



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TESIS

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE
CÓMPUTO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UN
SISTEMA FOTOVOLTAICO-EÓLICO-HIDRÓGENO**

TESIS
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN MECATRÓNICA

PRESENTA
ING. GABRIEL GUZMÁN QUEZADA

DIRECTOR
DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR

ASESORES
**DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL
DR. JAVIER VÁZQUEZ CASTILLO
DR. ABIMAEEL RODRÍGUEZ SÁNCHEZ
DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**



CHETUMAL QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS BAJO LA SUPERVISIÓN DEL COMITÉ
DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y APROBADA COMO
REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN MECATRÓNICA

COMITÉ DE TESIS

DIRECTOR:

DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR

ASESOR:

DR. GLISERIO ROMELI BARBOSA POOL

ASESOR:

DR. JAVIER VÁZQUEZ CASTILLO

ASESOR:

DR. ABIMAEEL RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

ASESOR:

DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ



CHETUMAL, QUINTANA ROO, MÉXICO, OCTUBRE DE 2020.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivo general	5
1.4.1. Objetivos específicos	5
1.5. Alcance y restricciones	5
2. SISTEMAS DE ENERGÍA HÍBRIDOS	6
2.1. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Batería	8
2.2. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno -Batería	9
2.3. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	12
2.4. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Eólico	14
2.5. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Batería	15
2.6. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Diésel	16
2.7. Sistema Fotovoltaico-Diésel-Batería	17
2.8. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Biomasa- Batería	18
2.9. Modelado de un sistema fotovoltaico	18
2.10. Criterios y estrategias en el dimensionamiento y diseño de sis- temas híbridos	19
3. FUENTES DE ENERGÍA	26
3.1. Energía fotovoltaica	27
3.1.1. Tipos de celdas solares	29
3.1.1.1. Celdas solares de Silicio	30
3.1.1.2. Celdas solares de película delgada	30
3.1.1.3. Módulos fotovoltaicos	31

3.2.	Energía Eólica	32
3.2.1.	Aerogenerador	33
3.2.1.1.	Rotores de eje horizontal	34
3.2.1.2.	Rotores de eje vertical	34
3.2.2.	Energía del viento	37
3.3.	Hidrógeno como vector energético	38
3.3.1.	Métodos de producción de Hidrógeno	39
3.3.1.1.	Reformado con vapor	40
3.3.1.2.	Oxidación parcial, reformado autotérmico y seco	40
3.3.1.3.	Electrolisis del agua	41
3.3.1.4.	Gasificación y conversión de la biomasa	42
3.3.1.5.	Producción biológica de Hidrógeno	42
3.3.2.	Almacenamiento	43
3.3.3.	Usos del Hidrógeno	43
3.3.4.	Transporte del Hidrógeno	44
3.3.5.	Celdas de combustible	44
3.3.5.1.	Tipos de celdas de combustible	47
4.	HERRAMIENTAS DE CÓMPUTO	50
4.1.	Desarrollo Web	50
4.1.1.	Python	50
4.2.	Optimización del costo de las aplicaciones híbridas	51
4.2.1.	PSO	52
4.2.2.	Librerías en Python que implementan PSO	54
4.3.	API y librerías misceláneas utilizadas	55
4.3.1.	Geopy	56
4.3.2.	Chart.js	56
4.3.3.	API NREL	56
4.3.4.	configparser, requests, json, zipfile, csv	57
5.	IMPLEMENTACIÓN	59
5.1.	Estrategia de dimensionamiento	60
5.1.1.	Menú del sistema	62
5.1.2.	Opciones del dimensionamiento en el sistema Web	63
5.2.	Carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	67
5.2.1.	Costos	69

5.3.	Carga en kWh/día y sistema Eólico-Hidrógeno	70
5.3.1.	Costos	71
5.4.	Carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno	72
5.4.1.	Costos	73
5.5.	Carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	74
5.6.	Carga en kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno	75
5.7.	Carga en kWh/mes y sistema Eólico-Fotovoltaico-Hidrógeno	76
5.8.	Carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	77
5.9.	Carga en kWh y sistema Eólico-Hidrógeno	77
5.10.	Carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno	78
5.10.1.	Costos	78
6.	RESULTADOS	79
6.1.	Resultados para la modalidad de carga en kWh/día	80
6.1.1.	Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	80
6.1.2.	Sistema Eólico-Hidrógeno	82
6.1.3.	Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno	83
6.2.	Resultados para la modalidad de carga en kWh/mes	85
6.2.1.	Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	85
6.2.2.	Sistema Eólico-Hidrógeno	87
6.2.3.	Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno	88
6.3.	Resultados para la modalidad de carga en kWh	90
6.3.1.	Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno	90
6.3.2.	Sistema Eólico-Hidrógeno	92
6.3.3.	Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno	94
6.4.	Conclusiones	96
A.	Anexo I: Código fuente del archivo de configuración	104
B.	Anexo II: Código fuente del programa	107

Índice de figuras

3.1.	Curva de potencia de un generador eólico típico [1]	36
3.2.	Funcionamiento general de una celda de combustible [2].	45
5.1.	Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno [3].	60
5.2.	Entradas y salidas del sistema.	62
5.3.	Menú del sistema.	63
5.4.	Formulario de ubicación del proyecto.	64
5.5.	Formato de la carga a elegir por el usuario.	65
5.6.	Campo para ingresar las cargas.	66
6.1.	Resultados del dimensionamiento para el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno y carga en kWh/día.	81
6.2.	Resultados del dimensionamiento para el sistema Eólico-Hidrógeno y carga en kWh/día.	83
6.3.	Resultados del dimensionamiento para el sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno y carga en kWh/día.	84
6.4.	Comportamiento gráfico del Resultado del dimensionamiento en el tiempo para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.	85
6.5.	Resultados para el caso kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.	86
6.6.	Resultados del dimensionamiento para el caso kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno.	88
6.7.	Resultados para el caso kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.	89
6.8.	Comportamiento gráfico para el resultados en el caso de la carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.	90
6.9.	Resultados para la carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.	91

6.10. Resultados del dimensionamiento incluyendo velocidad del viento y carga.	93
6.11. Total de la energía eólica generada.	94
6.12. Resultados del dimensionamiento para el sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno y carga en kWh.	95
6.13. Energía eólica y solar generada por el número de paneles y aerogeneradores obtenidos.	96

Índice de tablas

6.1. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.	81
6.2. Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh/día.	81
6.3. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Eólico-Hidrógeno.	82
6.4. Eficiencia de los componentes del sistema Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh/día.	82
6.5. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.	83
6.6. Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh/día.	84
6.7. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.	86
6.8. Datos de entrada internos del software para el sistema de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.	86
6.9. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno.	87
6.10. Datos de entrada internos del software para el sistema de carga en kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno.	87
6.11. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.	88
6.12. Datos de entrada internos del software para el sistema de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Hidrógeno.	89
6.13. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.	91
6.14. Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh.	91

6.15. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh y sistema Eólico-Hidrógeno.	92
6.16. Eficiencia de los componentes del sistema Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh.	92
6.17. Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.	95
6.18. Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh.	95

Agradecimientos

Le agradezco a Dios quien es el dador de la vida, el dueño de toda sabiduría y conocimiento. Gracias por la salud, por darme las fuerzas y la sabiduría necesaria para seguir adelante, por siempre guiar mi camino y ser mi luz en todo momento.

A mis padres porque sin su apoyo esto no fuera posible, en especial a mi madre por su apoyo incondicional y los valiosos consejos que siempre me ha brindado.

A mi esposa e hijas por la paciencia, apoyo y el tiempo que me prestaron para dedicárselo a la maestría.

A mis profesores por la paciencia, empeño y dedicación puesto en cada clase, al aclarar cada duda compartiendo sus conocimientos. Muy especialmente a mi director de tesis el Dr. Jaime Silverio Ortegón Aguilar por el apoyo que siempre me brindó, sus enseñanzas, la profesionalidad con que me trató. Así mismo, a mis asesores el Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool con quien adquirí las bases con las que inicié mi trabajo de tesis y por ser el ideólogo de la misma. Al Dr. Javier Vázquez Castillo, Dr. José Hernández

Tesis

Ing. Gabriel Guzmán Quezada

Rodríguez y al Dr. Abimael Rodríguez Sánchez por haber hecho de este un mejor trabajo con sus observaciones y recomendaciones.

A mis siete compañeros de maestría por su amistad y disposición siempre abierta a compartir sus conocimientos de forma solidaria, espero volver a trabajar con ustedes en un futuro y repetir ese ambiente de camaradería.

Resumen

Las personas que necesitan conocer opciones específicas de generación de energía para poder reducir sus costos en materia energética, muchas de ellas no tienen ninguna relación con esta área y no tienen los conocimientos técnicos necesarios para la toma de decisiones. Los investigadores que realizan el dimensionamiento de sistemas híbridos de energía usan herramientas de software propietario o hace los cálculos manualmente.

Existen herramientas informáticas de simulación y dimensionamiento de sistemas energéticos renovables que permiten elegir los elementos que conforman un sistema híbrido de energía eléctrica y determinar la potencia requerida de todas las fuentes y demás componentes necesarios para implementar un sistema óptimo de energía basado en fuentes alternativas de generación eléctrica. La gran mayoría de tales sistemas están enfocados en un tipo de usuario con conocimientos técnicos avanzados del tema eléctrico, por lo que se hace muy difícil al usuario común hacer uso de estas modernas herramientas.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación Web que permite el dimensionamiento de un sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, Eólico-Hidrógeno o Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno. La herramienta fue desarrollada en Python y el framework Django.

La cantidad de elementos que componen los diferentes sistemas de energía se dimensionan mediante la optimización con enjambres de partículas (Particle Swarm Optimization, PSO), el cual es un algoritmo heurístico de optimización que se utiliza para dar solución a problemas de forma iterativa.

El sistema requiere como datos de entrada valores de carga, velocidad del viento e irradiancia, según sea el tipo de sistema a dimensionar, estos se pueden ingresar mediante un archivo en formato de valores separados por coma (Comma Separated Values, CSV) o dando una localidad para que los datos se recuperen desde el National Renewable Energy Laboratory (NREL). El dimensionamiento resultante incluye el número de aerogeneradores y paneles solares; potencia de la celda de combustible, electrolizador e inversor; costo de inversión inicial, y el costo de mantenimiento anualizado durante la vida del proyecto; y el ángulo óptimo para la instalación de los paneles solares, según sea la configuración ingresada. En adición, el software mostrará gráficamente el comportamiento en el tiempo de la energía generada por el total de paneles y aerogeneradores obtenidos, de la carga, la irradiancia y la velocidad del viento.

Los diferentes valores que afectan el dimensionamiento se puede modificar mediante un usuario y una contraseña, esto incluye paneles solares, aerogeneradores, celda de combustible, electrolizador y el inversor. Para esto se utiliza un archivo en formato de notación de objeto de JavaScript (JavaScript Object Notation, JSON) donde se deben realizar los cambios y ser subidos al sistema.

Tesis

Ing. Gabriel Guzmán Quezada

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En los últimos años, la humanidad ha experimentado un aumento desmedido en el consumo de los combustibles fósiles, debido en parte a la industrialización de algunos países que han abierto sus economías al mercado internacional y al avance tecnológico, lo que ha causado una disminución importante de las reservas de dicho recurso.

En el mismo orden de ideas, la disminución en la disponibilidad de los combustibles fósiles, situaciones geopolíticas, sociales y medio ambientales han obligado a buscar de manera urgente soluciones alternativas de generación de energía [4].

Estudios recientes muestran que la energía renovable tiene un gran potencial para satisfacer la demanda mundial de energía y resolver muchos de

los problemas que presenta la energía derivada de combustibles fósiles. La energía renovable destaca por el menor impacto ambiental y la capacidad de producir energía limpia y sostenible. Entre los sistemas de energía renovables más prometedores destacan los sistemas de energía fotovoltaica, eólica y sistemas híbridos Fotovoltaico-Eólico [5].

Recientemente, la tecnología del Hidrógeno ha aparecido para resolver el gran problema de la intermitencia que presentan los sistemas eólicos en ambientes aislados de la red eléctrica ofreciendo la capacidad de almacenamiento de energía cuando existe un excedente y generación eléctrica por medio de electrolizadores [6].

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente, hay numerosas herramientas informáticas de simulación y dimensionamiento de sistemas energéticos renovables los cuales permiten elegir los diferentes elementos que conforman un sistema híbrido de energía eléctrica y con ellos se puede determinar la potencia requerida de todas las fuentes y demás componentes necesarios para implementar un sistema óptimo de energía basado en fuentes alternativas de generación eléctrica.

La gran mayoría de tales sistemas están enfocados en un tipo de usuario con conocimientos técnicos avanzados del tema eléctrico, por lo que se hace muy difícil al usuario común hacer uso de estas modernas herramientas.

Otro de los problemas de este tipo de software es la protección del código fuente por parte de las empresas desarrolladoras, debido a lo cual los usuarios finales no tienen permitido modificar el código, eliminando con ello la posibilidad de que el usuario final pueda hacer adaptaciones o mejoras al software. En adición, está el alto costo que se tiene que pagar para usar estos programas más allá del periodo de prueba, ya sea en forma de licencia o en la compra de versiones más avanzadas y con más funcionalidades del software.

1.3. Justificación

El sistema de energía híbrido, Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno, presenta dos ventajas importantes con respecto a los sistemas energéticos derivados de los combustibles fósiles: la primera ventaja es de carácter económico y la segunda de tipo medioambiental.

El retorno de la inversión de un sistema de este tipo es de aproximadamente 5 años estando conectado a la red eléctrica convencional y después de eso la energía generada es prácticamente gratuita. El tiempo de vida de los sistemas fotovoltaicos ronda los 30 años y de la fuente eólica, su duración depende de las condiciones medioambientales, de la frecuencia y calidad del mantenimiento, no obstante, el período de vida promedio son aproximadamente 15 años. En el aspecto medioambiental, estos sistemas son muy amigables con el medio ambiente, ya que la energía utilizada proviene del viento y del sol, las cuales no necesitan pasar por un proceso de combustión, como sí lo hacen las energías obtenidas de combustibles fósiles.

Por otro lado, los sistemas energéticos con almacenamiento de combustible en forma de Hidrógeno, tienen alta eficiencia de conversión y son una muy buena opción para el almacenamiento de energía por largos periodos, a diferencia de otras formas de almacenamiento como las baterías. Existen tecnologías, como las celdas de combustible, que tienen la capacidad de producir energía a partir del Hidrógeno. Para almacenar este combustible, una de las tecnologías más utilizadas es el empleo de hidruros metálicos que facilitan el transporte del Hidrógeno y minimizan problemas relacionados con la seguridad.

Desarrollar una herramienta informática que permita dimensionar un sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno se considera de gran importancia, debido a que permitirá a cualquier persona o empresa, conociendo la potencia requerida, determinar de forma fácil, rápida y con fundamentos termodinámicos, la cantidad de elementos y la potencia necesaria para suplir las necesidades energéticas demandadas.

Este software servirá de herramienta para que otros puedan conocer el funcionamiento de este tipo de sistemas, y ver el comportamiento de los modelos claves en tiempo real.

1.4. Objetivo general

Desarrollar una herramienta de cómputo con tecnología web para dimensionar la potencia de los componentes de un sistema Fotovoltaico-Eólico con respaldo de energía en forma de Hidrógeno, considerando la programación del balance de energía.

1.4.1. Objetivos específicos

- Analizar los modelos matemáticos de las celdas fotovoltaicas.
- Investigar los modelos matemáticos del electrolizador, las celdas de combustible y medios de almacenamiento.
- Analizar los modelos matemáticos de un sistema Eólico.
- Analizar, diseñar y codificar el sistema web.
- Analizar el método de optimización a implementar en el sistema web.

1.5. Alcance y restricciones

El presente documento contempla el análisis, diseño y codificación de un sistema Web que permita hacer el dimensionamiento de la potencia de los diferentes elementos de un sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno basado en un equilibrio termodinámico que satisfaga de forma completa la potencia demandada por la carga. Se considera que el sistema podrá ser utilizado sin mayor problema por personas no especializadas de hispanoamérica.

Capítulo 2

SISTEMAS DE ENERGÍA HÍBRIDOS

En la actualidad, la actividad económica y tecnológica mundial está basada principalmente en los combustibles fósiles [6]. No obstante, estos combustibles tienen dos problemas principales: el primero es la contaminación medio ambiental y el segundo es que son finitos. El primero de los problemas, tiene que ver con los efectos perjudiciales que producen sus residuos, como el CO_2 , los cuales contribuyen a los gases de efecto invernadero [7]. El segundo problema, se deriva del hecho de que los combustibles fósiles no son renovables, es decir, en algún momento en el futuro se agotarán [8]. En vista de lo anterior, investigadores de diferentes países han desarrollado formas alternativas de generación de energía las cuales buscan minimizar los efectos contaminantes de los combustibles fósiles y disminuir nuestra dependencia de ellos.

Entre las principales fuentes de energías renovables utilizadas en la actualidad se encuentran las siguientes: la energía eólica, solar, hidráulica, biogás, geotérmica y sistemas híbridos [9]. Los sistemas de energías renovables tienen muchas bondades, sin embargo, también tienen algunas desventajas, como por ejemplo, su dependencia de las condiciones meteorológicas y medioambientales. Entre las variables que se ven afectadas por las condiciones meteorológicas se pueden citar: la irradiancia solar, la velocidad del viento y la temperatura, las cuales son factores determinantes en la intermitencia de un sistema de energía alternativo. Esta intermitencia trae como consecuencia que dichos sistemas, al ser utilizados por sí solos, ofrezcan poca confiabilidad e inestabilidad.

Por esta razón, surgen los sistemas híbridos para minimizar estas deficiencias al tener un método de producción alterno. Un sistema de energía híbrido está formado por una o más de una fuente de energía renovable, ninguna, una o más de una fuentes de energía convencional, lo que permite que el sistema en su conjunto actúe de forma ininterrumpida [4, 10].

De igual manera, los sistemas de energías híbridos aislados precisan de una fuente de almacenamiento de energía que pueden ser supercapacitores, baterías electroquímicas, tanques de almacenamiento de Hidrógeno o una combinación de los últimos dos. La combinación de más de una fuente de energía ofrece más confiabilidad y estabilidad que una sola, debido a que cuando hay una disminución en uno de los generadores por una variación, ya sea, la radiación solar o la velocidad del viento, el otro generador equilibra la

producción. La tendencia actual es que los sistemas híbridos estén formados por sistemas de energías renovables, ya que estos requieren menos mantenimiento; los costos han disminuido en los últimos tiempos; tienen un periodo de vida mayor que los sistemas no renovables; y son amigables con el medio ambiente.

2.1. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Batería

Numerosos trabajos de investigación sobre sistemas híbridos se han propuesto y desarrollado, por ejemplo, Manuel Castañeda et al. [11] presentan un método de dimensionamiento utilizando Simulink Design Optimization (SDO) de MATLAB y varias estrategias de control para minimizar los costos y optimizar los diferentes componentes de un sistema híbrido aislado compuesto de baterías, sistema fotovoltaico y celdas de combustible.

Las estrategias de control están dirigidas a satisfacer la demanda de la carga, mantener cierto nivel de hidrógeno en los tanques y extender la vida del banco de baterías en el estado de carga. Los autores hacen una comparativa sustituyendo la celda de combustible por un banco de baterías y determinan, después de hacer un análisis económico, que este último es mucho más barato. No obstante, se logró la mejor eficiencia general del sistema cuando se utilizó la celda de combustible, pero no se consideró viable económicamente por los altos costos.

Por otro lado, Lorenzo Bartolucci et al. [7] hacen un análisis profundo de

un sistema híbrido (Fotovoltaico-Hidrógeno-Baterías) utilizando un modelo numérico para una microred. Ellos dimensionan el sistema, incluyendo su análisis económico, para un conjunto habitacional de 75 casas, o un área industrial. Los autores concluyen que son dos los puntos más importantes que deben ser tomados en cuenta a la hora de diseñar estos sistemas energéticos: el primero es el perfil de carga y el otro es el correcto dimensionamiento del sistema fotovoltaico. Se debe considerar aplicar alguna estrategia que permita optimizar y obtener el número justo y la potencia necesaria de los paneles.

