



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE
COMBUSTIBLE EN LA ENM

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jesús Romero González

DIRECTORES: Víctor Alfonsín Pérez

Andrés Suárez García

CURSO ACADÉMICO: 2014-2015

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE
COMBUSTIBLE EN LA ENM

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_deVigo

RESUMEN

La energía eólica es utilizada generalmente en la red eléctrica. Sin embargo dicho uso no es demasiado eficiente, puesto que para adaptar la energía eléctrica a las características de la red, es necesario rectificarla en un proceso que disminuye su eficiencia energética. Además su uso estaría limitado a las necesidades energéticas de la red eléctrica.

Por otra parte, el almacenamiento de esta energía eléctrica es problemático, ya que el método tradicional es utilizando baterías, pero dichos sistemas están muy limitados tanto en capacidad, vida útil y precio.

Otro método de almacenamiento posible sería mediante la obtención de hidrógeno a través de la electrólisis. Dicho proceso permite utilizar la corriente eléctrica de forma más eficiente y transformar agua en hidrógeno. A posteriori dicho hidrógeno podrá ser reconvertido en energía eléctrica mediante una pila de combustible.

En este trabajo de fin de grado se propone la simulación y obtención de resultados de un generador eléctrico de pila de combustible, utilizando la energía eléctrica procedente de generadores eólicos ubicados en la ENM.

PALABRAS CLAVE

Aerogenerador, electrolizador, pila de combustible, energías renovables, MATLAB®, SIMULINK®.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por haber estado conmigo apoyándome y dándome lo mejor que ellos tenían desde el día en que nací. Del mismo modo quiero agradecer a mis hermanos por haber tenido el placer de poder compartir con ellos en la misma casa durante años de mi vida, los cuales han sido inolvidables. Quiero mencionar a mi abuela que a pesar de la edad, es para mí una persona que ha compartido conmigo el conocimiento y su sabiduría de la vida dado su bagaje en la misma. También y aunque ya no me acompañe, mi abuelo me ha servido de guía en los peores momentos. A mi novia por haber estado junto a mí, haciéndome sonreír en las buenas situaciones y apoyándome en las malas. A estas personas citadas, siempre las llevaré en mi corazón.

También quiero agradecer el interés, la atención y el apoyo mostrado por mi tutor Víctor durante el desarrollo y realización del trabajo.

Así mismo, debo reconocer la ayuda prestada por la Escuela Naval Militar, en especial al destino de mantenimiento por que en mayor o menor medida han contribuido a la realización de este trabajo.

Por último, agradecer a la promoción 415-145 por haberme acompañado durante 5 intensos años esta travesía que ya acaba.

A todos ellos, muchas gracias.

Contenido

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción	6
1.1 Actual situación energética	6
1.2 Recurso alternativo	7
1.3 Energía eólica	10
1.3.1 Aerogenerador.....	10
1.4 Almacenamiento del recurso eólico.....	12
1.4.1 Baterías	12
1.4.2 Limitaciones de la batería	17
1.5 Hidrogeno como portador de energía	17
1.5.1 Electrolizador	18
1.5.2 Pila de combustible.....	19
1.6 Combustibles alternativos	22
1.6.1 Biocombustibles	22
1.6.2 Gas natural	22
1.6.3 Hidrógeno.....	22
2 Desarrollo del TFG	25
2.1 Introducción	25
2.2 Aerogenerador	25
2.2.1 Aerogenerador seleccionado	26
2.2.2 Modelo del aerogenerador	27
2.3 Batería	29
2.3.1 Batería seleccionada	29
2.3.2 Modelo de la batería	30
2.4 Electrolizador	37
2.4.1 Electrolizador seleccionado	37
2.4.2 Modelo del electrolizador	39
2.5 Tanque de almacenamiento.....	40
2.5.1 Tanque de almacenamiento seleccionado.....	40
2.5.2 Modelado del tanque de almacenamiento.....	41
2.6 Pila de Combustible	42
2.6.1 Pila de combustible seleccionada	42

2.6.2 Modelado de la pila de combustible	44
2.7 Modelo global.....	46
3 Simulación del sistema	48
3.1 Presentación de resultados anuales.....	48
3.1.1 Potencia generada	48
3.1.2 Hidrógeno generado	49
3.1.3 Energía generada	50
3.2 Presentación de resultados mensuales	50
4 Conclusiones	51
4.1 Conclusiones	51
5 Líneas futuras	53
6 Bibliografía.....	54
Anexo I: Contenido del primer anexo	56

Índice de Figuras

Figura 1: Historia y previsión de la producción global de petróleo (1900-2150).....	6
Figura 2: Evolución de la población mundial	7
Figura 3: Comparación del nivel de ruido (en dB) de un aerogenerador con acciones cotidianas. ...	9
Figura 4: Generación del mes de diciembre de 2014, en España.....	10
Figura 5: Tipos de aerogeneradores (el enmarcado es el usado en el proyecto).....	11
Figura 6: Generador eólico convencional.	12
Figura 7: Representación de una batería de Pb-ácido.....	13
Figura 8: Batería de NiCd.	14
Figura 9: Baterías de Ni-Hidruro Metálico.	15
Figura 10: Batería de litio.	16
Figura 11: Similitud entre el almacenaje de “energía” y “materia”.	18
Figura 12: Esquema simplificado de un electrolizador y sus componentes	19
Figura 13: Electrolisis del agua (izquierda), pila de combustible (derecha).....	20
Figura 14: Pila de combustible básica.	20
Figura 15: Representación básica de las reacciones en una pila, (a) cuando el electrolito es un conductor iónico y (b) cuando es un conductor protónico.	21
Figura 16: Reacciones que se producen en la pila de combustible.	21
Figura 17: Aerogenerador seleccionado, WT6500 de Honeywell®.	26
Figura 18: Gráfica relación viento/ potencia, ofrecida por Honeywell®.	27
Figura 19: Superposición a la del polinomio calculado a la curva real del fabricante.	27
Figura 20: Diagrama de la Turbina WT6500 de Honeywell® en SIMULINK®.	28
Figura 21: Diagrama de flujo en SIMULINK® de la Turbina.	28
Figura 22: Curva potencia-velocidad de viento simulada en SIMULINK® (“Scope”).	29
Figura 23: T-1275 Plus de TROJAN BATTERY COMPANY ®.	30
Figura 24: Circuito equivalente simple de una batería de 6 celdas.	31
Figura 25: La gráfica presenta la variación de la tensión de circuito abierto de una batería frente a la profundidad de descarga.	31
Figura 26: Diagrama global de la batería.....	34
Figura 27: Extracto del bloque 1 de Matlab/Simulink®.....	34
Figura 28: Extracto del bloque 2 de Matlab/Simulink®.....	35
Figura 29: Extracto del bloque 3 de Matlab/Simulink®.....	35
Figura 30: Extracto del bloque 4 de Matlab/Simulink®.....	36
Figura 31: Extracto del bloque 5 de Matlab/Simulink®.....	36
Figura 32: Extracto del bloque 6 de Matlab/Simulink®.....	37

Figura 33: NMH2-500 de la casa MATHESON TRI-GAS®.....	37
Figura 34: Interior del electrolizador NMH2-500.....	38
Figura 35: Diagrama de flujo del electrolizador.	39
Figura 36: Diagrama completo del electrolizador en SIMULINK®.....	40
Figura 37: Depósito de hidrógeno H2-MHS2200 de la casa VONEN®.....	41
Figura 38: Diagrama de flujo que simula el tanque de hidrógeno en SIMULINK®.	42
Figura 39: Diagrama esquemático del sistema general.	42
Figura 40: Pila de combustible Nexa™ 1200W de la casa BALLARD ®.....	43
Figura 41: Gráfica relación hidrógeno consumido/potencia de salida, ofrecida por BALLARD®.	44
Figura 42: Superposición a la del polinomio calculado a la curva real del fabricante.	45
Figura 43: Superposición a la del polinomio calculado a la curva real del fabricante.	45
Figura 44: Diagrama general de la pila de combustible en SIMULINK®.	46
Figura 45: Presentación completa del sistema en SIMULINK®.	47
Figura 46: Esta gráfica muestra la potencia generada (W), frente al año 2014 (días)	48
Figura 47: Generación de H ₂ en litros por minuto frente a días del año 2014.....	49
Figura 48: Energía generada en kWh cada día del año 2014.....	50
Figura 49: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de enero.	56
Figura 50: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de febrero.	56
Figura 51: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de marzo.	57
Figura 52: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de abril.	57
Figura 53: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de mayo.	58
Figura 54: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de junio.	58
Figura 55: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de julio.	59
Figura 56: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de agosto.	59
Figura 57: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de septiembre.....	60
Figura 58: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de octubre.	60
Figura 59: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de noviembre.	61
Figura 60: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de diciembre.	61

Índice de Tablas

Tabla 1: Comparativa de diferentes tipos de baterías.....	17
Tabla 2: Densidades de energía de varios combustibles.....	23
Tabla 3: Principales métodos de almacenamiento.....	24
Tabla 4: Especificaciones técnicas de la turbina eólica WT6500 de Honeywell®.....	26
Tabla 5: Especificaciones de la batería T-1275 Plus de TROJAN BATTERY COMPANY ®.....	30
Tabla 6: Especificaciones técnicas del electrolizador NMH2-500 de MATHESON TRI-GAS®.....	38
Tabla 7: Especificaciones del depósito de hidrógeno H2-MHS2200 de la casa VONEN®.....	41
Tabla 8: Especificaciones de entrada y salida de la pila Nexa™ 1200W de BALLARD ®.....	44

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Actual situación energética

La necesidad de buscar nuevas alternativas a los métodos de obtención de energía convencionales es uno de los problemas más graves a los que se enfrentará el mundo en los próximos años.

Actualmente, la dependencia del transporte respecto de los combustibles fósiles es cercana al 100%. La necesidad nuevas fuentes de energía viene forzada por los dos siguientes factores:

- Previsible agotamiento de las reservas de petróleo existentes.

