar la potencia en plantas eólicas y solares, también son usados a nivel de distribución para mejorar la calidad de la energía, mejorar el consumo, aumentar la robustez en redes débiles y retardar la construcción de redes de transmisión” (Escobar y Holguín, 2011).

El uso de sistemas de almacenamiento eléctrico en las ER resulta indispensable, la sinergia de estas fuentes de producción con el sistema de almacenamiento da como resultado la eliminación de variaciones y fluctuaciones que tiene la energía producida por las fuentes. Estas fluctuaciones dependen de la zona en donde se aprovecha el recurso renovable, considerando estos factores se puede crear un sistema que cumpla, tanto con los aspectos técnicos, como con los económicos que el proyecto o implementación requiera.

La utilización de baterías de “ión de litio” se ha convertido en un avance importante para el almacenamiento de energía eléctrica. La compañía Tesla Motors reveló al público en 2018 su nuevo sistema de almacenamiento de energía residencial el cual utiliza bancos de baterías de “ión de litio”. Este sistema, *Powerwall*, más que separar al usuario por completo de la red eléctrica, busca proporcionar al usuario un apoyo adicional el cual es de utilidad en apagones o en horarios en los que la energía aumente considerablemente de costo. Una de las principales desventajas de las baterías de ión de litio es su calentamiento en ciclos de carga y descarga. Tesla Motors ha enfocado investigación para eficientizar el método de enfriamiento de sus bancos de baterías para solventar esto. Este sistema de enfriamiento es también utilizado en los autos eléctricos de la compañía que al ser de gran flujo de energía de descarga demuestra el correcto funcionamiento de los bancos de baterías.

Otras compañías productoras de automóviles han invertido recursos en investigación para el desarrollo de tecnologías de almacenamiento energético. Toyota innovó un nuevo sistema de almacenamiento de energía y combustible para sus automóviles de producción masiva. La tecnología implementada en el Toyota Mirai 2018 consiste en un vehículo de propulsión eléctrica con un tanque de

almacenamiento de hidrógeno. El hidrógeno de estos tanques es transformado por medio de una pila de combustible en energía eléctrica. La energía eléctrica producida en el vehículo puede ser usada para propulsión del mismo o bien como sustituto energético en aplicaciones residenciales.

Al igual que su conveniente uso en almacenamiento en pequeños volúmenes para medios de transporte, el hidrógeno puede ser utilizado de igual manera en sistemas de gran escala en volúmenes de mayor magnitud. Por estas características existen investigaciones actuales acerca de la correcta utilización del hidrógeno para almacenar energía. Cabe mencionar que unos investigadores de la Universidad Autónoma de Aguascalientes realizaron un estudio de potencialidad en el cual evaluaron el hidrógeno como método de almacenamiento de energía en México. Este estudio:

Tiene como objetivo identificar el potencial que tienen las ER en México al ser utilizadas eficientemente para almacenar la energía por medio del hidrógeno. Se identifican el tipo, ubicación, capacidad y costo de las principales ER en México. Asimismo, se establece un escenario prospectivo de capacidad de almacenamiento mediante el acoplamiento de las ER-H₂ para cuatro periodos de tiempo (2015, 2020, 2025 y 2029). Las estimaciones muestran una capacidad de almacenamiento de hasta 71,135 GWh/año por medio del hidrógeno al año 2029. Los resultados de esta investigación servirán como referencia para realizar estudios más detallados para el diseño de cadenas de suministro para ER-H₂ (Morales, Pérez y Pérez, 2017, p. 92, párr. 1).

Al igual que las energías renovables en la producción eléctrica en el mundo, el hidrógeno es una alternativa viable de los métodos tradicionales de almacenamiento energético. Esto se puede observar viendo el gran interés de parte de los investigadores en el tema, evaluar y considerar las investigaciones pasadas podría facilitar la elaboración de futuras investigaciones y futuros proyectos.

1.2 Planteamiento del problema

La energía eléctrica ha dejado de ser considerado un lujo para establecerse como un derecho universal. El desarrollo personal en la actualidad involucra en gran medida la utilización de energía eléctrica, así como ésta también es indispensable para el desarrollo y crecimiento social en general; sectores como el educativo, tecnológico, salud, etc.; dependen en gran medida del aprovechamiento de este recurso.

La producción de energía eléctrica se basa en la transformación de la energía proveniente de algún tipo de fuente para su posterior aprovechamiento. Las centrales de generación eléctrica hacen posible la producción eléctrica a nivel industrial y son el sistema más recurrente para satisfacer la demanda energética del mundo. Las fuentes de energía más utilizadas a nivel global son las comúnmente categorizadas como convencionales, de origen fósil, aunque también se cuenta cada vez más con la presencia del uso de fuentes no convencionales, renovables y limpias.

Uno de los problemas de mayor importancia que existe en los sistemas de generación eléctrica es el almacenamiento de energía. El almacenamiento representa la posibilidad de un aprovechamiento óptimo de la energía generada al conservar en la medida de lo posible cierta cantidad de ésta para su futuro uso. Desde la prehistoria el almacenamiento de energía ha existido, pero no fue hasta el desarrollo económico que produjo la introducción generalizada de electricidad que se planteó como un factor dominante. En el caso de la energía eléctrica lo generado es usualmente consumido o transportado de manera inmediata ya que para almacenarla se cuenta con únicamente dispositivos de menor escala debido a las características y propiedades que ésta presenta, lo cual resulta impráctico e ineficiente en cantidades relativamente grandes de energía eléctrica. Los sistemas de almacenamiento energético de tipo eléctrico, al contrario de otros tipos de tecnología, no han avanzado de manera considerable a través de los años. Una de las tecnologías actuales de mejores propiedades y características para almacenar energía eléctrica es el almacenamiento en baterías de ión de litio, estas baterías, aunque son

conocidas por sus grandes beneficios, carecen de muchas características que son consideradas indispensables en el diseño de sistemas sustentables; la exigencia energética de los sistemas ha evolucionado, pero se ha vuelto complicado el satisfacer esa necesidad con las limitaciones de los equipos existentes. Este problema que presenta la energía eléctrica al ser almacenada ocasiona la consideración en mayor medida de fuentes de energía convencionales para la producción de energía eléctrica al ser éstas no intermitentes reflejando así ventajas y pérdidas considerablemente menores frente a la producción eléctrica con fuentes de energía no convencionales; razón principal del dominio de este tipo de fuentes en el mercado eléctrico industrial.

Teniendo en cuenta la situación de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, ¿Cuál es el método de almacenamiento de energía eléctrica más apropiado que permita un manejo energético óptimo?

1.3 Objetivos

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la funcionalidad de un sistema de almacenamiento de energía por acumulación de hidrógeno producido por hidrólisis a través de una celda de hidrógeno para comparar la viabilidad del sistema en contraste al método de almacenamiento por ión de litio mediante el estudio de sus propiedades y características.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar el método de almacenamiento por acumulación de hidrógeno y el de almacenamiento por ión de litio a través de bases de datos publicadas para conocer sus características y propiedades.
- Realizar un estudio comparativo entre los gastos de inversión y mantenimiento de los sistemas de almacenamiento por acumulación de hidrógeno y de almacenamiento por ión de litio por medio de la utilización de contabilidad de costos como herramienta financiera, para conocer las diferencias entre los sistemas.
- Realizar un estudio comparativo entre la eficiencia energética de los sistemas de almacenamiento por acumulación de hidrógeno y de almacenamiento por ión de litio utilizando un análisis costo-efectividad para conocer la relación de energía de entrada y de salida de cada sistema.
- Realizar un estudio comparativo entre la longevidad de los componentes de los sistemas de almacenamiento por acumulación de hidrógeno con los componentes de los sistemas de almacenamiento por ión de litio para definir la viabilidad del sistema a largo plazo a través del análisis de las especificaciones y propiedades de los equipos en el mercado actual.

1.4 Justificación

Actualmente el estudio y desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica es de vital importancia para la evolución energética. Cada vez es más importante proyectar la efectividad de tecnologías actuales en comparación con otras alternativas de almacenamiento de energía en desarrollo o en investigación con el fin de efficientizar los sistemas eléctricos aislados en cuestión de consumo y almacenamiento eléctrico.

El vector hidrógeno representa una alternativa atractiva a los sistemas de almacenamiento de energía debido a su capacidad energética alta. La problemática

del aprovechamiento de este método es el diseño específico que estos sistemas requieren, así como la problemática que representa su almacenamiento.

Estos estudios y comparaciones tendrán como resultado la especificación de las características positivas y negativas del almacenamiento de energía por hidrógeno y el almacenamiento por ión de litio, que a su vez asegurará inversión para recursos en sistemas de almacenamiento de energía eléctrica. El análisis de estos sistemas de almacenamiento modificará el impacto negativo en suelo y subsuelo por el manejo incorrecto de sistemas de almacenamiento convencionales.

Entre los beneficiarios directos de estos estudios se encuentran los interesados en sistemas eléctricos aislados, los inversionistas en el desarrollo de estas tecnologías, el futuro alumnado y académicos que utilizarán la información recabada durante su desarrollo profesional y académico.

1.5 Delimitaciones

Los experimentos necesarios para el estudio se realizarán en los laboratorios y talleres de la Universidad La Salle Noroeste ubicada en el municipio de Cajeme, Sonora, en un periodo estimado equivalente a un año iniciando en enero de 2020 y terminando en diciembre del mismo a través de la utilización de herramienta facilitada por la institución. El alcance de este proyecto es el de obtener resultados y conclusiones de los experimentos, así como de los análisis entre sistemas de almacenamiento de energía para uso posterior de posibles interesados.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan las definiciones, conceptos y temas de interés relacionados la presente tesis. Dentro de los temas expuestos en el marco teórico se encuentra la generación de energía eléctrica, tanto mediante medios convencionales, como no convencionales; dentro de este mismo tema también se tiene un apartado que trata acerca de los sistemas eléctricos aislados, sus características y funcionamiento. Posteriormente, se abarca el tema de almacenamiento de energía eléctrica para establecer la importancia de las baterías de ión de litio en la actualidad. Finalmente, se introduce el tema del hidrógeno como recurso energético y se complementa con su almacenamiento y producción.

2.1 Generación de Energía Eléctrica

En la actualidad la energía eléctrica o electricidad resulta ser un pilar de suma importancia en la estructura económica a nivel mundial, tanto así que desde hace décadas este recurso es considerado como un derecho universal por parte de la

Organización de las Naciones Unidas. Este insumo es utilizado de manera general en la producción de bienes y servicios, aparte de ser de vital importancia en el desarrollo de las actividades cotidianas de las personas y sociedades. Debido a la importancia que la electricidad representa a nivel global su demanda ha ido en aumento junto con las exigencias y el número de usuarios de esta, por esta razón la industria eléctrica tiene el reto de seguir avanzando para suplir esas necesidades y poder suplir la demanda de la mejor manera posible.

Aunque en los últimos años el aumento en el uso de energías limpias y renovables en la generación de energía eléctrica ha sido considerable en todo el mundo, no se ha podido quitar a los combustibles fósiles del primer peldaño. La dependencia y el peso que estos últimos combustibles tienen en la economía global, retrasan en parte el crecimiento de tecnologías y el desarrollo de generación eléctrica con fuentes alternativas. Tomando en cuenta que el objetivo de la generación eléctrica es el suministro del recurso de manera eficiente, tanto para el cliente, como para el generador, así como posibles terceros que puedan resultar afectados por esta práctica se debe tener en consideración distintos tipos de generación eléctrica ya sea por medio de distintas fuentes primarias o por la utilización de distintas tecnologías según sea el caso; de esta manera se asegura la estabilidad económica y el correcto desarrollo de las personas dentro de la sociedad.

2.1.1 POR MEDIOS CONVENCIONALES

Se le conoce como medios o métodos convencionales de generación eléctrica a todo aquel proceso que involucre a un combustible fósil como fuente primaria para la obtención del recurso eléctrico. Básicamente, estos medios constan de la utilización de la biomasa generada con el paso del tiempo y procesos biológicos para hacer trabajar un sistema el cual genera energía eléctrica. Los medios convencionales más utilizados por el hombre han sido el carbón, el petróleo y el gas natural, entre otros.

Desde los comienzos de la industria eléctrica el perfeccionamiento de la obtención de la electricidad ha ido en aumento para así obtener un mayor beneficio de este

insumo en el desarrollo de distintas actividades. Esta mejora se ha visto en los métodos convencionales debido a la eficiencia que éstos han mostrado frente a las fuentes de energía limpias en la industria, principalmente en la generación eléctrica a gran escala mientras que otras fuentes de generación eléctrica no han sido explotadas de manera atractiva en ese volúmen. Un ejemplo de los métodos convencionales más utilizados es la utilización de turbinas de combustión; estas turbinas son accionadas mediante la combustión de un combustible fósil y ha demostrado ser un desarrollo eficiente en cuanto a generación eléctrica se trata.

Uno de los aspectos más conocidos acerca del uso de estos energéticos es la cantidad elevada de emisiones contaminantes, tanto locales como gases de efecto invernadero, principalmente el bióxido de carbono, que se generan al trabajar con ellos. Los contaminantes locales son aquellos que afectan a cierta área o región delimitada mientras que los gases de efecto invernadero son aquellos gases atmosféricos los cuales absorben y emiten radiación proveniente del sol dentro de la atmósfera terrestre para la efectuación de un proceso natural del planeta cuyo objetivo es la purificación del ambiente; este proceso recibe el nombre de efecto invernadero debido a que se presenta las mismas características que estos sistemas solo que a diferente escala. En adición a las emisiones, también su empleo provoca lluvia ácida, mezclas de ácido sulfúrico y nítrico los cuales se precipitan junto con la lluvia natural y en ocasiones con la nieve provocando así la contaminación de superficies. Teniendo en cuenta dichos aspectos de los energéticos convencionales se podría intuir que la utilización de fuentes de energía distintas aumentará para evitar lo anterior mencionado, lo que resulta curioso es que esto aunque sí se esté presentando no lo está haciendo a grandes rasgos, esto llega a manifestarse en diversas situaciones debido a la dependencia de los métodos convencionales para la generación eléctrica, por un monopolio energético establecido, la falta de información en el tema, el pobre desarrollo de nuevas tecnologías de generación eléctrica, entre otras numerosas razones.

Los impactos que las fuentes convencionales de energía en el sistema económico global son evidentes. Al ser este sistema establecido después de la segunda guerra mundial se buscó la mejor manera de manejar los recursos energéticos para beneficio de la sociedad moderna de aquél entonces, pero como todos aquellos recursos finitos de producción estos siguen la curva de Hubbert (ver Figura 1). En la teoría de la curva de Hubbert se plantea a estos recursos como crecientes hasta cierto punto máximo, o pico, donde estos se consuman como más accesibles y de calidad relativamente alta; posterior a este punto se tiene un evidente declive de explotación de los mismos recursos, pero con pobreza en cuanto a calidad y cantidad se refiere, siendo esta explotación más costosa y menos conveniente para el mercado energético. En resumen, esta curva teórica la cual representa la producción y explotación de los combustibles fósiles postulada originalmente por Marion King Hubbert, geofísico estadounidense, establece que a medida que el tiempo transcurra la obtención de estos energéticos será cada vez menos redituable debido a la baja calidad energética, cantidad y eficiencia de estos.

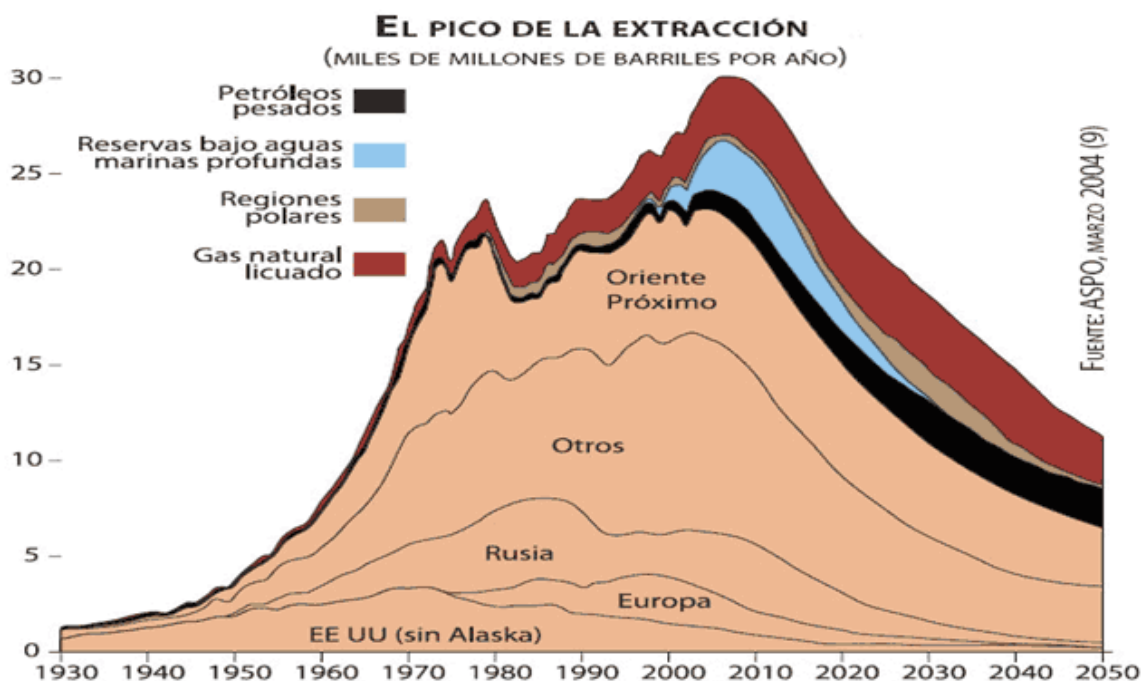


Figura 1. Curva Teórica del Petróleo de Hubbert (Ferrari, 2013).