Un dimensionamiento óptimo del sistema fotovoltaico permite una menor utilización del banco de baterías o requeriría baterías de menor capacidad y por lo tanto reduce la dependencia de éstas. En el estudio, se concluye que implementar una microred de estas características sería beneficioso no solo para los consumidores, sino también para los proveedores. Así mismo, la utilización de celdas de combustible contribuye de forma importante a la independencia del sistema, ya que si éstas son de la suficiente capacidad, los consumidores verían satisfechas sus necesidades energéticas, aunque económicamente no es viable a corto o mediano plazo.

2.2. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno - Batería

Por otro lado, Akbar Maleki y Alireza Askarzadeh [12] hacen un estudio comparativo entre un sistema híbrido formado por un sistema Fotovoltaico-Eólico con almacenamiento en Hidrógeno y otro con un sistema de alma-

cenamiento de baterías. En su trabajo, analizaron cada sistema utilizando técnicas heurísticas para optimizar el número de componentes; llegaron a la conclusión que el sistema Fotovoltaico-Eólico-Baterías, económicamente, era mucho más viable que el sistema con celdas de combustible. Utilizaron varios métodos heurísticos, pero Particle Swarm Optimization(PSO) fue el método que arrojó los mejores resultados en términos del total de costos anuales.

Utilizando un enfoque parecido, Jérémy Lagorse et al. [13] proponen tres configuraciones de sistemas híbridos: Hidrógeno-Batería-Fotovoltaico, Hidrógeno-Fotovoltaico y el último una combinación de los primeros dos Fotovoltaico-Batería-Hidrógeno. Después de modelar las tres configuraciones, aplicar un método de optimización y hacer un análisis económico a los modelos utilizando un enfoque analítico desarrollado por ellos, concluyeron que la configuración donde sólo se utiliza la celda de combustible(FC) no es viable en términos inmediatos desde el punto de vista económico, tal vez, pueden serlo en un futuro cercano cuando bajen de precio. Sin embargo, las dos configuraciones restantes son factibles económicamente.

Utilizando una configuración parecida M.Y. Ayad et al. [14] aplican un método de control a un sistema híbrido Hidrógeno-Fotovoltaico-Batería en el cual controlan el voltaje de corriente directa(CD) que fluye a través del medio físico. Este método de control tiene la capacidad de ir reduciendo el error entre la producción de potencia y la carga hasta llegar a un punto de balance. Los resultados experimentales muestran que el método de control basado en la teoría de la “flatness” aplicado al sistema Hidrógeno-Fotovoltaico-Batería,

es capaz de administrar de forma satisfactoria para diferentes cargas el flujo de energía. En esta configuración, el sistema fotovoltaico se utilizó como la principal fuente de energía y el sistema de celda de combustible como un respaldo, la técnica de control aplicada permitió aumentar la estabilidad general del sistema.

Un modelo técnico económico interesante sobre un sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Eólico-Batería es el presentado por Abla Khiareddine et al. [15]. Debido a que las condiciones meteorológicas son sumamente variables, aleatorias e imprevisibles optan por desarrollar un modelo que les permite dimensional, de forma óptima, cada uno de los diferentes elementos que componen el sistema híbrido. Dicho sistema está pensado para suplir la carga, la cual consiste de un motor de inducción acoplado a una bomba centrífuga ubicada en Túnez. En este trabajo, se buscan dos objetivos principales: el primero es el diseño óptimo del costo y el segundo el enfoque de la administración eficiente de la energía. En cuanto al uso de la generación eólica, se incluye con la finalidad de reducir los costos totales del sistema ya que un sistema eólico es mucho más barato que uno fotovoltaico, el hidrógeno es utilizado debido a que su uso impacta de forma positiva alargando la vida del banco de baterías. El modelo del sistema desarrollado puede ser utilizado para dimensionar los diferentes componentes de un sistema híbrido compuesto de paneles, generadores eólicos, celdas de combustible y banco de batería ubicados en cualquier parte del planeta.

2.3. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

Otro tipo de sistema híbrido Fotovoltaico-Hidrógeno ha sido explorado por Romeli Barbosa et al. [16] para proveer energía a un sistema de comunicaciones móviles que funciona en configuración de una red de malla ad-hoc en un hipotético caso de huracanes. El dimensionamiento se hizo utilizando un enfoque analítico, aplicando estrategias que permitieran evitar el sobredimensionamiento de cada uno de los componentes del sistema híbrido y haciendo un balance energético entre la potencia generada por las diferentes fuentes y las cargas. Los resultados mostraron que el sistema puede operar durante dos huracanes con una eficiencia de más del 79 %, lo cual asegura que el suministro de energía es adecuado para la carga.

Por otro lado, A. Yunez-Cano et al. [17] desarrollaron un sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, el cual utiliza datos de irradiancia reales obtenidos en una estación meteorológica ubicados en Quintana Roo, México. El sistema es alimentado por un conjunto de paneles solares donde el excedente de energía es utilizada para producir hidrógeno, el cual es almacenado en tanques de hidruros metálicos para cuando haya una disminución de la energía generada por los paneles. Este hidrógeno pueda ser utilizado como combustible mediante un electrolizador para generar energía eléctrica y mantener el suministro de energía a la carga. En el sistema híbrido propuesto, los autores utilizan celdas de combustible que trabajan con hidrógeno, en vez de baterías, debido a que pueden almacenar energía por periodos muchos más largos de tiempo que las baterías de plomo-ácido. Aunado a ello, requiere menos mantenimiento y el sistema es más liviano, ya que el peso y el volumen de las celdas de

combustible es mucho menor en comparación con las baterías. La eficiencia teórica del sistema fue calculada haciendo un balance termodinámico entre la energía producida y la energía consumida.

Siguiendo con la misma temática Romeli Barbosa et al. [18] ha propuesto la misma configuración de sistema híbrido Fotovoltaico-Hidrógeno para una plataforma aérea de gran altitud que ofrecen servicios de retransmisión para redes de comunicaciones inalámbricas. El consumo de energía del avión se determinó con base en el peso de la aeronave en un estado estático en el aire. La eficacia del sistema se calculó en intervalos de una hora durante un año por medio de un balance energético. Los autores concluyeron que el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno no siempre cumple con la máxima eficiencia del sistema energético, sin embargo, la eficiencia nominal tiende a aumentar en la medida que aumenta la potencia de la pila, de igual manera, la eficiencia podría mejorar si se incorporan otros subsistemas de generación.

Continuando con los sistemas Fotovoltaicos-Hidrógeno, C. Darras et al. [19] desarrollaron una completa herramienta de dimensionamiento con métodos numéricos utilizando MATLAB al cual llamaron ORIENTE. El software desarrollado permite visualizar de forma clara el comportamiento del intercambio energético entre los diferentes subsistemas del sistema híbrido. Además, permite obtener el número óptimo de potencia de cada uno de los elementos que componen el sistema. Por otro lado, los resultados muestran que si el tanque de hidrógeno no está bien dimensionado, se podría desperdiciar energía. En cuanto a la electrónica de potencia utilizada, los resultados

muestran que se inducen pequeñas pérdidas comparado con el hidrógeno. Los autores proponen realizar un estudio posterior donde se haga el análisis económico de este sistema y donde se pueda comparar este sistema híbrido con otro donde se sustituyan las celdas de combustible por un banco de baterías.

2.4. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Eólico

I. Tégni et al. [20] proponen la utilización de un sistema formado únicamente por las dos formas de energías renovables más importantes en la actualidad: sistemas Fotovoltaicos-Eólicos, con la finalidad de minimizar la intermitencia que presentan los sistemas fotovoltaicos. En este estudio, se desarrolló una metodología donde la estrategia se basó en el método de control “differential flatness” con el objeto de determinar el número óptimo de componentes que aseguren un ciclo de vida de 20 años o más y que el costo del sistema sea el menor posible. Además, se busca suplir de forma completa la demanda de la carga. La metodología de optimización de costos utilizó un algoritmo genético multiobjetivo, cuyo fin es encontrar el equilibrio entre la potencia requerida de los diferentes componentes y los mínimos costos totales. Los autores de este estudio usan la programación dinámica y las técnicas de gradiente para la optimización, debido a que tienen la capacidad de alcanzar el nivel global óptimo con relativa simplicidad computacional.

Muy relacionado con el enfoque anterior Weiping Zhang et al. [21] desarrollan un algoritmo para la optimización de este tipo de sistemas híbridos,

el cual permite obtener el número óptimo de elementos que conforman el sistema. Para ello, se basan en la utilización de los tres algoritmos siguientes: búsqueda caótica (CH), búsqueda de armonía (HS) y simulado recocido (SA). Con la finalidad de mejorar la precisión del algoritmo de dimensionamiento, utilizaron la predicción del clima en conjunto con una red neuronal para la radiación solar, la temperatura del ambiente y la predicción de la velocidad del viento. Este nuevo método llamado: Annealing-Artificial Neural Network (ANN, por sus siglas en inglés) fue probado en la ciudad de Khorasan, Irán. La confiabilidad del sistema fue probada utilizando probabilidad de suministro de pérdida de potencia (LPSP) de 2% y los resultados del nuevo método (CH-HS-SA-ANN) mostraron que fueron los mejores. Finalmente, el algoritmo desarrollado puede ser utilizado con sistemas donde el valor del LPSP esté entre el 0 y el 5%.

2.5. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Batería

R. Nagaraj et al. [10] desarrollan un análisis técnico-económico de un sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico con almacenamiento en baterías para una pequeña planta desalinizadora. Toda la simulación del sistema es llevada a cabo utilizando HOMER [5, 22]. Los resultados de la simulación del sistema estuvieron enfocados en varios indicadores, entre ellos, la potencia producida en un año, costo de la energía por unidad y la disponibilidad de la energía para una carga específica durante un año. Los autores concluyeron que después de cierto punto, la adición de paneles solares o turbinas eólicas no incidía en la disminución del costo del sistema. No obstante, cuando la velocidad del

viento y la radiación solar se complementaban, se suplían los requerimientos de carga y el costo de la energía era mínimo.

El enfoque principal de este trabajo no fue el de dimensionar de forma óptima cada uno de los componentes del sistema, sino analizar el comportamiento o rendimiento del sistema con respecto a la potencia total producida, costo por unidad y disponibilidad de la potencia para una carga particular.

2.6. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Diésel

Hay otros autores que incluyen, aparte de los habituales componentes de un sistema híbrido, un generador diésel. Tal es el caso de B. Ould. Bilal et al. [23] quienes diseñan un sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico-Generador diésel-batería minimizando los costos, las emisiones de CO_2 para lo cual utilizan un algoritmo genético multiobjetivo. Las variables de entrada de este sistema fueron la radiación solar, la temperatura y la velocidad del viento colectadas en Senegal. Con el análisis hecho, se pudo obtener el número óptimo de componentes, el costo de la energía y las emisiones de CO_2 de cada solución. En el estudio se concluyó que al aumentar el costo nivelado de la energía, disminuían las emisiones de CO_2 . El generador diésel tiene una influencia en la óptima configuración del sistema, pero se debe tomar en cuenta el tipo de generador y el costo del mismo, ya que si se elige el inadecuado, podría aumentar drásticamente las emisiones de CO_2 y el costo general del sistema híbrido.

De igual manera, José L. et al. [24] desarrollan una metodología para el diseño y optimización de un sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico-Generador diésel utilizando, primero un banco de baterías y luego celdas de combustible para el almacenamiento. Para la simulación del sistema, los autores utilizaron HOMER [5, 22], una herramienta bien conocida entre los investigadores del área.

2.7. Sistema Fotovoltaico-Diésel-Batería

Mehdi Mehrpooya et al. [25] hacen un análisis de cuatro diferentes combinaciones de sistemas para suplir la demanda de una carga real, en la Universidad de Teherán en Irán. Los cuatro sistemas analizados fueron: sistema de generador diésel(sistema actual), Fotovoltaico-Diésel-Batería, Fotovoltaico-Batería, Fotovoltaico-Celda de combustible(FC). Debido a los precios del diésel en Irán, la combinación más viable económicamente fue Fotovoltaico-Generador diésel-Batería, el cual, además ofrece un alto nivel de confiabilidad. Al utilizar celdas de combustible el costo es muy alto, no obstante, una vez instalado el sistema con almacenamiento de hidrógeno el costo de producción de energía con hidrógeno es cercano al costo de producción utilizando generadores diésel. A este sistema le hicieron un análisis económico para obtener el número óptimo de componentes, que permita satisfacer la carga, con el menor costo económico. Para el análisis de simulación utilizaron HOMER [5, 22]. Los investigadores concluyen, con base en los resultados, que sustituir el generador diésel por un banco de baterías, permite obtener un aumento en la capacidad y cantidad de paneles instalados.

2.8. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Biomasa-Batería

Algunos investigadores agregan un elemento más al sistema híbrido como es el caso de la biomasa, tal es el caso de Yashwant Sawle et al. [26], quienes presentan como caso de estudio, en una región remota de la India, un sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico-Biomasa. En el sistema utilizan AG (Algoritmos genéticos) y PSO (Optimización de Enjambre de Partículas) para optimizar el sistema obteniendo el costo mínimo de la energía del sistema. Los resultados obtenidos muestran que con PSO se obtuvieron los mejores resultados, es decir, menores costos. De igual manera, los resultados obtenidos muestran que con PSO el ciclo de carga-descarga fue más eficiente.

2.9. Modelado de un sistema fotovoltaico

Debido a la importancia que tiene la energía fotovoltaica en los sistemas híbridos hemos querido hacer mención de algunos trabajos importantes sobre el modelado de celdas fotovoltaicas basados en el modelo de dos diodos [27]. En su artículo Kashif Ishaque et al. [28] proponen el uso de dos diodos en el modelado de la celda con una mejora en el número de variables del modelo, el cual, en vez de las 6 o más variables que utilizan otros autores, es reducido a solo cuatro variables. De igual, manera proponen la utilización de un simple método iterativo para calcular los valores de las resistencias serie y paralelo. Los resultados obtenidos en sus simulaciones los comparó con seis paneles solares de diferentes tipos y fabricantes, entre los paneles comerciales

utilizados están: monocristalinos, policristalinos y de película delgada.

Los resultados obtenidos con las comparaciones mostraron que los resultados del modelo de dos diodos fueron superiores en todos los seis paneles comerciales comparados, cuando estos fueron expuestos a variaciones de radiación y temperatura. En adición, Kashif Ishaque et al. [29] proponen el modelo mejorado, propuesto por ellos en [28] para el modelado y simulación de un sistema fotovoltaico durante un sombreado parcial. Este modelo tiene una mejor precisión en niveles de irradiancia bajos comparado, por ejemplo, con el modelo de un solo diodo. Por lo tanto, este modelo permite una predicción más exacta del rendimiento del sistema fotovoltaico.

Por otro lado Alejandro Castillo Atoche et al. [30] en su artículo diseñan un emulador de un sistema fotovoltaico en tiempo real, utilizando un sistema embebido en un entorno definido por el usuario. El sistema fotovoltaico desarrollado está basado en el modelo de dos diodos [27] previamente mencionado. El sistema es de bajo costo, portátil y asequible y es muy preciso ya que está basado en el modelo de doble diodo.

2.10. Criterios y estrategias en el dimensionamiento y diseño de sistemas híbridos

Existen básicamente dos tipos de sistemas de energía: los que son conectados a la red y los que son autónomos. Los sistemas autónomos mayormente son utilizados en lugares aislados o remotos donde la red eléctrica no tiene

presencia. Mientras que los sistemas interconectados a la red suelen estar en los lugares con fácil acceso a la red y por lo general no tienen sistemas de almacenamiento de energía locales, sino que utilizan la misma red como una forma de almacenamiento ya que si hay excedente de producción esta es vendida a la red eléctrica, en caso contrario, el déficit es suplido por la misma red eléctrica.

En todo sistema híbrido autónomo es necesario contar con un equilibrio entre las capacidades instaladas para suplir la demanda de la carga y el costo de instalación y de mantenimiento del sistema de energía. Se busca que la potencia instalada no esté sobre dimensionada, porque esto impacta directamente en el costo de instalación del sistema, pero que de ninguna manera, la potencia instalada no sea suficiente para suplir la demanda de la carga en todo momento, ya que esto vuelve al sistema inestable e ineficaz y por tanto no cumpliría con el objetivo principal del mismo, que es ofrecer energía eléctrica de forma ininterrumpida. Por lo tanto, se hace necesario aplicar algún método de optimización, algún algoritmo o alguna estrategia que permita mantener el equilibrio entre costos y estabilidad del sistema. No obstante, debido a que en un sistema híbrido intervienen diferentes fuentes de energía y se utilizan diferentes medios de almacenamiento, lograr una perfecta coexistencia entre los diferentes elementos no siempre es tarea fácil.

Existe otra clasificación de los sistemas de energía, la cual es en función del arreglo interno de cada uno de sus componentes. De acuerdo al arreglo interno de los diferentes componentes estos pueden estar acomodados en for-

ma de Bus CD, Bus AC o Híbrido. Esta clasificación es importante debido a que la estrategia a desarrollar para dimensionar el sistema debe tomarla en cuenta. los criterios técnicos y económicos.

F.J. Vivas et al. [6] hacen un recuento de los principales criterios, estrategias y técnicas de administración energéticas utilizadas en los sistemas híbridos con sistemas de almacenamiento de Hidrógeno. En él, encontramos que el sistema híbrido Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno es el más común y en un sistema de este tipo, lo más recomendable es hacer el diseño considerando el sistema fotovoltaico como fuente primaria de generación. Algo que hay que tomar en cuenta a la hora de dimensionar o diseñar estos sistemas son los criterios técnicos-económicos. Los criterios técnicos son aquellos que se refieren al buen funcionamiento de los equipos para aumentar su rendimiento y alargar su vida útil. Aquí se debe considerar el impacto que tendrá el porcentaje de utilización de un equipo u otro sobre los demás.

Cada componente se debe elegir de acuerdo al tipo de aplicación donde será empleado y de acuerdo a la carga que será suplida. Los criterios económicos son aquellos que se enfocan en las decisiones económicas que permitan hacer que los costos del sistema sean viables y económicamente competitivos con los sistemas tradicionales.

Estrategias de administración energética, es otro punto importante que debe ser tomado en cuenta y el objetivo de la misma puede ser, solamente, asegurar la demanda; mantener un balance energético; minimizar costos y di-

mensionamiento; estabilidad de voltaje; minimizar costos y alargar el tiempo de vida y las combinaciones deseadas, entre otros.

En el mismo orden de ideas, Samer Alsadi y Tamer Khatib [5] hacen una revisión de criterios, restricciones y herramientas de software para optimizar sistemas fotovoltaicos y su respectivo sistema de almacenamiento. En el mismo proponen el modelo de doble diodo para simular el modelo de un panel fotovoltaico y hace especial énfasis en los factores que afectan la obtención de la radiación solar total, entre los que destaca las condiciones meteorológicas, el ángulo de inclinación de los paneles y la sombra. Para el almacenamiento, las tres principales opciones que hay son: baterías, celdas de combustible y supercapacitores, utilizaron baterías de plomo-ácido debido al costo, la confiabilidad y el tiempo de servicio que ofrecen.

Cuando se está dimensionando cualquier sistema energético sea autónomo o híbrido es importante contar con una herramienta de software que permita predecir el rendimiento en una ubicación determinada, además, comprobar en una etapa temprana del diseño, si el tamaño del sistema que se está proponiendo es el adecuado para satisfacer la demanda. Es por esta razón que se ha desarrollado una variedad de software, herramientas de diseño y simuladores que facilitan estas tareas.

Los autores, clasifican los principales software en 4 categorías principales, las cuales son: Software de simulación, de evaluación económica, de análisis y planificación y finalmente, software de mapas de radiación. La mayoría de

los programas antes mencionados tienen la capacidad de trabajar tanto con sistemas fotovoltaicos como con sistemas híbridos.

A continuación una breve descripción de cada uno de las categorías:

Software de simulación, son programas informáticos que tienen la capacidad de predecir la potencia de salida y el comportamiento de un diseño hecho por el usuario. Para hacer tales predicciones, estos sistemas tienen incorporados algoritmos especializados y extensas base de datos meteorológicas de diferentes lugares. Un software con esta funcionalidad es Integrated Simulation Environment Language (INSEL) [5] el cual fue desarrollado en Alemania. Este programa informático puede crear modelos de sistemas y establecer configuraciones para planificación y monitoreo de sistemas eléctricos y térmicos; también, se puede simular el tiempo, series de irradiancia solar, sistemas de energía fotovoltaicos, sistemas de enfriamiento y calefacción solar.