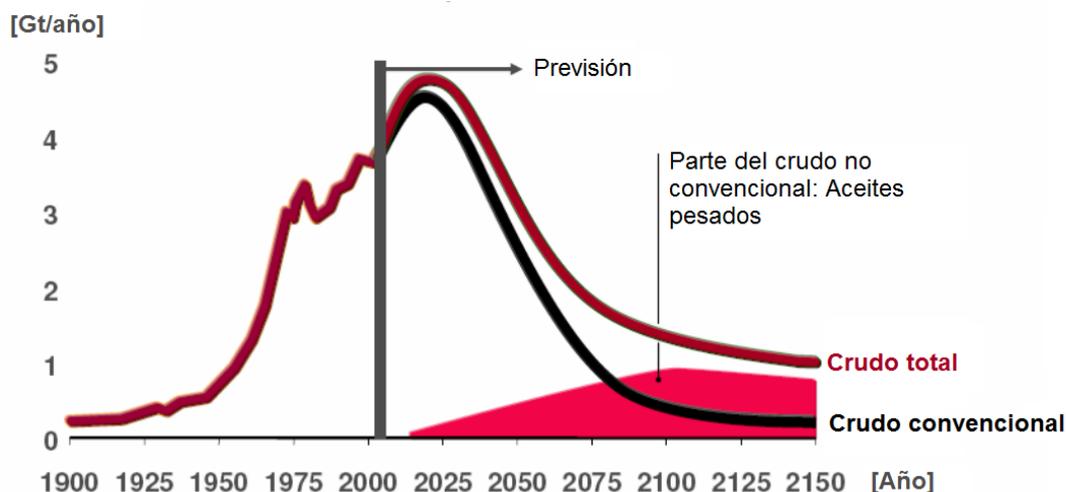


Figura 1: Historia y previsión de la producción global de petróleo (1900-2150).

A pesar de las discrepancias entre las diferentes fuentes, todas tienen en común un punto de inflexión donde la producción de petróleo caerá hasta mínimos. Dicho punto está centrado entre 2025 y 2035.

En la Figura 1, del *Federal Institute for Geosciences and Natural Resources* alemán, se aprecia como a partir del 2018 aproximadamente la producción de petróleo comenzara a decaer, además de iniciarse la extracción de petróleo en formas no convencionales, que por lo general es un proceso de refinado más costoso(1).

- Incremento del consumo global.

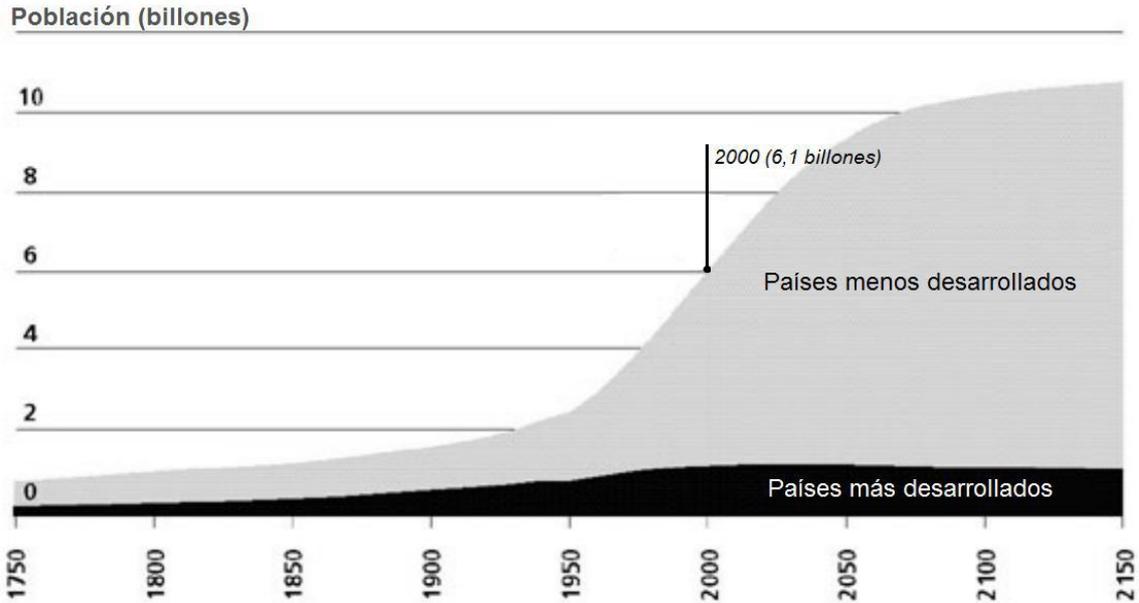


Figura 2: Evolución de la población mundial

Esto es principalmente debido al crecimiento demográfico y del nivel de vida de los países en vías de desarrollo. Como se observa en la Figura 2, el crecimiento de la población para las próximas décadas permite hacerse una idea del problema que será en un futuro abastecer energéticamente a todos los países del mundo y las grandes repercusiones económicas y políticas que esto puede acarrear.

En la actualidad existen razones por las que las energías renovables adquieren un interesante papel y en particular la energía eólica, como por ejemplo:

- Hoy en día se sustenta el consumo de energía en base a recursos limitados en su existencia, seguir así supondría llegar a tal punto que no se pueda abastecer a la población de energía y solo las sociedades más enriquecidas podrán acceder a este bien tan solicitado en nuestros días. Necesitamos la búsqueda de fuentes de energías no convencionales que permitan atender la demanda, ya que cada vez el consumo de energía por renta per cápita aumenta a medida que las sociedades se desarrollan.
- Potenciar fuentes de energía que ahorren combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) para reducir su peso y por lo tanto promover un modelo de desarrollo sostenible, además de ser capaz de suministrar energía mediante fuentes propias del país para lograr una mayor independencia energética del resto de economías.
- Limitar la emisión de gases contaminantes, residuos sólidos y líquidos con potencial de contaminación química y radiactiva (efecto invernadero, acidificación de la atmósfera, destrucción de la capa de ozono, etc.) (2).

1.2 Recurso alternativo

El aprovechamiento de la energía de las masas de aire en movimiento (el viento), viene siendo utilizada desde hace mucho tiempo en aplicaciones diversas que van desde el transporte marítimo y aplicaciones agrícolas (bombeo de agua o molienda de grano), hasta la generación de energía eléctrica a gran escala. Solo se mantiene a lo largo de los años una cosa: **aprovechar la energía que posee el viento, un recurso energético que nos ofrece la naturaleza completamente gratuita** y que en determinadas circunstancias puede alcanzar niveles muy importantes, llegando a sustituir parte de los métodos de recolección de energía convencionales (3).

Las fuentes de energía primaria se clasifican en:

- Fuentes no renovables. Son aquellos recursos formados durante muchos millones de años que permanecen en la Tierra y que una vez sean consumidos por el hombre no vuelven a regenerarse por lo que su agotamiento es progresivo (carbón, petróleo, gas natural, uranio, etc.)
- Fuentes renovables. Son recursos que se están continuamente regenerando a una velocidad similar a su consumo por el hombre (solar, eólica, biomasa, etc.)

La energía eólica es una de las tecnologías que más ha crecido en los últimos años que básicamente, utiliza la fuerza del viento para generar electricidad mediante aerogeneradores o “molinos de vientos” los cuales transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. Su funcionamiento es bien conocido, las aspas giran con el viento y un generador es el encargado de transformar el movimiento en energía.

Hay una gran cantidad de fuentes que hablan de energías limpias (renovables o verdes) así como la energía eólica, de la cual destacan sus principales ventajas (2):

- Representa la energía más limpia hasta el momento ya que no existe emisión de gases contaminantes, ni de efluentes líquidos ni gaseosos ni de residuos sólidos, tampoco utiliza agua.
- Respeto el medio ambiente y su pequeño impacto medioambiental se produce a escala local.
- Son energías seguras ya que su uso y posibles incidentes en su explotación no implican riesgos ambientales de gran impacto (derrames, explosiones, incendios, etc.). Tampoco suponen un riesgo para nuestra salud.
- El viento es una fuente inagotable de tal manera que se ahorra en combustibles fósiles, se diversifica el suministro energético autonomizando energéticamente las regiones.

También tiene problemas, claro (3).

- El viento es disperso, de gran variabilidad y fluctuación (tanto en velocidad como en dirección), por lo que no todos los lugares son adecuados para una explotación técnica y económicamente viable.
- Un aerogenerador puede producir ruido que podría llegar a ser molesto si está situado cerca de un núcleo habitado, como se aprecia en la Figura 3.

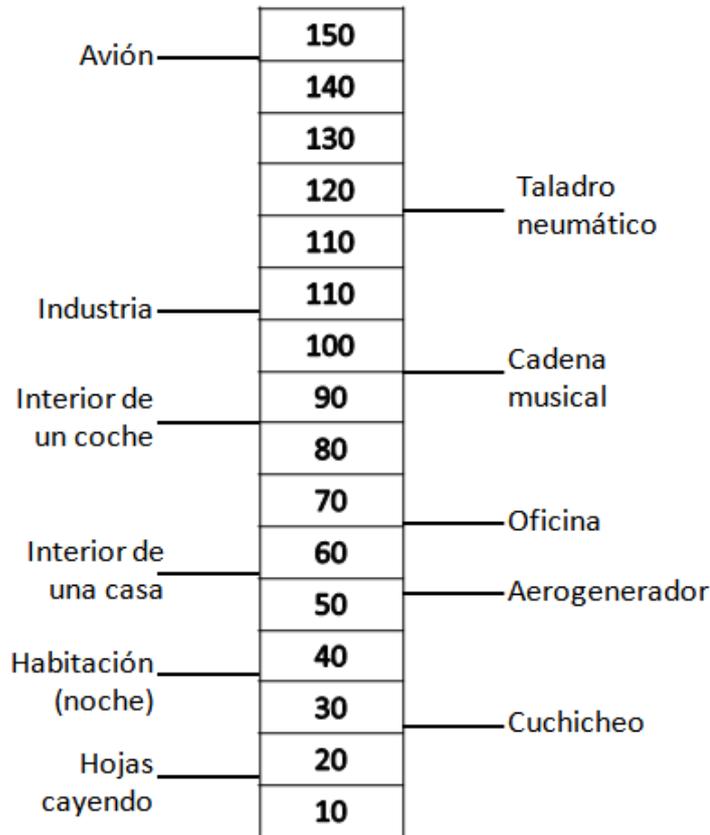


Figura 3: Comparación del nivel de ruido (en dB) de un aerogenerador con acciones cotidianas.