Para asegurar la estabilidad económica del sector energético, la preservación de recursos energéticos, así como el bienestar y recuperación del medio ambiente no solo basta con una transición de un tipo de fuentes energéticas a otras, sino que además lo que se requiere en gran medida es ahorro energético, aprender a consumir este recurso de manera controlada y no exigir más de lo que realmente se requiere para el desarrollo de actividades. “En el corto plazo la mejor estrategia para asegurar recursos energéticos suficientes para las generaciones futuras reside esencialmente en el ahorro energético” (Ferrari, 2013).

2.1.2 POR MEDIOS ENERGÍAS RENOVABLES

En la generación de energía eléctrica se tiene el uso de energías renovables para la producción de la misma, este tipo de energías o energéticos se traducen en energías o recursos que pueden ser establecidos como recursos que presentan un tiempo de regeneración más rápido que el de su aprovechamiento, debido a eso se entiende

que el uso de las energías renovables consta de partir de algún recurso inagotable, o bien, infinito para su aprovechamiento. Es importante la planificación del uso de la energía producida por dichas fuentes puesto que estas dependen de las situaciones y estado de las zonas en donde se utilizarán dichas energías, esto debido a que algunos recursos se encuentran con mayor accesibilidad que otros según sea el caso. Es impredecible la planeación de la generación eléctrica por estos medios ya que hacer este tipo de instalaciones lleva consigo una considerable inversión económica. Aunado a esto las energías renovables (ER) facilita su aprovechamiento o su explotación a gran escala en aquellas ciudades con una solidez económica y una infraestructura que relativamente pocas ciudades actualmente tienen. Por esta razón investigadores alrededor de todo el mundo hacen recopilación de investigación sobre la manera en la que muchas ciudades pueden aprovechar los recursos renovables que sus mismas zonas geográficas o sus condiciones demográficas les otorgan, por ejemplo, el uso de los materiales o recursos endógenos, así como los posibles residuos que puedan presentar. Por ejemplo:

En Tartu (Estonia) se valoró la capacidad de aprovechar residuos urbanos para obtener bioetanol, pudiéndose sustituir con ello el 60% de la demanda de combustibles). En Mar del Plata (Argentina), el 4,36% de la electricidad puede abastecerse utilizando residuos forestales urbanos. En Tijuana (México), el 40% de iluminación artificial puede suplirse con biogás de rellenos sanitarios). (Bazzagan, Terrados, Vanegas y Zalamea, 2019, pag. 261, párr. 11).

Esto hace notar el cómo algunas ciudades, terminan despreciando el potencial energético debido a la falta de infraestructura y recursos.

Es imprescindible delimitar cada una de las ER que se pueden utilizar en zonas, tanto urbanas, como rurales puesto que repercute especialmente en la sociedad, por lo que esto ayuda a fomentar su uso, así como la investigación de las mismas; en adición a esto la creación de carreras universitarias que están enfocadas en el área

indudablemente resultan en una mayor investigación de las energías o tecnologías relacionadas que actualmente se utilizan siendo esto un factor para nuevos desarrollos en el área que día con día se tienen alrededor del mundo. Esto se traduce en la implementación con mayor regularidad de las energías renovables en zonas distintas por ser tecnologías que poco a poco debido al desarrollo de las mismas se vuelven accesibles y asequibles, repercutiendo así en el uso este tipo de tecnologías y sistemas. La Figura 2 muestra algunos ejemplos de fuentes de energía urbanas.

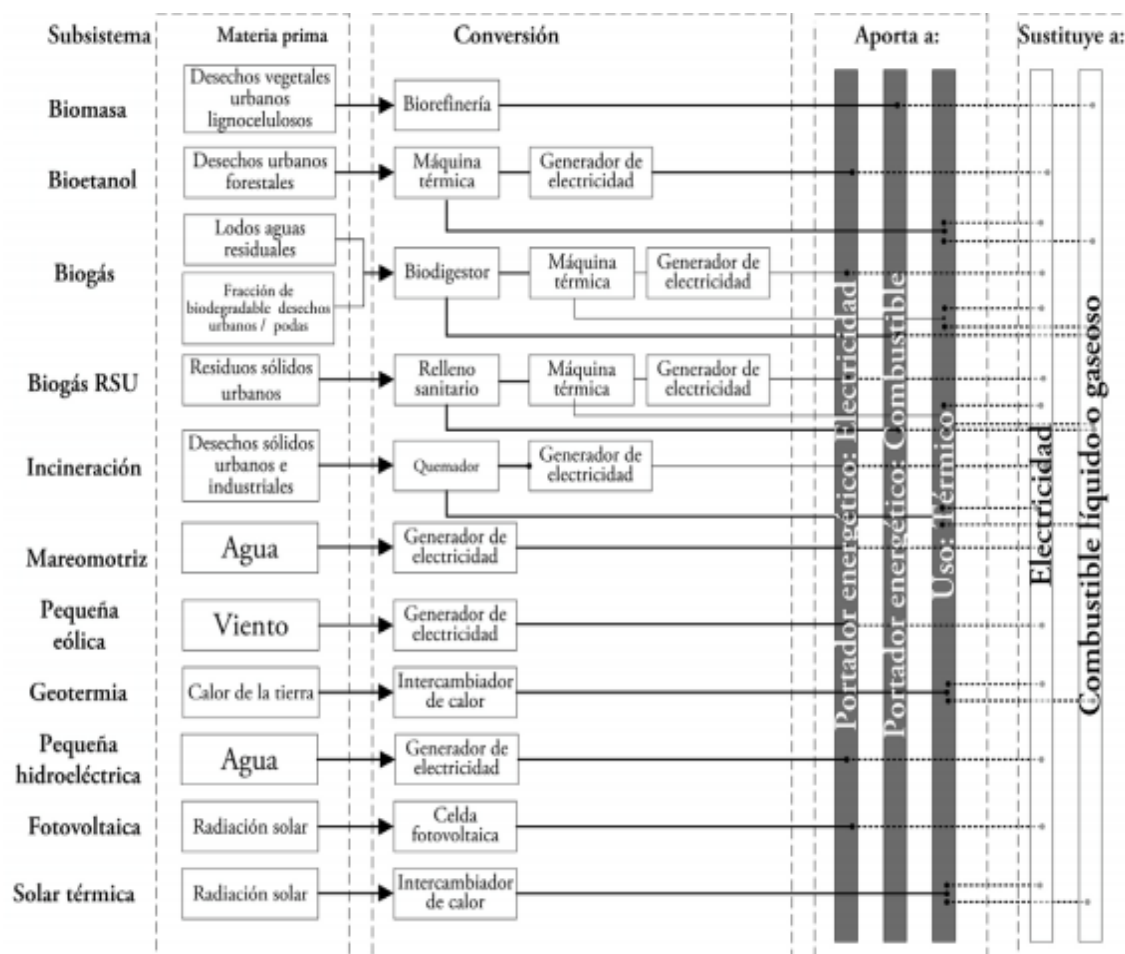


Figura 2. Fuentes de energías renovables urbanas (Bazzagan, Terrados, Vanegas y Zalamea, 2019).

Un energético considerado como ER es el bioetanol, si este es originado de residuos urbanos, lignocelulosas, se le conoce como bioetanol de segunda generación. Este proporciona un valor añadido a los desechos que en la ciudad son considerados

como desperdicio, como lo son estos materiales orgánicos, que al utilizarse como bioetanol contribuyen drásticamente a la reducción de estos desperdicios para su utilización en este tipo de procesos.

Continuando con las diferentes tecnologías de ER que pueden ser utilizadas en zonas urbanas se tiene a la biomasa que mediante procesos químicos y bioquímicos puede llegar a transformarse en energía eléctrica, calor o combustible. Se les denomina materias primas a los desechos de poda de jardines o de la caída de hojas de los árboles al cambiar de estación, debido a ser varios materiales orgánicos la mezcla de la biomasa no resulta homogénea por lo que es necesario un proceso posterior a la recolecta de la materia prima para poder ser transformada en biomasa utilizable.

Otro energético considerado como ER es el biogás para la producción de energía eléctrica, puesto que el biogás puede desempeñar una opción de amplia viabilidad en la producción de energía que además contribuye en gran medida a la protección del medio ambiente. Cuenta con un amplio desarrollo en la tecnología para poder ser más asequible en su explotación, debido a que la manera de extracción de la materia prima para esta tecnología radica en residuos industriales, podas, desechos sólidos, aguas residuales, etc. La manera en la que se obtiene el biogás es por dos maneras las cuales son biogás de biodigestor y de rellenos sanitarios. El biogás de biodigestores utiliza las aguas residuales para la generación de energía eléctrica o alguna otra energía que se requiera en la zona, la materia prima se recolecta por lo que se forman lodos que a su vez producen metano el cual es quemado para la generación de electricidad a partir de dicha quema. El biogás de rellenos sanitarios, situados por cientos de toneladas, por lo general en zonas aledañas a las zonas urbanas, estos son apilados y al descomponerse la materia orgánica e inorgánica se crean gases que, al no someterse a filtrados, pueden llegar a escaparse y causar daños en la salud de las personas y por supuesto a la capa de ozono.

Un tipo de ER que poco a poco mediante el desarrollo de la misma ha tomado más relevancia en las zonas que se encuentran en las aledañas a las costas, es la energía mareomotriz. Esta utiliza el movimiento de las corrientes o el movimiento generado

naturalmente por las olas. Actualmente su desarrollo ya se encuentra inclusive a escala comercial, por lo que se hace una tecnología un tanto más accesible que representa una opción para las zonas urbanas cuya ubicación geográfica los favorezca para utilizar dicha tecnología, sin embargo, es necesario remarcar el que es una tecnología de naturaleza intermitente por lo que su producción de energía aprovechable es un tanto impredecible.

La energía eólica es un tipo de energía que se obtiene de las corrientes de viento. Las corrientes de viento son generadas por el cambio drástico de temperaturas en delimitadas zonas geográficas, requiere necesariamente estudios para comprobar viabilidad del potencial eólico en la zona en la que se desea instalar. Actualmente es una de las tecnologías que en los últimos años han crecido en cuanto a instalación debido a que al instalarse en las zonas que cuenten con las condiciones adecuadas para su correcto funcionamiento, así como su avance tecnológico ha atraído inversión. Se traduce en una de las tecnologías que más produce energía mundialmente. Las instalaciones eólicas en zonas urbanas reducen las pérdidas puesto que la carga se encuentra a una relativa proximidad a la generación, reduce la demanda eléctrica de la red además de evitar gases de efecto invernadero como con la utilización de combustibles fósiles.

La geotermia es una ER que es utilizada para el calentamiento de agua en aplicaciones como lo es la climatización o generación eléctrica, lo cual puede ser utilizado en procesos, tanto urbanos, como industriales. Dicha energía al ser comparada con otras representa una amplia ventaja en cuanto a eficiencia de los sistemas, puesto a que esta no es intermitente. Actualmente el uso de dicha energía ha incrementado en un 10% mundialmente debido a su amplio rendimiento y eficiencia que este tipo de sistemas presentan, lo cual justifica el uso en zonas urbanas que cuentan con las condiciones necesarias para explotar el recurso.

El aprovechamiento de la energía cinética por caída del agua se ha convertido en una de las energías renovables más dominantes, no solo en México sino a nivel mundial, la sencilla operación de grandes centrales hidroeléctricas resulta una opción más

que viable para su utilización en zonas cercanas a zonas urbanas. Buscando el máximo aprovechamiento del flujo en la zona se han creado centrales de diferentes tamaños, que representan una reducción en pérdidas significativas del sistema tales como las pérdidas por transmisión.

La energía solar fotovoltaica es una de las potencias energéticas y actualmente sigue en desarrollo buscando el máximo aprovechamiento de los espacios para la generación de energía eléctrica, aprovechando uno de los recursos renovables y en cierta parte infinitos que existen, la radiación solar. La energía solar fotovoltaica aprovecha la radiación que llega a tierra y haciendo uso de materiales como lo es el silicio, uno de los elementos más abundantes que existen con alta conductividad, al agregar una banda de conducción al momento de llegar la radiación y golpear un módulo fotovoltaico, los electrones que se encuentran en dicha banda comienzan el proceso de excitación por lo que comienzan a saltar generando una corriente eléctrica directa. Es importante entender que los sistemas fotovoltaicos, así como muchas de las energías renovables, para ser aprovechados de una manera eficiente es necesario contar con las condiciones adecuadas para un correcto aprovechamiento. La amplia investigación y el desarrollo de la tecnología de países como China hace que en el mercado el uso de la energía fotovoltaica sea, además de accesible, una energía asequible para el público en general buscando así que en las zonas urbanas se implementen para la generación eléctrica para cubrir el consumo de los hogares donde sean instalados, buscando así dar un paso para el futuro en la generación de energía eléctrica. Al ser una de las energías que se consideran intermitentes puesto que no se puede contar con la misma producción al tener la posibilidad de intervención de periodos nocturnos, nubes o algún otro tipo de obstáculo representa una principal barrera en su explotación.

La energía solar térmica consta del aprovechamiento de la radiación proveniente del sol en forma de calor como fuente energética para concentrar el recurso y de esta manera poder realizar procesos que requieren elevadas temperaturas. Normalmente este tipo de energía es aprovechada en sistemas donde el calor es aprovechado para

hervir agua o distintos líquidos y adquirir energía eléctrica a través del accionamiento de turbinas. En escalas más pequeñas los sistemas de energía solar térmica tienen como objetivo el calentamiento de agua o espacios.

2.1.3 SISTEMAS ELÉCTRICO AISLADOS

Alto porcentaje de la población consumista desconoce cómo es que la energía eléctrica es entregada a sus hogares. Aunque el proceso de generación y distribución de energía eléctrica a grandes rasgos puede sonar sencillo, existen muchas variantes que interfieren en el proceso. La mayoría de la población recibe la energía eléctrica por medio de una red de distribución que facilita el transporte de la energía del punto de generación al usuario final. Este método de distribución en red, aunque tiene grandes ventajas, disminuye la eficiencia del sistema por razón de pérdidas en transporte de energía. Aún con esta gran desventaja resulta una ser la opción más utilizada por permitir la instalación de tecnologías de generación a gran escala en ubicaciones lejanas al consumo final de la energía. Para una situación en la que se busque proveer de energía eléctrica a una localización lejana a esta red de distribución se cuenta con la existencia de los llamados sistemas aislados.

Un sistema aislado se refiere a un sistema en el cual la ubicación de generación y consumo de energía son compartidos. Este tipo de sistemas son comúnmente utilizados en aplicaciones rurales para satisfacer sus necesidades energéticas. Una de las principales ventajas que ofrecen los sistemas aislados es la reducción en pérdidas energéticas y por mantenimiento al evitar las grandes distancias de transporte en los sistemas de distribución.

La fluctuación ascendente de los precios de combustibles fósiles reduce la viabilidad y atractivo de los métodos convencionales de generación por lo que aumenta el interés de buscar nuevas alternativas de generación. Las tecnologías de generación por fuentes renovables se han posicionado en la opción de mayor interés gracias a su reducción de costos en el mercado y por sus propiedades de generación limpia. “El principal problema de los sistemas basados exclusivamente en un tipo de energía

renovable es la variabilidad de la climatología y por lo tanto su carácter intermitente” (Cristóbal, 2017). Lo anterior es considerado el principal problema a considerar al proponer e instalar dichos sistemas de generación, aunque existen fuentes renovables constantes tales como la geotermia, la mayoría presentan curvas de producción con muchas variaciones y poco confiables para la entrega constante de energía eléctrica. Este problema puede ser solucionado de dos maneras, con la incorporación de otro método de generación o la implementación de un método de almacenamiento de energía al sistema.