Software de evaluación económica, son aquellos que proporcionan un análisis económico para el sistema propuesto por el usuario y determinar la factibilidad o no del mismo. Para ello, el usuario debe poder ingresar todos los parámetros, costos y luego ejecutar el sistema. Este análisis es necesario debido a que con estos resultados se puede optimizar el sistema de energía. Un ejemplo de esta categoría de software es CalSol [5], el cual permite hacer análisis económicos de sistemas aislados o interconectados a la red, la problemática de esta herramienta es que la base de datos meteorológica con que cuenta solo contiene datos de Francia.

Uno de los software de modelado y evaluación más conocidos es Hybrid Optimization Model for Electrical Renewable (HOMER) [5, 22], el cual es un software que fue desarrollado por National Renewable Energy Laboratory (NREL) en EEUU. HOMER es capaz de analizar y diseñar sistemas de energía híbrida, incluyendo generadores convencionales, cogeneración, turbinas eólicas, sistemas fotovoltaicos, energía hidroeléctrica, baterías, pilas de combustible, biomasa y otros. Este software puede proporcionar diferentes opciones de tecnología y optimización de acuerdo al costo y a la cantidad de energía requerida y tiene la particularidad que puede simular un sistema durante todo un año, es decir, 8760 horas, y presentar los resultados en tablas y gráficos.

Software de análisis y planificación, son programas de cómputo adecuados para ayudar a los usuarios a planificar, diseñar, dimensionar, optimizar las fuentes y la definición completa del sistema de energía. Algunos de ellos tienen bases de datos de componentes comerciales tales como paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, entre otros. En Estados Unidos, uno de los software más utilizados es PVSyst [5]. Este software puede dimensionar, diseñar, simular y analizar tanto sistemas autónomos, como sistemas conectados a la red.

Otro ejemplo importante de esta clasificación es improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithm (iHOGA) [5], un software de optimización para sistemas híbridos. iHoga permite hallar el número óptimo de componentes de un sistema propuesto. Este software está desarrollado en C++ y permi-

te analizar sistemas fotovoltaicos, turbinas hidroeléctricas, turbinas eólicas, celdas de combustible, tanques de Hidrógeno, electrolizadores, sistemas de almacenamiento, y combustibles fósiles, todo esto para sistemas interconectados a la red y para sistemas aislados o autónomos.

Software de mapa de radiación: programas que están diseñados para ofrecer una aproximación de la cantidad de radiación solar en un área determinada. Estos son herramientas muy útiles ya que, de un vistazo, permiten a los usuarios ver el recurso solar en cualquier punto del planeta. Dos de los principales software que se pueden consular online son PVGIS y SolarGIS [5].

Capítulo 3

FUENTES DE ENERGÍA

El proyecto a desarrollar consiste en el diseño y desarrollo de un software web que permita el dimensionamiento de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica. Dicho dimensionamiento estará fundamentado en un balance termodinámico de la energía. El diseño de la herramienta tiene como objetivo principal brindar a cualquier usuario, sea este experto en el tema o no, la posibilidad de opciones energéticas de aplicaciones específicas.

En este capítulo se hará un recorrido por las diferentes tecnologías involucradas y relacionadas con el desarrollo del proyecto. Se iniciará con la energía fotovoltaica, luego seguirá la eólica y el Hidrógeno como portador energético. Además, se estudiarán las diferentes aplicaciones de carácter energético del Hidrógeno y se analizarán los diferentes modelos matemáticos y enfoques necesarios al modelar dichos sistemas.

3.1. Energía fotovoltaica

La energía solar se transmite principalmente a la Tierra por ondas electromagnéticas, que también pueden ser representadas por partículas llamadas fotones. La tierra funciona como un gran colector de energía solar. La energía solar se manifiesta de diversas formas como por ejemplo, la luz solar y masas de aire caliente las cuales producen viento [8].

Existen diversas formas de aprovechar la energía solar, no obstante, de todas ellas, la fotovoltaica es la única que se convierte directamente en electricidad, sin requerir ningún otro elemento intermediario. En la actualidad es una tecnología ya probada y con muy poco riesgo tecnológico.

Para aprovechar la energía proveniente del sol se utilizan las celdas solares. Una celda solar es un dispositivo electrónico construido por una unión p-n que convierte la energía de la radiación solar, directamente, en energía eléctrica.

Para que se produzca esta conversión, la energía contenida en los fotones que inciden en la celda debe ser mayor o igual que la banda prohibida del semiconductor. Al incidir la luz solar sobre la celda y ser esta mayor que la energía requerida para traspasar la zona prohibida, se produce un voltaje entre las terminales de la celda y al mismo tiempo un flujo de corriente eléctrica en un circuito externo que puede ser utilizado para alimentar cualquier dispositivo electrónico o eléctrico. Es importante señalar que la aparición de este voltaje se debe a un fenómeno llamado efecto fotovoltaico [31].

Los factores más importantes que caracterizan toda celda fotovoltaica son la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje a circuito abierto (V_{oc}), el factor de llenado o de forma FF y la eficiencia η . La corriente de corto circuito es la corriente que cruza la celda solar cuando el voltaje entre sus terminales es cero, en este caso, la celda está en cortocircuito. La corriente de cortocircuito es directamente proporcional a la intensidad de la incidencia de los rayos de luz sobre la superficie de la celda solar.

Tanto la corriente de corto circuito como el voltaje de circuito abierto son los valores máximos de corriente y de voltaje que se pueden extraer de una celda solar. Sin embargo, en este punto la potencia es $p = 0$. Donde,

$$p = v \cdot i \quad (3.1)$$

Debido a lo anterior, es preciso determinar el valor máximo de la curva $v \cdot i$ y utilizar el valor en ese punto (I_{mp}, V_{mp}) para determinar el factor de llenado, el cual se calcula con la siguiente manera

$$FF = I_{mp} \cdot V_{mp} / I_{sc} \cdot V_{oc} \quad (3.2)$$

La eficiencia de la conversión de la energía solar en eléctrica se define como la razón de la potencia eléctrica máxima que suministra la celda entre la potencia de la radiación solar que incide sobre la misma celda. Matemáti-

camente se calcula de la forma siguiente

$$\eta = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{P} = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{P} \cdot FF \quad (3.3)$$

Como se puede observar en la ecuación 3.3 la eficiencia depende de muchos factores, como por ejemplo, la radiación solar, la temperatura a la que está sometida la celda y en términos generales, de todos los factores de que depende la ecuación anterior.

3.1.1. Tipos de celdas solares

Algo muy importante a destacar, en este punto, es que en términos generales un sólido presenta tres formas microscópicas en su estructura: el sólido monocristalino, el policristalino y el sólido amorfo.

El sólido monocristalino tiene un arreglo periódico de sus átomos formando una estructura definida. Este tipo de material, en consecuencia, tiene un potencial también periódico llamado potencial cristalino.

Por su parte, el policristalino, está formado por regiones donde existen cluster o granos policristalinos separados por las fronteras entre granos. Lo que diferencia un sólido policristalino de uno monocristalino es la disminución de la movilidad de los portadores de carga lo cual se traduce en una disminución de la conductividad eléctrica del sólido policristalino y por tanto una menor eficiencia de los policristalinos con respecto monocristalinos [31]. En cuanto al sólido amorfo, el arreglo de potencial es aleatorio, por lo

cual, el potencial también lo es.

Buscando mejoras en la eficiencia de las celdas fotovoltaicas se han estudiado diferentes materiales semiconductores para su construcción. A continuación se describen los más importantes.

3.1.1.1. Celdas solares de Silicio

El silicio es el elemento más utilizado en la fabricación de celdas solares y la eficiencia de las celdas monocristalino de este material, en su valor más alto obtenido, ronda el 22% [31]. Las limitaciones más importantes a la hora de construir estas celdas son la reflexión superficial, la colección de portadores, la recombinación de los mismos y las pérdidas por resistencias parásitas.

3.1.1.2. Celdas solares de película delgada

Celdas solares de películas delgadas son celdas donde el diámetro de la película varía desde unos pocos nanómetros (nm) hasta decenas de micrómetros (μm).

Además del silicio, existen otros materiales utilizados para la fabricación de celdas fotovoltaicas. Entre ellas, el Telurio de Cadmio (CdTe), el cual se combina con el sulfuro de cadmio (CdS) para aumentar la corriente de corto circuito. Otro material importante en la fabricación es el diseleniuro de cobre indio (CuInSe_2), el cual es utilizado por su alta eficiencia fotovoltaica. Se combina con el Galio (Ga) para obtener un compuesto semiconductor con un valor de banda prohibida mayor para obtener una mejor absorción de la

radiación solar. Las mayores eficiencias alcanzadas con este tipo de celdas son el 16.5% para el CdTe y de 19.2% para el CuInGaSe_2 .

3.1.1.3. Módulos fotovoltaicos

Un módulo fotovoltaico es un arreglo de celdas solares individuales interconectadas eléctricamente entre sí, lo que permite sumar la potencia de salida de todas las celdas solares. Las celdas son protegidas de las condiciones climáticas para no causar accidentes a las personas. Un conjunto de módulos conectados entre sí forman un panel, el cual por lo general consta de 36, 60 u otra cantidad de celdas solares. El conjunto de paneles constituye un sistema fotovoltaico. Mientras que el voltaje del módulo depende de la cantidad de celdas, la intensidad de corriente, por lo general, depende del tamaño de las celdas. Esto con una temperatura de $25\text{ }^\circ\text{C}$, una intensidad de insolación de $1000\text{W}/\text{m}^2$ y condiciones óptimas de inclinación del módulo. La densidad de corriente de una celda comercial es entre 20 o 30 mA/cm^2 .

Las celdas solares de silicio policristalinos son por lo general de 100cm^2 dando una corriente total del módulo de entre 2 y 4 Amperios. Los efectos más importantes que inciden en la eficiencia de los módulos fotovoltaicos son: pérdidas debido a la interconexión de las celdas solares con características distintas, temperatura del módulo y los modos de fallas del módulo. La vida útil de los módulos ronda los 25 o 30 años. La potencia producida por un panel fotovoltaico se puede obtener utilizando la siguiente ecuación:

$$E_{PV}(t) = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot G_i(t) \quad (3.4)$$

Donde, A_{PV} es el área total del panel, η_{PV} es la eficiencia de conversión y G_i es la radiación instantánea incidente sobre la superficie de dicho panel. Usando esta ecuación se puede calcular la energía producida en cualquier instante de tiempo.

La irradiancia solar G_i incidente sobre la superficie del panel se puede obtener mediante la siguiente expresión matemática

$$G_i = G_{sc}[1 + 0.033 \cos(360N/365)][\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h] \quad (3.5)$$

G_{sc} es la constante solar cuyo valor es $1366.1 \frac{W}{m^2}$, N es el día del año, L es la latitud del lugar y h es la hora solar. δ es la declinación solar, la cual es la distancia angular desde los rayos del sol, norte o sur hasta el ecuador. La declinación norte es considerada como positiva y puede ser calculada para cualquier día del año con la siguiente ecuación:

$$\delta = 23.45 \sin[360/365(284 + N)] \quad (3.6)$$

3.2. Energía Eólica

El viento es una manifestación solar indirecta, puesto, que es generado por las masas de aire que se desplazan entre zonas de alta presión atmosférica hacia regiones adyacentes de baja presión con velocidades proporcionales al gradiente de presión. Estos gradientes son generados debido al calentamiento no uniforme de la superficie del planeta por el sol, combinado con el movimiento de rotación del planeta [31, 32, 8]. Debido a su origen, el viento

presenta una gran intermitencia y variabilidad tanto en dirección, intensidad, y lugar. No obstante, se han desarrollado formas para utilizar la energía cinética del mismo y convertirla en energía eléctrica. El dispositivo ideal para este fin es el aerogenerador.

3.2.1. Aerogenerador

Un aerogenerador es un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica [33, 34]. El aerogenerador está formado por varios componentes, no obstante, tres son los principales para la conversión de la energía: el rotor o sistema de captación del viento, la caja de engranajes o multiplicadora y el generador eléctrico. El rotor es el sistema principal de un aerogenerador, está formado un un cierto número de palas o hélices y su función es transformar la energía cinética en energía mecánica. Esta energía mecánica, luego es utilizada para alimentar un generador eléctrico y así producir energía eléctrica. La función de los engranajes es multiplicar las revoluciones por minutos del eje “lento” el cual gira a la misma velocidad que las palas, entre 7 y 12 revoluciones por minuto (RPM).

El aerogenerador se clasifica en función de la orientación de las palas y puede ser de eje vertical o de eje horizontal. En la actualidad, los más utilizados y eficientes para aplicaciones de alta demanda energética son los de eje horizontal [33].

3.2.1.1. Rotores de eje horizontal

Este tipo de rotores tienen la disposición de su eje horizontal y se caracterizan por girar las palas en dirección perpendicular a la velocidad del viento. Hay una gran variedad de rotores de eje vertical entre ellos: los monopala, bipala, tripala, multipala, multipala americano, rotor a vela, multirotor, rotor a barlovento, rotor a sotavento, entre otros.

3.2.1.2. Rotores de eje vertical

En los rotores de eje vertical las palas rotan en torno a un eje central vertical, debido a esto, la velocidad de rotación es mucho menor a los de eje horizontal lo que se traduce en una menor generación eléctrica. Hay varios tipos de estos rotores, donde los más representativos son: los tipo persa, Savonius bipala, Savonius cuatripala, Darrieus-Savonius, Darrieus, Giromill, entre otros.

Las características principales deseadas en todo rotor son:

- Velocidad típica de giro. Es la relación entre la velocidad de las puntas de las palas y la velocidad del viento.

$$\lambda = \frac{\mu}{\nu} \quad (3.7)$$

donde μ es la velocidad de las puntas de las palas y ν es la velocidad del viento. Del valor de lambda surge la clasificación de los rotores en lentos y rápidos. Valores próximos a 1 son considerados lentos, en adición, un valor entre 4 y 14 es considerado rápido.

- Rendimiento aerodinámico. También llamado coeficiente de potencia, se refiere al porcentaje de energía del viento que es convertida en energía mecánica. Los valores típicos oscilan entre el 20 % y el 40 % dependiendo de geometría de las palas.
- Longitud. Corresponde a la longitud de las palas.
- Perfil. Este se refiere a la forma del borde de ataque de la pala contra el viento.
- Calaje o ángulo de ataque. Ángulo que forma la pala contra el viento.
- Anchura. Corresponde al ancho de las palas.
- Tipo de material de fabricación. Este debe ser resistente, liviano y barato.

Otro elemento importante en los aerogeneradores es el sistema de regulación, el cual tiene la función principal de controlar la velocidad de rotación y así evitar fluctuaciones producidas por la velocidad del viento. De igual manera, cuando estas detectan que la velocidad del viento sobrepasa los límites de velocidad, emplean mecanismos para detener el sistema. El más sencillo de estos sistemas es el conocido como puesta en bandera, el cual, al detectar que la velocidad del viento sobrepasa el límite permitido, actúa poniendo el rotor paralelo al viento frenando de esta manera el rotor.

Al momento de planificar la instalación de un sistema eólico es de gran importancia determinar lo siguiente: potencial disponible y con él determinar la viabilidad económica; lugar de instalación más adecuado; cargas que

alimentará el sistema lo que permite dimensionar de una mejor forma el sistema; vida útil del sistema tomando en cuenta los efectos de las turbulencias, ráfagas, tormentas, rayos, etc.; comportamiento energético de la explotación eólica, variación del viento con la altura, estadísticas de ráfagas y valores extremos, entre otros.

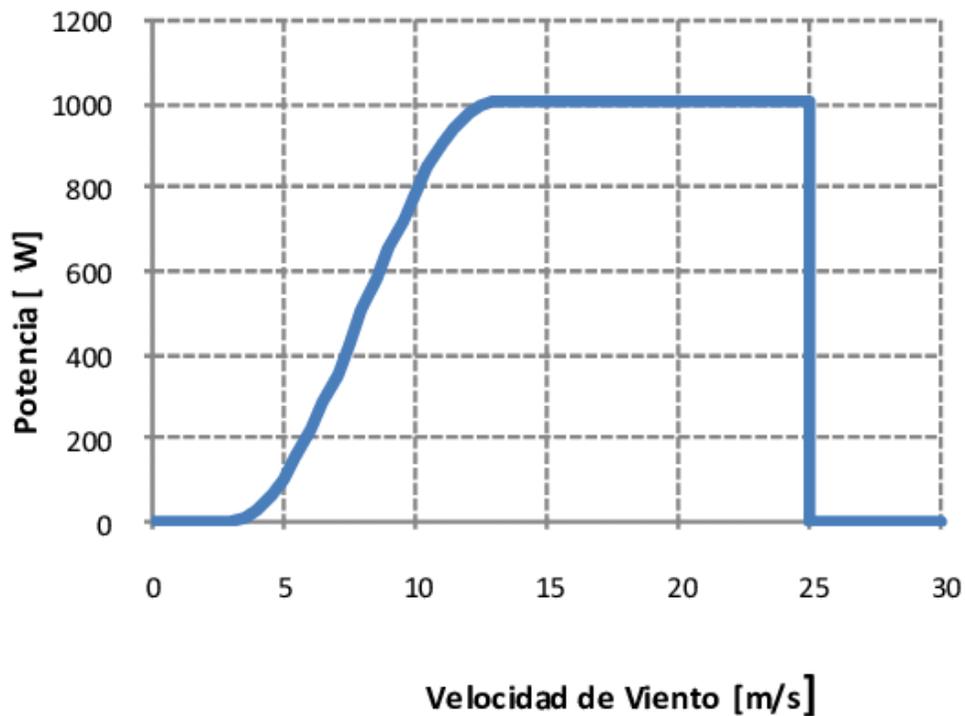


Figura 3.1 Curva de potencia de un generador eólico típico [1]

La figura 3.1 es una curva de potencia típica de un aerogenerador, en ella podemos ver la potencia del aerogenerador a diferentes velocidades. A partir de los 4 m/s aproximadamente, el aerogenerador empieza a producir potencia. Entre los 12 y 25 m/s el aerogenerador producirá a plena potencia, alcanzando la potencia nominal. Cuando la velocidad del viento sobrepasa

los 25 m/s los mecanismos de seguridad pondrán el sistema de rotor paralelos al viento con lo cual la producción de potencia se detiene.

3.2.2. Energía del viento

Una masa de aire m con un movimiento uniforme unidireccional con velocidad v tiene una energía cinética que puede ser calculada utilizando la siguiente ecuación

$$E = \frac{1}{2} m_{aire} v^2 \quad (3.8)$$

además

$$m_{aire} = \rho \cdot v \cdot A_r \cdot \Delta T \quad (3.9)$$

Por lo que si reemplazamos la ecuación 3.9 en la ecuación 3.8 obtenemos:

$$P_{generador} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho_{aire} \cdot v^3 \cdot A_r \quad (3.10)$$

Donde ρ es la densidad del aire, C_p es el coeficiente de potencia, cuyo valor máximo teórico fue establecido por Betz en 0.593 el cual es llamado el límite de Betz, A_r es el diámetro del aire atravesado, el cual corresponde al diámetro del rotor o la longitud de las aspas. De igual manera observando la figura 3.1 se puede calcular la potencia generada en cada instante de tiempo utilizando la siguiente fórmula

$$P_{wt}(t) = \begin{cases} 0 & \text{si } v(t) \leq V_{cut-in} \text{ o } v(t) \geq V_{cut-out} \\ P_r \frac{v(t)-V_{cut-in}}{v_r-V_{cut-in}} & \text{si } V_{cut-in} < v(t) < V_r \\ P_r & \text{si } V_r < v(t) < V_{cut-out} \end{cases} \quad (3.11)$$

La ecuación 3.11 muestra que la producción de potencia depende de la velocidad del viento. Esta velocidad debe ser mayor que la velocidad de corte de entrada y menor que la velocidad de corte de salida para que el aerogenerador produzca potencia. En caso contrario la producción de energía es nula.

3.3. Hidrógeno como vector energético

Se espera que en las próximas dos décadas la producción de petróleo llegue al máximo, luego haya una disminución a pesar de las mejores técnicas de extracción lo que causará un aumento de los precios, aunque no de forma regular ya que estos también se ven afectados por las guerras, las condiciones políticas y mano de obra que en algunos lugares, como oriente medio, es muy barata. Aunado a esto, la contaminación producida por los autos que funcionan con combustibles fósiles y su impacto en la salud, el medio ambiente, en la sociedad y la seguridad en el suministro han acelerado y hecho más interesante el desarrollo de alternativas al uso de combustibles fósiles.