- Generalmente los parques eólicos se sitúan en las zonas más altas para favorecer la producción de electricidad, por lo que pueden producir un cierto impacto paisajístico al destacar la línea de aerogeneradores sobre el perfil de la cresta de la montaña.
- Impacto sobre la fauna, en particular sobre las aves.
- Ocupación del suelo, aunque solo alrededor de un 5% queda inutilizado, pudiendo ser usado el resto con fines agrícolas o agropecuarios.
- Interferencias con transmisiones electromagnéticas, los rotores de las centrales eólicas pueden producir interferencias con los campos electromagnéticos y afectar a la transmisión de señales.

A pesar de que parezcan muchos los efectos negativos citados anteriormente, están muy lejos de parecerse a los que producen los métodos convencionales de obtención de energía (nuclear, térmicas del carbón, etc), los cuales presentan unos niveles muy elevados de rechazo social frente a la gran aceptación que muestra la población hacia la energía eólica.

Las noticias y artículos que hablan sobre las esperanzas de futuro en estas tecnologías son innumerables, como por ejemplo los siguientes títulos de prensa:

- “Las eólicas españolas invertirán más de 9.000 millones en México” (4).
- “España, el país del viento” (5).

- “Gamesa y Areva crean una sociedad para desarrollar la eólica marina” (6).
- “Iberdrola compra aerogeneradores a Areva por 620 millones de euros” (7).
- “La eólica, primera tecnología de generación en diciembre” (8), véase Figura 4.

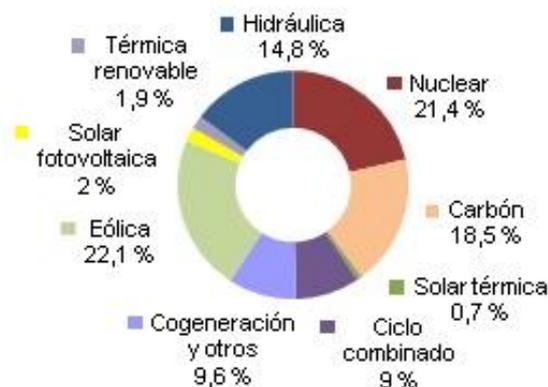


Figura 4: Generación del mes de diciembre de 2014, en España.

- “Iberdrola utilizará por primera vez aerogeneradores de 5 MW en el parque eólico marino alemán de Wikinger” (8).
- “Un parque eólico marino de última generación puede ahorrar hasta 45 millones de toneladas de CO₂” (8).
- “España necesita entre 4.500 y 6.500 MW de eólica más para cumplir con los objetivos europeos de 2020, según Industria” (8).
- “E.ON pone en marcha proyectos eólicos y solares a gran escala en Estados Unidos” (8).

Como se aprecia existen innumerables noticias relacionadas con este tema que reflejan las esperanzas de futuro y la convicción absoluta que las energías renovables, como en este caso la eólica, presentan una buena base de sustentación energética.

1.3 Energía eólica

La energía eólica es utilizada generalmente en la red eléctrica. Sin embargo dicho uso no es demasiado eficiente, puesto que para adaptar la energía eléctrica a las características de la red, es necesario rectificarla en un proceso que disminuye su eficiencia energética. Además, su uso estaría limitado a las necesidades energéticas de la red eléctrica.

Por otra parte, el almacenamiento de la energía eléctrica obtenida por los aerogeneradores es problemático, ya que el método tradicional es utilizando baterías. Dichos sistemas están muy limitados tanto en capacidad, vida útil y precio.

1.3.1 Aerogenerador

La mejoría continua del tradicional molino de viento, ha dado lugar a modernos aeromotores que sacan el máximo partido de la energía eólica para generar electricidad. Las turbinas eólicas modernas

pueden ser instaladas en agrupaciones o aisladas que suministran energía a las redes de distribución. Sin embargo el viento tiene dos características negativas, la variabilidad y su dispersión. Esto conlleva pequeños perfeccionamientos en el diseño de las palas y en el sistema de control para regular revoluciones y de tal modo evitar velocidades excesivas y orientar el rotor hacia la dirección del viento(9).

Las partes de un aerogenerador son las siguientes.

- **Los cimientos** son de hormigón y están contruidos en tierra, sobre el cual se atornilla la torre del aerogenerador.
- **La torre** proporciona la altura necesaria para evitar las turbulencias que pudiera traer el viento y para superar los obstáculos cercanos.
- **El chasis** es el soporte donde se apoya el aerogenerador, el sistema de frenado, el sistema de orientación, los equipos auxiliares, caja de cambio, etc. Da protección a estos equipos y a su vez sirve de aislante acústico.
- **El buje** es una pieza metálica de fundición que conecta el eje de la transmisión con las palas.
- **Las palas** se encargan de recoger la energía del viento. Además, el rendimiento del aerogenerador depende también de la geometría de las palas (véase Figura 5) , las cuales se miden por los siguientes factores:
 - Longitud
 - Perfil
 - Calaje
 - Anchura

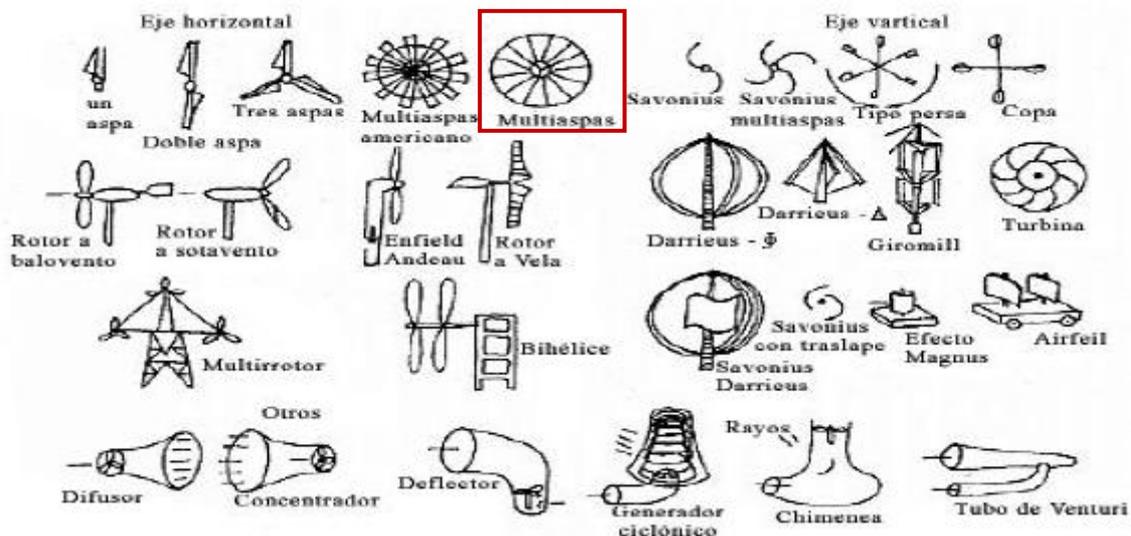


Figura 5: Tipos de aerogeneradores (el enmarcado es el usado en el proyecto).

Los sistemas de los que consta un aerogenerador son los siguientes:

- **Sist. de orientación** mantiene el rotor encarando al viento, haciendo mínimos los cambios de dirección del rotor con los de dirección del viento ya que estos si no se controlan generan grandes pérdidas de rendimiento.
- **Sist. de regulación** controla el par motor en el eje del rotor así como la velocidad del mismo, evitando así fluctuaciones producidas por la velocidad del viento.
- **Sist. de transmisión** se utiliza para aumentar la velocidad de giro del rotor con el fin de accionar un generador de corriente eléctrica colocado entre el rotor y el generador.
- **Sist. generador** es el encargado de la corriente continua mediante una dinamo y de la producción de corriente alterna con un alternador síncrono o asíncrono.



Figura 6: Generador eólico convencional.

1.4 Almacenamiento del recurso eólico

La innovación de este trabajo de fin de grado está íntimamente relacionada con el almacenamiento y los problemas que conlleva el uso de baterías. Se va a analizar las diferentes características así como ventajas y desventajas de los diferentes métodos de almacenamiento de la energía.

1.4.1 Baterías

Uno de las principales dificultades de la energía eléctrica, es el problema a la hora de su almacenamiento. Las baterías presentan una forma fiable de almacenar la energía eléctrica, convirtiéndola en energía química y viceversa. De tal modo se puede disponer de energía eléctrica sin depender de la red cuando se desee.

En los siguientes apartados de este capítulo se van a clasificar los diferentes tipos de baterías.

1.4.1.1 Baterías de PLOMO-ÁCIDO

Son un tipo de batería que se usa en vehículos convencionales, no híbridos. Normalmente son de 6 y 12V y están formadas internamente por celdas de 2V. Forman una parte importante del mercado mundial de baterías, tanto primarias como secundarias (10).

Tienen mucha capacidad de descarga durante un periodo de tiempo, lo que las hace útiles para el arranque de vehículos de combustión. Están formadas por un depósito de ácido sulfúrico y en su interior unas placas de plomo dispuestas alternadamente, véase Figura 7.

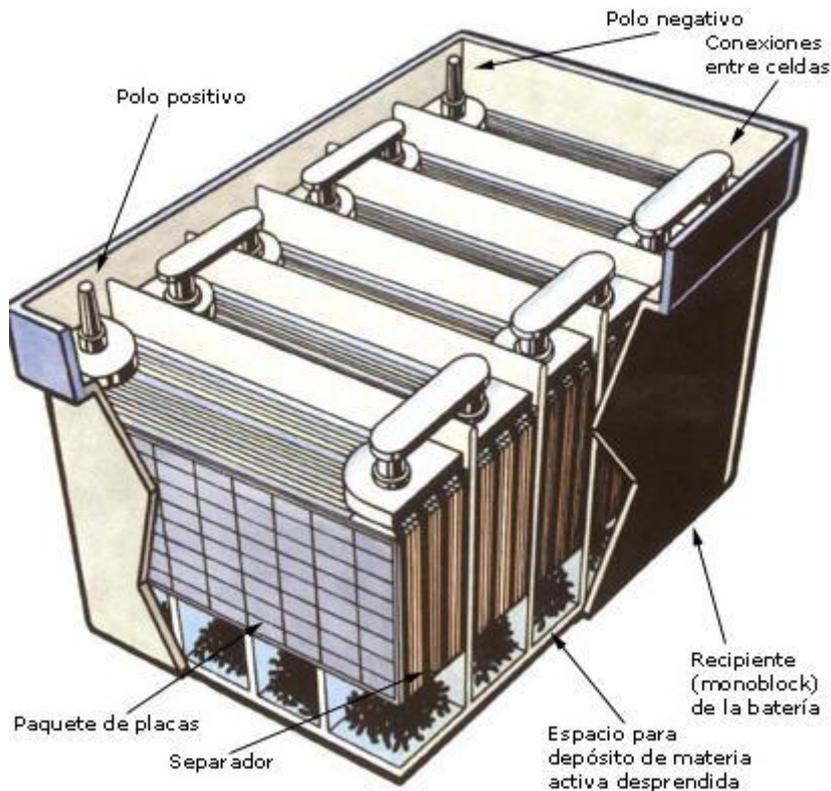


Figura 7: Representación de una batería de Pb-ácido.