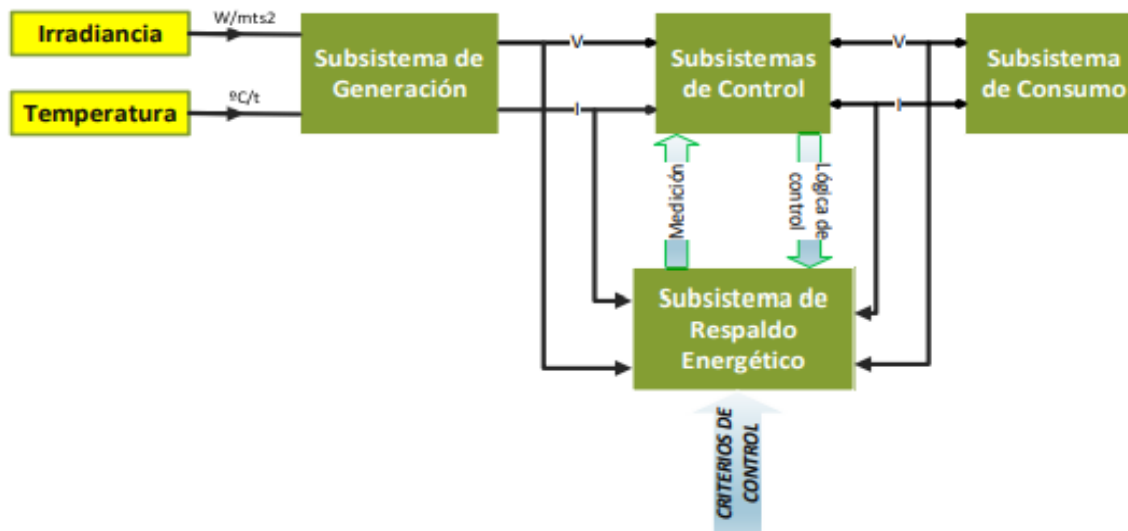
El término cogeneración o generación híbrida es definida como la integración de dos o más sistemas de generación, por lo general es implementado para eliminar la variación que tienen las diferentes fuentes de generación de energía, obteniendo así, una salida constante de energía. En el caso de la implementación de energías renovables es común la integración de otra fuente renovable o la utilización de generadores a base de combustibles fósiles para asegurar una curva de producción de energía constante al usuario final.

La utilización de sistemas de almacenamiento de energía podría parecer ante los ojos de muchos la opción más inteligente y viable. Aunque estos representan una solución aparentemente menos complicada que la anterior, la falta de desarrollo tecnológico en el tema representa altos costos de inversión y mantenimiento. Los sistemas de almacenamiento más utilizados en estas aplicaciones por su alta densidad de almacenamiento son los bancos de baterías de ión de litio.

La utilización de baterías de ión de litio en la actualidad está posicionada como la tecnología más avanzada y de mayor efectividad, sin embargo, así como se busca sustituir la generación de energía por métodos convencionales con energías renovables por su disminución en impacto ambiental, también se busca utilizar métodos de almacenamiento amigables con el ambiente.

Una de las tecnologías en desarrollo para los sistemas aislados es el almacenamiento de energía en hidrógeno. El hidrógeno en este caso puede ser producido por una fuente renovable y utilizado cuando el sistema lo demande.

En la Figura 3 se presenta un modelo gráfico el cual representa los componentes principales de un sistema aislado con generación por energía solar como fuente principal. Se observa una composición principal de cuatro componentes; el subsistema de generación representa la generación de energía solar fotovoltaica que tiene como entrada la variación de irradiación y temperatura. Por otra parte, el



subsistema de control representa el sistema utilizado para controlar la entrega de energía proveniente del sistema de generación principal y el sistema secundario o de respaldo. Se puede observar en la Figura 3 cómo este bloque está en constante

Figura 3. Modelo propuesto para generación solar fotovoltaica (Castillo, 2018).

intercambio de información con el bloque subsistema de respaldo energético. El subsistema de respaldo energético representa el sistema de generación de respaldo o sistema de almacenamiento del sistema completo y por último el subsistema de consumo representa el consumo del sistema.

2.2 Almacenamiento de energía eléctrica

La energía eléctrica en la actualidad puede ser generada y transportada fácilmente, pero el almacenamiento de esta resulta mucho más complicado. El almacenamiento

de energía se refiere a un método utilizado para conservar la energía obtenida de algún método de generación para después ser utilizada cuando sea necesario. Esta energía puede ser potencial, química, gravitacional, elástica o cinética.

En la red eléctrica existen tres tipos de almacenamiento de energía clasificados por su capacidad; almacenamiento a gran escala con unidades en gigawatts (GW), almacenamiento en redes con unidades en megawatts (MW) y almacenamiento para consumidor final con unidades en kilowatts (kW).

Cuando se busca incorporar un método de almacenamiento de energía a un sistema es importante primero evaluar el comportamiento final de demanda energética. El aplanamiento de la curva de demanda es un término que hace referencia a la reducción de variaciones excesivas en el comportamiento de la curva de demanda energética. El mantener una demanda considerablemente constante asegura una mayor eficiencia y una entrega constante de energía al usuario final.

Las tecnologías de almacenamiento también son clasificadas según el tipo de transformación energética utilizada en el método. En la Figura 4 se presenta gráficamente las cuatro principales tecnologías utilizadas para el almacenamiento de energía y sus correspondientes variaciones específicas. El almacenamiento mecánico consiste básicamente en almacenar energía de tal forma que pueda ser recuperada en forma de un movimiento físico-mecánico. El almacenamiento por aire comprimido consiste en almacenar aire a altas presiones en recipientes naturales o artificiales para después producir a través de una turbina y un generador la energía eléctrica que el sistema demande. Es importante considerar que la capacidad de los generadores eléctricos de los métodos mecánicos de almacenamiento depende de la demanda real del sistema, lo que se traduce en un aumento de energía necesaria para mover el generador entre más energía este demande. El almacenamiento por bombeo hidráulico consiste en la extracción de un fluido, por lo general agua, a una altura mayor, para después aprovechar su energía cinética con una turbina de generación eléctrica. A diferencia de los métodos anteriores, el almacenamiento por volantes de inercia no es comúnmente utilizado en aplicaciones macro, pero consiste

en la utilización de un motor generador que produce un movimiento libre cuando la demanda se encuentra en un punto valle y recupera la energía por medio del generador en situaciones punta de demanda.

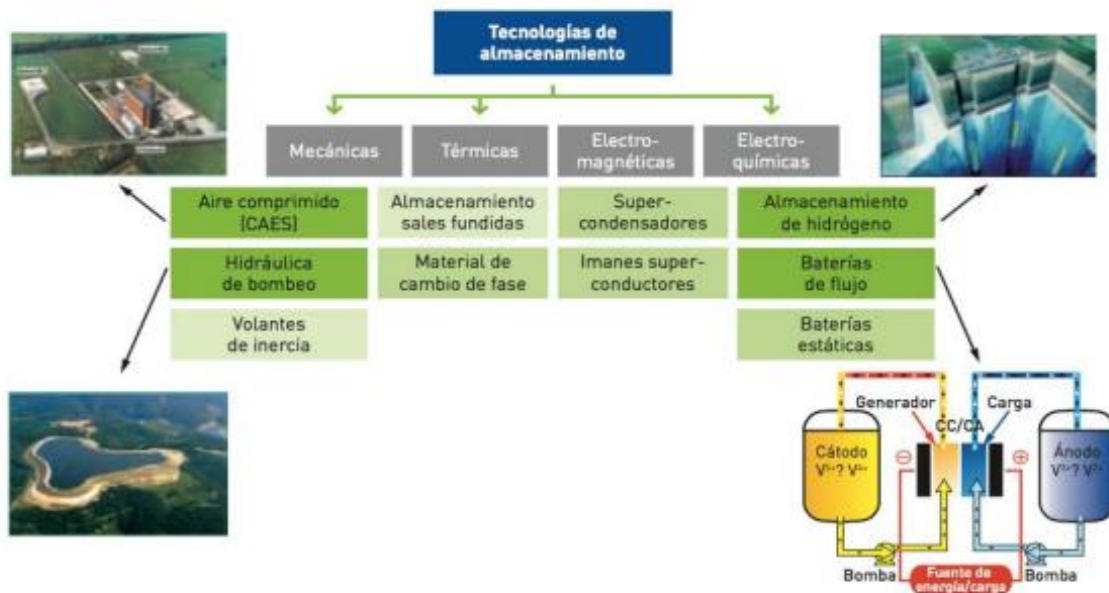


Figura 4. Tecnologías de almacenamiento en la red eléctrica (García, 2017).

Las tecnologías de almacenamiento térmicas se basan básicamente en el almacenamiento de energía por diferenciales de temperatura. La energía accesible en el momento es utilizada para elevar una masa a una mayor o menor temperatura para después utilizar la energía liberada en su posterior equilibrio térmico. Este tipo de almacenamiento de energía puede ser utilizado en aplicaciones de generación eléctrica y en climatización de edificaciones. Existen dos principales tipos de almacenamientos térmicos, almacenamiento de calor sensible y almacenamiento de calor latente. El almacenamiento de calor sensible consiste en modificar la temperatura de un material hasta llevarlo a un cambio de fase, después es posible aprovechar la energía liberada el inverso cambio de fase en situaciones de demanda energética. A diferencia del almacenamiento de calor latente el almacenamiento de calor sensible modifica la temperatura de un material, por lo general un fluido, sin

comprometerla a un cambio de fase. La energía aprovechada es aquella liberada en el equilibrio térmico del material.

Las tecnologías de almacenamiento electromagnéticas aprovechan el movimiento iónico en los fenómenos eléctricos y magnéticos para almacenar energía eléctrica. Los condensadores electroquímicos y los imanes semiconductores son ejemplos de esta tecnología. Una de las ventajas principales de esta tecnología es su rápido flujo energético que permite una carga y descarga rápida de energía.

Por último, las tecnologías de almacenamiento electroquímicas utilizan métodos químicos para almacenar energía. Los ejemplos más representativos de esta tecnología de almacenamiento son las baterías y el almacenamiento por hidrógeno. Las baterías, aunque representa una opción tentativa por su gran capacidad de almacenamiento por densidad, tienen como desventajas su elevado costo y poco tiempo de vida. Las desventajas anteriores se vuelven más impactantes cuando se busca almacenar grandes cantidades de energía. Por otra parte, el almacenamiento de energía por hidrógeno es una opción viable en instalaciones de gran tamaño, pero su almacenamiento y producción pueden representar un gran desafío. La Figura 5 expone un ejemplo de almacenamiento de hidrógeno utilizando la energía producida por un parque eólico. El ejemplo presenta cinco componentes principales, el electrolizador recibe a su entrada agua y energía eléctrica, se encarga de separar la molécula en sus dos componentes lo que le permite tener un hidrógeno en estado gaseoso a la salida. Después este hidrógeno pasa a ser comprimido y almacenado en las siguientes etapas del proceso. Por último, el motor de hidrógeno y generador transforman la energía contenida en el combustible en energía eléctrica para su posterior uso.



Figura 5. Ejemplo de almacenamiento de hidrógeno a través de un parque eólico (García, 2017).

2.2.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

La principal razón de la existencia de la necesidad del uso de almacenamiento de energía es la naturaleza intermitente e impredecible que presentan algunos tipos de generadores eléctricos como lo son los energéticos renovables. Al tener fluctuaciones en la potencia estos sistemas generadores de energía necesitan un sistema de almacenamiento para almacenar el recurso que a la vez pueda ser capaz de obrar eficientemente en todos los aspectos posibles, técnicos y económicos, de lo contrario el aprovechamiento del insumo energético se vuelve pobre.

El almacenamiento de energía por si solo representa la mayor de las desventajas en cuanto a operación de sistemas eléctricos aislados se trata. Al ser cada vez más exigentes con respecto a la funcionalidad y eficiencia de este tipo de sistemas, la mayor parte de sus componentes junto con su operatividad ha ido avanzando con creces de manera positiva exceptuando a los subsistemas de almacenamiento de energía lo cual actúa como anclaje e impide el óptimo desarrollo de este tipo de sistemas eléctricos. Aunque el desempeño para almacenar energía depende del tipo de sistema de almacenamiento a utilizar es indudable el hecho de que se requiere una optimización en su funcionamiento para poder así aprovechar lo máximo posible el recurso energético para el beneficio de los operadores y usuarios.

Los sistemas de almacenamiento de energía o *Energy Storage Systems* (ESS) sirven y son comúnmente utilizados en plantas de generación eléctrica de naturaleza renovable tales como las de energía eólica y las de energía solar fotovoltaica. Su capacidad de mitigación en las variaciones de potencia de salida de estos sistemas es lo que hacen que estos sistemas sean una opción atractiva, de esta manera se presentan menos pérdidas en el recurso y, por lo tanto, también en el aspecto económico.

Entre las técnicas de almacenamiento más utilizadas se encuentran las baterías (BESS), los capacitores doble capa (EDLCs), los sistemas de almacenamiento *flywheel* y los sistemas de almacenamiento de superconducción magnética. Estas últimas opciones, aunque según sea el caso no siempre logran ser las más eficientes, son las más recurrentes debido a que normalmente los sistemas de almacenamiento con mayor eficiencia o con mayor capacidad de trabajo son relativamente costosos y representan una mayor inversión para un proyecto energético lo cual puede llegar a retraer a posibles inversionistas o clientes. La optimización de la potencia de salida no es la única razón para la implementación de los ESS sino que además se presenta una mayor facilidad de adecuación de la electricidad generada con el sistema eléctrico público o nacional. De igual manera hace que los tipos de sistemas no

convencionales logren ser más competitivos en el mercado eléctrico y se pueda de alguna manera mitigar a los energéticos convencionales de origen fósil.

Los ESS se pensaron en desarrollar o utilizar primero en sistemas de generación a gran escala, pero al ver que también podría ser redituable su utilización en proyectos más locales o de pequeña escala se fueron adecuando a estos. Esto también sirve como ejemplo de como la industria eléctrica va y seguirá avanzando en el futuro; anteriormente se prescindía principalmente de grandes centrales generadoras y ahora la generación distribuida o generación a pequeña escala para consumo propio y una red eléctrica comunicada es el tema principal a tratar debido a que se cree de esta manera se cimentará la industria.

Las baterías de almacenamiento, BESS, funcionan mediante el almacenamiento energético por procesos químicos y presumen de ser de las tecnologías del mercado con mayor disponibilidad y éxito debido a la relación costo-beneficio que estas presentan. Dentro de los sistemas eléctricos aislados estas baterías pueden ser instaladas en arreglos, tanto en paralelo, como en serie para así contar con las características necesarias del sistema eléctrico en cuanto a voltaje y corriente. Una de las ventajas con las que estas cuentan es su alta densidad de energía, su alta eficiencia, larga vida útil, respuesta inmediata y su fácil integración a los sistemas eléctricos aislados. Básicamente los aspectos negativos de las mismas recaen en la necesidad que tienen de estar en un ambiente refrigerado, en sus comúnmente complejos convertidores de potencia y principalmente en su costo relativamente elevado inicial. Los estudios actualmente efectuados en este tipo de tecnologías tienen el objetivo de incrementar aún más la densidad energética con la que cuentan, así como el mejoramiento de su vida útil y bajar el costo de las mismas con base en la elección de componentes o materiales que utilizan.

Los capacitores fungen un papel importante en el almacenamiento energético. Estos operan acumulando la energía presente en un campo eléctrico esto gracias al aumento del tamaño de un capacitor o del voltaje aplicado entre las capas del mismo. De igual manera que con lo visto en las baterías los capacitores también deben de

contar con las condiciones óptimas de eficiencia, capacidad de carga y descarga aparte de una vida útil larga para poder realizar un óptimo desempeño en el almacenamiento de energía. De hecho:

Los capacitores han sido ampliamente usados como componente fundamental para compensación en sistemas eléctricos, sin embargo, recientemente se ha desarrollado una nueva clase de capacitores como elementos almacenadores de energía, ultra-capacitores, con muchas más ventajas sobre sus predecesores. Los ultra-capacitores han presentado su ventaja al ser empleados para compensar la variabilidad de la potencia de salida de plantas solares y eólicas inyectando potencia eléctrica durante periodos cortos de tiempo, alta energía, pero a baja potencia, lo que lo hace limitado en aplicaciones de soportar demanda (Escobar, 2011, pág. 14, párr. 5).

Los sistemas de almacenamiento *flywheel*, también llamados volantes de inercia o volantes motor en mecánica, son consideradas como el método de almacenamiento más aprovechable sólo por debajo de las baterías lo que a su vez provoca que sean investigados e implementados para la mitigación de fluctuaciones de potencia mayormente de baja escala. La operación de estos sistemas se asemeja al de los capacitores en almacenamiento energético; la energía rotacional que es almacenada gracias a una masa rotativa manejada por un *drive* es la que se aprovecha. Esta última depende de dos factores, del momento de inercia y del cuadro de la velocidad de rotación del mismo *flywheel*. Para el cálculo de esta misma energía se debe de tener en cuenta el radio, la masa y la altura del rotor ya que de estos depende el momento de inercia. Este recurso energético se emplea en el *flywheel* cuando transcurren horas donde la demanda es poca o cuando la energía dentro del mercado está por debajo del precio de oferta. Básicamente, cuando la energía desee ser liberada se realiza la operación a través de un controlador quien manda una señal al drive para así

desacelerar gracias al torque electromagnético que se genera el cual es opuesto a la dirección rotativa original del rotor para tener así un freno más eficiente del equipo.

La capacidad de los volantes de inercia puede ser aumentada al igual que la de muchos otros métodos de almacenamiento energético mediante la mejora del momento de inercia del rotor o aumentando la velocidad de su trabajo, pero esto genera problemáticas en el sistema tales como la robustez del equipo y la ineficiencia de su control al no poder operar a tales velocidades.

En el caso del almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) se ha tenido una amplia utilización de estos sistemas en distintas instalaciones las cuales presumen de alta eficiencia y productividad. Este método consta de la utilización energética de bajo costo o con gran disponibilidad en horas de poca demanda, la cual es más barata, para la compresión de aire en sistemas subterráneos. El aire que es extraído de estos sistemas bajo tierra se calienta con gas natural, pudiendo ser de igual manera con cualquier otro energético eficaz para el aumento de temperaturas, para el accionamiento de un generador eléctrico. Este tipo de trabajo cuenta con una operación de ciclo combinado por lo tanto también presume de no necesitar la misma cantidad de desperdicio de energéticos lo cual también significa una emisión menor de gases malignos al ambiente.