Uno de los vectores más importantes tomado en cuenta para realizar esta transición energética es el Hidrógeno, el cual, tiene el distintivo de ser el elemento más abundante en el universo. Este elemento químico forma parte de la composición de las estrellas, y en los planetas como la tierra, se encuentra como parte de las moléculas de agua, metano y material orgánico ya sea fresco o fosilizado. El Hidrógeno es un elemento químico que cuando se encuentra en condiciones normales de temperatura o de presión se presenta como un gas diatómico sin color, olor ni sabor.

La posibilidad de utilizar el Hidrógeno como un portador de energía general tiene mucho tiempo siendo reconocido [35]. El Hidrógeno surge como un potencial candidato avalado por ser el combustible con la mayor energía específica (120 MJ /Kg). En esta sección el enfoque estará en el estudio de su producción, almacenamiento, transmisión y el uso del Hidrógeno especialmente en celdas de combustibles.

3.3.1. Métodos de producción de Hidrógeno

La producción de Hidrógeno se refiere al proceso de extraer y aislar las moléculas independientes de Hidrógeno con la pureza requerida para una necesidad específica. Los procesos de extracción dependen del medio o la materia prima de donde será extraído.

Este gas se puede extraer de muchos elementos como por ejemplo, metano, gas natural, petróleo, el agua, entre otros. El Hidrógeno no aparece solo en la naturaleza por lo que debe ser extraído y aislado. Por tal motivo, se han creado diferentes métodos y formas de conseguirlo, no obstante, el método más utilizado en la actualidad, cuando la energía ya está transformada en electricidad, es por electrolisis. Existen otros métodos de extracción que pueden ser utilizados dependiendo la cantidad requerida, los costos asociados y la pureza deseada. También podemos encontrarnos con otras formas más experimentales que en la actualidad se utilizan poco, no obstante, pueden preferirse en un futuro cuando dichas tecnologías estén más desarrolladas y maduras.

A continuación se detallan algunos de los métodos más utilizados en la obtención del Hidrógeno.

3.3.1.1. Reformado con vapor

Gran parte del Hidrógeno industrial se extrae del metano CH_4 el cual es el componente principal del gas natural. Se mezcla el metano con vapor de agua a alta temperatura y se produce un proceso químico endotérmico $CH_4 + H_2O \rightarrow CH + 3H_2 - \Delta H^0$.

El reformado se utiliza para producir grandes cantidades de Hidrógeno a un costo relativamente bajo, en contraposición, este método no resulta viable económicamente para producir pequeñas cantidades. La calidad del hidrógeno producido utilizando este método no es muy buena por lo que muchas veces debe ser sometido a algún proceso de limpieza con la finalidad de purificar el producto final. La eficiencia del reformado está alrededor del 80 %. [35]

3.3.1.2. Oxidación parcial, reformado autotérmico y seco

Este método es considerado más rápido que el reformado con vapor. Aquí el metano junto con el oxígeno se hace pasar por un catalizador adecuado donde ocurre la reacción, pero hasta cierto punto también se dan otros procesos químicos como la oxidación, la metanización, la reacción de cambio y el reformado en seco.

3.3.1.3. Electrolisis del agua

La conversión de electricidad en Hidrógeno y Oxígeno se conoce desde hace muchos años, ya en 1820 fue demostrada por Faraday. Sin embargo, si la conversión se hace utilizando combustible fósil el costo de producir el Hidrógeno es más que el costo de producir la energía. La pureza del Hidrógeno producido utilizando este método alcanza niveles muy altos y es muy adecuado para producir cantidades moderadas de dicho gas. Con ciertas adecuaciones se podría utilizar para producir grandes cantidades, no obstante, el porcentaje de producción de Hidrógeno por medio de electrolisis es apenas alrededor del 5 %. Por otro lado, si el H_2 es producido con el excedente de la energía de fuentes renovables como la radiación solar o energía eólica, el costo de producirlo es mínimo y por lo tanto, se hace muy conveniente producirlo y almacenarlo para su posterior utilización.

La electrolisis convencional utiliza un electrolito alcalino acuoso KOH o un NaOH con un peso de aproximadamente 30 % con electrodos positivos y negativos separados por un diafragma microporoso. La función del electrolito es mejorar la conductividad del agua, por lo cual se limita la temperatura a menos de 100 °C para evitar grandes aumentos de corrosión alcalina en los electrodos. La reacción en el electrodo negativo produce H_2 y en el electrodo positivo produce O_2 .

$$E_{Elec}(t) = [(E_{eol}(t) + E_{fotov}(t)) - carga/\eta_{inv}]\eta_{elec} \quad (3.12)$$

La ecuación 3.12 permite conocer la energía equivalente producida por el

electrolizador en cada instante de tiempo. Dicha ecuación puede ser utilizada tanto para sistemas fotovoltaicos, eólicos o una combinación de ambos. Observando dicha ecuación se ve que la cantidad de Hidrógeno producido es directamente proporcional a la eficiencia de conversión del electrolizador.

3.3.1.4. Gasificación y conversión de la biomasa

Este método es hasta cierto punto emergente y permite producir grandes cantidades de Hidrógeno a partir del gas natural, la gasolina pesada o carbón la cual requiere cantidades importantes de entrada de electricidad. Este proceso requiere una planta que opera con uno de los combustibles antes mencionados y se calienta a $1,600^{\circ}C$. Los productos energéticos están en términos energéticos: 48 % Hidrógeno, 40 % Carbono y 10 % vapor de agua. Considerando la suma de los tres productos, los cuales son portadores de energía, podemos decir que su eficiencia es de un 98 % , sin embargo, no es muy deseable la conversión de gas natural a Carbono y el vapor de agua solo tiene un uso local. Por tal motivo, es más factible considerar una eficiencia del 48 %.

3.3.1.5. Producción biológica de Hidrógeno

Otra forma de producir hidrógeno utilizando biomasa es por medio de bacterias, algas del agua u otro sustrato, las cuales descomponen la materia por medio de un proceso de fermentación. Este proceso se da en presencia o ausencia de la luz, y depende del tipo de bacteria o alga utilizada.

3.3.2. Almacenamiento

La forma de almacenar Hidrógeno va a depender de la aplicación deseada, sin embargo, el almacenamiento de Hidrógeno en forma de gas comprimido es la forma más común. La presión típica en los tanques de almacenamiento ronda los 10-20MPa y la presión en las pilas de combustible está entre los 25 y 35 MPa, aunque se han hecho pruebas en tanques para carros con presiones de hasta 70MPa. Existen algunas aleaciones metálicas que pueden almacenar Hidrógeno a densidades volumétricas de más del doble que la del Hidrógeno líquido, como por ejemplo los tanques de hidruros metálicos. El Hidruro de MgH_2 es uno de los más interesantes ya que puede almacenar alrededor del 7.6 % de su masa. [35].

Un termino importante que se debe mencionar aquí es la capacidad gravimétrica la cual es la relación entre la masa de Hidrógeno almacenada y la masa total del dispositivo de almacenamiento con el Hidrógeno incluido, suele darse en tanto por ciento.

3.3.3. Usos del Hidrógeno

El Hidrógeno es un gas muy versátil, el cual se puede utilizar como portador de energía, medio de almacenamiento o como combustible para motores convencionales encendidos por chispa o motores Otto y diésel. Otro uso importante es en celdas de combustible estacionarias. Estas celdas de combustible tienen básicamente dos grandes áreas de investigación: las celdas utilizadas en el sector de energía eléctrica, donde se encuentran las más

eficientes compuestas por óxido sólido o carbonato fundido y el otro son enfocadas en áreas más pequeñas, por lo general de un solo edificio, basado en la tecnología de celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC).

3.3.4. Transporte del Hidrógeno

El Hidrógeno puede transportarse en contenedores de Hidrógeno ya sea en forma comprimida o líquida. Así como en tanques de hidruros, en algunas formas químicas y en forma de metanol e hidrocarburos los cuales, luego son convertidos a gases ricos en Hidrógeno.

3.3.5. Celdas de combustible

En términos generales una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que tiene la capacidad de convertir la energía química depositada como combustible a energía eléctrica o viceversa de manera directa[35, 36, 37]. Los componentes comunes a todas estas celdas son dos electrodos y un electrolito que separa ambos electrodos. El electrodo donde se acumulan las cargas positivas se llama ánodo y donde se acumulan las cargas negativas se llama cátodo. El funcionamiento básico es el siguiente: el Hidrógeno alimenta el ánodo donde reacciona y se separa en electrones y protones.

Los electrones viajan por un conductor externo para entregar su energía útil a una carga eléctrica. Por otro lado, los protones viajan a través del electrolito hacia el cátodo, donde también es el destino final de los electrones. Allí se encuentran con el oxígeno donde reaccionan y forman agua pura y

calor como se muestra en la figura 3.2. Esta conversión electroquímica está determinada por la energía libre de Gibbs.

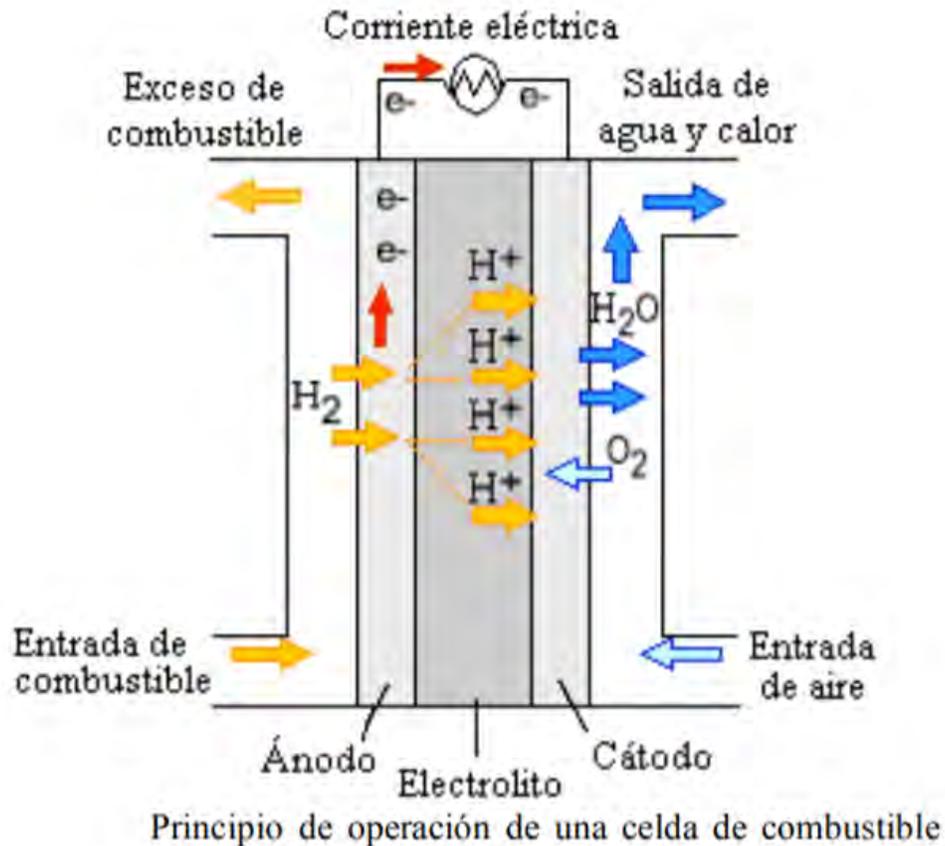


Figura 3.2 Funcionamiento general de una celda de combustible [2].

La energía libre de Gibbs es la máxima cantidad de energía química en un determinado momento o en una situación dada que se puede convertir en energía aprovechable, como por ejemplo la electricidad [38]. La energía de Gibbs está dada por la siguiente ecuación $G = U - T_{ref}S + P_{ref}V$ donde U

es la energía interna del sistema, S es la entropía, V es su volumen, T_{ref} es la temperatura absoluta y P_{ref} es la presión.

La eficiencia de una celda de combustible es la relación entre la energía eléctrica de salida y la energía total perdida, la misma puede ser obtenida idealmente por $\eta^{ideal} = \Delta G / \Delta H$. Donde ΔH es igual a -9.5×10^{-19} o -2.86×10^5 J por mol de H_2O formado [35]. La eficiencia ideal para la celda de combustible es $\eta^{ideal} = 0.83$

La eficiencia del stack de una celda de combustible por medio de la termodinámica se puede definir por $\eta_{FC} = \varepsilon_{FC} / E_{NHc}$ donde ε_{FC} representa la energía producida por la celda y E_{NHc} es la energía producida con el Hidrógeno consumido en la celda. De igual manera expresando la potencia máxima del stack en función de la máxima potencia de la monocelda y el número del total de monoceldas obtenemos la siguiente relación

$$P_{mstack} = P_{mcell} / F_{size} \quad (3.13)$$

De forma similar se puede determinar la potencia del stack P_{stack} como función de la potencia de operación de la monocelda ($PM - C$) donde

$$P_{stack} = (PM - C) / F_{size} \quad (3.14)$$

Luego las eficiencias tanto de la celda de combustible y el electrolizador se obtienen mediante extrapolación usando un polinomio de tercer grado,

quedando de la siguiente manera

$$\eta_{FC} = -277.88PM - C^3 + 54.04PM - C^2 - 4.43PM - C + 0.73 \quad (3.15)$$

$$\eta_{Pelec} = -0.09PM - C^3 + 0.36PM - C^2 - 4.43PM - C + 0.73[17] \quad (3.16)$$

3.3.5.1. Tipos de celdas de combustible

Se ha investigado y existe una gran variedad de celdas de combustible, entre las que destacan las siguientes: carbonato fundido(MCFC), óxido sólido(SOFC), ácidas alcalinas(AFC), membrana de intercambio protónico(PEMFC), etc.

Las MCFC emplean iones de carbonato en un electrolito de matriz sólido a altas temperaturas de 650°, lo cual, forma una sal fundida altamente conductora donde los iones de carbonatos son los que proporcionan la conductividad iónica. Por otro lado, las SOFC destacan por su alta eficiencia y baja cantidad de emisiones contaminantes. Estas celdas trabajan a temperaturas aproximadas de 1,000°C y tienen la capacidad de utilizar diferentes tipos de combustibles para su operación [39].

Por su parte las pilas AFC, fueron unas de las primeras celda de combustibles desarrolladas y utilizadas en el programa espacial de Estados Unidos. Las AFC emplean electrodos de carbono poroso con un catalizador de platino y ácido fosfórico como electrolito, en adición, son alimentadas en el ánodo con Hidrógeno y en el cátodo con Oxígeno. La temperatura de operación está

entre los 175°C y 200°C [35, 40].

Un electrodo es un cuerpo cavernoso donde se producen las reacciones electroquímicas. Tienen varias funciones entre ellas: proporcionar una superficie donde se produzcan las reacciones de ionización, transportar los iones desde y hasta la interfaz de contacto, separar la fase gas del electrolito.

Uno de los tipos de celdas de combustibles de más rápido desarrollo son las PEMFC. Estas celdas contienen una membrana sólida de polímero de ácido sulfónico fluorado, comercialmente llamado Nafion, intercalada entre dos capas de electrodos y difusores de gas, la temperatura de operación está entre los 30°C y 100°C, el catalizador más utilizado, y del cual se obtienen los mejores resultados, es el platino [41].

Otros autores como Sorensen [35] establecen la temperatura de operación entre los 50°C y 100°C, en adición la eficiencia de estos sistemas oscila entre el 40 % y el 50 %. El período de vida de las celdas PEMFC ronda las 5 mil horas. La estabilidad mecánica de estas celdas, generalmente, es proporcionada por un par de placas bipolares que también actúan como terminales colectoras para la corriente eléctrica generada.

Aquí es importante hacer la siguiente diferenciación: Un dispositivo que convierte la energía química, que es suministrada como combustible de entrada al dispositivo, en energía eléctrica se llama pila de combustible. Si la sustancia que contiene energía libre se almacena dentro del dispositivo en

lugar de fluir hacia él, el nombre que recibe es batería primaria. Un dispositivo que puede hacer la conversión inversa se llama celda impulsada y si se utiliza el mismo dispositivo para hacer la conversión en ambas direcciones, el dispositivo es una celda de combustible regenerativa.

Un modelo matemático que se puede utilizar para obtener la energía producida por una celda de combustible es el mostrado en la ecuación 3.17

$$E_{gen}(t) = [-(E_{eol}(t) + E_{fotov}(t)) - carga/\eta_{inv}]\eta_{celda} \quad (3.17)$$

donde η_{inv} es la eficiencia del inversor y η_{celda} es la eficiencia de la celda de combustible. Usando en conjunto las ecuaciones 3.12 y 3.17 se puede obtener el tamaño del tanque requerido al momento de dimensionar un sistema energético híbrido.

Capítulo 4

HERRAMIENTAS DE CÓMPUTO

En este capítulo, se hará un breve recorrido por algunas de las principales herramientas, librerías y lenguajes para el desarrollo de la programación Web.

4.1. Desarrollo Web

En los últimos años, las aplicaciones web han experimentado un aumento significativo debido a que pueden ser accedidas desde cualquier lugar y por medio de distintos tipos de equipos de cómputo con conexión a Internet.

4.1.1. Python

Para el desarrollo de tales aplicaciones existe una gran cantidad de lenguajes de programación, entre los más utilizados se encuentran: Java, Ruby, Python, PHP, C#, Perl, entre otros. Python [42] destaca por su versatilidad,

portabilidad, curva de aprendizaje (mucho más corta que otros lenguajes), elegancia, repertorio de herramientas disponibles, el tamaño de la comunidad de desarrolladores, su amplio uso en aplicaciones de ciencia, ingeniería, análisis de datos, inteligencia artificial y muchas otras aplicaciones.

Python es un lenguaje de programación independiente de la plataforma, orientado a objetos e interpretado lo que significa que no es necesario compilar el código fuente para poder ejecutarlo. Además, con Python se pueden desarrollar diferentes tipos de programas como aplicaciones de escritorio, servidores de red y aplicaciones web, entre otras.

Para el desarrollo de aplicaciones web, con Python, existen varios frameworks, dos de los más conocidos son Flask y Django. En términos generales, un framework es una estructura de software compuesta de componentes personalizados e intercambiables de una aplicación. Para realizar la herramienta de dimensionamiento, se ha elegido Django [43] ya que es un framework gratuito, de código libre que admite un desarrollo rápido, directo con componentes intercambiables y escalables.

4.2. Optimización del costo de las aplicaciones híbridas

Aunque los costos de los paneles fotovoltaicos, las turbinas eólicas, las celdas de combustible y el electrolizador han disminuido mucho en los últimos años, la energía derivada de los combustibles fósiles sigue siendo mucho

más barata. Por tal razón, es de suma importancia el óptimo dimensionamiento de cada uno de los elementos que componen un sistema renovable de energía, para de esta manera lograr una disminución considerable de los costos en dichos proyectos. Con la finalidad de lograr dicho objetivo, en el presente proyecto, se utiliza un algoritmo heurístico de optimización llamado: Optimización de enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés).

4.2.1. PSO

La optimización de enjambre de partículas es una técnica de búsqueda heurística que mejora iterativamente un conjunto de soluciones candidatas dada una función objetivo [44]. La optimización juega un papel importante en diferentes áreas científicas como son el análisis de datos, ingeniería, aprendizaje profundo, entre muchas otras áreas del conocimiento.

En el algoritmo PSO, cada potencial solución es llamada partícula y el conjunto de posibles soluciones es llamado enjambre. La actualización de la posición de la partícula en un determinado tiempo t , está dado por la ecuación 4.1.

$$\vec{x}_i(t) = \vec{x}_i(t-1) + v_i(t) \quad (4.1)$$

donde, $v_i(t)$ es la velocidad y está dada por:

$$\vec{v}_i(t) = w \cdot \vec{v}_i(t-1) + C_1 \cdot r_1 \cdot (\vec{x}_{pi} - \vec{x}_i) + C_2 \cdot r_2 \cdot (\vec{x}_{gi} - \vec{x}_i) \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.2. \vec{x}_{pi} es la mejor solución que \vec{x}_i ha encontrado en su reco-

rrido y x_{gi} es la mejor partícula, la cual, es llamada partícula líder. Por otro lado, w es el peso de la partícula la cual mantiene un balance de compensación entre la experiencia local y global. r_1 y r_2 son dos números aleatorios en el rango de 0 y 1 uniformemente distribuidos, mientras que C_1 y C_2 son parámetros específicos los cuales controlan el efecto de la mejor partícula en el ámbito local y global.