Las principales características de estas baterías se pueden apreciar observando sus ventajas y desventajas que esta tecnología presenta.

Ventajas:

- Tecnología totalmente desarrollada y comprobada.
- Alta tensión por celda (2V), lo que permite obtener altas tensiones con menos celdas colocadas en serie.
- Muy buena capacidad para suministrar altos picos de corriente durante su descarga.
- Su tasa mensual de auto-descarga es de las más bajas, aproximadamente un 5%.
- Una eficiencia por encima del 80%.
- Fácil reciclado.

Desventajas:

- Debido a la utilización del plomo como material activo presentan un elevado peso.
- Tienen una baja energía específica, menor a un 30-50Wh/kg. Se suele usar para cubrir necesidades de arranque, iluminación e ignición.
- Vida cíclica corta, entre 500 ó 600 ciclos de carga-descarga.
- No toleran carga rápida, por lo que se requiere de largos periodos de tiempo para su recarga.
- Poca resistencia ante sobrecargas y descargas accidentales.
- Son muy vulnerables a la corrosión de sus electrodos.
- Mantenimiento periódico.

Las investigaciones que se llevan a cabo en la actualidad sobre estas baterías están enfocadas a lograr una mejora de sus prestaciones en relación a la reducción de la necesidad de mantenimiento, aumento de la vida útil, disminución de dimensiones y peso y reducción del tiempo de recarga.

En este enfoque, las baterías de plomo-ácido de válvula regulada ya son un avance real y se emplean en un amplio abanico de las aplicaciones que usan baterías de plomo-ácido.

1.4.1.2 Baterías de NÍQUEL-CADMIO

Estas baterías (véase Figura 8) usan un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de un compuesto de cadmio y un electrolito de hidróxido de potasio. Dicha disposición de los materiales permiten reutilizar la batería, recargándola una vez está agotada.



Figura 8: Batería de NiCd.

Sin embargo, su densidad de energía es de 50 Wh/kg, por lo que tienen una capacidad media. Toleran sobrecargas, y también pueden seguir siendo cargadas cuando ya no admite más carga, aunque no se almacene. En un estado próximo al de plena carga, la tensión de la batería aumenta considerablemente por un incremento de su resistencia interna. Este efecto se conoce como “delta peak” y es utilizado para evaluar el final de la carga(10).

Del mismo modo que hicimos con las baterías de plomo-ácido, se va a presentar las ventajas y desventajas de esta batería para comprender las principales características funcionales.

Ventajas:

- Tecnología establecida.
- Admite un amplio rango de temperaturas con buen comportamiento (-40°C - 60°C).
- Toleran sobrecargas, aunque no la almacenen más carga se puede seguir cargando sin problemas.
- Larga vida cíclica, más de 1.500 ciclos.
- Gran robustez frente a alteraciones eléctricas y mecánicas.
- Gran fiabilidad, dado que no suelen fallar de forma repentina.

Desventajas:

- Elevado precio, en comparación con otro tipo de baterías.
- El cadmio es un elemento altamente contaminante y requiere un esfuerzo para su reciclaje.

- En la actualidad no se fabrican en muchos países desarrollados.
- Presentan auto descarga mensual del 10%.
- Tiene efecto memoria.

1.4.1.3 Baterías de NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO.

Estas baterías (véase Figura 9) tienen un rendimiento muy parecido al de la batería de NiCd, aunque la principal diferencia es que utiliza un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Con lo que estas baterías no usan cadmio y por lo tanto presentan algunas ventajas considerables como el aumento de la capacidad, disminución del peso y un menor efecto memoria.

Este tipo de baterías presentan algunas similitudes frente a la tecnología Níquel-Cadmio. Las curvas de carga y descarga son muy parecidas, y la tensión nominal por celda es de 1,2V. Del mismo modo que las baterías NiCd, usan efecto utilizado para marcar el fin de carga de las baterías es el conocido “delta peak”.



Figura 9: Baterías de Ni-Hidruro Metálico.

Seguidamente se presentan ventajas y desventajas para apreciar sus características funcionales.

Ventajas:

- Mayor energía específica y una mayor densidad energética, que las baterías de NiCd.
- Batería libre de cadmio, menos contaminante.
- Tienen la posibilidad de ser cargadas con un cargador convencional.
- Son seguras en su manipulación y uso.

Desventajas:

- Auto descarga ente un 15% y un 20% por mes.
- Menor fiabilidad que las baterías NiCd.
- No toleran fuertes descargas.
- Voltaje por celda bajo (1,2V).
- Vida media aproximadamente de 300 a 500 ciclos de carga, estos dependen del fabricante.
- Tiempos de carga superiores a las baterías de NiCd.

1.4.1.4 Baterías de LITIO

Como se sabe, el litio (Li) es el material más ligero que existe dado que su peso atómico es muy bajo, ya que solo posee tres protones. Esto permite fabricar baterías de poco peso y de gran capacidad. Existen dos diferentes tipos de baterías de Litio, Litio Ion y Litio Polímero. Dado que presentan características parecidas se va a explicar las de Litio Ion ya que son las más conocidas, véase Figura 10.

Una celda de litio presenta un voltaje que oscila entre los 3.3 y 3.7 V. Esto permite fabricar baterías de una única celda y de tal manera que se reduce considerablemente el tamaño de estas baterías, haciéndose ideales para teléfonos móviles (10).

Estas baterías poseen una estructura frágil y requieren un circuito de seguridad. Este circuito limita el voltaje máximo de cada célula durante la carga y el voltaje mínimo de cada célula en la descarga.



Figura 10: Batería de litio.

Se va a analizar sus características funcionales.

Ventajas:

- Alta densidad de energía.
- Alta energía específica.
- Gran capacidad de descarga en algunos tipos de baterías de litio.
- No requieren mantenimiento.
- No tienen efecto memoria.
- Efecto de auto descarga bajo.

Desventajas:

- Se necesita un circuito de seguridad para tener estables los límites de voltajes máximos y mínimos por celda.
- Baja capacidad de descarga en las baterías de iones de litio.
- Limitaciones en su transporte aéreo.
- Precio más elevado en comparación a otras baterías.

Estas son las principales características de las baterías más usadas. A continuación se expone una tabla comparativa con las diferentes prestaciones de los distintos tipos de baterías.

Tecnología	Pb-Ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ión
Parámetros				
Voltaje (V/celda)	2v	1.2v	1.2v	3.6/3.7v
Auto descarga(%/mes)	3-20%	10%	30%	8%
Descarga en continua	-	10c	8c	1c
Descarga por picos	-	-	-	-
Mantenimiento	Bueno	Malo	Regular	Fácil
Ciclos de vida	500-800	1500-2000	300-500	400-1200
Densidad energética[Wh/l]	60-75	50-150	140-300	250-360
Energía específica[Wh/kg]	30-40	40-60	30-80	100-250
Potencia específica[W/kg]	180	150	250-1000	250-340
Corriente carga rápida [C]	0.4	1-2	1-2	1
Eficiencia. Carga/Descarga	50-92%	70-90%	66%	80-90%
Tolerancia a sobrecargas	-	M. buena	Media	M. mala
Robustez a impactos	Buena	M. buena	Buena	M. mala
Altas temperaturas	Media	M. buena	Media	M. mala
Problemas de ecualización	No	No	No	Si
Seguridad	M. buena	M. buena	M. buena	M. buena
Formato	-	Cilíndrico	Cilíndrico	Prisma

Tabla 1: Comparativa de diferentes tipos de baterías.

1.4.2 Limitaciones de la batería

Se va a presentar algunas de las limitaciones del tipo de batería plomo-ácido, ya que son las que se usarían en este caso para almacenar dicha energía.

Estas baterías tiene un elevado peso debido a la utilización de plomo, poseen baja energía específica (menor a 30-50Wh/kg), poca vida cíclica, no aceptan una recarga rápida, tiene baja resistencia ante sobrecargas, sufre descargas accidentales, son afectadas periódicamente por la corrosión de sus electrodos, además necesitan un mantenimiento periódico.

En la actualidad las investigaciones de mejoras de las baterías están principalmente dirigidas a conseguir una reducción de la periodicidad de su mantenimiento, aumento de la vida útil, disminución del volumen, así como del peso y la reducción del tiempo de recarga (10).

1.5 Hidrogeno como portador de energía

En grandes rasgos, en vez de que la energía eléctrica proporcionada por el aerogenerador se distribuya a la red eléctrica general de consumo (o se almacene en baterías), será enviada a un electrolizador. Una vez allí y mediante el proceso de la electrolisis, se utilizará la corriente eléctrica para transformar agua en hidrógeno, siendo comprimido en un tanque para su almacenamiento. De esta

manera se conseguiría portar energía en forma de hidrógeno, es decir en materia. Dicho hidrógeno almacenado podrá ser reconvertido en energía eléctrica para su uso directo mediante una pila de combustible.

Se quiere hacer hincapié en la gran diferencia existente entre los citados métodos de almacenamiento entre la batería y el tanque de hidrógeno, la batería almacena energía química y el tanque almacena hidrógeno, ambos con vistas a generar energía eléctrica, véase Figura 11.

El hidrógeno almacenado no sufre pérdidas a diferencia de la energía en la batería que si las sufre. Esto, es por la conocida Ley de conservación de la materia, anunciada por Antoine Lavoisier: “la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma”.



Figura 11: Similitud entre el almacenaje de “energía” y “materia”.

De la manera anteriormente descrita, se conseguiría eliminar los problemas que suponen el almacenamiento de energía en baterías a través del almacenaje de materia, en un tanque de hidrógeno gas.