El centro de control a través de sensores e indicadores de distintos tipos determina cuando el aire comprimido por el sistema es necesitado para el cumplimiento de la demanda energética. En la Figura 6 se representa la estructura y funcionamiento de este tipo de instalaciones. Según el trabajo de Escobar, investigador de la Universidad de Pereira, Colombia, comúnmente las instalaciones de CAES presentan cantidades considerables de energía yendo desde 50 MW hasta aproximadamente los 300 MW. Aparte de la gran magnitud energética con la que se relacionan estos equipos también presentan una alta eficiencia, alrededor del 75%, así como de periodos de respaldo atractivos, de 1 a 3 horas en periodos de alta demanda, establece el experto. La desventaja principal que se observa en este tipo de este método de

almacenamiento energético es meramente la construcción o adecuación del espacio en el cual se planee su implementación ya que estos sistemas son de gran tamaño y representan dificultades geológicas y maltrato ambiental del terreno en cuestión. “La implementación de CAES (ver Figura 6) hace parte de una de estrategias para permitir la integración de recursos renovables con la red eléctrica” (Escobar, 2011). Cabe mencionar que la cada vez más frecuente utilización de gas natural en este tipo de sistemas se jacta de impulsar a las energías renovables para la obtención de recurso energético al ser esta fuente considerada como tal por muchas organizaciones a nivel mundial cuando esta fuente energética es de origen fósil y cuenta con emisiones considerables de gases nocivos para el planeta.

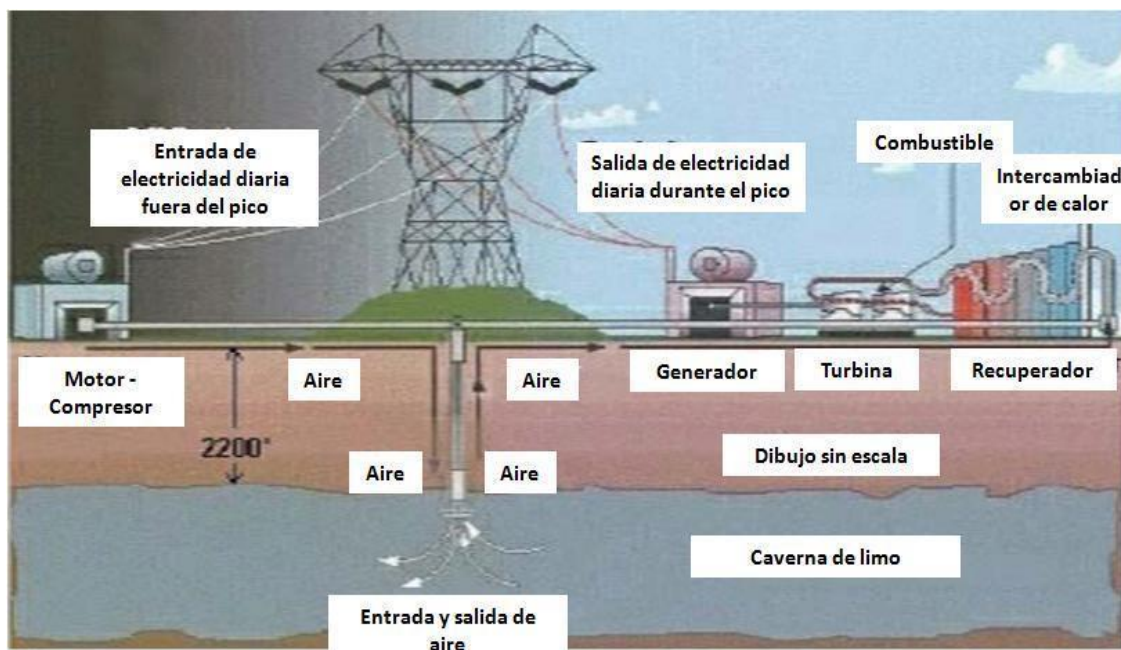


Figura 6. *Instalación de Caes* (Escobar, 2011).

La creciente necesidad de aprovechar los recursos renovables, los incentivos económicos de diferentes gobiernos y la necesidad de disminuir gases de efecto invernadero, han conllevado al avance de los ESS para ser integrados a la red.

Los ESS no solamente son útiles para compensar la potencia en plantas eólicas y solares, también son usados a nivel de distribución para

mejorar la calidad de la energía, mejorar el consumo, aumentar la robustez en redes débiles y retardar la construcción de redes de transmisión (Escobar, 2011, pág. 15, párr. 3).

2.2.2 BATERÍAS DE IÓN DE LITIO

Durante las últimas décadas el avance en el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento ha tomado una alta relevancia, uno de los avances con mayor proyección en los últimos años ha sido en las baterías por ión de litio, dichas baterías entre más avanza la tecnología son utilizadas con mayor frecuencia en la vida diaria en artículos que quizás no se sabe que son portadores de baterías de ión de litio como lo son las computadoras portátiles, cámaras fotográficas, teléfonos celulares, bocinas portátiles o herramientas eléctricas. Dado ese uso es por lo cual las baterías por ión de litio se encuentran en un auge en el mercado además de contar con una proyección de mayor demanda en los próximos años.

Las baterías por ión de litio son dispositivos compuestos por una o varias celdas electroquímicas que se encargan de almacenar la energía eléctrica en forma de energía química. Cada una de las celdas cuenta con una bipolaridad de un electrodo conectando los polos mediante un electrolito, dicha conexión permite el intercambio de iones entre ambos mientras que la corriente generada por el movimiento iónico de los polos de la celda, es transportada externamente mediante un material conductor. Durante el uso de la energía almacenada o en la llamada fase de descarga, lo que ocurre al usar los dispositivos, es que el polo negativo, también llamado ánodo de la celda electroquímica, entra en un proceso de oxidación lo cual hace que se liberan electrones los cuales con reducidos en la reacción que ocurren en el polo positivo conocido como cátodo de la celda, en el caso de que la batería que se utiliza sea recargable el proceso de descarga implica el que dichos procesos anteriormente mencionados se invierten durante la carga del dispositivo mediante una fuente eléctrica externa.

Cada una de estas reacciones se puede explicar mediante una ecuación que corresponde al comportamiento de las baterías en la fase de descarga o en la fase de carga. En el estado normal de las baterías el potencial del polo negativo y en el del lado positivo de la celda cuenta con potenciales muy cercanos entre sí mismos, por lo que el voltaje que maneje la batería es a su vez la diferencia entre los potenciales de ambos polos de la celda.

El material del que están hechas las baterías el ión de litio, es un material altamente ligero lo cual lo vuelve un material práctico si es utilizado para el almacenamiento de la energía además de contar con un alto potencial electroquímico y que dicho material puede acumular grandes cantidades de energía. Una de las características más importantes de las baterías por ión de litio es que los electrodos que los componen cuentan con la capacidad de absorber y devolver iones reversiblemente, a pesar de esto solamente el ánodo es el componente que está compuesto por litio. En el pasado en las primeras versiones de estas baterías para el material del ánodo se utilizaba carbón, pero al ir avanzando la tecnología se opta actualmente por el grafito debido a sus características de descarga.

En este tipo de baterías, debido al uso de descarga y carga, puede llegar a verse afectada la estabilidad térmica de las mismas. Las probabilidades de una fuga térmica aumentan con el uso por lo que pueden llegar a prenderse en fuego. En estudios realizados por el Ing. Alberto García Gorría publicados por la universidad de Cantabria en España relacionados con las baterías, se hacen análisis de sus principales características entre las cuales están un alto voltaje, entre 3 y 4 V/celda, alta energía específica, entre 80-170 Wh/kg, un alto rendimiento, alcanzando el 94% en comparación con las tecnologías de baterías anteriormente mencionadas y una alta ciclabilidad, conservan el 90% de capacidad después de los 1000 ciclos. En cuanto al cuidado del medio ambiente son mucho menos contaminantes, ya que no contienen plomo, cadmio o mercurio. Cuentan con una baja descarga al estar en estado inerte, al ser una tecnología relativamente nueva su costo es elevado. Pierde prestaciones cuando la temperatura supera los 50°C. Continuando con lo aportado

por García, estas baterías se degradan rápidamente cuando la descarga es muy profunda o se sobrecarga la batería por lo cual un cuidado en cuanto a las cargas y uso óptimo es necesario para los usuarios de esta tecnología por lo que para un uso adecuado debe de ser con un mínimo estado de carga del 10%. Necesitan un empaquetamiento especial y un circuito de protección interno frente a sobrecargas esto para buscar la que la vida útil de las mismas sea lo mayor posible.

Todas estas características lo hacen un medio altamente factible no sólo para el almacenamiento de energía en pequeña escala sino también el uso de almacenamiento en gran escala, países como España utilizan las baterías por ión de litio como una gran bloque o banco de baterías que en ciudades como Sevilla ayudan a la eficiencia del sistema eléctrico.

Esto hace que las baterías por ión de litio (en su mercado) tiendan a un considerable aumento, no sólo por el uso a pequeña escala en aparatos electrónicos, sino también por el uso de almacenamiento en vivienda buscando el alcanzar una *Smart-grid*, además del uso industrial en la regulación de las redes eléctricas buscando un mayor control en la demanda de las mismas industrias. Todo esto apunta en una dirección para el futuro la cual es que esta tecnología mejorará su desarrollo, aplicación e investigación para su mejor aprovechamiento por las futuras generaciones.

2.3 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante del universo, lo cual forzó a analizar detalladamente sus características físicas y químicas para explotar al máximo el potencial del recurso. Aun considerando que el hidrógeno es el elemento más abundante del universo, no es una fuente primaria de energía y no es directamente aprovechable. Por lo tanto, hay que considerar que la obtención del recurso requiere cantidades altas de energía provenientes de una fuente primaria. Aun tomando en cuenta que su obtención requiere altos niveles de energía externa, la utilización de

fuentes renovables de energía para el proceso podría resultar en un sistema energético viable.

El interés por utilizar el hidrógeno nace en los grandes problemas globales de la época, tales como el calentamiento global y la alta producción de gases de efecto invernadero. Una de las principales áreas de oportunidad para reducir los índices de contaminación es la sustitución de combustibles fósiles por un combustible renovable y limpio. El hidrógeno al ser comparado con gasolina convencional tiene una densidad energética en masa tres veces superior a la gasolina y los métodos de producción energética con utilización de hidrógeno tienen como residuo: agua, por lo cual se considera una opción inteligente para reducir la emisión de gases contaminantes.

El hidrógeno puede ser utilizado como combustible para satisfacer las necesidades de transporte de la sociedad o bien para la producción de energía eléctrica a pequeña y gran escala. De acuerdo con la información recopilada por Santiago Urréjola Madriñán, profesor del centro universitario de la defensa ENM de Marín y adscrito a la universidad de Vigo, en el año 2011 el 96% de la producción de hidrógeno en el mundo se genera por métodos con utilización de combustibles fósiles y sólo el 4% por fuentes renovables de energía. Es importante recalcar que, aunque el hidrógeno es una gran opción como portador de energía, el método de producción tiene gran impacto en la sostenibilidad del proceso.

La investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en cuanto a la producción de hidrógeno ha permitido aumentar la simplicidad del proceso de producción y aprovechamiento del hidrógeno aumenta de igual manera el interés por el recurso.

2.3.1 PRODUCCIÓN POR ENERGÍA ELÉCTRICA

Como se mencionó con anterioridad el hidrógeno tiene características que podrían favorecer el sector energético por lo que para su utilización es necesario desarrollar y perfeccionar los métodos de producción utilizados. La producción de hidrógeno se

puede globalizar en dos sectores principales, producción industrial y celdas de hidrógeno por membranas. El hidrógeno es comúnmente utilizado en industrias específicamente en métodos químicos de tratamiento de materiales que a su vez son producidos por métodos tradicionales utilizando hidrocarburos. El método más utilizado es el reformado con vapor. El reformado con vapor consiste en dos etapas. En la primera se somete el vapor de agua y un aporte de calor a los hidrocarburos, al reaccionar este tiene como resultado monóxido de carbono e hidrógeno. En la segunda etapa el monóxido de carbono es tratado con un aporte calorífico y vapor de agua para obtener después de la reacción dióxido de carbono e hidrógeno. Una de las razones principales por el cual este proceso es el más utilizado en la actualidad en el sector industrial es por su precio accesible y considerablemente menor a las otras opciones de producción, pero tiene la gran desventaja de utilizar combustibles fósiles y producir altos índices de contaminación. Aunque existen muchas variantes en cuanto a la producción de hidrógeno a partir de la utilización de combustibles fósiles, los altos índices de contaminación y emisión de gases de efecto invernadero obligan a las industrias y proyectistas a buscar métodos alternos con menores índices de contaminación.

Los métodos electrolíticos para la producción de hidrógeno abren paso a la posibilidad de incorporar fuentes de energías renovables al proceso. El proceso electrolítico se basa en romper la molécula de agua por medio de un aporte energético. Las dos tecnologías actualmente más desarrolladas para la electrólisis se basan, una, en membranas poliméricas o de intercambio de protones *Proton Exchange Membrane* y la otra de electrolito líquido, como el hidróxido de potasio, también trabajándose con electrolitos sólidos o gelatinosos.

Como se muestra en la Figura 7 en ambos casos se busca la separación de la molécula de agua con la aplicación de una corriente eléctrica aplicada a dos electrodos separados por el electrolito o una membrana lo cual sólo permite el paso de los iones positivos, produciéndose hidrógeno en el cátodo y oxígeno en el ánodo.

El electrolizador tipo PEM consiste prácticamente en el funcionamiento inverso de una celda de combustible funcionando, con las mismas reacciones electroquímicas por lo tanto se aplican indistintamente las mismas ecuaciones de balance energético. En el caso de la Figura 7 se puede observar cómo se requiere un aporte energético de 237.13 kJ/mol el cual será suministrado en forma de energía eléctrica. Los métodos fotoelectrolíticos consisten en la obtención de hidrógeno a partir de energía solar. En este caso existen dos variantes, los métodos indirectos y los métodos directos. Los métodos fotoelectrolíticos indirectos consisten en la utilización de módulos solares fotovoltaicos para la producción de energía eléctrica para a su vez ser utilizada por métodos electrolíticos para la producción de hidrógeno. Los métodos directos por otra parte consisten en la utilización de celdas fotoelectroquímicas capaces de descomponer la molécula en hidrógeno y oxígeno a partir de radiación solar. Los métodos indirectos mencionados pueden ser de igual manera propuestos utilizando cualquier fuente de energía renovable, esto además de abrir las posibilidades al mercado energético proporciona una opción inteligente en temas de manejo y almacenamiento energético.

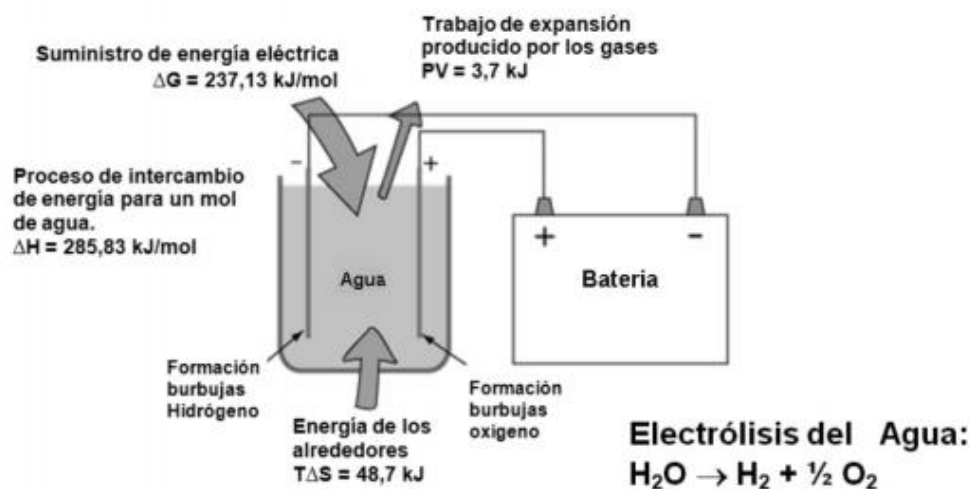


Figura 7. *Electrólisis del agua* (Carl, 2005).

2.3.2 ALMACENAMIENTO

El elemento hidrógeno presenta una viable opción como sustituyente de los energéticos de origen fósil debido a sus características energéticas, abundancia y simpleza. Aunque el uso, control y explotación de este recurso continúa siendo relativamente caro en contraste con métodos energéticos convencionales existen actualmente cada vez más motores funcionales los cuales lo utilizan.