Uno de los grandes retos que presentan muchos de los algoritmos PSO es el aumento abrupto de la velocidad de las partículas lo que muchas veces ocasiona movimientos erráticos hacia los límites superiores e inferiores de la posición de dichas partículas [45]. Una opción desarrollada para solventar esa problemática es el algoritmo Speed-constrained Multi-Objective PSO (SM-PSO, por sus siglas en inglés), esta versión de PSO incluye un procedimiento de restricción de velocidad. Dicho procedimiento consiste en la implementación de un coeficiente de restricción el cual se obtiene como se muestra en la ecuación 4.3.

$$x = \frac{2}{2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (4.3)$$

donde, φ está representado con la siguiente expresión:

$$\varphi = \begin{cases} C_1 + C_2 & \text{si } C_1 + C_2 > 4 \\ 0 & \text{si } C_1 + C_2 \leq 4 \end{cases} \quad (4.4)$$

De igual manera, existe un mecanismo que permite conocer la velocidad de las partículas en cada momento [45].

4.2.2. Librerías en Python que implementan PSO

El principal objetivo de dimensionar un sistema de energía renovable es minimizar el costo total, el cual incluye costo de inversión, operación, mantenimiento y reemplazo. No obstante, en este trabajo, sólo se tomará en cuenta para el cálculo del costo total, el costo de inversión y el costo de mantenimiento.

Diseñar y desarrollar una librería o framework donde se implemente el algoritmo PSO desde cero requiere mucho tiempo, esfuerzo y dinero, por lo que una solución viable es utilizar una de las múltiples librerías que ya están desarrolladas y probadas un sinnúmero de veces.

En python existe una variedad de librerías que permiten trabajar con PSO en aplicaciones tanto mono como multiobjetivo. Algunas de las más populares son: Pyswarm, Pymoo, PyGMO y Platypus.

Pyswarm es una librería que está disponible en Python la cual permite trabajar con problemas del tipo mono objetivo y tiene soporte para establecer restricciones. Si lo que se quiere es trabajar para resolver algún problema multiobjetivo dicha librería no es la adecuada debido a que no cuenta con dicho soporte.

Por su parte Pymoo es una librería muy potente el cual incluye soporte para problemas mono y multiobjetivo. Además cuenta con soporte para el manejo de restricciones [46].

PyGMO es otra librería en Python, la cual permite trabajar con problemas de optimización masivos mono y multiobjetivo. Tiene la ventaja que permite utilizar una cantidad impresionante de algoritmos de optimización heurística diferentes. Esta librería está optimizada para trabajar con múltiples unidades centrales de procesamientos (CPU, por sus siglas en inglés).

Platypus [47] es una librería de optimización multiobjetivo que permite implementar algoritmos de última generación; permitiendo al usuario probar la solución de un problema con múltiples algoritmos y proporciona métodos de análisis posteriores basados en métricas de visualización.

Después de haber probado varias de las librerías mencionadas anteriormente se ha elegido Platypus como librería para implementar PSO en el proyecto ya que cuenta con todas las características requeridas para llevar a cabo el mismo. Entre las que destacan multiobjetivo y soporte para la implementación de restricciones personalizadas.

4.3. API y librerías misceláneas utilizadas

Adicional a Platypus, librería elegida para implementar PSO, en el presente proyecto, se usaron otras librerías tanto internas, que ya vienen incluidas en el core de Python, como externas las cuales realizan diferentes funcionalidades necesarias para la implementación del software. Entre esas librerías se hará mención de las siguientes: Geopy, Chart.js, National Renewable Energy

Laboratory (NREL), configparser, requests, json, zipfile y csv.

4.3.1. Geopy

Geopy es un cliente Python que implementa varios de los más populares web services de geolocalización que existen en la actualidad como por ejemplo Nominatim, GoogleV3, Bing, entre otros [48]. La librería requiere sólo un string como argumento conteniendo una dirección y la librería devuelve tanto la latitud como la longitud correspondiente a dicha dirección. De igual manera, funciona a la inversa, recibiendo como parámetro la latitud y la longitud, devolviendo la dirección correspondiente a dichos parámetros.

4.3.2. Chart.js

Las herramientas con las que cuenta Python para visualizar gráficas en Django no siempre son las más intuitivas de utilizar por lo que una alternativa para este fin es Chart.js. Dicha librería está escrita en Javascript cuya integración con Django es total; con ella se pueden obtener gráficos dinámicos y responsivos que se adaptan a diferentes tamaños de dispositivos [49].

4.3.3. API NREL

Con la finalidad de obtener los datos históricos de velocidad del viento y de irradiancia correspondiente a la ubicación donde el usuario desea dimensionar el sistema, se utilizó el API de The National Renewable Energy Laboratory (NREL), la cual tiene diferentes formatos en la cual puede ser consumida, entre ellos JSON Y CSV. Una vez hecha la consulta nos devuelve un archivo

en formato zip el cual debe ser descomprimido, abierto y leído [50].

4.3.4. **configparser, requests, json, zipfile, csv**

Se hizo uso de varias librerías del core de Python para resolver diferentes problemáticas que se presentaron durante el desarrollo del sistema. Por ejemplo, se usó configparser para trabajar con archivos de configuración tanto en formato ini como en formato json. La librería se utilizó para desarrollar un archivo de configuración en formato json el cual permite modificar todas las constantes que usa el sistema para realizar el dimensionamiento (Ver anexo llamado archivo de configuración).

Otra librería usada es requests. Requests es una librería HTTP que permite obtener recursos ubicados en webs remotas de una forma fácil. Con ella se accede a la API de NREL desde donde se tiene acceso a los datos de velocidad del viento e irradiancia solar necesarios cuando el usuario requiere de dichos datos para realizar el dimensionamiento [51].

JSON(JavaScript Object Notation) es un formato ligero de intercambio de datos. Es un formato de texto que es completamente independiente del lenguaje pero utiliza convenciones que son ampliamente conocidos por los programadores de la familia de lenguajes C, incluyendo C, C++, Java, JavaScript, Perl, Python, y muchos otros [52]. En Python, la librería que trabaja con este tipo es json la cual se utilizó en la herramienta de cómputo. Con ella se lee el archivo de configuración que está en dicho formato y se accede al API de NREL.

Una vez obtenidos los datos de irradiancia y velocidad del viento desde NREL estos están en formatos zip por lo que se utiliza la librería zipfile de Python para descomprimir, abrir, y luego leer el archivo con los respectivos datos. Zipfile es una librería que permite precisamente trabajar en modo lectura, escritura o compresión de este tipo de archivos.

Finalmente, el usuario, al momento de acceder al área de dimensionamiento en la herramienta web, tiene la posibilidad de incluir un archivo conteniendo los datos de carga, velocidad del viento e irradiancia solar, dicho archivo debe estar en formato valores separados por coma (CSV) por sus siglas en inglés. CSV es un formato de texto plano que contiene los datos separados por coma. La librería Python que se utilizó para trabajar con dichos archivos lleva el mismo nombre que el formato de datos, csv.

Capítulo 5

IMPLEMENTACIÓN

El proyecto desarrollado es un software con tecnología web que permite el dimensionamiento de los componentes de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica, el cual fue codificado utilizando la versión 3.7.6 del lenguaje de programación Python y la versión 3.0.3 de Django, el cual es un framework escrito enteramente en Python cuya función principal es el desarrollo de aplicaciones web.

De todas las configuraciones de sistemas híbridos de energía eléctrica estudiados anteriormente, se eligió como modelo para el desarrollo una configuración que está compuesta por dos de las fuentes de energías renovables más importantes y utilizadas en la actualidad. Dichas fuentes son las fotovoltaicas y las eólicas. Para el almacenamiento de energía se consideraron tanques de hidruros metálicos debido a que son capaces de almacenar gran cantidad de Hidrógeno por unidad de volumen y presentan más seguridad que otras formas de almacenamiento.

Por otro lado, se utilizó la celda de combustible tipo PEM como una fuente secundaria de generación de energía. Las celdas PEM tiene una alta densidad de potencia y su temperatura de funcionamiento es menor a 100° lo cual es ideal para aplicaciones estacionarias de generación eléctrica. El esquema general de la configuración del sistema se muestra en la figura 5.1.

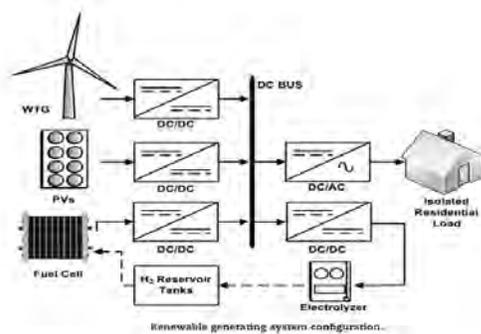


Figura 5.1 Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno [3].

Como se observa en la figura 5.1, el sistema está formado por dos fuentes primarias y una fuente secundaria. Las fuentes primarias son la eólica y la fotovoltaica. La fuente secundaria es una celda de combustible.

5.1. Estrategia de dimensionamiento

Utilizando datos históricos tanto de velocidad del viento en m/s como de irradiancia en W/m^2 y la carga demandada por el usuario se hace un barrido a través de un período de un año, esto es 8760 valores, uno por cada hora

del día. En caso que en una hora determinada la producción de energía sea mayor que la carga demandada, dicho excedente de energía es utilizado por el electrolizador para producir Hidrógeno y almacenarlo en el tanque. En caso contrario, cuando se presente un déficit, es decir, la energía producida no sea suficiente para suplir la carga demandada, se utiliza la celda de combustible con el fin de suplir ese faltante de energía. La celda de combustible es alimentada con el Hidrógeno almacenado en el tanque.

Es importante mencionar que se asume la existencia de un dispositivo controlador de carga inteligente, que tiene la capacidad de realizar las operaciones descritas anteriormente en tiempo real. En el presente trabajo esta funcionalidad se realiza con código de programación.

Viendo la figura 5.1 como un sistema de cómputo se puede representar como se muestra en la figura 5.2

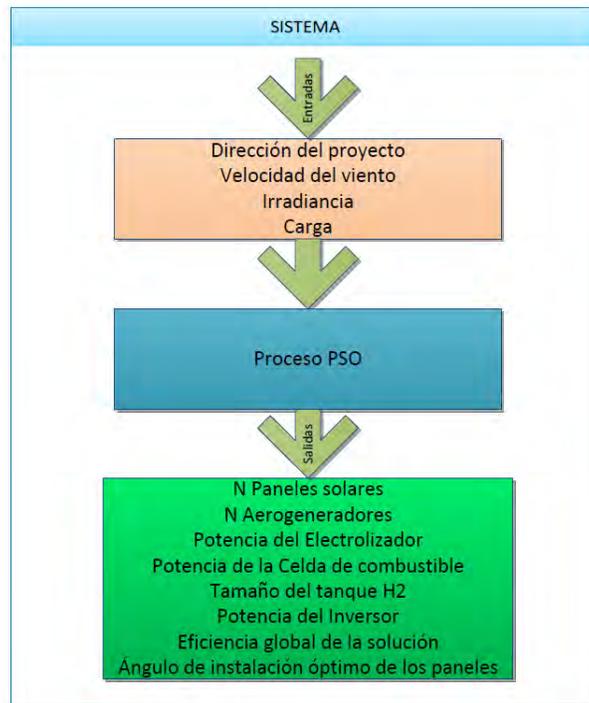


Figura 5.2 Entradas y salidas del sistema.

En este sistema tenemos entradas, procesos y un conjunto de salidas las cuales conforman las respuestas del dimensionamiento.

5.1.1. Menú del sistema

El usuario podrá elegir el tipo de sistema híbrido que quiere dimensionar, ya sea para sistemas Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno, Eólico-Hidrógeno o Fotovoltaico-Hidrógeno.

Cuando el usuario ingresa al sistema se muestra un menú con cinco links como se observa en la figura 5.3, el primer link tiene por función hacer un

redireccionamiento al sitio de la Universidad de Quintana Roo (UQROO); el segundo es llamado Home y su única función es redireccionar a la página de inicio del sistema; el tercer link lleva directamente al corazón del sistema y es donde están las opciones y funciones del dimensionamiento; en el link llamado Json se lleva a una visualización de los valores por defecto de las diferentes constantes con que trabaja el sistema; y finalmente, en la opción 'Sign in', la cual es una opción avanzada, la persona con un usuario y una contraseña válido puede acceder para modificar los parámetros y constantes del sistema.

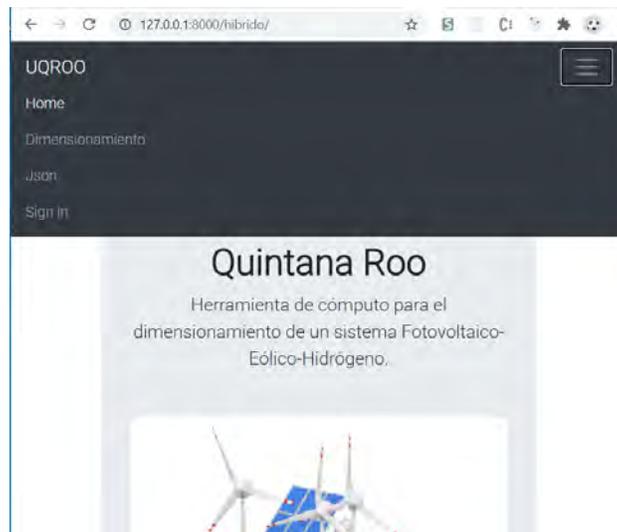


Figura 5.3 Menú del sistema.

5.1.2. Opciones del dimensionamiento en el sistema Web

Al momento de hacer clic en el link dimensionamiento el sistema redirige a una página donde nos pide la ubicación o dirección del lugar donde quie-

re desarrollar el proyecto como se muestra en la figura 5.4. En él, se solicita ingresar el país, estado y el municipio o ciudad donde va a dimensionar el proyecto. Esta información es importante ya que permite utilizar una librería de geolocalización para obtener la latitud y longitud. Dichas coordenadas permiten realizar cálculos del ángulo de inclinación a la que se deben colocar los paneles solares y recuperar la información del recurso solar y eólico disponible.

The image shows a web browser window displaying a form. The browser's address bar shows the URL '127.0.0.1:8000/hibrida/ubic...'. The page has a dark header with the text 'UQROO' and a hamburger menu icon. The main content area has a light blue background and contains the following text: 'Ubicación donde realizará el proyecto', 'Herramienta de cómputo para el dimensionamiento de un sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.', and three input fields labeled 'País', 'Estado', and 'Municipio/Ciudad'. A blue button labeled 'Siguiente' is positioned below the input fields.

Figura 5.4 Formulario de ubicación del proyecto.

Una vez lleno este formulario, aparece un menú, como el mostrado en la figura 5.5, donde el usuario puede elegir el formato de la carga requerida en su proyecto, pudiendo ésta ser en kWh/día, kWh/mes o kWh durante todo el año. La carga en kWh/día se refiere a la carga promedio consumida en un pe-

riodo de un día por todos los componentes eléctricos del lugar a dimensionar. De igual manera, kWh/mes se refiere a la carga promedio consumida cada mes durante un año por los diferentes equipos del lugar a dimensionar. Por otro lado, kWh , se refiere al consumo cada hora de todos los componentes eléctricos durante un año.



Figura 5.5 Formato de la carga a elegir por el usuario.

Una vez seleccionado el formato de la carga y dependiendo de cuál haya elegido el usuario, el sistema mostrará un campo para subir el archivo en formato CSV o un campo de texto con los valores de la carga como indica la figura 5.6. Una vez ingresada la carga, el usuario procede a elegir las fuentes que desea agregar a su proyecto. Puede seleccionar Solar-Hidrógeno, Eólica-Hidrógeno o la combinación Solar-Eólica-Hidrógeno.

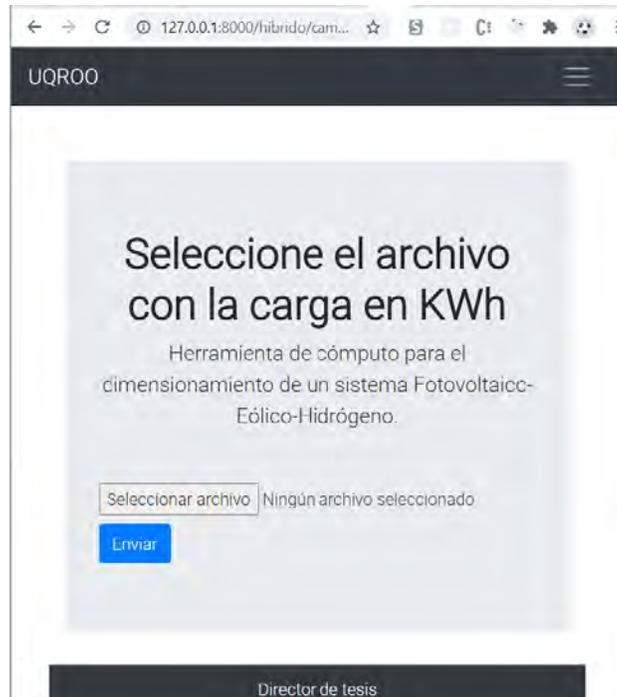


Figura 5.6 Campo para ingresar las cargas.

Al momento del usuario agregar energía eólica en el software, inmediatamente se despliega un selector para que él pueda seleccionar el tipo de aerogenerador que quiere utilizar. Puede elegir aerogenerador de eje vertical, de eje horizontal o uno genérico con características preestablecidas.

De igual manera, al momento del usuario elegir energía solar se le despliega la opción de elegir el tipo de panel fotovoltaico deseado. Entre las opciones a elegir están: panel monocristalino, policristalino o una opción por defecto que se llama panel genérico. Esto con la finalidad de que el usuario tenga la flexibilidad de que los cálculos obtenidos con el software sean lo más exactos posibles para cada proyecto en particular.

Después del usuario haber elegido el panel solar o aerogenerador, sus tipos específicos y el almacenamiento, el sistema muestra un resumen donde despliega las opciones elegidas. En caso que se quiera modificar alguna de estas opciones, tiene la posibilidad de hacerlo.

Los datos de irradiancia solar y velocidad del viento con los que se probó el software durante su codificación fueron obtenidos por la estación climática experimental ubicada en las instalaciones de la Universidad de Quintana Roo (UQROO) en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, México. Así mismo, en otras pruebas se utilizaron datos obtenidos del API de NREL en diferentes coordenadas.

5.2. Carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

Para hacer el cálculo de dimensionamiento en Python cuando la carga proporcionada por el usuario es en kWh/día y se optó por utilizar sólo energía solar como energía primaria, se toma el valor de la carga y se divide por 24 para hallar el consumo promedio por cada hora del día. Luego se utiliza la ecuación 3.4 que en este caso es nuestra función objetivo. Es decir, queremos encontrar el valor mínimo del área total requerida para que la producción de energía de la cantidad de paneles obtenidos con PSO sea óptima. Para evaluar dicha ecuación se utiliza la eficiencia del panel fotovoltaico específico elegido por el usuario, así mismo, se itera sobre la irradiancia creando una

lista con 8760 valores la cual es evaluada 87,600,000 millones de veces con Particle Swarm Optimization (PSO) por sus siglas en inglés, mediante la librería Platypus. De esta evaluación con PSO se obtiene el valor óptimo de la variable que representa el área total de los paneles.

Es importante mencionar que se definieron dos restricciones al algoritmo PSO para obtener los resultados deseados. La primera restricción es que el Hidrógeno en el tanque siempre debe ser mayor o igual a cero, con lo que se asegura que siempre se pueda producir electricidad. La segunda restricción verifica que la cantidad de Hidrógeno producido por el electrolizador menos el Hidrógeno consumido por la celda de combustible sea siempre mayor o igual a cero; esto para hacer un balance entre la producción y el consumo de Hidrógeno. Estas dos restricciones aseguran que el algoritmo proporcione los valores óptimos requeridos para que el dimensionamiento no produzca sobreproducción o déficit de energía a lo largo de todo el periodo de un año.

La segunda restricción permite que inicialmente el tanque de Hidrógeno pueda o no tener cierta cantidad de Hidrógeno.