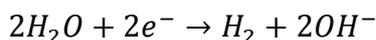
El hidrógeno parece ser, a día de hoy, el combustible sintético del futuro por sus propiedades físicas y químicas. Esto se basa en sus características de ser renovable y abundante, ya que es posible extraerlo de la descomposición del agua mediante la electrolisis, usando el agua como fuente de energía primaria (11).

Este elemento tampoco es contaminante, puesto que el producto de su combustión con el oxígeno es simplemente vapor de agua, haciendo así del hidrógeno el combustible ideal. Esto se lleva a cabo mediante el uso de una pila de combustible.

1.5.1 Electrolizador

La electrolisis del agua comenzó a desarrollarse en la primera revolución industrial, cuando en el 1800 Nicholson y Carlisle descubrieron la descomposición electrolítica del agua. Ya por el año 1902 estaban disponibles más de 400 unidades electrolíticas y en el 1939 se puso a funcionar la primera gran unidad con una capacidad de $10000 \frac{Nm^3}{h}$ de H_2 . En el 1966 *General Electric* fabricó el primer electrolizador de polímeros sólidos y en el 1972 se desarrolló el electrolizador de óxidos sólidos. Los electrolizadores de polímeros sólidos se fabricaron en el 1978 (12).

A continuación se muestra la reacción que se produce por la electrolisis del agua, que viene a decir que con agua y corriente eléctrica se logra separar hidrógeno y oxígeno.



DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE COMBUSTIBLE PARA LA ENM

Un electrolizador está formado por una o varias celdas electrolíticas conectadas entre sí eléctricamente. Ahora se va a detallar las partes que adquieren mayor importancia en las celdas electrolíticas que son los electrodos, el electrolito y el diafragma, véase la Figura 12 (12).

Los electrodos se encargan de conducir la corriente eléctrica en el electrolito, agua en nuestro caso, para que se produzca correctamente el proceso de la electrólisis, el electrodo positivo de le conoce como ánodo y en su interfase de separación con el electrolito se produce una semireacción de la formación de oxígeno gaseoso, y el electrodo negativo se le denomina cátodo y en su interfase de separación con el electrolito se produce una semireacción de formación del hidrógeno gaseoso.

El electrolito se encarga de aportar los iones que se van a encargar de la conducción en el interior de la celda electrolítica.

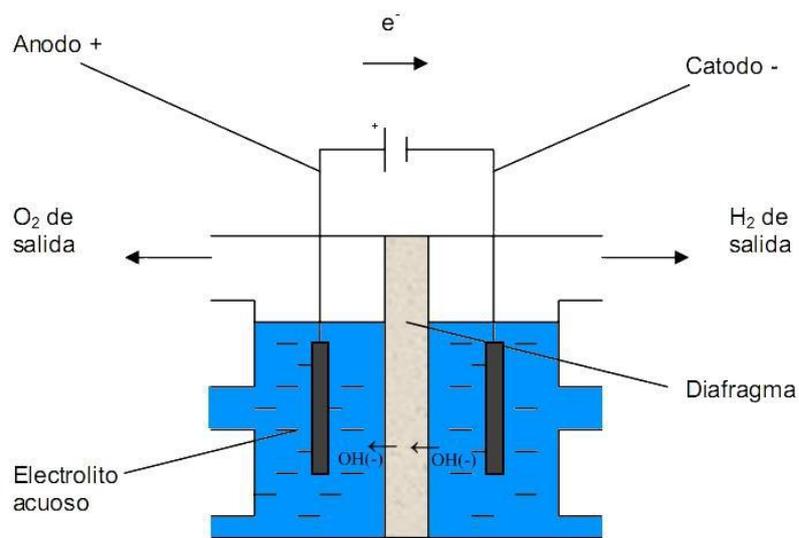


Figura 12: Esquema simplificado de un electrolizador y sus componentes

Por otra parte tenemos el diafragma que separa el compartimento anódico y catódico permitiendo el paso de los iones que transmiten la carga del cátodo al ánodo.

En la actualidad se investiga en la optimización de los electrolizadores alcalinos para poder disminuir el consumo específico en la utilización de los diafragmas de intercambio de protones así como la electrólisis a altas temperaturas por medio del uso de la tecnología de óxidos sólidos.

1.5.2 Pila de combustible

La demostración más antigua de la pila de combustible fue creada sin conocimiento real de la misma y fue realizada por el científico y abogado William Grove en 1839, tal y como se muestra en la Figura 13 (1).

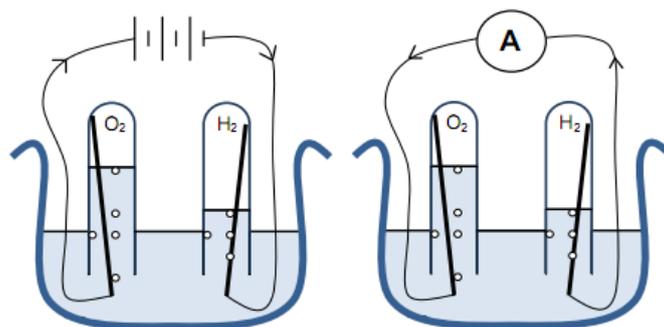


Figura 13: Electrolysis del agua (izquierda), pila de combustible (derecha).

La figura de la izquierda representa la electrolysis del agua. Mientras que la figura de la derecha muestra la “desconocida” pila de combustible, donde la recombinación de H_2 con O_2 genera una pequeña corriente eléctrica. Este valor es pequeño debido a que el electrolito actúa como resistencia al flujo de corriente y a la superficie de contacto entre el gas, el electrodo y el electrolito ya que esta superficie se limita al anillo donde tienen contacto el electrolito y el electrodo. Como solución a este problema de distancias y áreas se propone la disposición que presenta la Figura 14.

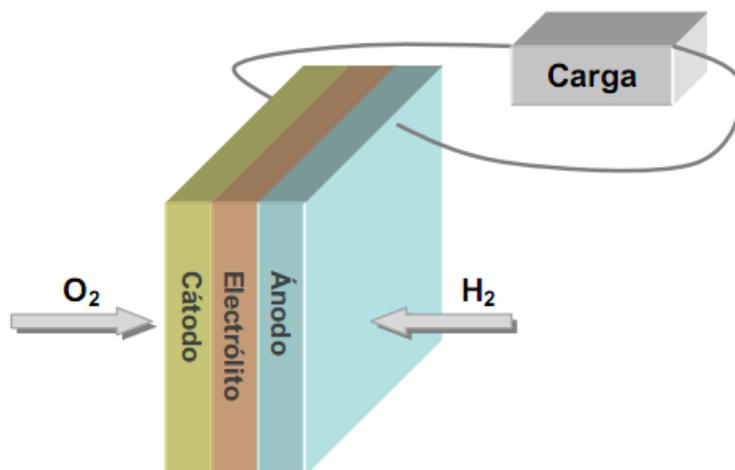


Figura 14: Pila de combustible básica.

La pila se compone de dos electrodos, un ánodo y un cátodo separado por un electrolito. El combustible se envía al ánodo, donde ocurre la reacción de oxidación y libera electrones al circuito externo (13).

Mientras tanto el oxidante se suministra al cátodo, donde los electrones llegan del circuito externo, y se produce la reacción de reducción. El flujo de electrones desde el ánodo al cátodo es el responsable de la producción de corriente eléctrica. El electrolito al ser un aislante electrónico permite el traspaso de iones óxido o protones entre los dos electrodos, como muestra la Figura 15. El combustible más empleado es el hidrógeno debido a su alta reactividad electroquímica y a que se puede obtener con relativa facilidad como se ha explicado anteriormente con el uso de un electrolyzador.

De una forma más simplificada lo que sucede es que en el ánodo de una pila de combustible con electrolito ácido, el hidrógeno gas libera electrones y crea iones H^+ (protones). Esta reacción libera energía. En el cátodo, el oxígeno reacciona con los electrones y los protones del ánodo para formar agua.

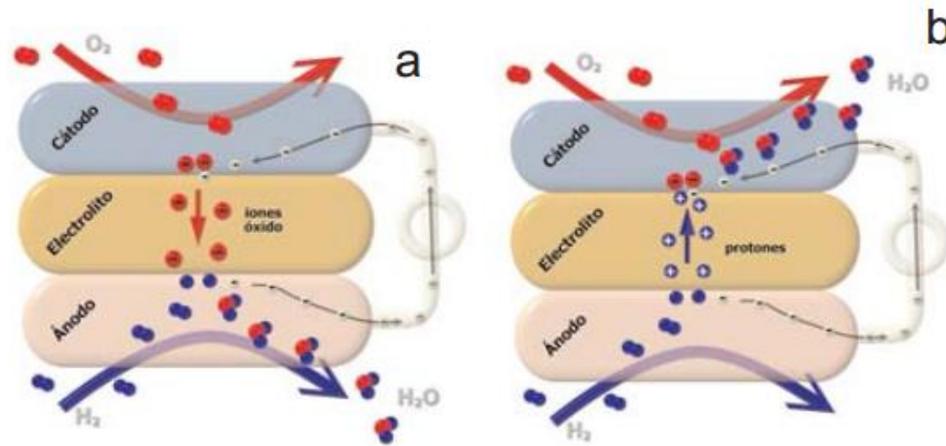
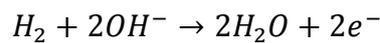


Figura 15: Representación básica de las reacciones en una pila, (a) cuando el electrolito es un conductor iónico y (b) cuando es un conductor protónico.

Para que estas reacciones sucedan continuamente los electrones producidos en el ánodo deben fluir a través del circuito eléctrico hasta el cátodo mientras que los protones pasan a través del electrolito. El electrolito debe permitir el paso de protones pero no de electrones, si estos llegases a pasar, se perderían. El electrolito que más facilita es transporte es aquel que está formado por una membrana intercambiadores de protones o electrólito polimérico, donde una membrana polimérica que conduce protones separa el ánodo del cátodo tal y como muestra la Figura 16 (1).



Ésta es la reacción que se produce en el interior de la pila, con hidrógeno y oxígeno se logra obtener corriente eléctrica y vapor de agua. Además el único “residuo” generado si se usa hidrógeno como combustible será agua. En relación al oxidante, es oxígeno es el más utilizado dado que se encuentra en el aire por lo que su obtención es sencilla y gratuita.