Al igual que el resto de los sistemas de almacenamiento, la posible variable que podría llevar al hidrógeno a ser explotado de manera eficiente, segura y a gran escala, es su almacenamiento. Esta característica del hidrógeno es lo que lo sobrepone por encima de la electricidad la cual, aunque de igual manera puede almacenarse con la ayuda de los ESS, no tiene esta propiedad por si sola. “Existen diversos sistemas de almacenamiento de hidrógeno. La elección del sistema más adecuado dependerá de la aplicación final en la que vaya a utilizarse” (Mendoza, 2006). Una investigación del integrante de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México, anteriormente citado, establece el énfasis en los sistemas de almacenamiento de hidrógeno a presión, de almacenamiento de hidrógeno líquido, la utilización de hidruros metálicos, así como el uso de nanotubos de carbono debido a su importancia y relevancia en el rubro energético. Continuando con la aportación de Mendoza (2006), el almacenamiento a presión, principalmente utilizado para aplicaciones de transporte, trabaja con unidades de entre 200 a 350 Bar en tanques de acero, a mayor presión se tenga el hidrógeno mayor es la cantidad de este la que se almacena; aunque actualmente se trabaja en sistemas los cuales tengan la capacidad de soportar hasta 700 bar para la obtención de un almacenamiento más eficiente lo cierto es que estas tecnologías aún se encuentran en fase de desarrollo debido a las dificultades que presenta el trabajar con altas presiones. Mendoza (2006), comenta que los sistemas de almacenamiento líquido se encargan de llevar al hidrógeno a este estado de la materia por medio de tanques criogénicos en los que

se enfría el elemento a temperaturas inferiores a los -235°C ; mediante este tipo de sistemas se maximiza la capacidad de almacenamiento en espacios reducidos. En el caso de los hidruros metálicos estos forman compuestos al interactuar con el hidrógeno lo cual es reversible para la posible obtención del hidrógeno puro tal como antes de su reacción; la formación de estos compuestos significa una alta capacidad de almacenamiento, así como diversas ventajas en cuanto a seguridad y manipulación en contraste con otros tipos de sistemas. También se tomó en cuenta la utilización de nanotubos de carbono los cuales son básicamente estructuras de grafito en forma de hexágonos de carbono los cuales forman tubos dentro de los cuales es capaz de almacenar cantidades grandes de hidrógeno.

Aunque actualmente el hidrógeno es mayormente utilizado en la industria química y petroquímica, y en la metalúrgica, electrónica y aeroespacial, las energías renovables presentan las características necesarias para la solución de problemas existentes con el uso de energéticos de origen fósil, mitigación de gases dañinos para el medio ambiente y el aumento de eficiencia energética al reducir el consumo de energía primaria. En adición a esto último es importante recalcar la intermitencia de los sistemas de energías renovables lo cual representa uno de los mayores obstáculos para su aprovechamiento, así como la necesidad de la implementación de ESS.

2.3.3 PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El hidrógeno se presenta como una alternativa al notable próximo desabasto del petróleo. Si se sigue consumiendo barriles de petróleo a ritmo acelerado y exponencial, el fin de dicho recurso es inminente. Día con día el uso de derivados del petróleo es mayor por lo que se infiere que aún queda recurso por explotar, no obstante, algunas potencias del mundo han analizado la tendencia del desabasto del llamado oro negro por lo que es necesario buscar alternativas que puedan cumplir con la tarea del petróleo. Una de esas alternativas que se maneja actualmente es el hidrógeno para la producción de energía eléctrica.

Con la creación de la obra de Rifikin, *La Economía del Hidrógeno*, las grandes potencias del mundo han visto como una solución y atractiva fuente de energía que llegue a salvar la industria eléctrica como se conoce. Realizar la transición en la utilización de recursos para algo necesario como lo es el progreso del mercado eléctrico y su industria se interpone como prioridad. La demanda de petróleo y de gas natural amenaza drásticamente el suministro de energía eléctrica mencionando también las grandes contaminaciones que traen estos energéticos al mundo por su quema. Esto puede llegar a un colapso puesto que se espera un incremento poblacional exponencial lo que significaría un aumento drástico en la demanda de energía en el mundo lo que puede llegar a un colapso de la red eléctrica si no se toman las medidas necesarias.

El hidrógeno como se conoce hoy en día en su mayoría es producido a partir de gas natural, cuyo proceso es llamado reformado con vapor pero al ser producido mediante combustibles fósiles este se priva de su potencial de ser una alternativa que se produzca en grandes cantidades y se utilice en altas concentraciones sin contaminar al medio ambiente o contaminado en la menor cantidad posible, por lo que la mejor opción para la producción de este energético en altas cantidades es la utilización de agua por medio de una energía renovable. Existen diferentes maneras de producción de hidrógeno, por lo que, al depender de las tecnologías nuevas, en el sentido de su explotación, no se puede competir actualmente, en cuanto a costos de producción en contraste con el empleado por combustibles fósiles no son comparables en rendimiento o inclusive en cuanto a confiabilidad.

Actualmente al ser una alternativa que cumple con suplir a los combustibles fósiles de forma parcial, el desarrollo de su tecnología es una realidad como lo son las celdas de combustibles. En el caso de la celda el oxígeno pasa sobre un electrodo e hidrógeno por el otro. El hidrógeno funciona como un catalizador en el electrodo del ánodo de la celda que transforma el hidrógeno en electrones y en iones. Los electrones fluyen fuera de la célula por lo que se crea una cadena de reacción culminando en la transformación junto con el oxígeno en agua. Su desarrollo en los

últimos años ha tenido un gran avance, lastimosamente actualmente “las celdas de combustibles más modernas cuentan con un rango de eficiencia no mayor al 60 % aunque puede llegar parecer ineficiente en su comparación con los motores de gasolina que su eficiencia ronda en un 22% o en los motores a diésel que rondan un 45%” (Buchanan, Crabtree y Dresselhaus, 2014). La utilización de las celdas mejoraría drásticamente la eficiencia del uso de la energía eléctrica en el futuro.

Como se observa en la Figura 8, el funcionamiento básico de una celda de combustión de hidrógeno, al adaptar las celdas a motores eléctricos convencionales debido a su alta eficiencia, se puede convertir la energía química del hidrógeno en energía mecánica sin contar con pérdidas debido al calor.

El carácter internacional de la economía del hidrógeno seguramente influirá en cómo se desarrolla y evoluciona a nivel mundial. Cada país o región del mundo tiene intereses tecnológicos y políticos en juego. Es probable que la cooperación entre las naciones para aprovechar los recursos y crear enfoques técnicos y organizativos innovadores para la economía del hidrógeno mejore significativamente la efectividad de cualquier nación que de otro modo actuaría sola. (Buchanan, Crabtree y Dresselhaus, 2014, pág. 44, párr. 3).

El hidrógeno tiene a su favor su naturaleza de conversión energética que sería la celda de combustibles que se plantea la cual puede llegar a ser la nueva alternativa que abastezca de energía eléctrica limpia y durable a las futuras generaciones con un combustible limpio e inagotable como lo es el hidrógeno. La sinergia entre los conocimientos de las nuevas tecnologías en colaboración con las amplias bases de tecnología de energía eléctrica pretende la sustitución de combustibles fósiles en el futuro.

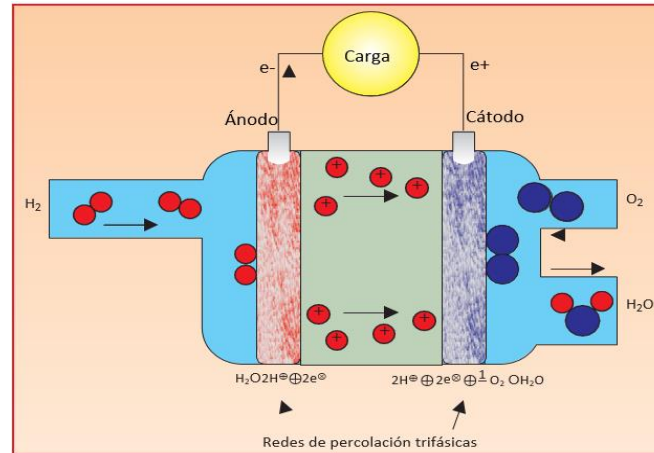


Figura 8. Celda de combustible de membrana de intercambio de protones (Buchanan, Crabtree y Dresselhaus, 2014).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

Dentro de este capítulo se describen los elementos que integran la presente investigación. La metodología incorpora inicialmente el tipo de investigación al igual que su diseño, la hipótesis y variables de estudio, así como los objetos de investigación. Por último, se presentan los materiales e instrumentos utilizados, el procedimiento que se utilizó.

3.1 Tipo de investigación

El documento es clasificado como una investigación cuantitativa por su enfoque en resultados numéricos, así como una investigación documental por analizar datos provenientes de distintas fuentes como lo son las: Técnicas experimentales aleatorias, cuasi-experimentales, *tests* “objetivos” de lápiz y papel, análisis estadísticos, multivariados, estudios de muestra, entre otros. (Cook y Reichardt, 1986).

Los estudios correlacionales tienen como propósito evaluar la relación y correlación entre dos o más objetos, variables, conceptos o sistemas para obtener un resultado cuantitativo fácil de interpretar.

Las investigaciones correlacionales intentan descubrir si dos o más conceptos o propiedades de objetos están asociados, como es su forma de asociación y en qué grado o magnitud lo están. (Díaz y Calzadilla, 2016).

En esta investigación se compararán dos sistemas de almacenamiento en base a datos numéricos calculados y estandarizados con el propósito de determinar las principales características de interés de ambos sistemas de almacenamiento de energía.

3.2 Diseño de investigación

La presente investigación es no experimental de corte transversal, debido a que este tipo de investigación es la búsqueda empírica y sistemática en la que el científico no posee control directo de las variables independientes, debido a que sus manifestaciones ya han ocurrido o a que son inherentemente no manipulables (Kerlinger y Lee, 2002), aunado a esto se enfoca en corte transversal debido a que los diseños de investigación transversal recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir las variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado (Baptista, Fernández y Hernández, 2003). Por lo que dicha esta investigación se lleva a cabo durante un periodo de doce meses comenzando en enero del 2020 y concluyendo en diciembre del mismo año.

3.3 Hipótesis y Variables

3.3.1 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

(Hi): El uso del recurso hidrógeno para sistemas de almacenamiento de energía eléctrica demuestra ser competente en relación al desempeño de los métodos de almacenamiento energético populares en el mercado.

(Ho): El uso del recurso hidrógeno para sistemas de almacenamiento de energía eléctrica demuestra no ser competente en contraste con el desempeño de los métodos de almacenamiento energético populares en el mercado.

3.3.2 VARIABLES DE ESTUDIO

En la tabla siguiente se presentan las variables de estudio consideradas para el desarrollo de investigación con sus respectivos conceptos.

Tabla 1. Variables para el estudio. Fuente: Elaboración propia

VARIABLE DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL
Contaminación Ambiental	“La contaminación ambiental son los contaminantes provocados por los cambios físicos, químicos y biológicos del aire, del agua o el suelo” (SENATI, 2012).
Costos	“El costo de un producto es la suma del costo de los materiales, la mano de obra y la suma de los costos de todas las actividades realizadas para elaborar ese producto o servicio” (Arias, Bernal y Portilla, 2008).
Eficiencia Energética	“La eficiencia energética está entendida como la reducción de la energía utilizada para un determinado servicio (calefacción, iluminación, etc.) o nivel de actividad” (Mejía, 2014).
Rentabilidad	“La rentabilidad puede considerarse, a nivel general, como la capacidad o aptitud para generar un excedente partiendo de un conjunto de inversiones efectuadas” (Daza, 2016).

Tecnología Almacenamiento Energético	de	“Tecnología es un conjunto de conocimientos de base científica que permite describir, explicar, diseñar y aplicar soluciones técnicas a problemas prácticos de forma sistemática y racional” (Quintanilla, 1982).
---	-----------	---

3.4 Objeto de estudio

El objeto de esta investigación es el método de almacenamiento de energía comúnmente utilizado en el sector energético por un método innovador y en desarrollo como lo es el almacenamiento de energía en materia de hidrógeno. Esto con el propósito de brindar una comparación concreta en aplicaciones a pequeña y gran escala.

3.5 Materiales e Instrumentos

3.5.1 MATERIALES

Se emplean diversos artículos y bases de datos que fungen como una guía, como lo son investigaciones como Sistemas de Almacenamiento de la Universidad de Valladolid en el 2016, aunado a esto se recabarán datos de Sistemas de Almacenamiento de Energía y su Aplicación en Energías Renovable de la Universidad de Pereira publicado en el 2011, los cuales se han utilizados anteriormente en este proyecto con el fin de recopilar datos además de un medio para ampliar el panorama con el fin de crear un análisis de calidad para poder realizar las comparaciones pertinentes para dictaminar una conclusión sólida y con contundencia para reafirmar el conocimiento debido al análisis, aunado a esto se cuenta con expertos en el tema del recurso energético hidrógeno y sistemas de almacenamiento eléctrico para poder solucionar con eficiencia cualquier problemática que se presente en el proceso.

3.5.2 INSTRUMENTOS

Tomando en cuenta el objetivo principal del documento, el cual consiste en comparar de forma teórica dos métodos de almacenamiento de energía, se recurrió a la utilización de diversas herramientas digitales. En los anexos 1-5 se encuentran las tabulaciones otorgadas por los fabricantes provenientes de estudios previos con datos importantes para el desarrollo del cálculo principal del estudio.

3.6 Procedimiento

El procedimiento para la realización de esta investigación parte de la selección del tema. Posteriormente se considera el planteamiento del problema base, así como las derivaciones de dicho elemento utilizando como guía la pregunta de investigación formulada. Seguido se delimita el objetivo general continuando con los objetivos específicos, justificación y delimitación del proyecto. El siguiente paso es la realización del marco teórico donde se busca formar las bases del conocimiento para una mejor aplicación en los procesos de la investigación con base en analizar la funcionalidad del almacenamiento de energía por acumulación de hidrógeno no sin antes realizar la metodología la cual hace denotar el tipo y enfoque de la investigación así como su diseño, hipótesis y variables de estudio, materiales e instrumento a utilizar, posteriormente determinar el objeto de estudio, siguiendo con el procedimiento y finalmente con el cronograma de actividades para la elaboración de investigación. Consiguientemente se presentan los resultados de las comparaciones utilizando las bases de datos de los métodos de almacenamiento que son obtenidos de la investigación y cálculos para plasmar lo planteado en el objetivo del análisis. Como continuación se tiene a la discusión de resultados comparados con base de datos ya existentes con validez de resultados que hacen mención a la comparación de la producción y utilización de la energía almacenada por medio del hidrógeno comparado directamente con el medio de almacenamiento convencional de las baterías de ión de litio.

Basado en lo anterior mencionado, se cuenta con la figura 9. El cual especifica la manera en la que se fue realizado el proceso de obtención de resultados presentado a grandes rasgos para posteriormente en el siguiente capítulo profundizar en cada uno de los siguientes pasos.

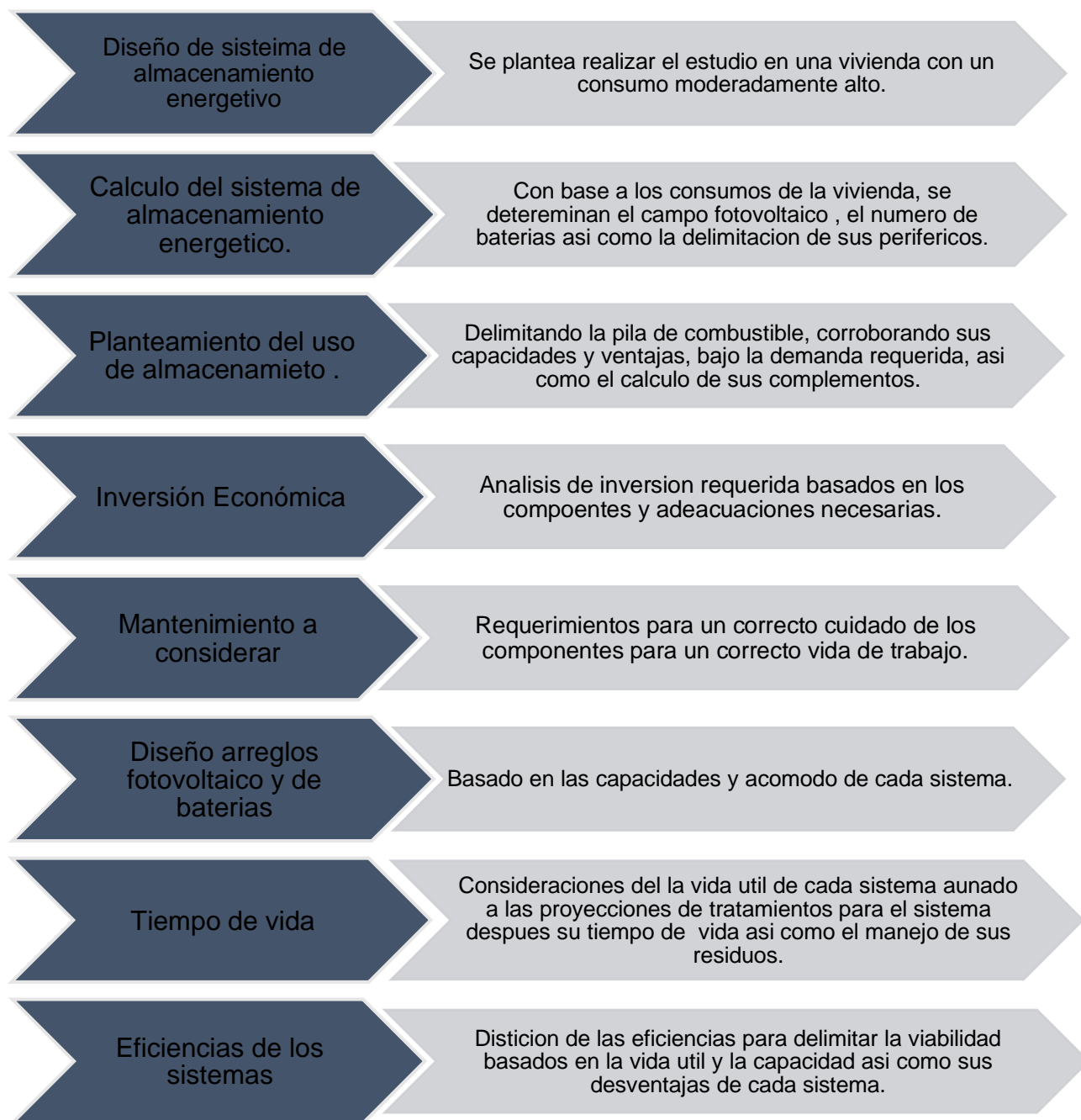


Figura 9. Proceso de análisis de sistema. Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos productos de la investigación y cálculos propiciados por los elaboradores de está comenzando por la presentación de la inversión que engloban cada uno de los métodos de almacenamiento energético analizados, el mantenimiento que este tipo de sistemas requieren, el tiempo de vida del conglomerado de sus componentes, así como el manejo de estos últimos una vez pasado su periodo de utilidad. Por último, se compartirán los datos de eficiencia obtenidos de manera comparativa.