En este punto, los datos de irradiancia no los proporciona el usuario sino que son obtenidos en tiempo de ejecución utilizando la base de datos de The National Renewable Energy Laborator (NREL). Dichos datos son descargados y utilizados. La API de NREL ofrece una resolución de hasta media hora en el intervalo medición, regiones de 4x4 km y cobertura de 1998 a 2017 para la región de México y Centro América.

5.2.1. Costos

El costo total del proyecto está en función del número de paneles, la potencia del electrolizador, la potencia de la celda de combustible, el tiempo de vida del proyecto y de la potencia del inversor.

Los costos obtenidos son anualizados durante la vida útil del proyecto. Los costos que se están considerando en la herramienta web son los costos de capital de inversión y los de mantenimiento. El costo de capital se da al inicio del proyecto mientras que el costo de mantenimiento tiene lugar durante la vida útil del mismo. El cálculo del costo total se realizó de la siguiente manera: costo de capital anual más el costo de mantenimiento anualizado. De donde el costo de capital se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{costoCA} = & \text{factorRecuCapital} \cdot \left[\frac{\text{areaPSO}}{\text{areaPanel}} \cdot \right. \\ & \left. \text{precioPanel} + \text{numElec} \cdot \text{costoElec} + \text{numCelda} \cdot \text{costoCel} + \text{CostoInv} \right] \end{aligned} \quad (5.1)$$

Donde, areaPSO es el área del total de paneles calculados mediante PSO, areaPanel es el área del panel elegido por el usuario, numElec es la cantidad de electrolizadores, costoElec es el costo de cada electrolizador, numCelda es la cantidad de celdas de combustible, costoCel es el costo de cada celda y CostoInv es el costo de inversor . Además,

$$\text{factorRecuCapital} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (5.2)$$

donde i el interés, n el tiempo de vida del proyecto, generalmente oscila entre 25 y 30 años para los paneles solares.

Por otro lado el costo de mantenimiento fue obtenido en Python con la siguiente expresión:

$$\text{costoMaAnual} = \text{factorRecuCapital}[(\text{areaPSO}/\text{areaPanel}) \cdot \text{costoMa}] \quad (5.3)$$

Donde, costoMa es el costo de mantenimiento por cada panel fotovoltaico. Como se muestra en la ecuación 5.3, para el mantenimiento del sistema Fotovoltaico-Hidrógeno sólo se considera el mantenimiento de los paneles fotovoltaicos.

5.3. Carga en kWh/día y sistema Eólico-Hidrógeno

En el sistema web cuando el usuario elige que quiere conocer el dimensionamiento utilizando como energía primaria sólo energía eólica y la carga que proporciona es en kWh/día se hace el mismo procedimiento con la carga que en la sección anterior. Sin embargo, la ecuación objetivo cambia. Ahora, la ecuación a utilizar es la ecuación 4.4. Esta ecuación nos permite conocer la potencia de salida de un aerogenerador en función de la velocidad del viento multiplicada por un factor y .

Para obtener la cantidad de aerogeneradores requeridos se crea una fun-

ción en Python donde se evalúa la función objetivo con PSO mediante la librería Platypus. En dicha función se establecen las dos restricciones descritas anteriormente a efecto de que los resultados obtenidos sean lo más precisos posible.

5.3.1. Costos

Igual que en la sección anterior los costos considerados son los costos anualizados tanto de capital de inversión como de mantenimiento. El cálculo del costo de capital de inversión se realizó en Python con la expresión siguiente

$$\begin{aligned} \text{costoCA} = \text{factorRecuCapital} & [(\text{numAero} \cdot \text{costoAero} \\ & + \text{numElec} \cdot \text{costoElec} + \text{numCelda} \cdot \text{costoCel} + \text{CostoInv})] \end{aligned} \quad (5.4)$$

Donde numAero es el número de aerogeneradores obtenidos mediante PSO, costoAero es el costo de cada aerogenerador.

Para el cálculo de costo del mantenimiento se utilizó la ecuación siguiente:

$$\text{costoMa} = \text{factorRecuCapital}[\text{numAero} \cdot \text{costoManAerogenerador}] \quad (5.5)$$

Donde, costoManAerogenerador es el costo de mantenimiento de cada aerogenerador al año.

5.4. Carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno

El usuario también tiene la opción de incluir en su proyecto una combinación de paneles solares y aerogeneradores como fuentes primarias y celdas de combustible como fuente secundaria. Si elige esta combinación e ingresa la carga en kWh/día la solución aplicada en Python consiste en utilizar las ecuaciones 3.4 y 4.4 como funciones objetivo, de tal forma se trata como un problema multiobjetivo. A diferencia de los casos anteriores, aquí no se tendrá una solución única, sino que se ofrecen una variedad de opciones, el usuario deberá elegir una dependiendo si quiere priorizar una tecnología o los costos.

Dichas funciones se evalúan con PSO y por cada hora se verifica si la suma de los dos valores evaluados en cada hora es mayor que la carga demandada en ese tiempo a lo largo del año. De cumplirse que dicha suma es mayor que la carga, el excedente de energía es utilizado para producir Hidrógeno con el electrolizador. Para tal fin, se utiliza el modelo del electrolizador cuya expresión matemática es el que se describe en la ecuación 3.12.

En este caso es de interés poner las dos restricciones utilizadas en los sistemas anteriores. El primero especifica que el Hidrógeno en el tanque de Hidrógeno siempre debe positivo y la segunda restricción establece que el Hidrógeno producido por el electrolizador y el consumido por la celda de combustible debe ser el mismo, estableciéndose así un balance energético.

5.4.1. Costos

Para la combinación Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno se calcula el costo de capital anualizado y el costo de mantenimiento anual.

El costo de capital anualizado se obtiene en Python de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \text{costoCaAnual} = & \text{factorRecuCapital}[(\text{areaPSO}/\text{areaPanel}) \\ & \text{precioPanel} + \text{numAero} \cdot \text{costoAero} + \text{numElec} \cdot \text{costoElec} + \\ & \text{numCelda} \cdot \text{costoCel} + \text{CostoInv}] \quad (5.6) \end{aligned}$$

Donde, areaPSO es el área óptima del total de paneles calculada con PSO, areaPanel es el área del panel específico seleccionado por el usuario, precioPanel es el costo de cada panel, numAero es el número de aerogeneradores obtenidos mediante PSO y costoAero es el precio del aerogenerador elegido por el usuario.

Por otro lado, el costo de mantenimiento anual, se calcula con la expresión matemática siguiente:

$$\begin{aligned} \text{costoMaAnual} = & \text{factorRecuCapital}[(\text{areaPSO}/\text{areaPanelUsuario})\text{costoMa} \\ & + \text{numAero} \cdot \text{costoManAerogenerador}] \quad (5.7) \end{aligned}$$

Como muestra la ecuación 5.7 sólo se considera el mantenimiento de los paneles fotovoltaicos y de los aerogeneradores.

Así pues el costo total anualizado del proyecto se obtiene sumando el costo anualizado de capital y el costo de mantenimiento.

5.5. Carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

Cuando el usuario selecciona la carga en kWh/mes y elige para dimensionar el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, el sistema solicita un archivo, en formato CSV, con la carga promedio consumida por cada mes del año y la irradiancia. En este caso, el usuario debe proporcionar al software los datos con los que se va a realizar el dimensionamiento, ya que no se tiene la opción de descargarlos de alguna base de datos.

A estas 12 cargas en kW se le hace un tratamiento mediante una interpolación para convertirlas a kWh promedio durante un año, resultando así en 8,760 valores, uno por cada hora del año.

Es importante mencionar que en dicho archivo, el encabezado de cada columna debe coincidir con los siguientes nombres: “carga” para la columna de carga e “irradiancia” para la columna de irradiancia.

Con estas entradas el sistema procesa toda la información y al final muestra como resultado la cantidad de paneles solares, el ángulo a la que se deben colocar los paneles, la potencia del inversor, la potencia del electrolizador, la potencia de la celda de combustible, el tamaño del tanque para almace-

namiento de Hidrógeno requerido y los costos anualizados tanto de capital inicial como de mantenimiento. Así mismo, muestra tres gráficas donde se puede verificar en el tiempo el comportamiento de la carga, de la irradiancia y la energía producida por el número de paneles solares durante un año.

5.6. Carga en kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno

El tratamiento de la carga es la misma que en el caso anterior cuando el sistema elegido es Fotovoltaico-Hidrógeno. No obstante, cambia en este caso la ecuación con la cual se obtiene el número de aerogeneradores ya que se utiliza la ecuación 4.4. En el caso de los costos la metodología es la misma que en el caso anterior.

Una vez obtenidos los datos de entrada por parte del usuario, carga y velocidad del viento, el sistema procesa toda la información y al final muestra como resultado la cantidad de aerogeneradores, la potencia del inversor, la potencia del electrolizador, la potencia de la celda de combustible, el tamaño del tanque para almacenamiento de Hidrógeno requerido y los costos anualizados tanto de capital inicial como de mantenimiento. Así mismo, muestra tres gráficas donde se puede verificar el comportamiento de la carga, de la velocidad del viento y la energía producida por el número de aerogeneradores para un año.

En el archivo de subida de datos de entrada, el encabezado de cada co-

lumna debe coincidir con los siguientes nombres: “carga” para la columna de carga y “velocidadviento” para la columna de la velocidad de viento.

5.7. Carga en kWh/mes y sistema Eólico-Fotovoltaico-Hidrógeno

El tratamiento de la carga es el mismo que el descrito en el primer caso cuando el tipo de carga elegido es kWh/mes y el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno. Las ecuaciones utilizadas en este tipo de dimensionamiento son las 3.4 y 4.4 y el código implementado queda de la siguiente manera:

Una vez el usuario selecciona tipo de carga kWh/mes el sistema le solicitará subir un archivo en formato CSV con los datos de irradiancia, velocidad del viento y cargas de cada hora durante un periodo de un año.

Con estas entradas el sistema procesa dicha información y al final proporciona como resultados la cantidad de paneles solares, el ángulo a la que se deben colocar los paneles, la potencia del inversor, la potencia del electrolizador, la potencia de la celda de combustible, el tamaño del tanque para almacenamiento de Hidrógeno requerido, el número de aerogeneradores y los costos anualizados tanto de capital inicial como de mantenimiento. Así mismo, mostrará cuatro gráficas donde se podrá verificar en el tiempo el comportamiento de la carga, de la irradiancia, la velocidad del viento y la energía producida por el número de paneles solares y por la cantidad de aerogeneradores durante un año.

5.8. Carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

Una vez que el usuario selecciona el tipo de carga kWh, el sistema le solicita subir un archivo en formato CSV con los datos de irradiancia y cargas de cada hora durante un periodo de un año. Aquí no se le hace ningún tratamiento a la carga ya que la misma es en kWh y el usuario proporciona los 8,760 valores requeridos.

Con estas entradas el sistema procesa la información proporcionada y al final muestra los resultados siguientes: la cantidad de paneles, el ángulo a la que se deben colocar los paneles, la potencia del inversor, la potencia del electrolizador, la potencia de la celda de combustible, el tamaño del tanque para almacenamiento de Hidrógeno requerido y los costos anualizados tanto de capital inicial como de mantenimiento.

Como parte de los resultados se muestran tres gráficas donde se puede observar en el tiempo el comportamiento de la carga, de la irradiancia y la energía producida por el número de paneles solares durante un año.

5.9. Carga en kWh y sistema Eólico-Hidrógeno

Se recibe por parte del usuario los datos de velocidad del viento y carga en un archivo CSV que es leído por la herramienta. Dichos datos se procesan con PSO y se muestran los resultados siguientes: la cantidad de aerogeneradores,

la potencia del inversor, la potencia del electrolizador, la potencia de la celda de combustible, el tamaño del tanque para almacenamiento de Hidrógeno y los costos anualizados tanto de capital inicial como de mantenimiento. Así mismo, muestran tres gráficas donde se puede observar en el tiempo el comportamiento de la carga, de la velocidad del viento y la energía producida por el número de paneles durante un año.

5.10. Carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno

Cuando la persona elige esta modalidad de carga se espera que proporcione los datos de velocidad del viento, irradiancia y carga durante cada hora del día en un periodo de un año en archivo en formato CSV como los casos anteriores. En este sistema el procesamiento de los datos por parte del sistema será más rápido, por ejemplo que cuando el usuario selecciona la carga en kWh/día, debido a que los datos le son proporcionados de forma local y la herramienta no tiene que descargarlos desde los servidores de NREL, luego descomprimirlos, abrir el archivo que los contiene y finalmente usar los datos.

5.10.1. Costos

El cálculo de los costos será muy parecido a los casos anteriores, mostrando la inversión inicial para el arreglo de paneles solares, aerogeneradores requeridos, inversor, electrolizador y celda de combustible. Por otro lado, mostrará los costos de mantenimiento para los paneles y aerogeneradores.

Capítulo 6

RESULTADOS

Para obtener los resultados del dimensionamiento con el software desarrollado se realizaron pruebas con las tres opciones disponibles para la carga: kWh, kWh/día y kWh/mes y se muestran los resultados para cada caso en particular. A continuación se presentan los datos de entrada y la información de salida obtenida en cada corrida. Es importante mencionar, sin embargo, que los datos de velocidad del viento e irradiancia se mostrarán en el apartado del anexo del mismo nombre por ser 8,760 valores por cada uno. Los datos de carga para kWh de igual manera se pueden ver en el apartado del anexo titulado carga.

6.1. Resultados para la modalidad de carga en kWh/día

6.1.1. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

En las tablas 6.1 y 6.2 se pueden ver los datos de entrada para el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno. Una vez que los datos son procesados por el sistema, este muestra una gráfica como la observada en la figura 6.1 donde se puede apreciar el número de paneles necesarios, la potencia del inversor, el ángulo óptimo a la que se deben instalar los paneles solares, la potencia que debe tener el electrolizador, la celda de combustible, el tiempo de vida a la que se proyectó el proyecto y finalmente, la eficiencia que nos dice cuanta energía se produce con el total paneles calculados con relación a la carga demandada. Para este caso vemos que la eficiencia global de la solución es de un 117%.

Otra información importante que se puede apreciar son los costos tanto de inversión inicial como de mantenimiento durante los 25 años del proyecto. Los costos son importantes, ya que permiten tomar decisiones de la viabilidad del proyecto.

Para esta configuración, la respuesta del sistema es única pues solo es necesario que se determine el número de paneles solares requeridos y el tamaño del tanque.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Yucatán, Oxkutzcab	20 kW	Genérico	N/A	PEMFC

Tabla 6.1 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
18 %	95 %	40 %	80 %	25 años

Tabla 6.2 Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh/día.

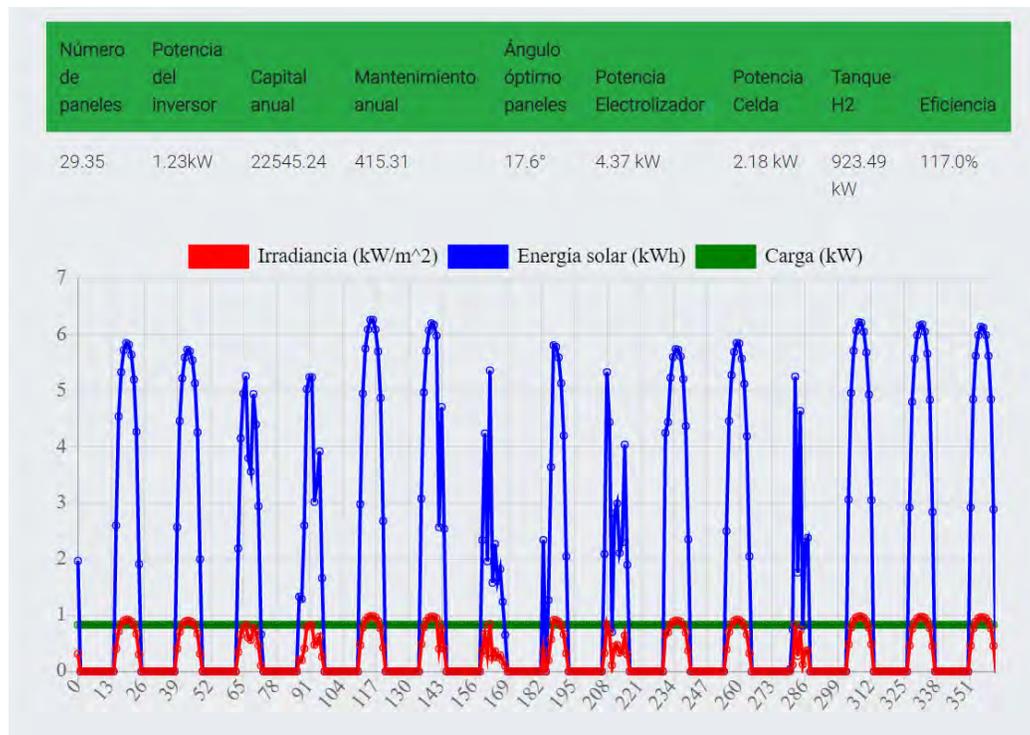


Figura 6.1 Resultados del dimensionamiento para el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno y carga en kWh/día.

6.1.2. Sistema Eólico-Hidrógeno

Para el sistema Eólico-Hidrógeno se utilizaron como datos de entrada los mostrados en las tablas 6.3 y 6.4. En este caso la velocidad del viento se toma directamente desde los servidores del NREL, por lo que el usuario no necesita ingresarlos. En la figura 6.2 se muestra el resultado del dimensionamiento y las gráficas de la energía calculada con la solución proporcionada con el software donde se puede observar que la producción de energía satisface la carga en un 121 %.

Para esta configuración, la respuesta del sistema es única pues solo es necesario que se determine el número de aerogeneradores requeridos y el tamaño del tanque.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Q. Roo , Cancún	5 kW	N/A	Genérico	PEMFC

Tabla 6.3 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Eólico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
N/A	95 %	40 %	80 %	15 años

Tabla 6.4 Eficiencia de los componentes del sistema Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh/día.

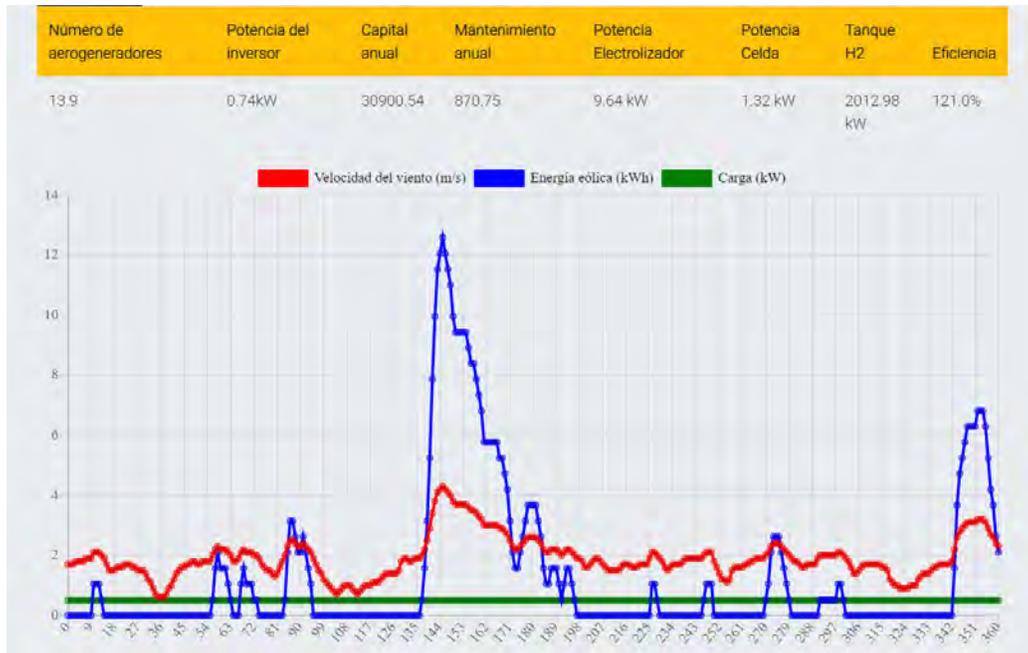


Figura 6.2 Resultados del dimensionamiento para el sistema Eólico-Hidrógeno y carga en kWh/día.