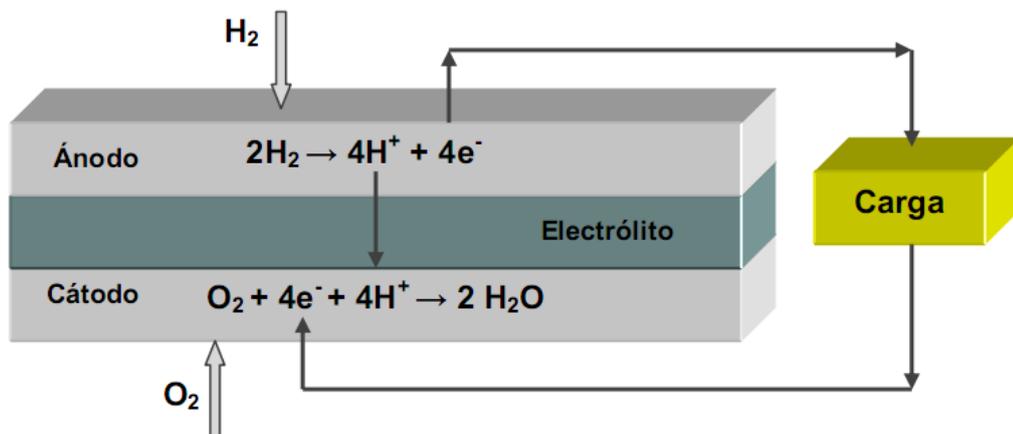


Figura 16: Reacciones que se producen en la pila de combustible.

Tiene un aspecto negativo que se corrige sin problema pero debe de ser comentado, y es que una sola celda que trabaje a 900°C con hidrógeno (combustible) y oxígeno (oxidante), produce alrededor de 1 Voltio. Aunque en realidad el voltaje útil suele estar entre 0.5V y 0.7 V. De esta manera es imposible alcanzar altas potencias, por eso es necesaria la combinación de varias celdas en serie, dando lugar a lo que se conoce como “stacks”.

1.6 Combustibles alternativos

Existen tres grandes grupos de posibles combustibles alternativos y son los siguientes:

- Biocombustibles.
- Gas Natural.
- Hidrógeno.

1.6.1 Biocombustibles

Estos combustibles se entienden como combustible de origen biológico pero obtenido de forma renovable a partir de restos orgánicos, que básicamente existen dos tipos (1).

- **Bioetanol:** Es un alcohol producido por la fermentación de productos azucarados como por ejemplo la remolacha o la caña de azúcar. Los granos de cereales como el trigo la cebada o el maíz también pueden ser restos útiles, mediante la hidrólisis o transformación en azúcares fermentables del almidón contenido en ellos. El Bioetanol sustituye a la gasolina en vehículos, como único combustible o en mezclas, aunque por motivos de miscibilidad entre ambos no deben sobrepasar el 5-10% en volumen de etanol.
- **Biodiesel:** Forma un grupo de carburantes que se obtienen a partir de aceites vegetales como el girasol, la colza y la soja. Los aceites vegetales en reacción con el metanol producen metilésteres, estos poseen características muy parecidas al gasóleo con el que pueden ser mezclados en cualquier proporción. Además estas mezclas no alteran en gran medida las propiedades del gasóleo, como su poder calorífico o el índice de cetano.

1.6.2 Gas natural

Es una multitud de gases que se encuentran con frecuencia en yacimientos fósiles. Dependiendo del lugar del yacimiento extraído tiene una composición u otra, pero básicamente está compuesto por metano un 90-95% y suele contener gases como nitrógeno, etano, CO₂, H₂S, CH₄, CH₃ y trazas de hidrocarburos más pesados (1).

1.6.3 Hidrógeno

En la actualidad el hidrógeno es un elemento usado en varias industrias, como por ejemplo en la alimentaria. Es un elemento muy fácil de obtener, la forma de hacerlo es a partir del agua. Entonces al ser usado como combustible se recorre un ciclo cerrado que comienza y termina con agua. Esto le hace ser al hidrogeno renovable al 100%. Sin embargo no se obtiene a partir de la electrolisis del agua, sino de los hidrocarburos, donde resulta más económico. Es predecible que no en mucho tiempo el precio del petróleo aumente tanto que sea más rentable la producción masiva de hidrogeno por métodos electrolíticos (11).

Además desde el punto de vista energético el hidrógeno es el que tiene la máxima relación energía/peso de todos los combustibles, como se aprecia en la siguiente Tabla 2.

	Combustible	Energía específica [kWh/kg]	Densidad de energía [kWh/l]
	Hidrógeno(líquido)(20K)	33,33	2,359
	Hidrógeno(gas)(150atm)	33,33	0,4490
Gases (CNPT)	Hidrógeno	33,33	0,002993
	Metano	11,39	0,00997
	Gas Natural(82-93% CH ₄)	10,6-13,1	0,0088-0,0104
	Etano	14,42	0,02024
	Propano	12,88	0,02589
	Butano	12,7	0,03439
	Líquidos	Gasolina	≈12
Benceno		11,75	10,33
Etanol		8,251	6,510
Metanol		5,47	4,44
Amoníaco		5,706	3,41
Sólidos	Carbón	8,717	≈(15-20)
	Madera	4,756	≈(2,8-5,6)

Tabla 2: Densidades de energía de varios combustibles.

Si se piensa en el hidrogeno como portador de energía, también se debe pensar donde se tendrá almacenado, que tipo de contenedores son los más apropiados y de que forma el hidrógeno ofrece mayores ventajas. A continuación se presentas unas pequeñas pinceladas sobre las principales formas de almacenaje.

- Gas comprimido: Se almacena en el típico cilindro de acero, que normalmente el contenido de hidrógeno es del 1,2% de la masa del cilindro. La densidad de hidrógeno presente en el cilindro aumentaría al aumentar la presión dentro del mismo, pero esto trae consigo el riesgo de las altas presiones y a su vez un gran consumo de energía por parte del compresor de alta presión.
- Hidrógeno líquido: Esta forma de almacenamiento permite incrementar la masa de hidrógeno respecto al volumen del contenedor. El tanque tendría que mantener una temperatura de -252°C a presión atmosférica, lo que supone que la transferencia de calor por las paredes del contenedor produzcan la perdida de hidrógeno por evaporación. Además hace falta un gran consumo de energía para la licuefacción.
- Hidruro metálico: Existen hidruros metálicos que absorben y expulsan hidrógeno a temperatura ambiente y a presión cercana a la atmosférica. El proceso consiste en absorber el gas a baja temperatura y a una presión suficiente para que la aleación sorba el hidrógeno completamente, después se calienta para liberar el gas a una presión algo más elevada. Los tanques de hidruro deben poseer dispositivos para enfriar y calentar el material.

La Tabla 3 presente un resumen de los principales métodos de almacenamiento.

Método de almacenamiento	ρ_m [H% masa]	ρ_v [kg H/m ³]	T [°C]	P [bar]	Fenómeno y observaciones
Cilindros de gas a alta presión	2-10	10 - 40	25	130-800	Gas comprimido (H ₂ molecular) en cilindros de acero o material (de resistencia a tracción 2000Mpa)
Hidrógeno líquido en tanques criogénicos	Depende del tamaño	70.8	-252	1	Hidrógeno comprimido (H ₂ molecular), pérdida continua de pocos % de hidrógeno a T _{amb}
Hidrógeno absorbido	≈2	20	-80	100	Adsorción física (H ₂ molecular) sobre materiales de gran área específica (p.ej. Carbón), totalmente reversible
Absorbido en sitios intersticiales de un metal (Hidruro metálico)	≈2	150	25	1	Hidrógeno (H atómico) intercalado en metal anfitrión, los hidruros metálicos trabajando a T _{amb} son totalmente reversibles

Tabla 3: Principales métodos de almacenamiento.

2 DESARROLLO DEL TFG

2.1 Introducción

Para realizar una composición del sistema propuesto y un posterior análisis de los resultados se ha optado por trasladar todos los aspectos reales, a la simulación mediante el software Matlab/Simulink®. Es una herramienta útil para obtener, de forma sencilla y económica, una primera fase sobre la viabilidad técnica del proyecto. Además de simular la realidad de los diferentes componentes del sistema también se puede generar modelos y controles de gobierno. Operaciones reales en circunstancias reales son simuladas, para al final obtener resultados objetivos.

Los subsistemas creados son:

- El aerogenerador, el cual recoge un dato de viento (m/s) y da potencia (W).
- La batería, que soporta los picos de potencia negativos y positivos. Intentando dar así un flujo constante de corriente al electrolizador.
- El electrolizador, que recibe una intensidad (A) y resulta un volumen (L).
- El tanque de hidrógeno, que no es más que un paso intermedio de almacenaje (entre el electrolizador y la pila de combustible).
- La pila de combustible, que recibe un volumen (L) y da una intensidad (A) a una potencia (W).

El origen de todo este sistema es el viento que impulsa al aerogenerador. Estos datos de vientos son reales y recogidos por la estación meteorológica que se encuentra situada en el Puerto de Vigo, la cual es la recomendada por el personal de Meteo Galicia, ya que no existe ninguna estación meteorológica que tenga similitudes climáticas a las existentes en las proximidades de la Escuela Naval Militar.

2.2 Aerogenerador

Los aerogeneradores son unos dispositivos con palas, que mediante el giro de las mismas por el efecto del viento permiten mover un eje, que a su vez está conectado a un generador. De tal manera que se genera una corriente eléctrica.

2.2.1 Aerogenerador seleccionado

Dado que los datos de viento son relativamente bajos se ha seleccionado un aerogenerador que arranque a baja velocidad de viento y que además su régimen de trabajo nominal se adapte a los datos obtenidos de la estación meteorológica. El modelo de aerogenerador finalmente seleccionado es el modelo WT6500 Wind Turbine del fabricante Honeywell® que puede desarrollar una potencia máxima de hasta 1,5 kW, y cuyas principales especificaciones se resumen en la Tabla 4.

Modelo WT-6500	Especificaciones
Máxima salida de potencia	1500W a 13,9m/s
Peso	79,5 kg
Diámetro del rotor	1,82m
Tasa de rotación	150rpm
Velocidad ¹ de apagado de seguridad	16,99m/s
Velocidad ¹ a 160rpm	14m/s
Inyección a la red	Híbrida
Nivel de sonido a 13,5 m/s	<35dB

Tabla 4: Especificaciones técnicas de la turbina eólica WT6500 de Honeywell®.