4.1 Desarrollo del cálculo para Sistemas de Almacenamiento Energético

Con la intención de recabar resultados precisos, se utilizaron los datos energéticos reales de una vivienda ubicada en el municipio de Cajeme, Sonora, México. Se utilizaron los datos de consumo y de ubicación geográfica como base para realizar los cálculos de diseño (ver Tabla 2).

Tabla 2. Consumo real para ejemplo. Elaboración propia

PLAZO	CONSUMO
ENERO – FEBRERO	987 kwh
MARZO – ABRIL	756 kwh
MAYO – JUNIO	896 kwh
JULIO – AGOSTO	3, 912 kwh
SEPTIEMBRE – OCTUBRE	4, 590 kwh
NOVIEMBRE – DICIEMBRE	3, 497 kwh
TOTAL	14,638 kwh

Mes de mayor consumo: 2, 295 kwh

Consumo promedio diario: 76.5 kwh

Se procede a dimensionar los componentes principales de ambos sistemas a fin de obtener datos específicos teóricos cercanos a los que se obtendrían en una aplicación real de ambos sistemas de almacenamiento. Una de las ventajas que ofrecen los componentes disponibles en el mercado son sus amplias fichas técnicas, estas nos permiten dimensionar y comparar valores energéticos de manera ágil y rápida. Las fórmulas a continuación fueron desarrolladas tomando en cuenta los principios de la ley de ohm y la fórmula de potencia.

De acuerdo con el autor Thomas L. Floyd, “La ley de Ohm establece que la corriente es directamente proporcional al voltaje e inversamente proporcional a la resistencia.”. (Floyd, 2007) Es representada por la siguiente formula:

$$I=V/R$$

Donde R es la resistencia eléctrica medida en ohmios (Ω), I es la intensidad de corriente medida en amperios (A) y V es la diferencia de potencial medida en voltios (V).

De igual manera Floyd afirma que “La potencia (P) es cierta cantidad de energía (W) utilizada en cierto tiempo (t)”. (Floyd, 2007) Es expresada como:

$$P=W/t$$

Donde P es la potencia en *watts* (W), W es la energía en *joules* (J) y t es el tiempo en segundos (s).

“La Hora solar pico (HSP) es una unidad que mide la irradiación solar, y se define como la energía por unidad de superficie que se recibiría como una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m². Una hora solar pico equivale por tanto a 1 kWh/m².” (Alvarado, sin fecha)

La unidad anterior consiste en promediar el total de energía solar de una ubicación geográfica con el fin reducir al mínimo la variación energética en los cálculos.

La siguiente fórmula se usa para calcular el campo fotovoltaico:

$$\text{Campo FV} = \frac{(1 + \text{Días de autonomía}) * \text{Energía para cubrir un día de consumo}}{\text{Horas solar pico}}$$

$$\frac{(1 + 1) * 76.5kwh}{6horas} = 24.797kw$$

Del mismo modo, la expresión que sigue se usa para determinar el almacenamiento (ver Anexo 1).

Almacenamiento =

$$\frac{(1 + \text{Días de autonomía}) * \text{Energía para cubrir un día de consumo} * 1000}{\text{Voltaje de baterías}}$$

$$\frac{(1 + 1) * 76.5kwh * 1000}{24v} = 6375Ah$$

El número de baterías se calcula de la manera siguiente:

$$\text{Número de baterías} = \frac{\text{Almacenamiento}}{\text{Capacidad de batería}}$$

$$\frac{6375Ah}{50Ah} = 127.5 \text{ Baterías} \cong 128 \text{ Baterías}$$

La energía máxima de carga por cargador solar se determina de la manera siguiente (ver Anexo 2):

$$\begin{aligned} \text{Energía máxima de carga} \\ = \text{Corriente solar máxima de carga} * \text{Horas solar pico} \end{aligned}$$

$$120A * 6horas = 720Ah$$

El número máximo de baterías por cargador solar se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Número de baterías por grupo primario} = \frac{\text{Energía máxima de carga}}{\text{Capacidad de batería}}$$

$$\frac{720Ah}{50Ah} = 14.4 \text{ Baterías}(48v) \cong 14 \text{ Baterías}(48v)$$

Considerando que el total de baterías necesarias para el sistema de almacenamiento es mayor a la máxima capacidad del cargador, se divide el sistema de almacenamiento en grupos primarios y un grupo adicional. Los grupos primarios consistirán en grupos de baterías con un cargador a su máxima capacidad. Por otra parte, el grupo adicional estará conformado por un grupo de menor número de baterías que servirá para completar el almacenamiento total necesario para el sistema.

Y, la energía real por cargador se calcula del modo siguiente:

Energía por cargador solar = Número de baterías por grupo * Capacidad de batería
* Voltaje de carga

$$14 \text{ Baterías} * 50Ah * 48v = 33600wh$$

La Figura 10 muestra el diagrama de grupo primario de las baterías:



Figura 10. Diagrama de grupo primario de baterías. Fuente: Elaboración propia

El número real de baterías se determina con la expresión siguiente:

$$\text{Número de grupos primarios de baterías} = \frac{(1 + \text{Días de autonomía}) * \text{Energía para cubrir un día de consumo Almacenamiento}}{\text{Energía por cargador solar}}$$

$$\frac{(1 + 1) * 76.5\text{kwh}}{33.6\text{kwh}} = 4.55 \text{ Grupos primarios} \cong 4 \text{ Grupos primarios}$$

$$\begin{aligned} \text{Energía grupo adicional} \\ &= \text{Energía total} - (\text{Grupos primarios} \\ &\quad * \text{Energía por cargador solar}) \end{aligned}$$

$$\text{Energía grupo adicional} = 153\text{kwh} - (4\text{grupos} * 33.6\text{kwh}) = 18.6\text{kwh}$$

Número de baterías en grupo adicional =

$$\frac{\text{Energía grupo adicional}}{\frac{\text{Voltaje de batería}}{\text{Capacidad de batería}}}$$

$$\frac{18600\text{wh}}{\frac{24\text{v}}{50\text{Ah}}} = 15.5 \text{ Baterías}(24\text{v}) \cong 16 \text{ Baterías}(24\text{v})$$

$$\text{Total de baterías}(24\text{v}) = 128 \text{ Baterías}(24\text{v})$$

El campo fotovoltaico para los grupos primarios se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$\text{Campo FV} = \frac{(1 + \text{Días de autonomía}) * \text{Energía}}{\text{Horas solar pico}}$$

$$\text{Campo FV} = \frac{(1 + 1) * 76.5\text{kwh}}{6\text{hr}} = 24.797\text{kw}$$

*Nota: Se consideró 1 día extra de autonomía que funcionara como respaldo para días de baja irradiancia solar.

La demanda por cargador solar se calcula del modo siguiente:

$$\text{Demanda de cargador solar} = \frac{\text{Voltaje de baterías} * \text{Amperaje de baterías}}{\text{Horas solar pico}}$$

$$\text{Demanda de cargador solar} = \frac{48\text{v} * 700\text{ah}}{6\text{h}} = 5.6\text{kw}$$

El número de módulos fotovoltaicos se determina mediante la expresión siguiente (ver Anexo 3):

$$\text{Número de paneles} = \frac{\text{Demanda de cargador}}{\text{Potencia de panel} * \text{Eficiencia del panel}}$$

$$\text{Número de paneles} = \frac{5600\text{w}}{380\text{w} * 0.98} = 15.03 \text{ paneles} \cong 15 \text{ paneles}$$

A continuación, se realizan los cálculos para el diseño de campo fotovoltaico por cargador solar (ver Figura 11):

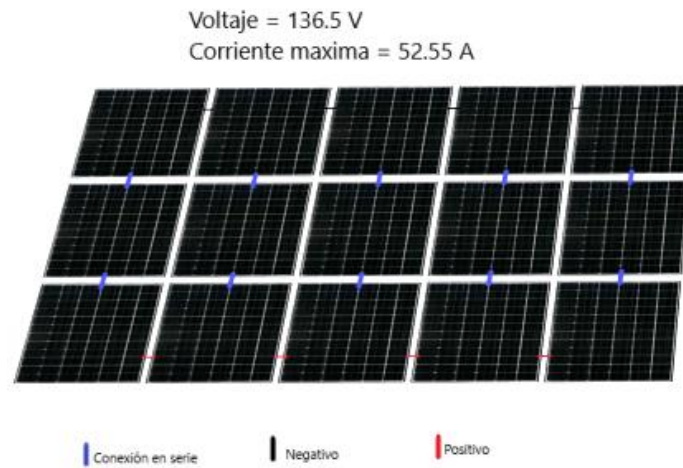


Figura 11. Diseño campo fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia

La demanda del cargador del campo fotovoltaico (grupo adicional) se determina mediante la expresión siguiente:

$$Demanda\ de\ cargador\ solar = \frac{Energía\ necesaria}{HSP}$$

$$Demanda\ de\ cargador\ solar = \frac{18.6kwh}{6h} = 3.1kw$$

Además, el número de módulos fotovoltaicos se calcula como sigue:

$$Número\ de\ paneles = \frac{Demanda\ de\ cargador}{Potencia\ de\ panel * Eficiencia\ del\ panel}$$

$$Número\ de\ paneles = \frac{3100w}{380w * 0.98} = 8.3\ paneles \cong 9\ paneles$$

Diseño de campo FV para grupo adicional:

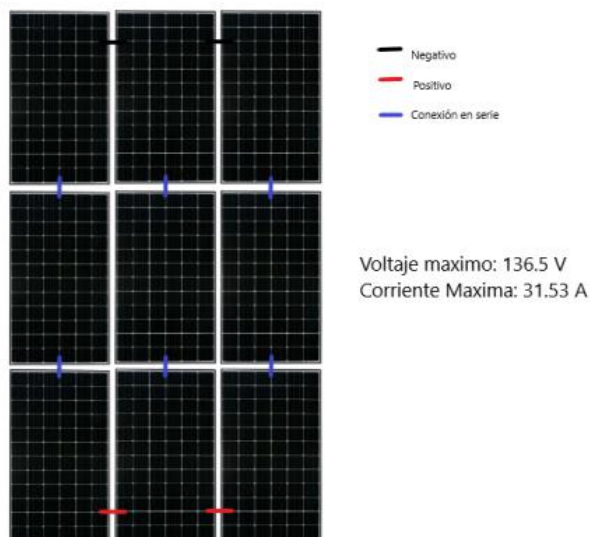


Figura 12. Campo fotovoltaico adicional. Fuente: Elaboración propia

4.2. Pila de combustible

Para lograr satisfacer la necesidad energética deseada con un sistema de almacenamiento de hidrógeno alimentado por una pila de combustible, es importante cumplir los mismos criterios de reserva energética utilizados en el ejemplo anterior. Se desea cubrir un consumo total de 153kwh en el cual se consideró un respaldo energético de 24 horas.

Con el objetivo de comparar ambas opciones de almacenamiento, no se tomará en cuenta el uso de baterías como parte del sistema. Por lo tanto, es importante contar con un dato estimado de demanda máxima al sistema. Bajo estas consideraciones, se elaboró una tabla teórica (ver Tabla 2) simulando una situación de alta demanda.

Tabla 3. Demanda máxima en consumo. Fuente: Elaboración propia

CONCEPTO	DEMANDA
5 TONELADAS DE REFRIGERACIÓN	5000w
ILUMINACIÓN	500w
2 CENTROS DE ENTRETENIMIENTO	500w
ELECTRODOMÉSTICOS	3000w
	9000w

Para cubrir la demanda estimada se seleccionaron 2 pilas de combustible de una producción máxima de 5kw. Los datos técnicos de una pila de combustible (ver Anexo 4) son los siguientes:

Potencia: 5kw

Voltaje de salida: 72 V

Corriente de salida: 70 A

Flujo H₂: 0.55 Bar, 65 L/min, 3900 l/h

El cálculo de Hidrógeno necesario se realiza con la expresión siguiente:

$$H^2 \text{ necesario} = \left(\frac{\text{Energía total}}{\text{Producción máxima de celdas}} \right) * (\text{consumo de celda})$$

$$H^2 \text{ necesario} = \left(\frac{153 \text{ kWh}}{10 \text{ kW}} \right) * \left(3900 \frac{\text{l}}{\text{hr}} \right) = 59670 \text{ l}$$

Para el caso del electrolizador se tienen los datos siguientes (ver Anexo 5):

Consumo: 381 W DC

Producción: 120 l/hr, 2 l/min

El número de electrolizadores necesarios se determina de la manera siguiente:

$$\text{Número de electrolizadores necesarios} = \frac{H^2 \text{ necesario}}{\text{Producción} * \text{HSP}}$$

Número de electrolizadores necesarios =

$$\frac{59670 \text{ l}}{2 \text{ l}/* 360 \text{ min}} = 82.87 \cong 83 \text{ Electrolizadores}$$

En tanto el número de paneles se determina de la siguiente manera:

$$\text{Número de paneles} = \frac{\text{Demanda max} * \text{Número de electrolizadores}}{\text{Producción Panel} * 85\%}$$

$$\text{Número de Paneles} = \frac{381 \text{ w} * 83 \text{ Paneles}}{360 \text{ w} * .85} = 103.3 \text{ Paneles} \cong 104 \text{ Paneles}$$

Finalmente, el convertidor DC/DC baja o sube la tensión de salida del arreglo fotovoltaico a una tensión que asegure el funcionamiento de los electrolizadores. El convertidor determinará las características y delimitaciones del arreglo fotovoltaico.

4.3 Inversión Económica

El análisis de inversión económica es de vital importancia en la elaboración de cualquier proyecto. Por lo general este determinará si el proyecto representa o no una opción viable para la solución del problema. La inversión económica es lo que determina la viabilidad de llevar a cabo un proyecto. En este estudio, se comparó el gasto inicial de los sistemas propuestos.

Con el objetivo de facilitar la comparación entre los sistemas se optó por un enfoque simplificado en donde solo se tomaron en cuenta los componentes de mayor representación económica, los cuales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 4. Estimado de costos. Fuente: Elaboración propia.

Almacenamiento en baterías de litio			Almacenamiento en H2		
<i>Unidades</i>	<i>Concepto</i>	<i>Costo Total (\$USD)</i>	<i>Unidades</i>	<i>Concepto</i>	<i>Costo Total (\$USD)</i>
128	Baterías Deep Cycle (50Ah, 24v)	102,272.00	83	Electrolizador QL-2000	925,035.00
69	Módulos Trina Solar 360w	16,560.00	2	5000w Horizon Fuel Cell	53,600.00
5	Cargador Inversor Growatt	4,500.00	104	Módulos Trina Solar 360w	24,960.00
			1	Tanque H2 Alta presión	3,000.00
		Total = 123,332.00			Total = 1,006,595.00

Los costos mencionados en la tabla anterior no incluyen IVA u otro impuesto y cabe aclarar que estos podrían verse afectados con la variación del mercado energético.

4.4 Mantenimiento

El mantenimiento, al igual que el costo inicial, representa un punto importante de cualquier proyecto. El mantenimiento necesario generalmente es especificado por los fabricantes de los componentes utilizados y, este además de asegurar el correcto

funcionamiento del sistema, permite no comprometer el periodo de vida útil de los elementos. A continuación, se desglosarán las técnicas de mantenimiento esperadas según los fabricantes de cada componente. Se optó por omitir los componentes que no requieran mantenimiento a lo largo de su vida útil.

4.4.1 Mantenimiento de un Sistema de Almacenamiento en Baterías de Litio

En el caso del mantenimiento en el sistema de almacenamiento de energía en baterías de litio, no se encontró ningún componente el cual el fabricante especifique un mantenimiento que involucre un gasto significativo para el usuario. Por esto último, solo se consideró necesario una revisión general y limpieza una vez al año.