6.1.3. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno

En este caso el sistema es del tipo Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno por lo tanto, nos enfrentamos a un problema multiobjetivo donde pueden existir múltiples soluciones. Para problemas de este tipo, la solución implementada permite obtener soluciones múltiples donde cada una de ellas satisface los requisitos del problema como muestran las figuras 6.3 y 6.4.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Q. Roo, Chetumal	5 kW	Genérico	Vertical	PEMFC

Tabla 6.5 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
18 %	95 %	40 %	80 %	25 años

Tabla 6.6 Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh/día.

Número de paneles	Número de aerogeneradores	Potencia del Inversor	Capital anual	Mantenimiento anual	Ángulo óptimo paneles	Potencia Electrolizador	Potencia Celda	Tanque H2	Eficiencia
3.06	4.95	0.31kW	12962.07	1712.45	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %
0.0	5.84	0.31kW	12979.66	1809.62	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %
32.19	0.0	0.31kW	20603.42	1877.79	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %
13.8	2.61	0.31kW	14628.69	1613.0	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %
30.12	0.29	0.31kW	19924.97	1847.1	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %
1.23	5.79	0.31kW	13658.55	1866.16	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %
16.84	2.21	0.31kW	15686.66	1666.52	16.48°	2.43 kW	0.55 kW	509.48 kW	90.0 %

Figura 6.3 Resultados del dimensionamiento para el sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno y carga en kWh/día.

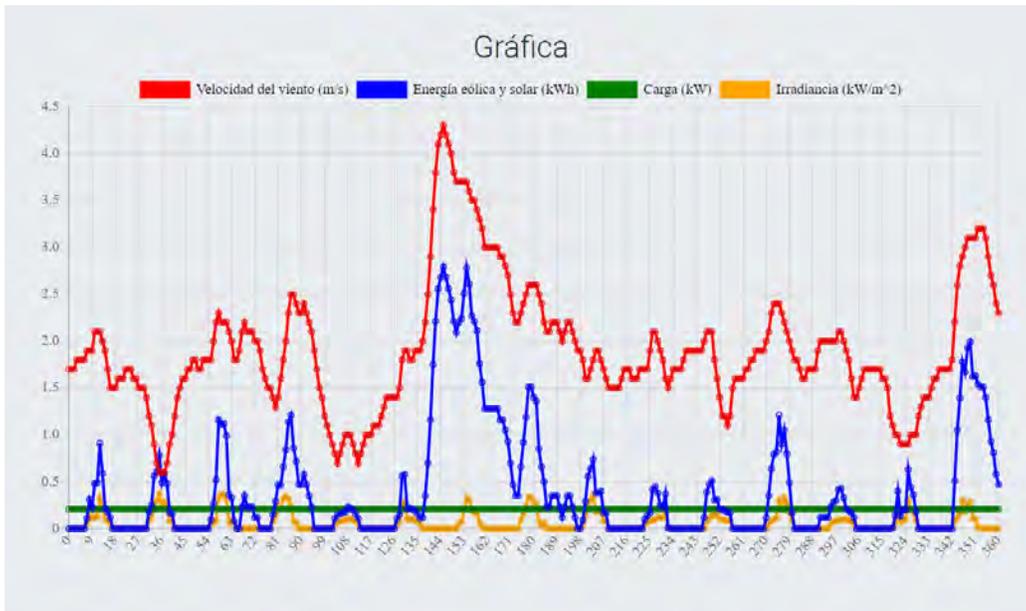


Figura 6.4 Comportamiento gráfico del Resultado del dimensionamiento en el tiempo para la modalidad de carga en kWh/día y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

6.2. Resultados para la modalidad de carga en kWh/mes

6.2.1. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

Hay ocasiones cuando se está realizando el dimensionamiento en el sistema Fotovoltaico-Hidrógeno y los datos de entrada, como por ejemplo la irradiancia, son mínimos se dispara el número de paneles solares requeridos como se observa la imagen 6.5. En este caso no es viable económicamente llevar a cabo el proyecto y por lo tanto, quizás sea mejor buscar otra ubicación con más recurso solar para llevarlo a cabo.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Yucatán, Baca	Ver anexo	Genérico	N/A	PEMFC

Tabla 6.7 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
18 %	95 %	40 %	80 %	25 años

Tabla 6.8 Datos de entrada internos del software para el sistema de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.

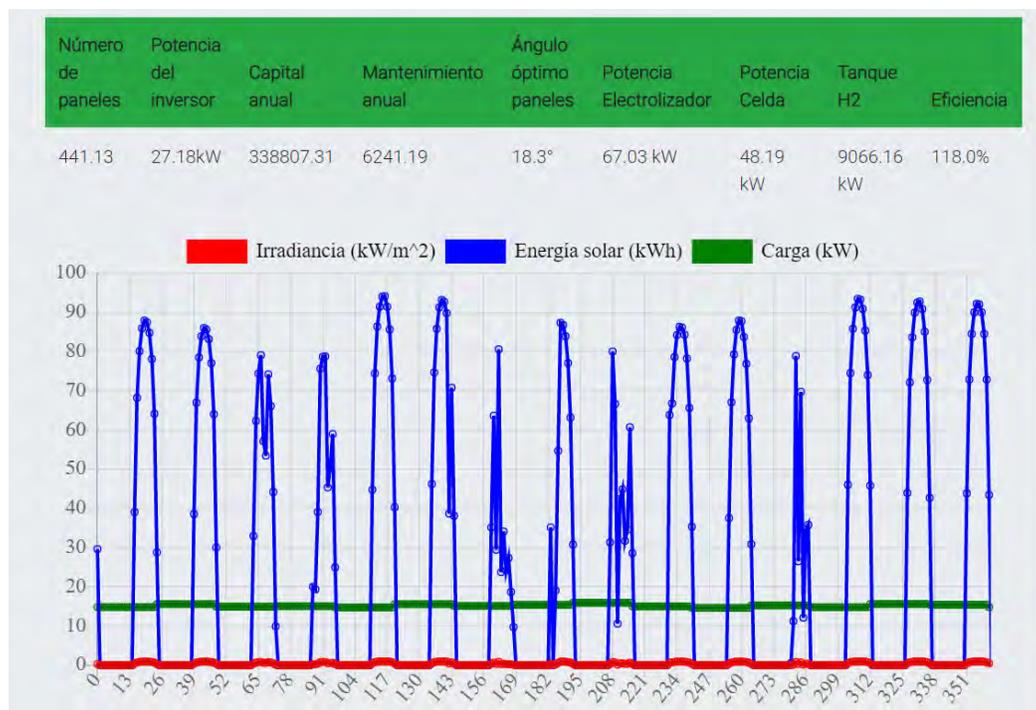


Figura 6.5 Resultados para el caso kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.

6.2.2. Sistema Eólico-Hidrógeno

Al dimensionar sistemas de este tipo hay que tener la disponibilidad del recurso eólico ya que si no es suficiente, los aerogeneradores no pueden entregar la potencia nominal para la cual están diseñados, lo que ocasiona altos costos de inversión y poca producción de energía como se observa en la figura 6.6.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Q. Roo, Mahahual	6 kW	N/A	Genérico	PEMFC

Tabla 6.9 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
N/A	95 %	40 %	80 %	20 años

Tabla 6.10 Datos de entrada internos del software para el sistema de carga en kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno.

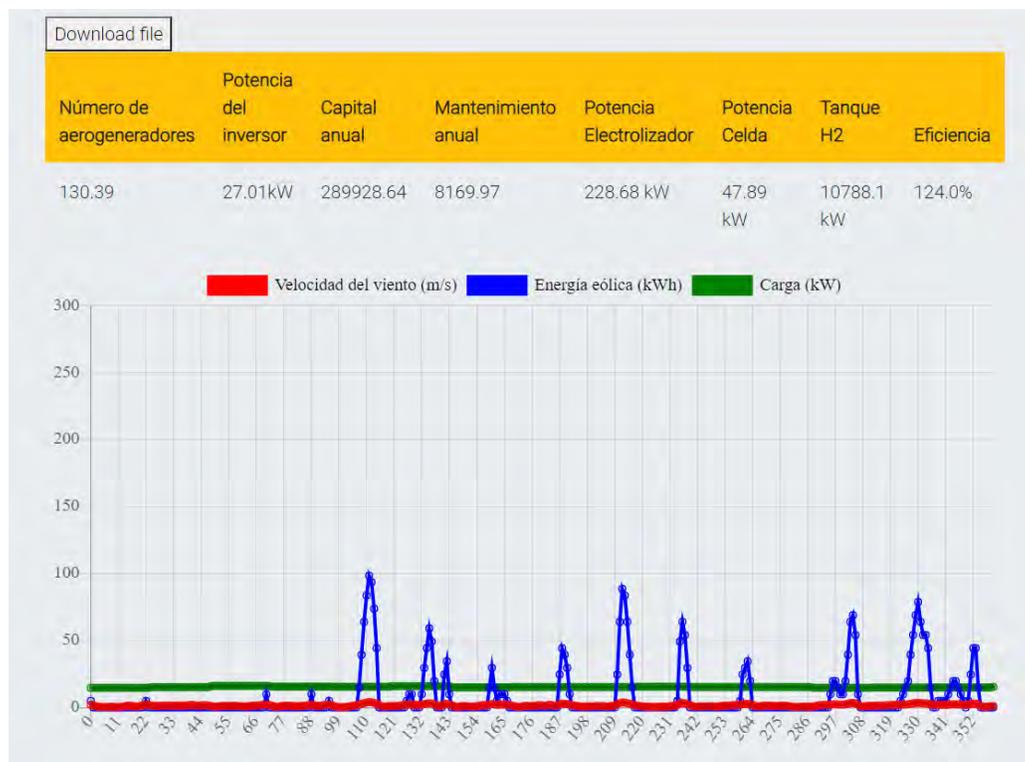


Figura 6.6 Resultados del dimensionamiento para el caso kWh/mes y sistema Eólico-Hidrógeno.

6.2.3. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno

De los sistemas antes dimensionados el que tuvo la eficiencia optima fue con la carga en kWh/mes. En la figura 6.8 se puede observar que el sobredimensionamiento es mínimo alcanzando apenas un 10 %.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Yucatán, Baca	Ver anexo	Genérico	Horizontal	PEMFC

Tabla 6.11 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
18 %	95 %	40 %	80 %	20 años

Tabla 6.12 Datos de entrada internos del software para el sistema de carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno-Hidrógeno.

RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO
Herramienta de cómputo para el dimensionamiento de un sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

[Download file](#)

Número de paneles	Número de aerogeneradores	Potencia del inversor	Capital anual	Mantenimiento anual	Ángulo óptimo paneles	Potencia Electrolizador	Potencia Celda	Tanque H2	Eficiencia
0.0	360.98	27.07kW	912003.86	111903.02	18.28°	96.65 kW	47.99 kW	11066.14 kW	110.0 %
529.58	0.0	27.07kW	338956.27	30892.39	18.28°	96.65 kW	47.99 kW	11066.14 kW	110.0 %
27.1	332.06	27.07kW	856291.25	104519.73	18.28°	96.65 kW	47.99 kW	11066.14 kW	110.0 %
26.65	343.74	27.07kW	885507.46	108113.56	18.28°	96.65 kW	47.99 kW	11066.14 kW	110.0 %

Figura 6.7 Resultados para el caso kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

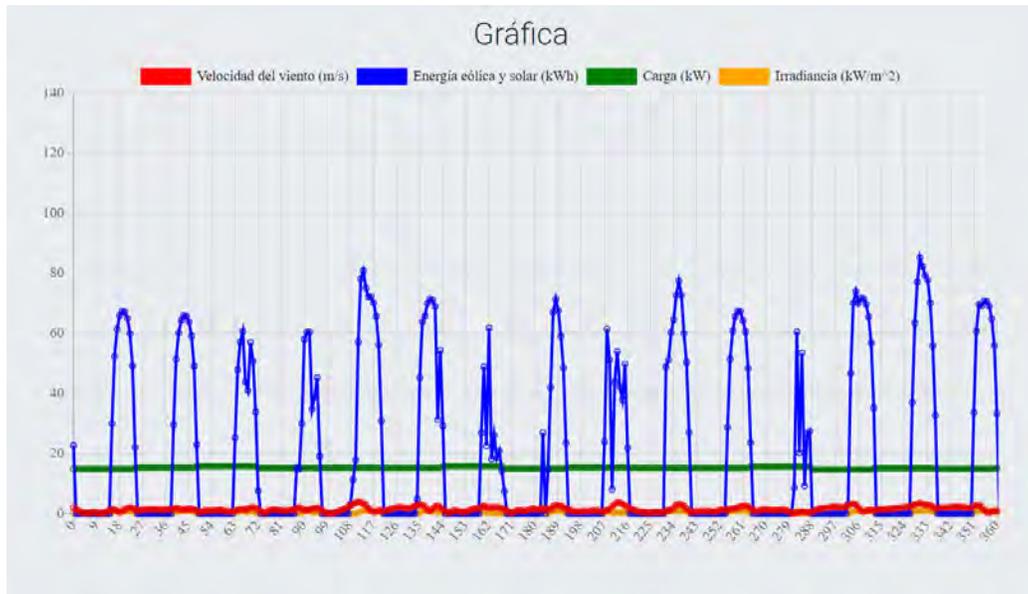


Figura 6.8 Comportamiento gráfico para el resultados en el caso de la carga en kWh/mes y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

6.3. Resultados para la modalidad de carga en kWh

6.3.1. Sistema Fotovoltaico-Hidrógeno

Cuando el usuario elige en el sistema el tipo de carga en kWh debe proporcionar los datos de irradiación , velocidad del viento, y carga con la que quiere realizar el dimensionamiento. Con los datos de entrada mostrados en las tablas 6.13 y 6.14 se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 6.9

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Q. Roo, Chetumal	Ver anexo	Policristalino	N/A	PEMFC

Tabla 6.13 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
13.5 %	95 %	40 %	80 %	25 años

Tabla 6.14 Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh.

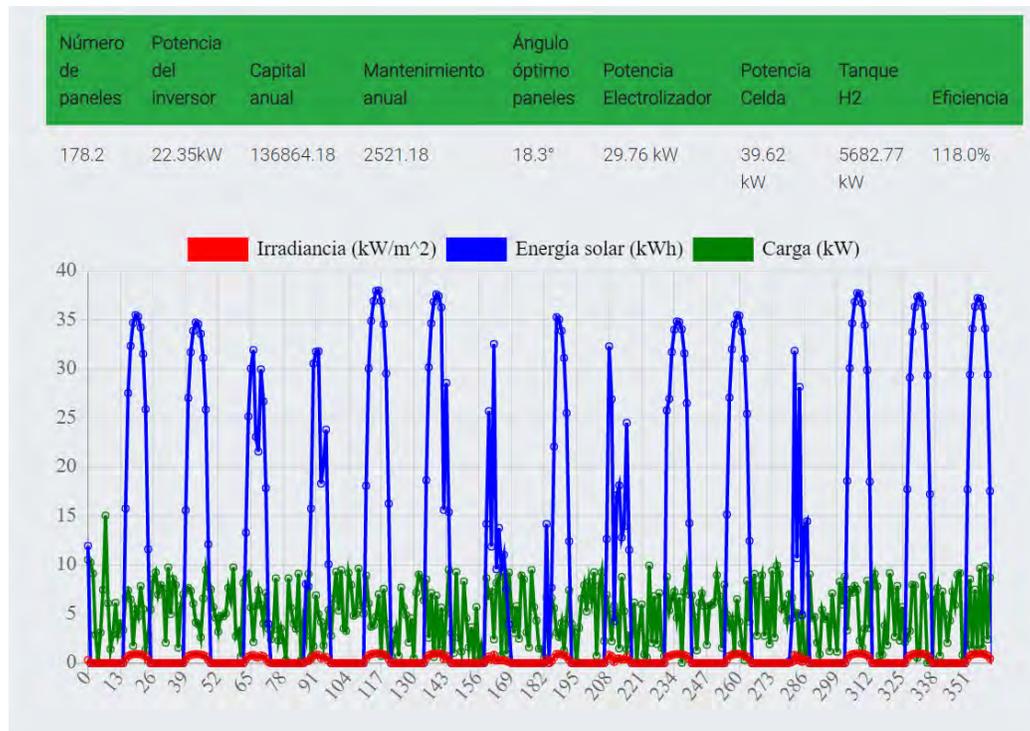


Figura 6.9 Resultados para la carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Hidrógeno.

6.3.2. Sistema Eólico-Hidrógeno

La cantidad de aerogeneradores obtenidas por la herramienta informática dependerá en gran medida de las características del aerogenerador seleccionado ya que cada uno de ellos tiene diferente velocidad de corte de inicio, velocidad nominal, potencia nominal y velocidad máxima permitida. De igual manera depende de la velocidad del viento ya que si esta es menor que la velocidad nominal, el aerogenerador no funcionará a su capacidad plena. Los efectos de dimensionar con velocidad del viento mucho menor que la velocidad nominal lo vemos en la figura 6.13 donde la consecuencia inmediata es el requerimiento de un elevado número de aerogeneradores para satisfacer la demanda de la carga.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
Estados Unidos, Arizona, Phoenix	ver Anexo	N/A	Horizontal	PEMFC

Tabla 6.15 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh y sistema Eólico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
N/A	95 %	40 %	80 %	15 años

Tabla 6.16 Eficiencia de los componentes del sistema Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh.

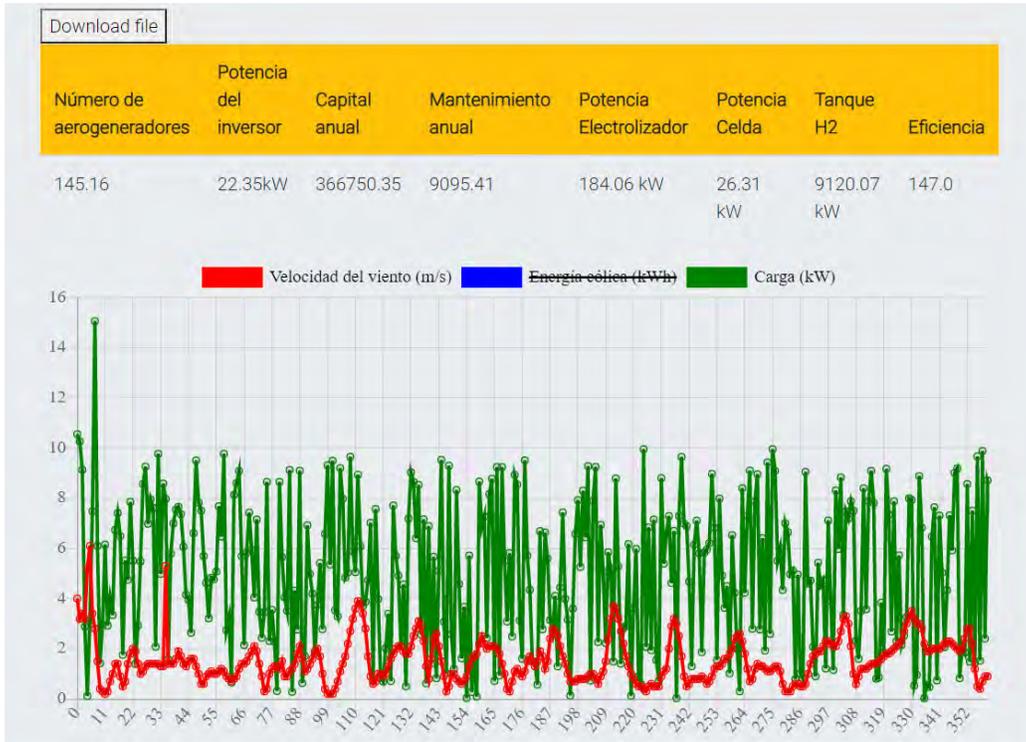


Figura 6.10 Resultados del dimensionamiento incluyendo velocidad del viento y carga.