La Figura 17 muestra dicha turbina eólica. La WT6500 no usa engranajes y tiene un diseño único de aspas multi-etapas que permiten que el sistema reaccione rápidamente a los cambios de viento, esto garantiza que se capture la máxima energía del viento sin el ruido típico asociado con las turbinas eólicas convencionales.

Para la generación de energía la turbina utiliza un sistema de imanes y estatores que rodean su anillo exterior y capturan energía de las puntas de las aspas donde la velocidad es mayor, eliminando prácticamente la resistencia y el arrastre mecánico. Esta innovadora tecnología conocida por Blade Tip Power System (BTPS) es una creación patentada de WindTronics™. Además dispone de dos aletas en sus extremos que permiten la orientación al viento por pequeño que sea la variación de la dirección, tal y como se aprecia en la imagen (14).



Figura 17: Aerogenerador seleccionado, WT6500 de Honeywell®.

2.2.2 Modelo del aerogenerador

En primer lugar el fabricante proporciona los datos de potencia (W) para cada velocidad de viento (m/s) a través de una gráfica mostrada en la Figura 18 . En dicha gráfica se puede ver que el aerogenerador comienza su funcionamiento a muy bajas velocidades de viento.



Figura 18: Gráfica relación viento/ potencia, ofrecida por Honeywell®.

A partir de esta curva y mediante una herramienta informática para la obtención de datos de curvas a través de imágenes, (Web Plot Digitizer® (15)) se obtienen los datos de los puntos que la forman. A partir de estos puntos se ajusta dicha curva a un polinomio mediante la herramienta Ploty® (16), de uso público en la red, (Figura 19). Ploty nos permite probar a realizar el ajuste con diferentes tipos de polinomios.

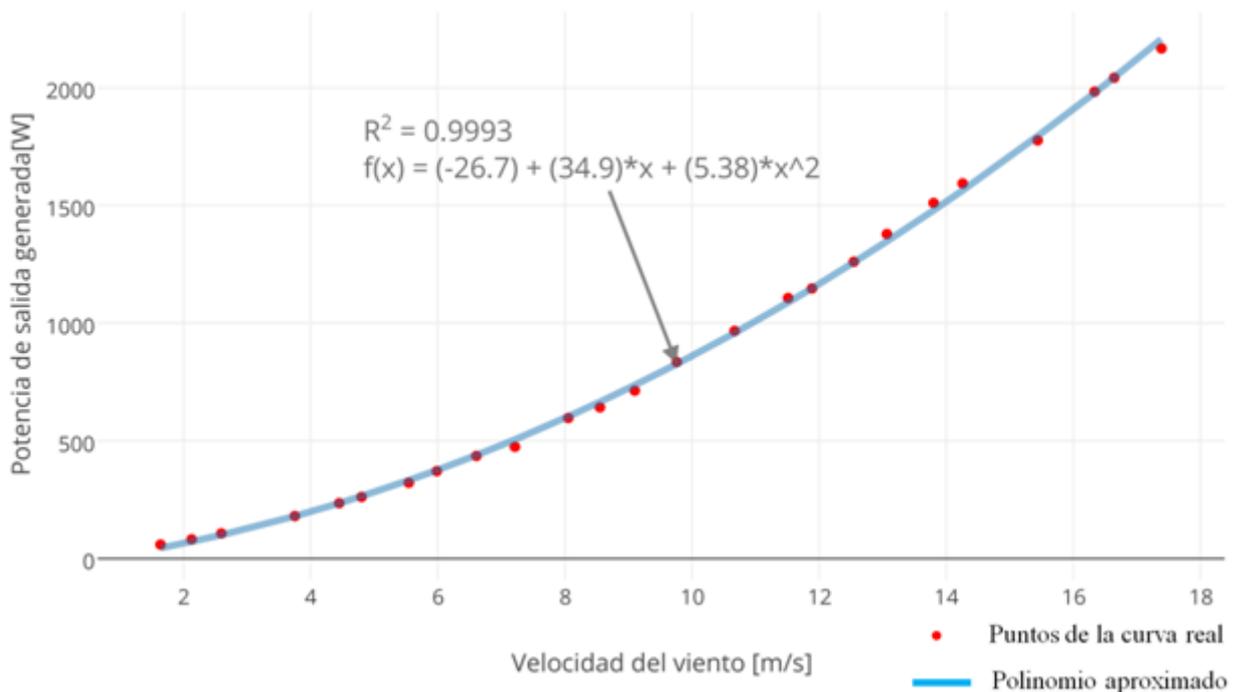


Figura 19: Superposición a la del polinomio calculado a la curva real del fabricante.

Finalmente se ha seleccionado un polinomio de ajuste de grado dos, que era el que presentaba una mejor relación de ajuste:

$$P = -26,7 + 34,9v + 5,38v^2 [W]$$

Siendo P la potencia del aerogenerador en y v la velocidad del viento.

Dicho polinomio se implementa como una función de Matlab (*MATLAB Fcn*) en SIMULINK®.



Figura 20: Diagrama de la Turbina WT6500 de Honeywell® en SIMULINK®.

En la Figura 20(arriba) se muestra el modelo del aerogenerador para implementar con el resto de los modelos, y en la Figura 21(debajo) se puede observar la estructura interna de bloque aerogenerador con la función de Matlab que incorpora la ecuación de ajuste.

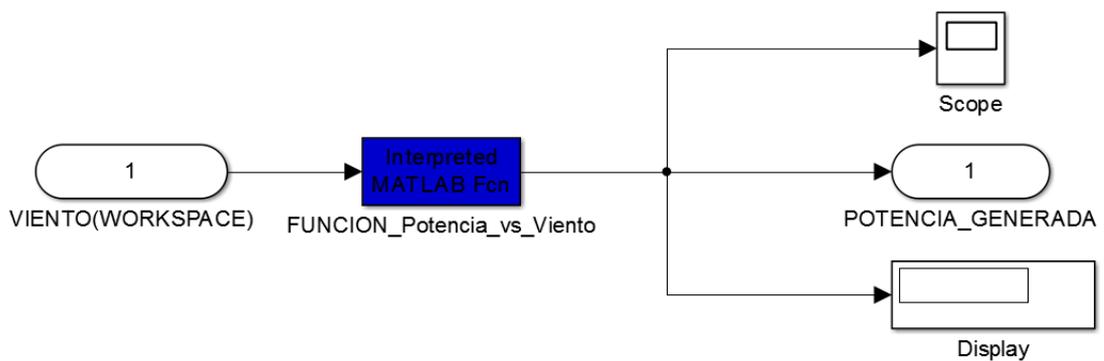


Figura 21: Diagrama de flujo en SIMULINK® de la Turbina.

Una vez realizado el modelo y mediante un bloque “Scope”, se va a comprobar el correcto funcionamiento del modelo realizando una simulación para los diferentes valores de velocidades de viento, obteniendo así la curva potencia-velocidad de viento simulada, representada en la Figura 22.

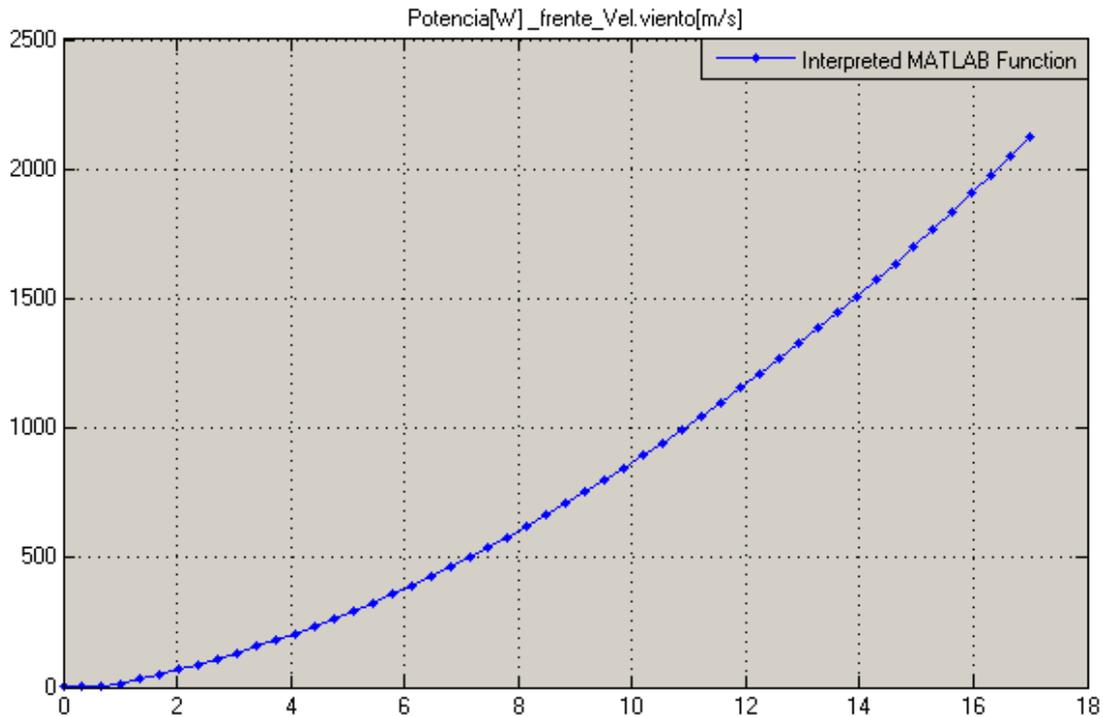


Figura 22: Curva potencia-velocidad de viento simulada en SIMULINK® (“Scope”).

2.3 Batería

La utilización de la batería se hace necesaria ya que la potencia que suministra la turbina no es constante dado que depende directamente de la velocidad del viento. La potencia obtenida está destinada para ser utilizada con el electrolizador, el cual trabaja con una intensidad constante. De esta manera la batería serviría de “colchón” para cargarse cuando haya potencia en exceso para el electrolizador, o descargarse cuando la potencia suministrada por la turbina no sea suficiente para alimentar el funcionamiento del electrolizador.

2.3.1 Batería seleccionada

Se ha seleccionado la tecnología de baterías de plomo-ácido por los siguientes motivos. Estas baterías usan plomo metálico con una estructura porosa como material del electrolito negativo y óxido de plomo como material del electrolito positivo. Durante la descarga el material activo de los dos electrodos pasa a ser sulfato de plomo lo que provoca el consumo de sulfúrico y la formación de agua, de tal manera que disminuye la concentración del electrolito expulsados, como se aprecia en la siguiente reacción:



Una de las ventajas principales que aporta esta tecnología es la recombinación de los gases durante las reacciones de sobrecarga (la batería se encuentra próxima al 100% de su estado de carga). De esta forma se evita la pérdida de electrolito gas que tiene como consecuencia una reducción de las necesidades de mantenimiento de la batería, es por ello por lo que a este tipo de batería se le conoce como “batería de libre mantenimiento” o “batería de recombinación de gases”(10).