4.4.2 Mantenimiento de un Sistema de Almacenamiento Energético Basado en la Utilización de Hidrógeno

1. Pila de combustible: Inspección visual, inspección de válvulas de alivio, inspección de fugas (debe realizarse después de cualquier mantenimiento preventivo o correctivo) e inspección de filtros.

2. Electrolizador: Monitoreo y reemplazo constante de los tanques de agua. De igual manera una limpieza de tanque cada 2 a 3 meses para asegurar el correcto funcionamiento del componente. Monitoreo y reemplazo de catalítico cada 2 años.

4.5 Tiempo de Vida

Actualmente las tecnologías de energías renovables compiten en cuanto a durabilidad contra los métodos de producción tradicionales, requiriendo mantenimientos que pueden llegar a ser mínimo considerando su operación.

4.5.1 Durabilidad de los Componentes de un Sistema de Almacenamiento Energético Convencional

Banco de Baterías: 3000-5000 Ciclos, de 8 a 14 años de uso continuo.

Arreglo Fotovoltaico: 25 años, 84% eficiencia

Cargador/Inversor: 10 a 20 años

4.5.2 Durabilidad de los componentes de un Sistema de Almacenamiento Energético basado en la utilización de Hidrógeno

Arreglo Fotovoltaico: 25 años, 84% eficiencia

Electrolizador: 25 – 50 años, con mantenimiento continuo y reemplazo constante de componentes.

Pila de combustible: 25 – 50 años, con mantenimiento continuo y reemplazo constante de componentes.

4.6 Metodología de tratamiento posterior a la vida útil

Considerando que la producción primaria de energía de ambos sistemas proviene de una fuente renovable, es importante evaluar su verdadero impacto antes, durante y después de su instalación. Frecuentemente no se aborda el impacto representado por los componentes después de su vida útil. Este engloba los métodos de reciclaje, así como también el tratamiento de componentes no reciclables.

4.6.1 Tratamiento de componentes propios de un sistema de almacenamiento energético convencional

Con respecto al banco de baterías se tiene lo siguiente:

Las baterías de litio son comúnmente categorizadas como un dispositivo electrónico, los cuales son 100% reciclables gracias a sus componentes de alto valor (ver Figura 12). La Figura 13 muestra los componentes principales de una batería de litio.

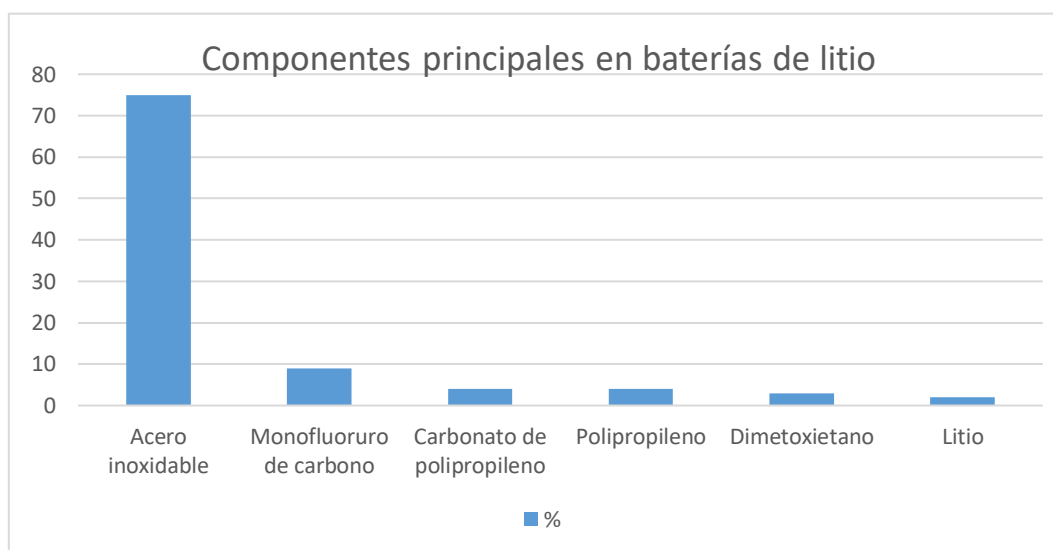


Figura 13. Componentes principales en baterías de litio. Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al tratamiento del banco de baterías se tiene lo siguiente:

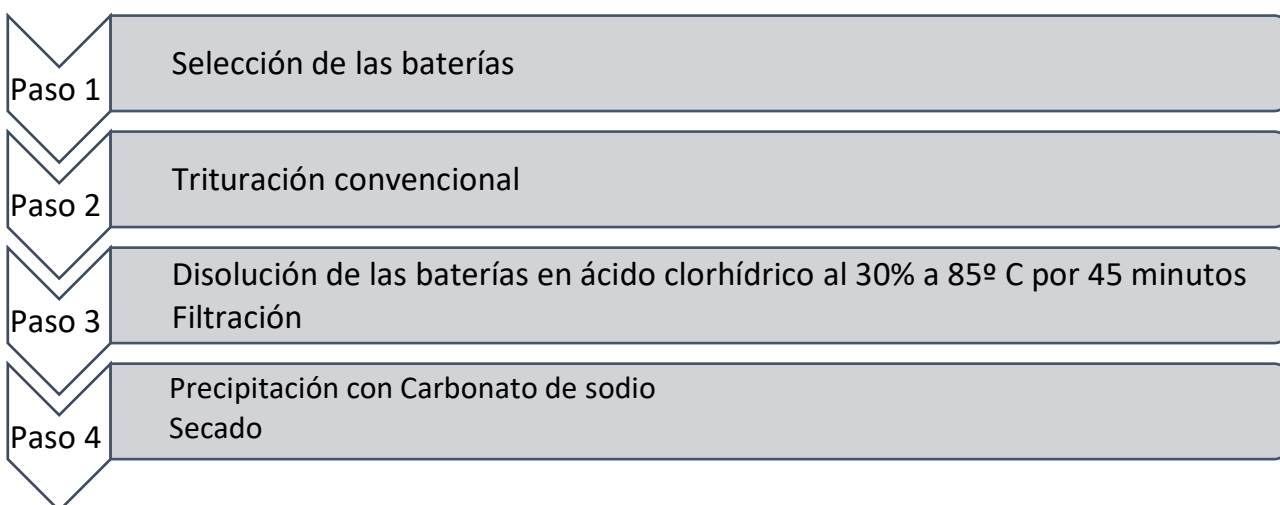


Figura 14. Método de reciclaje de baterías de litio. Fuente: Elaboración propia.

El método mencionado es uno de los tratamientos utilizados para minimizar el impacto negativo que representan las baterías de litio después de cumplir su periodo de vida útil. Este tratamiento también genera materia prima para la fabricación de futuros equipos electrónicos, pudiendo minimizar así la necesidad de extracción de futura materia prima.

Por otro lado, para el caso del arreglo fotovoltaico se tiene lo siguiente:

El tratamiento post-vida de los módulos fotovoltaicos puede ser seccionado en dos procedimientos generales. El primero de ellos consiste en la separación de los componentes generales del módulo. El segundo haría referencia al tratamiento específico de cada material. La Figura 15 muestra la separación de materiales de módulos fotovoltaicos.

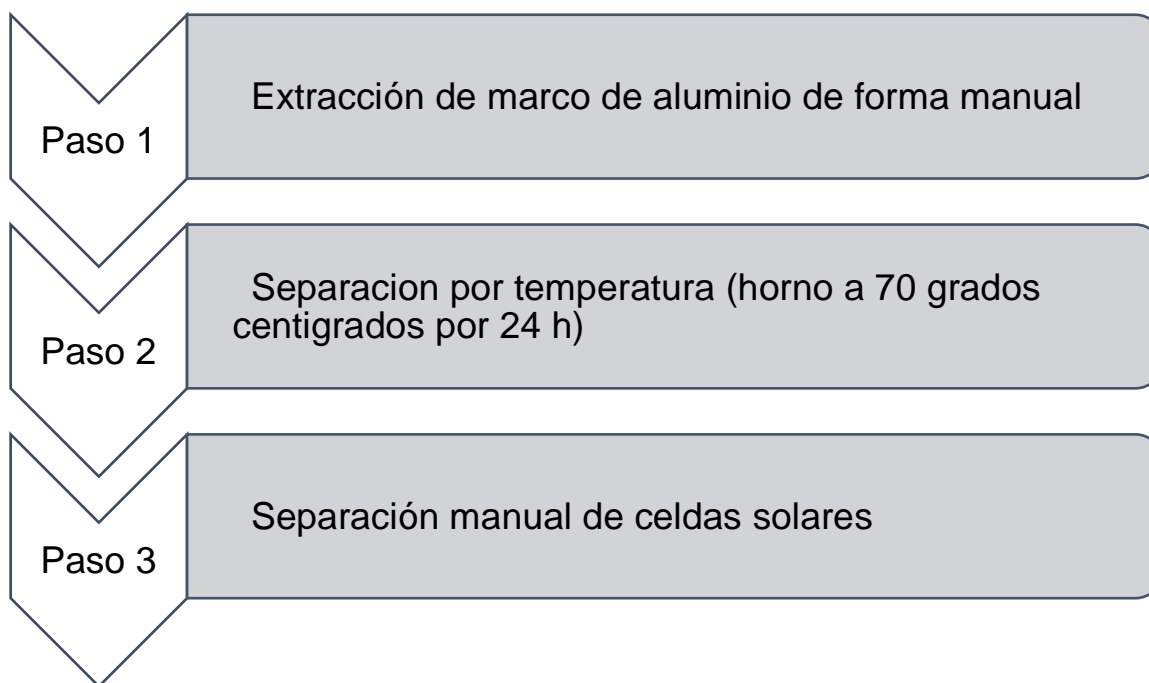


Figura 15. Separación de materiales de módulos fotovoltaicos. Fuente: Elaboración propia

Separar de manera física los componentes principales del módulo fotovoltaico representa el primer paso en el proceso de reciclaje. Estos materiales deben pasar

por un procedimiento específico según sus propiedades para ser convertidos de nuevo en materia prima para la fabricación futura de más componentes, o bien, en el caso de sustancias peligrosas, neutralizarlas para no impactar de manera negativa al medio ambiente. La Figura 16 una clasificación de los residuos de un módulo fotovoltaico.

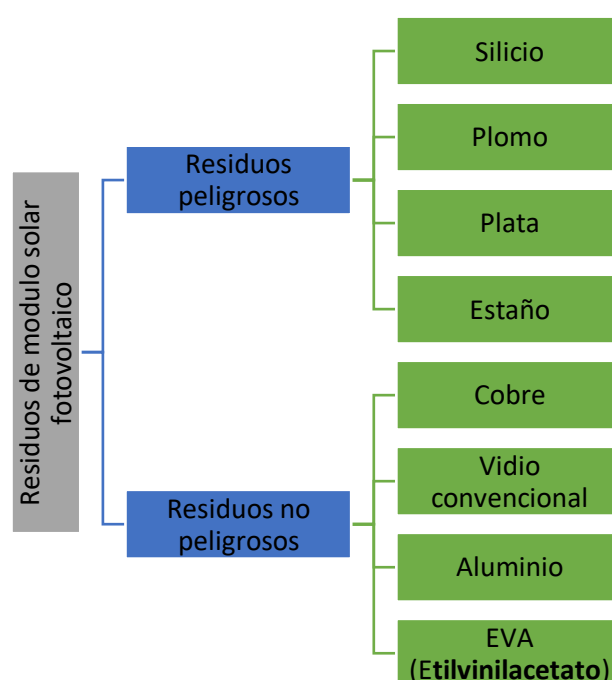


Figura 16. Clasificación de residuos de un módulo solar fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del Inversor/Cargador se tiene lo siguiente:

Se consideró la utilización de inversores/cargadores centrales para minimizar el impacto medioambiental por la utilización de un mayor número de componentes.

Además de ofrecer mayores tiempos de vida y accesibilidad de componentes, este tipo de inversores ofrecen mayor viabilidad en cuanto al reciclaje de sus aditamentos.

Los inversores no cuentan con un tratamiento estandarizado para su reciclaje. En algunos casos, estos son transportados a una planta tratadora de residuos electrónicos donde son procesados con distintos métodos a fin de reducir el desperdicio final del componente.

4.6.2 Tratamiento de componentes propios de un sistema de almacenamiento energético basado en la utilización hidrógeno

Una de las ventajas que conlleva incorporar pilas de combustible y electrolizadores en proyectos, es la facilidad que tienen de ser reciclados ya que son fabricados en su mayor parte de componentes básicos y con alto valor en el mercado. Existen sustancias químicas que al ser agregadas mejoran la eficiencia de los equipos, pero si se busca mejorar la sustentabilidad de la tecnología es preferible utilizar sustancias amigables con el medio ambiente, aunque estas puedan representar una disminución en productividad. Los materiales más comunes de una pila de combustible y electrolizadores PEM son:

- Magnesio
- Aluminio
- Materiales plásticos (TECASINT)
- Nitruro de cromo
- Hierro
- Acero inoxidable

4.7 Eficiencias

La eficiencia de un componente hace referencia a la cantidad de energía final disponible para realizar una tarea en comparación a la energía de entrada. Entre más eficiente sea el componente menos energía será desperdiciada en el sistema. La fórmula básica para obtener la eficiencia es la siguiente:

$$Eficiencia = \frac{Energía\ final\ disponible}{Energía\ de\ combustible\ o\ de\ entrada}$$

4.7.1 Eficiencias de un sistema de almacenamiento energético convencional

La figura 17 muestra la eficiencia y el tiempo de vida de las baterías de litio.

 BATERÍAS DE LITIO	DENSIDAD ENERGÉTICA (KW/KG)	EFICIENCIA (%)	TIEMPO DE VIDA (Años)
	150-250	89-95	10-15

Figura 17 Eficiencia y tiempo de vida de baterías de ion de litio. Fuente: Elaboración propia

Para lograr eficiencias por encima del 90% es importante cuidar los siguientes puntos:

- Necesidad de circuito de protección para evitar fugas térmicas
- Degradación a alta temperatura y cuando se almacena a alto voltaje
- Imposibilidad de carga rápida a temperaturas bajo cero (<0 ° C, <32 ° F)

4.7.2 Eficiencias de un sistema de almacenamiento energético basado en la utilización de Hidrógeno

Se consideró una pila de combustible de tipo PEM, las cuales cuentan con un rango de eficiencia de 40-55%. Este tipo de pilas de combustible es mayormente utilizado por su valor económico y eficiencia entregada. Cabe resaltar que a pesar de que el calor residual no es elevado, se puede acoplar un sistema de cogeneración para así reducir pérdidas y mejorar la eficiencia del sistema.

En el caso de esta investigación se utilizó una celda Horizon 5000W. Esta pila de combustible cuenta con una eficiencia del 40% a 72V, con una temperatura máxima de operación de 65°C o 149°F.

Entre las desventajas que se consideran de este tipo de tecnologías están:

- Operan a bajas temperaturas
- Requieren catalizadores para que la reacción se produzca
- Los catalizadores generalmente utilizan metales nobles como platino que además de costosos son delicados y se envenenan fácilmente, por esto la pila de combustible debe funcionar con hidrógeno de alta pureza

CAPITULO V. CONCLUSIONES

En este capítulo se describen las conclusiones obtenidas a partir de la información generada en los capítulos anteriores a fin de seleccionar un método de almacenamiento energético superior o bien definir de manera concreta los pros y contras de cada método. Por último, se seleccionó el sistema más apropiado para el ejemplo descrito en el capítulo de resultados.

Las siguientes conclusiones están basadas en precios del mercado energético actual y en la información disponible al público general. Futuros desarrollos tecnológicos podrían afectar las observaciones y conclusiones obtenidas. Ambos sistemas fueron evaluados en una instalación hipotética ubicada en Ciudad Obregón Sonora México.

Tabla 5. Resultados. Fuente: Elaboración propia.

Comparación	Almacenamiento Pila De Litio	Almacenamiento H2
Inversión Económica	\$123, 332.00	1, 006, 595.00
Mantenimiento	-Revisiones Generales y/o	-Pila de combustible,

	Limpieza anuales o cuando sea requerido	inspecciones generales haciendo énfasis en las fugas. - Electrolizador, limpieza cada 3 o 4 meses y/o reemplazo del mismo cada 2 años.
Tiempo De Vida y Manejo de Residuos	Banco de baterías de 8 a 14 años. Se cuentan con materiales electrónicos los cuales pueden ser reciclados en un 100% aunado al requerimiento de manejar con extremo cuidado el Litio para su correcto tratamiento post-vida útil.	Electrolizador y Pila de combustible pueden llegar desde 25 a 50 años. Fácil reciclaje de la mayor parte de los componentes del sistema con un alto valor post-vida útil.
Eficiencias	90%	40-55%

Tabla 6. Conclusiones. Fuente: Elaboración propia.