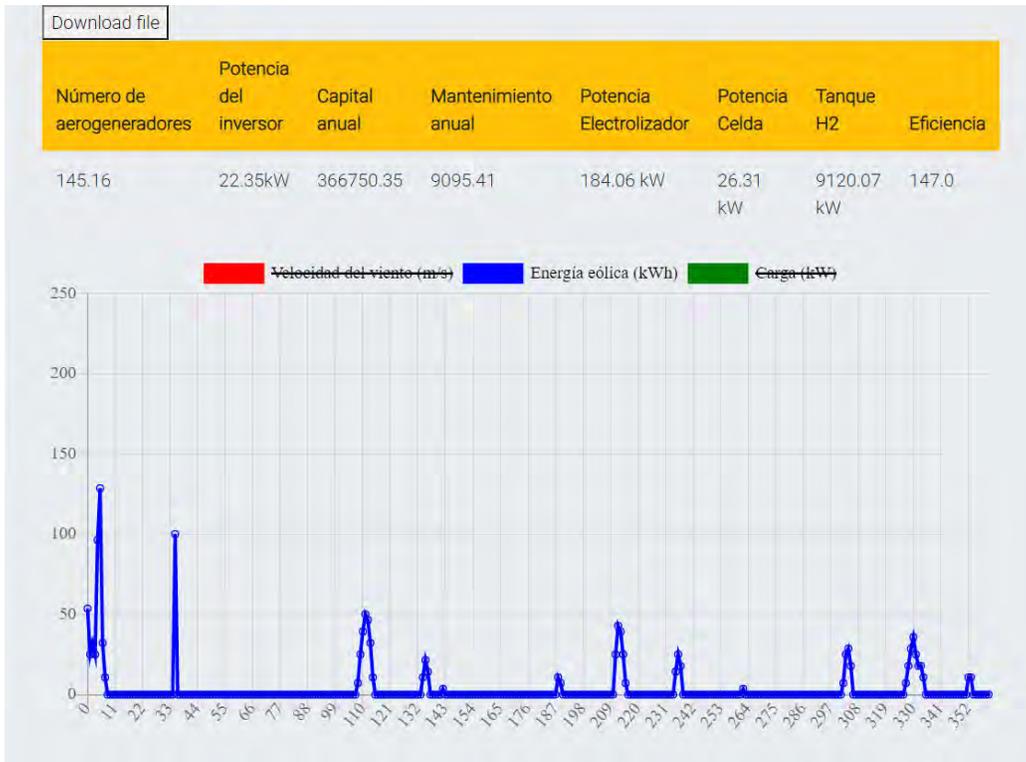


Figura 6.11 Total de la energía eólica generada.

6.3.3. Sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno

Aquí es importante mencionar que al momento de hacer el dimensionamiento de este tipo de sistema, la herramienta web proporciona más de 20 respuestas todas válidas, sin embargo, aquí para los fines que se persiguen se muestran cinco. En ellas vemos que la eficiencia es la misma, con un superávit de apenas el 11 %.

Datos de entrada del usuario				
Ubicación	Carga	Tipo de panel	Aerogenerador	Celda de combustible
México, Q. Roo, Cancún	ver Anexo	Monocristalino	Genérico	PEMFC

Tabla 6.17 Datos de entrada para la modalidad de carga en kWh y sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno.

Datos internos del sistema				
Eficiencia panel	Eficiencia inversor	Eficiencia PEMFC	Eficiencia electrolizador	Tiempo de vida proyecto
15 %	95 %	40 %	80 %	20 años

Tabla 6.18 Eficiencia de los componentes del sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno, tiempo de vida proyecto y carga en kWh.

Download file									
Número de paneles	Número de aerogeneradores	Potencia del inversor	Capital anual	Mantenimiento anual	Ángulo óptimo paneles	Potencia Electrolizador	Potencia Celda	Tanque H2	Eficiencia
214.81	0.0	22.35kW	137488.5	12530.67	18.3°	68.57 kW	39.62 kW	7020.01 kW	111.0 %
0.0	864.59	22.35kW	1660116.87	268021.85	18.3°	68.57 kW	39.62 kW	7020.01 kW	111.0 %
17.14	752.96	22.35kW	1456752.44	234417.74	18.3°	68.57 kW	39.62 kW	7020.01 kW	111.0 %
14.76	783.33	22.35kW	1513533.91	243692.01	18.3°	68.57 kW	39.62 kW	7020.01 kW	111.0 %
3.42	844.29	22.35kW	1623341.57	261930.73	18.3°	68.57 kW	39.62 kW	7020.01 kW	111.0 %

Figura 6.12 Resultados del dimensionamiento para el sistema Fotovoltaico-Eólico-Hidrógeno y carga en kWh.

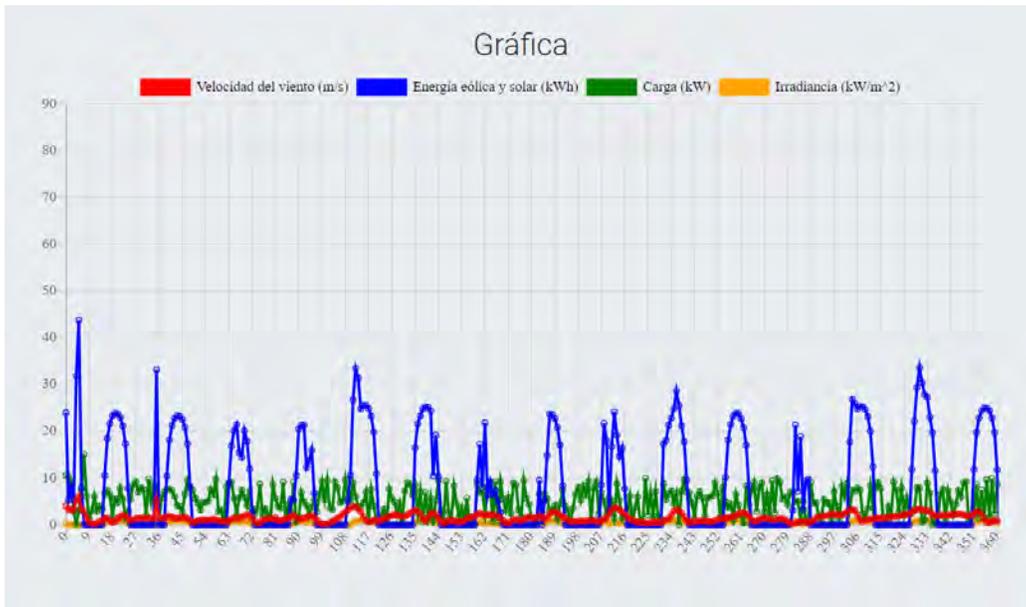


Figura 6.13 Energía eólica y solar generada por el número de paneles y aerogeneradores obtenidos.

6.4. Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis, se ha diseñado y codificado una herramienta de cómputo con tecnología Web que permite dimensionar la potencia requerida de los diferentes componentes de un sistema híbrido de generación de energía. Dicha herramienta resuelve dos problemas principales que presentan software similares: en primer lugar es un software muy amigable con el usuario, pudiendo ser utilizado, incluso, por personas sin conocimientos técnicos sobre el tema, en segundo lugar, es un software gratuito donde el usuario tiene la facilidad de modificar el código fuente del mismo y hacer las personalizaciones que considere necesarias.

Para la codificación del sistema se eligió el lenguaje de programación Pyt-

hon, el cual resultó ser una excelente opción debido al amplio repertorio de aplicaciones desarrolladas en él por su gran comunidad de usuarios, lo cual ahorra tiempo al momento de desarrollar aplicaciones de este tipo.

Nuestro software es una buena opción para dimensionar sistemas energéticos híbridos sustentables donde la cantidad de aerogeneradores y paneles solares requeridos no excede las 1,000 unidades.

PSO es una muy buena opción cuando se abordan problemas multiobjetivo en los cuales intervienen grandes cantidades de datos y no existe una fórmula o un algoritmo ya establecido que dé solución a la problemática de forma directa y fácil.

En conclusión se puede afirmar que con el desarrollo de la herramienta de cómputo se cumplieron tanto el objetivo general como los objetivos específicos planteados al inicio del proyecto.

Bibliografía

- [1] R. Aguilar, F. Pérez, and M. Gil, “Evaluación de inversiones en generación eólica en argentina,” 01 2010.
- [2] “CELDAS DE COMBUSTIBLE - PDF Free Download,” 07 de Julio de 2020. [Online]. Available: <https://docplayer.es/58192158-Celdas-de-combustible.html>
- [3] V. M. Sanchez, A. Chavez-Ramirez, S. M. Duron-Torres, J. Hernandez, L. Arriaga, and J. M. Ramirez, “Techno-economical optimization based on swarm intelligence algorithm for a stand-alone wind-photovoltaic-hydrogen power system at south-east region of Mexico,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 29, pp. 16 646–16 655, Oct. 2014. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319914016759>
- [4] H. Belmili, M. F. Almi, B. Bendib, and S. Bolouma, “A computer program development for sizing stand-alone photovoltaic-wind hybrid systems,” *Energy procedia*, vol. 36, no. 1, pp. 546–557, 2013.
- [5] S. Alsadi and T. Khatib, “Photovoltaic power systems optimization research status: A review of criteria, constrains, models, techniques, and software tools,” *Applied Science*, vol. 10, no. 8, pp. 1761–1791, 2018.
- [6] F. Vivas, A. D. las Heras, F. Segura, and J. Andújar, “A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup,” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no. 1, pp. 126–155, 2018.
- [7] L. Bartolucci, S. Cordiner, V. Mulone, V. Rocco, and J. L. Rossi, “Hybrid renewable energy systems for renewable integration in microgrids:

- Influence of sizing on performance,” *Energy*, vol. 152, no. 1, pp. 744–758, 2018.
- [8] R. Foster, M. Ghassemi, and A. Cota, *Solar energy: renewable energy and the environment*, ser. Energy and the environment. Boca Raton: CRC Press, 2010, oCLC: ocn226357399.
- [9] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, and J. Gómez, “Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 4, pp. 1753–1766, May 2011. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032110004430>
- [10] R. Nagaraj, D. Thirugnanamurthy, M. M. Rajput, and B. Panigrahi, “Techno-economic analysis of hybrid power system sizing applied to small desalination plants for sustainable operation,” *International Journal of Sustainable Built Environment*, vol. 5, pp. 269–276, 2016.
- [11] M. Castañeda, A. Cano, F. Jurado, H. Sánchez, and L. M. Fernández, “Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid system,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 10, pp. 3830–3845, Apr. 2013. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319913001894>
- [12] A. Maleki and A. Askarzadeh, “Comparative study of artificial intelligence techniques for sizing of a hydrogen-based stand-alone photovoltaic/wind hybrid system,” *Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 9973–9984, 2014.
- [13] J. Lagorse, M. G. Simoes, A. Miraoui, and P. Costerg, “Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications,” *Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 1, pp. 2871–2879, 2008.
- [14] I. Tegani, A. Aboubou, M. Ayad, R. Saadi, M. Becherif, M. Bahri, and O. K. M. Benaouadj, “Experimental validation of differential flatness-based control applied to stand alone using photovoltaic/fuel cell/battery hybrid power sources,” *Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 1510–1517, 2017.

- [15] A. Khiareddine, C. B. Salah, D. Rekioua, and M. F. Mimouni, "Sizing methodology for hybrid photovoltaic /wind/ hydrogen/battery integrated to energy management strategy for pumping system," *Energy*, vol. 153, no. 1, pp. 743–762, 2018.
- [16] R. Barbosa, V. M. Sanchez, B. Escobar, J. C. Cruz, and H. Toral-Cruz, "Sizing of a solar-hydrogen power source for a portable emergency communication system: Case study of hurricanes in cancu, mexico," *Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 1, pp. 17 361–17 370, 2015.
- [17] A. Yunez-Cano, R. de G. González-Huerta, M. Tufiño-Velázquez, R. Barbosa, and B. Escobar, "Solar-hydrogen hybrid system integrated to a sustainable house in mexico," *Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 1, pp. 17 361–17 370, 2016.
- [18] R. Barbosa, B. Escobar, V. M. Sanchez, J. Hernandez, R. Acosta, and Y. Verde, "Sizing of a solar/hydrogen system for high altitude long endurance aircrafts," *Hydrogen Energy*, vol. 39, pp. 16 637–16 645, 2014.
- [19] C. Darras, S. Sailler, C. Thibault, M. Muselli, P. Poggi, J. Hoguet, S. Melscoet, E. Pinton, S. Grehant, F. Gailly, C. Turpin, S. Astier, and G. Fontés, "Sizing of photovoltaic system coupled with hydrogen/oxygen storage based on the oriente model," *Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 3322–3332, 2010.
- [20] Tégani, A. Aboubou, M. Ayad, M. Becherif, R. Saadi, and O. Kraa, "Optimal sizing design and energy management of stand-alone photovoltaic/wind generator systems," *Energy Procedia*, vol. 150, no. 1, pp. 163–170, 2014.
- [21] W. Zhang, A. Malekic, M. A. Rosend, and J. Liue, "Sizing a stand-alone solar-wind-hydrogen energy system using weather forecasting and a hybrid search optimization algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 180, pp. 609–621, 2019.
- [22] I. Kim, J.-A. James, and J. Crittenden, "The case study of combined cooling heat and power and photovoltaic systems for building customers using HOMER software," *Electric Power Systems Research*, vol. 143, pp. 490–502, Feb. 2017. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378779616304680>

- [23] B. O. Bilal, V. Sambou, C. Kébé, P. A. Ndiaye, and M. Ndong, “Methodology to size an optimal stand-alone pv/wind/diesel/battery system minimizing the levelized cost of energy and the co2 emissions,” *Energy Procedia*, vol. 14, no. 1, pp. 1636–1647, 2012.
- [24] J. L. Bernal-Agustín and R. Dufo-López, “Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2111–2118, Oct. 2009. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109000215>
- [25] M. Mehrpooya, M. Mohammadia, and E. Ahmadi, “Techno-economic-environmental study of hybrid power supply system: A case study in iran,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 25, pp. 1–10, 2018.
- [26] Y. Sawle, S. C. Gupta, and A. K. Bohre, “Optimal sizing of standalone pv/wind/biomass hybrid energy system using ga and pso optimization technique,” *Energy Procedia*, vol. 117, no. 1, pp. 690–698, 2017.
- [27] O. Breitenstein and S. Rißland, “A two-diod emodel regarding the distributed series resistance,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 110, pp. 77–86, 2013.
- [28] K. Ishaque, Z. Salam, and H. Taheri, “Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 95, pp. 586–594, 2011.
- [29] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, and Syafaruddin, “Modeling and simulation of photovoltaic (pv) system during partial shading based on a two-diode model,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, no. 1, pp. 1613–1626, 2011.
- [30] A. C. Atoche, J. V. Castillo, J. O. Aguilar, R. Carrasco-Alvarez, J. S. Gío, and A. C. Menchi, “A high-accuracy photovoltaic emulator system using arm processors,” *Solar Energy*, vol. 120, no. 1, pp. 389–398, 2015.
- [31] H. M. Poggi-Varaldo, A. M. Reyes, J. A. Pineda-Cruz, and S. Caffarel-Méndez, *Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía*, 1st ed. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 2009.

- [32] R. G. Nix, “Wind energy as a significant source of electricity,” *NREL/TP*, pp. 1–9, 1995.
- [33] M. Islam, S. Mekhilef, and R. Saidur, “Progress and recent trends of wind energy technology,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 456–468, May 2013. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113000312>
- [34] S. Mathew and G. S. Philip, Eds., *Advances in Wind Energy and Conversion Technology*. Berlin: Springer, 2011, oCLC: 740952952.
- [35] B. Sørensen, *Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications*, 1st ed., ser. Sustainable world series. Amsterdam ; Boston: Elsevier Academic Press, 2005, oCLC: ocm57719054.
- [36] K.-D. Kreuer, *Fuel Cells*, 1st ed. Springer Science +Business Media, 2012.
- [37] A. Arshad, H. M. Ali, A. Habib, M. A. Bashir, M. Jabbal, and Y. Yan, “Energy and exergy analysis of fuel cells: A review,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 9, pp. 308–321, 2019.
- [38] J. G.O.Marques, A. L.Costa, and C. Pereira, “Gibbs free energy Δg analysis for the naoh (sodium-oxygen-hydrogen) thermochemical water splitting cycle,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 29, pp. 14 536–14 549, 2019.
- [39] S. Vázquez, V. Diaz, M. Corengia, and L. Suescun, “Modelado de una celda combustible de Óxido sólido (sofc) para uso residencial,” *Ingeniería Química Uruguay*, vol. 79, pp. 74–79, 01 2014.
- [40] Y. Chena, X. Wang, L. Chena, C. Chena, Q. Wang, and C. A. Sequeira, “Electrochemical properties of rare-earth based hydrogen storage alloy for replacing pt as the anode electrocatalyst in afc,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 421, pp. 223–227, 2006.
- [41] E. Carcadea, M. Varlam, M. Ismail, D. B. Ingham, A. Marinouiu, M. Raceanu, C. Jianu, L. Patularu, and D. Ion-Ebrasu, “Pem fuel cell performance improvement through numerical optimization of the parameters of the porous layers,”

- International Journal of Hydrogen Energy*, 2019. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919332380>
- [42] L. A. Alban VERGNAUD, Jean-Baptiste FASQUEL, “Python based internet tools in control education,” *IFAC(International Federation Of Automatic Control)*, vol. 48, no. 29, pp. 43–48, 2015.
- [43] “The Web framework for perfectionists with deadlines | Django.” [Online]. Available: <https://www.djangoproject.com/>
- [44] L. James V. Miranda, “PySwarms: a research toolkit for Particle Swarm Optimization in Python,” *The Journal of Open Source Software*, vol. 3, no. 21, p. 433, Jan. 2018. [Online]. Available: <http://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.00433>
- [45] A. Nebro, J. Durillo, J. García-Nieto, C. Coello, F. Luna, and E. Alba, “Smpso: A new pso-based metaheuristic for multi-objective optimization,” pp. 66 – 73, 05 2009.
- [46] J. Blank and K. Deb, “pymoo: Multi-objective Optimization in Python,” *IEEE Access*, pp. 1–1, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9078759/>
- [47] “Platypus - Multiobjective Optimization in Python — Platypus documentation.” [Online]. Available: <https://platypus.readthedocs.io/en/latest/>
- [48] “Welcome to GeoPy’s documentation! — GeoPy 2.0.0 documentation.” [Online]. Available: <https://geopy.readthedocs.io/en/stable/>
- [49] “Chart.js | Open source HTML5 Charts for your website.” [Online]. Available: <https://www.chartjs.org/>
- [50] “Solar Research.” [Online]. Available: <https://www.nrel.gov/solar/index.html>
- [51] “Requests: HTTP for Humans™ — Requests 2.24.0 documentation.” [Online]. Available: <https://requests.readthedocs.io/en/master/>
- [52] “JSON.” [Online]. Available: <https://www.json.org/json-en.html>

Anexos A

Anexo I: Código fuente del archivo de configuración

```
1 {
2   "economico":{
3     "INTERES": 0.2,
4     "TIEMPOVIDAPROYECTO":25.0
5   },
6   "celda":{
7     "eficienciaElectrolizador":0.80,
8     "eficienciaCelda":0.40,
9     "hidrogenoEnElTanque":40.0
10
11  },
12  "inversor":{
13    "eficienciaInversor":0.95,
14    "factorPotencia": 0.8,
15    "factorSeguridad": 1.25
16
17  },
18  "panelGenerico":{
19    "area":1.20,
20    "eficiencia":0.18,
21    "potencia":0.230,
22    "precio":3800.0,
```

```
23         "costoMantenimiento":70.0
24     },
25     "panelMonocristalino":{
26         "area":1.955,
27         "eficiencia":0.15,
28         "potencia":0.400,
29         "precio":3800.0,
30         "costoMantenimiento":100.0
31     },
32     "panelPolicristalino":{
33         "area":1.957,
34         "eficiencia":0.135,
35         "potencia":0.499,
36         "precio":3650.0,
37         "costoMantenimiento":100.0
38     },
39     "AerogeneradorGenerico":{
40         "velocidadCorteInicio":2.8,
41         "velocidadCorteFinal":40.0,
42         "velocidadNominal":14.0,
43         "potenciaNominal":0.410,
44         "precio":9500.0,
45         "costoMantenimiento":310.0
46     },
47     "AerogeneradorHorizontal":{
48         "velocidadCorteInicio":3.0,
49         "velocidadCorteFinal":87.0,
50         "velocidadNominal":19.0,
51         "potenciaNominal":1.6,
52         "precio":12500.0,
53         "costoMantenimiento":310.0
54     },
55     "AerogeneradorVertical":{
56         "velocidadCorteInicio":1.9,
57         "velocidadCorteFinal":100.0,
58         "velocidadNominal":18.0,
59         "potenciaNominal":2.3,
60         "precio":11001.0,
61         "costoMantenimiento":310.0
62     }
```


Anexos B

Anexo II: Código fuente del programa