Almacenamiento en baterías de litio a base de energía solar.	Producción y almacenamiento de hidrogeno a base de energía solar.
Menor inversión económica inicial	Mayor durabilidad y tiempo de vida
Menor mantenimiento	Menor complejidad en reciclado de materiales
Mayor eficiencia global	

Considerando lo anterior, el almacenamiento en baterías de litio demostró superioridad al ser comparado con el sistema de generación y almacenamiento de

hidrogeno. Dicho esto, los resultados de ciertas comparaciones podían verse mayormente afectadas al ser evaluadas en instalaciones de mayor escala. También se observó la gran influencia que tienen las tecnologías al estar disponibles en el mercado, existe una gran demanda de baterías de litio creando así mayores inversiones en su desarrollo y mayor competencia en el mercado. La generación y almacenamiento de hidrogeno en lo contrario al no tener una fuerte demanda, minimiza el interés de parte de inversionistas en su desarrollo tecnológico.

Se concluye aceptando lo establecido en el tercer capítulo, en la postulación de hipótesis nula (H_0) y se rechaza la hipótesis alterna (H_1). Actualmente considerando la longevidad de componentes, el mantenimiento, las eficiencias y la inversión económica necesaria en los sistemas de almacenamiento energético evaluados, los sistemas basados en la utilización de hidrógeno como almacenamiento de energía no logran competir con aquellos sistemas populares en el mercado, al menos por ahora.

REFERENCIAS

- Aguado, M, Alzueta, B y Garde, R. (2006). *Hidrógeno y pilas de combustible. Un uso energético eficiente en la vivienda*. Universidad de Navarra. Madrid, España. Recuperado de: <https://core.ac.uk/display/83569231>.
- Alvarado, J. (sin fecha). *Diseño y Cálculo de una Instalación Fotovoltaica Aislada*. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: https://oa.upm.es/52204/1/PFC_JORGE_ALVARADO_LADRON_DE_GUEVARA.pdf.
- Arias, L., Bernal, M. y Portilla, L. (2008). *Los Costos y su Manejo con el Control Estadístico de Procesos con Ayuda de la Distribución Normal*. Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Scientia Et Technica. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84903845.pdf>.
- ASIAN DEVELOPMENT BANK (2018). *Handbook On Battery Energy Storage System*. ADB. Recuperado de: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/479891/handbook-battery-energy-storage-system.pdf>
- Baptista P., Fernandez C. y Hernandez R. (2003). *Metodología de Investigación*. México D.F: McGraw-Hill
- Brown del Rivero, A. (2011). *Electricidad, Características y Opciones de Reforma para México*. Ciudad de México, México: Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Recuperado de: <http://clacso.redalyc.org/pdf/413/41318401010.pdf>.
- Buchanan, M., Crabtree, G. y Dressehaus, M. (2014). *The Hydrogen Economy*. Recuperado de <http://saeta.physics.hmc.edu/courses/p80/papers/hydrogen/PhysToday%20Hydrogen%20041239.pdf>.

- Calzadilla, A. y Díaz, V. (2016). *Artículos Científicos, Tipos de Investigación y Productividad Científica en las Ciencias de la Salud*. Universidad del Rosario. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/562/56243931011.pdf>.
- Castillo, T. (2018). *Metodología de Ecodiseño de Instalaciones Eléctricas Fotovoltaicas en Corriente Continua para Edificios Urbanos Aislados*. Recuperado de: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=9QTLWbDc6j8%3D>.
- Carl, N. (2005). *Electrolysis of Water*. Atlanta, Georgia:HyperPhysics. Recuperada de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/thermo/electrol.html>
- Cepeda, J., Escandon, E., León, E. y Peralta, P. (2019). *Factores que Influyen en la Selección de Energías Renovables en la Ciudad*. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/eure/v45n134/0717-6236-eure-45-134-0259.pdf>.
- Cook, T. y Reichardt (1986). *Métodos Cualitativos y Cuantitativos en la Investigación Evaluativa*. Edit. Moranta, Madrid.
- Cristóbal, I. (2017). *Optimización de Sistemas Híbridos Aislados Alimentados con Fuentes Renovables de Energía*. Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=202209>.
- Daza, J. (2016). *Crecimiento y Rentabilidad Empresarial en el Sector Industrial Brasileño*. Contaduría y Administración. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/395/39544252004.pdf>.
- El Servicio Nacional de Adiestramiento en Trabajo Industrial. (2012). *Contaminación Ambiental*. Gestión Ambiental. Lima, Perú. Recuperado de <http://virtual.senati.edu.pe/pub/GA/GARU2.pdf>.
- Escobar, A. (2011). *Sistemas de Almacenamiento de Energía y su Aplicación en Energías Renovables*. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84921327004>.

- Ferrari, L. (2013). *Energías Fósiles: Diagnóstico, Perspectivas e Implicaciones Económicas*. Revista Mexicana de Física, vol. 59, núm. 2. Sociedad Mexicana de Física. Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/570/57030971005.pdf>.
- Floyd, T. (2007). Principios de circuitos eléctricos. Octava edición. Recuperado de: http://media.espora.org/mgoblin_media/media_entries/1455/Principios_de_circuitos_electricos.pdf
- García, A. (2017). *Tecnologías de Almacenamiento de Energía en la Red Eléctrica*. Universidad de Cantabria. Cantabria, España. Recuperado de: <repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12027/396460.pdf?sequence=1>.
- Humboldt State University & Schatz Energy Research Center (2002). *Operation and Maintenance Manual PEM Fuel Cell Test Station*. Arcata, California. Recuperado de: <http://www.personal.umich.edu/~annastef/FuelCellPdf/UofMich%20O&M%20Manual.pdf>.
- Kerlinger, F. y Lee, H. (2002). *Investigación del comportamiento. Métodos de investigación en ciencias sociales*. México: McGraw-Hill.
- Madrigal, J (2013). *Separación y reciclaje de baterías en el relleno industrial de Blumenau, Brasil. Comparación con la situación de Costa Rica*. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Recuperado de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3070/Reciclaje%20de%20baterias.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martín G. (2016). *Sistemas De Almacenamiento De Energía*. Universidad de Valladolid. Valladolid, España. Recuperado de: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/18325/TFG-P;jsessionid=EAB277BCA0D5A71D039A1939FBEF8957?sequence=1>.

- Mejía, G. (2014). *Estudio Comparativo entre la Legislación de Eficiencia Energética de Colombia y España*. Revista Escuela de Administración de Negocios. Universidad EAN. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/206/20633274009.pdf>.
- Mendoza, A. (2006). *“El Hidrógeno y la Energía”*. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Medicina. Recuperado de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/38096/El%20hidr%C3%B3geno%20y%20la%20energ%C3%ADa.pdf?sequence=1> }
- Parra, F. (2007). Análisis de Eficiencia y Productividad. Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales. Recuperado de: <https://econometria.files.wordpress.com/2007/12/analisis-de-eficiencia-y-productividad.pdf>
- Quintanilla, M. (1998). Ciencia, Tecnología y Sociedad. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Enciclopedia Iberoamericana de Filosofía. Madrid, España. Recuperado de <https://editorial.csic.es/publicaciones/libros/12128/978-84-00-09470-6/ciencia-tecnologia-y-sociedad-.html>.
- Rifkin, J. (2002): *The Hydrogen Economy; the Creation of the Worldwide Energy and the redistribution of Power on Earth*, New York: Putnam.
- Rodríguez, S. (2018). *Plan de manejo para disposición final de paneles solares de Energía Integral Andina S.A.* Universidad del Bosque. Bogotá, Colombia. Recuperado de: https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/3246/Rodriguez_Blanco_Santiago_Eduardo_2018.pdf?sequence=1&isAllowed.
- Ruiz, E. (2020). *¿Cuál es la vida útil de los paneles solares fotovoltaicos?*, SolarPlus. Recuperado de: <https://solarplus.es/vida-util-de-paneles-solares>.

Urréjola S. (2011). *Métodos de Producción de Hidrógeno*. Centro universitario de la Defensa ENM de Marín adscrito a la Universidad de Vigo. Recuperado de <https://tv.uvigo.es/video/5b5b67b08f4208a36b9bf632>.


Vallejo, O (2003). *Ensamble y evaluación de una celda combustible tipo PEM*. CIDETEQ. Queretaro, Qro. Recuperado de: <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/281/1/Ensamble%20y%20evaluaci%C3%B3n%20de%20una%20celda%20combustible%20tipo%20PEM.pdf>

Wark, K. (1991). *Termodinámica*, 5ª Ed México D.F: McGraw-Hill Interamericana.


ANEXOS

1. Batería de litio BATTLEBORN

Specifications	Charging Parameters	Built-in Battery Management System
<ul style="list-style-type: none"> • 50 Amp Hour, 24 Volt Battery • LiFePO4 Chemistry • 3000-5000 Cycles • Dimensions (L x W x H): 12.76" x 6.86" x 8.95" *See QR Code below • 31 lbs. • Operating Temp Range: -4°F (-20°C) to 135°F (57.2°C) • Water Resistant and Sealed (Batteries should not be submerged) • Designed and Assembled in the USA • Built-in BMS (Battery Management System) 	<ul style="list-style-type: none"> • Absorption Voltage: 28.4V to 29.2V • Float Voltage: 26.8 to 27.6V • Equalization Voltage: 28.8V (if Applicable) • Absorption Time: 30 minutes per 100Ah battery bank • No Temperature Compensation 	<p>Our BMS keeps you and your battery safe and ensures your battery will last for many years.</p> <ul style="list-style-type: none"> • 60 Amps Continuous • 100 Amps Surge for 30 Seconds • ½ Second Surge for Loads Over 200 Amps • High/Low Voltage Protection • Short Circuit Protection • High/Low Temperature Protection • Cold Charging Protection • Automatic Cell Balancing at Top of Charge <p><i>*Please Note: This built-in protection will reset after 5 seconds in most fault conditions. Disconnecting the battery from loads will also reset the BMS.</i></p>



Get out there, stay out there.™



*QR Code

Questions? Call 855-292-2831 or email us at info@battlebornbatteries.com

Tabla A1.

2. Inversor/ Cargador GROWATT

Hoja de Datos	SPF 4000T DVM	SPF 5000T DVM	SPF 6000T DVM	SPF 8000T DVM	SPF 10000T DVM	SPF 12000T DVM
Voltaje de Batería	48VDC					
Tipo de Batería	Litio/Plomo-ácido					
Salida del Inversor						
Potencia nominal	4KW	5KW	6KW	8KW	10KW	12KW
Sobretensión	12KW	15KW	18KW	24KW	30KW	36KW
Tipo de onda	Onda sinusoidal pura / Igual que la entrada (modo bypass)					
Voltaje de CA(Modo batería)	104-110-115-120 / 208-220-230-240VAC (opcional)					
Frecuencia de red CA (Rango)	50Hz/60Hz(49.7 – 50.3Hz/59.7 – 60.3Hz)					
Eficiencia max.	>85%					
Tiempo de transferencia	10 ms(Para Computadoras); 20 ms (Para Electrodomésticos)					
Cargador Solar						
Corriente máxima de carga	80A			120A		
Máxima potencia FV	5000W			7000W		
Rango de voltaje del MPPT	60–145VDC					
Max. Voltaje de circuito abierto FV	150VDC					
Máxima eficiencia	>98%					
Cargador CA						
Voltaje de entrada CA	240./AC					
Rangos de voltaje	184–272VAC (Para computadoras); 54–272VAC (Para electrodomésticos)					
Rango de frecuencia	50Hz / 60Hz (detección automática)					
Max. Corriente de carga	40A	50A	60A	70A	80A	100A
Datos Generales						
Grado de protección	IP20					
Dimensiones	360/540/218mm	360/540/218mm	360/540/218mm	380/650/225mm	380/650/225mm	380/650/225mm
Peso	42kg	47kg	52kg	64kg	66kg	75kg
Entorno Operativo						
Temperatura de Operación	0°C to 45°C					

Tabla A2.

3. Módulo solar fotovoltaico TrinaSolar

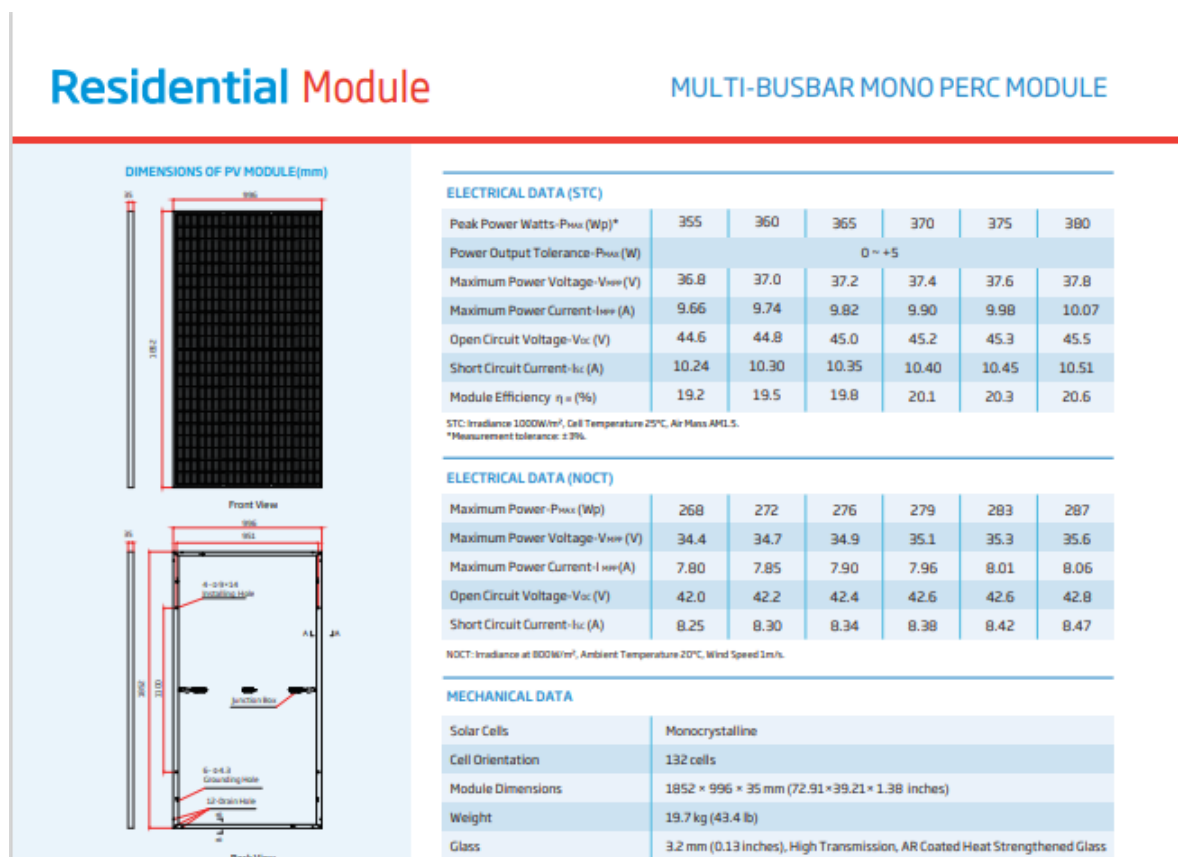


Tabla A3.

4. Pila de combustible HORIZON

Technical Details	
Number of Cells	120
Rated Power	5000W (5kW)
Rated Performance	72V @ 70A
Hydrogen Supply Valve Voltage	12V
Purging Valve Voltage	12V
Blower Voltage	12V
Reactants	Hydrogen and Air
Ambient Temperature	5 – 30 C; (41 – 86 F;)
Max Stack Temperature	65 C (149 F)
Hydrogen Pressure	0.45 – 0.55 Bar
Humidification	Self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Controller Weight	2500g (\pm 100g)
Stack Weight (with Fan & Casing)	30kg \pm 200g
Hydrogen Flow Rate at Max Output	65 L/min
Stack Size	350 x 212 x 650mm (13.8" x 8.3" x 25.6")
Hydrogen Purity Requirement	\geq 99.995% (dry H ₂)
Start up time	\leq 30s (ambient temperature)
Efficiency of System	40% at 72V
Low Voltage Protection	60V
Over Current Protection	90A
Over Temperature Protection	65 C
External Power Supply	24V (\pm 1V), 8A-12A

Tabla A4.

5. Electrolizador QL-2000

Product Advantages:

- Solid polymer electrolyte technology
- Plural electrode and multi-unit electrolysis cell structure
- Electrolysis of pure water (no adding alkali)
- Lower power consumption
- Low cell voltage
- High electrolysis efficiency

Key Features:

Model	Unit	QL-150	QL-300	QL-500	QL-1000	QL-2000
H2 Flow Rate	cc / min	0 - 150	0 - 300	0 - 500	0 - 1000	0 - 2000
H2 Purity	%	> 99.9995				
Output Pressure	bar	0.2 - 4.0				
Dew Point	° C	- 65.0				
Input Power	Watt	< 90	< 150	< 300	< 500	< 1000
Voltage	AC	220V/110V, 50-60Hz				
Water Tank Capacity	Liter	3.0	3.0	3.0	6.0	6.0
Operating Environment	Indoor	5° C to 45° C, < 80% Room Humidity				
Weight	kg	< 15	< 15	< 15	< 27	< 30
Water Resistivity	MΩ*cm	> 1				
Dimensions (L x W x H)	mm	420 x 227 x 352	420 x 227 x 352	420 x 227 x 352	485 x 368 x 352	505 x 368 x 352
Membrane		Nafion PFSA membrane				

Tabla A5.