Estas baterías se pueden situar en lugares cerrados y en diferentes posiciones porque en su funcionamiento regular no se producen fugas ni de líquidos ni de gases corrosivos que puedan dañar al resto de dispositivos que se encuentren en sus alrededores. El coste de esta batería es extremadamente bajo con respecto al resto de las baterías con diferentes tecnologías. Además tiene un proceso de reciclado sencillo una vez terminada su vida útil.

Por lo tanto, la batería elegida en cuestión es la T-1275 Plus de TROJAN BATTERY COMPANY® de 12 voltios y 6 celdas (Figura 23), que cuenta con las especificaciones técnicas reflejadas en la Tabla 5.



Figura 23: T-1275 Plus de TROJAN BATTERY COMPANY®.

Tipo	T-1275 Plus	
Capacidad en Minutos	25 Amps	280 min
	56 Amps	102 min
	75 Amps	70 min
Capacidad en Amps-Hora (AH)	5 h	120
	10 h	134
	20 h	150
	100 h	166
Energía(kWh)	100Hrs	1.99
Dimensiones (mm)	Largo x Ancho x Alto	329 x 181 x 272
Peso (kg)	37	

Tabla 5: Especificaciones de la batería T-1275 Plus de TROJAN BATTERY COMPANY®

2.3.2 Modelo de la batería

Respecto a la simulación de la batería se pretende predecir con la mayor precisión posible el comportamiento de dicha batería funcionando en carga y descarga. Todos los modelos de simulación de baterías son muy complejos y poco fiables ya que dependen de muchos factores, unos de fácil medición y otros con mediciones más complejas (1).

2.3.2.1 Modelado del comportamiento dinámico de la batería (OCV)

Lo primero en lo que hay que pensar a la hora de modelar una batería es la construcción del circuito equivalente.

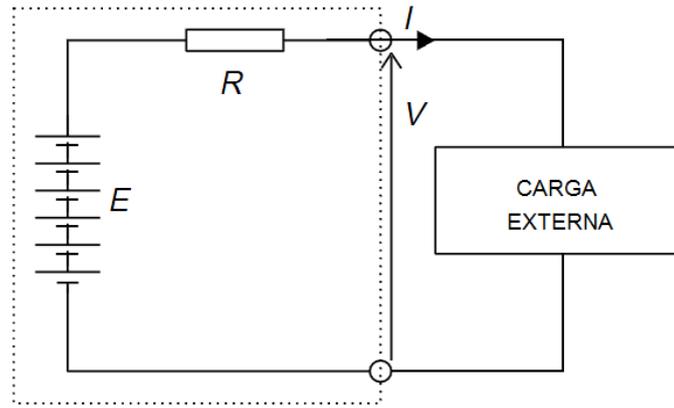


Figura 24: Circuito equivalente simple de una batería de 6 celdas.

Tal y como se muestra en la Figura 24, E_0 será la tensión de circuito abierto (E_0) y R equivale a la resistencia interna de la batería. La tensión de circuito abierto es un parámetro que varía en función del porcentaje de carga de la batería (Deep of Discharge o DoD).

Es por esto por lo que se tiene que obtener una ecuación en que E_0 esté en función de DoD , que tendrá un valor de 0 cuando esté cargada máximo y un valor de 1 cuando este descargada por completo.

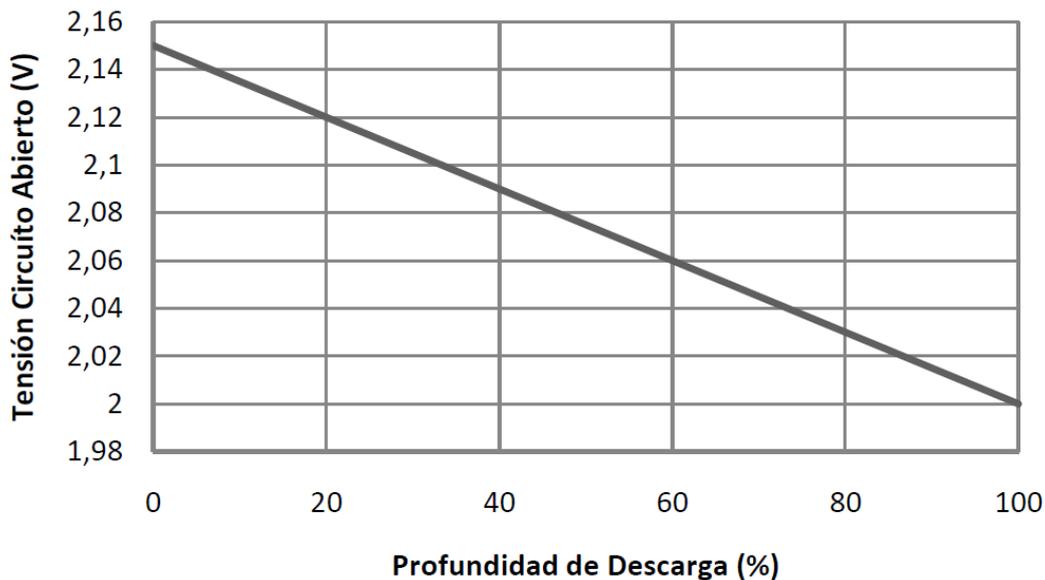


Figura 25: La gráfica presenta la variación de la tensión de circuito abierto de una batería frente a la profundidad de descarga.

Las baterías de plomo-ácido presentan un comportamiento en el que la tensión de circuito abierto (E_0) es proporcional a la DoD , tal y como se aprecia en la Figura 25, obtenida del fabricante. Si ajustamos estos datos a una recta se obtendría la siguiente ecuación para el cálculo de la tensión de cortocircuito en función de la DoD .

$$E_0 = N \times (2,15 - DoD \times (2,15 - 2,00))[V]$$

Donde N es el número de celdas de la batería.

La resistencia interna de una batería de plomo ácido es muy baja y aproximadamente tiene un valor de 0.022Ω por celda. En el caso nuestra batería podemos establecer la siguiente aproximación (1).

$$R = n \times \frac{0.022}{C_{10}} [\Omega]$$

Donde C_{10} es la capacidad en Amperios de la batería para una descarga de 1 hora. (Dato obtenido en las especificaciones del fabricante).

Por otra parte la capacidad de descarga de la batería no es la misma si descargamos a diferentes intensidades, siendo mayor cuanto menor sea la intensidad en la descarga. Para dicha simulación contamos con el modelo de Peukert que nos permitirá una buena aproximación de la capacidad de la batería (1).

2.3.2.2 Modelado de la capacidad de una batería (Peukert)

El primero de los cálculos a realizar va a ser el de la determinación del coeficiente de Peukert, la “ k ”. Aunque se podría tomar como referencia el valor de 1.12 para la batería de Pb-ácido. Vamos a calcularlo en función de los datos del fabricante con la finalidad de ajustarse lo más posible a la realidad. Para ello se necesita saber las máximas capacidades de descarga de la batería (C_1 y C_2), para sus dos respectivos tiempos (T_{20} y T_{100}). A partir de estos datos y con la siguiente formula se obtiene el coeficiente de Peukert para nuestra batería:

$$k = \frac{\log T_2 - \log T_1}{\log(C_1/T_1) - \log(C_2/T_2)}$$

A partir de la constante obtenida y la formula de Peukert seremos capaces de calcular la Capacidad de Peukert para distintas intensidades de corriente.

$$C_p = I^k \times T$$

Donde I es intensidad en Amperios y T tiempo en horas. Intensidad de carga y descarga de la batería.

Cuando la turbina eólica gira y produce una potencia, la batería se cargará. Sin embargo si la turbina no genera potencia y ésta es demandada por la pila de combustible, la batería de descargará. En el siguiente apartado se va a proceder a explicar la simulación realizada con estas situaciones.

2.3.2.3 Carga de la batería y descarga de la batería

Se va a partir de la ecuación integra de la potencia en función de la tensión y de la intensidad de corriente:

$$P = V \times I [W]$$

Que va a ser combinada con la ecuación básica de tensión de la batería:

$$V = E - IR [V]$$

Obteniendo la expresión siguiente:

$$P = EI - RI^2 [W]$$

Ahora bien, si despejamos I (A) obtenemos una ecuación de segundo grado fácil de modelar en la simulación con Matlab ®.

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP}}{2R}$$

Donde R es la resistencia interna de la batería que fue calculada con anterioridad, P es la potencia de salida de la turbina eólica y E es la tensión del circuito abierto (1).

Esta ecuación combinada con la que se vio antes de la Capacidad de Peukert se utilizará para obtener la variación de la tensión paso a paso cuando está siendo descargada y calcular también la carga eliminada en cada paso.

El tiempo entre dos pasos lo llamaremos δt y la carga eliminada de la batería es:

$$CR = \delta t \times I^k$$

Como δt se mide en segundos, se debe dividir por 3600 para resolver el problemas de unidades existente y de tal forma conseguir como unidades Ah (Amperios hora). Si CR es la carga eliminada, la carga eliminada de la batería total para el paso $n+1$ de la simulación sería CR_{n+1} , resultando la siguiente ecuación:

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \times I^k}{3600}$$

La profundidad de descarga de la batería es lo mismo que dividir la carga eliminada y la carga/capacidad original de la batería. Por lo que para el n ésimo paso de la simulación la DoD se puede expresar como:

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p}$$

Donde C_p es la Capacidad de Peukert que se obtuvo en el anterior apartado.

En términos de simulación, la carga de la batería es un proceso similar a la descarga como se verá a continuación.

Seleccionamos la ecuación general de la potencia:

$$P = V \times I [W]$$

Que siendo combinada con la ecuación general de la tensión en la batería resulta:

$$P = V \times I = (E + IR) \times I = EI + RI^2 [W]$$

Despejando la I (A) obtenemos una ecuación de segundo grado con la siguiente solución:

$$I = \frac{E + \sqrt{E^2 - 4RP}}{2R}$$

Por último para calcular la carga añadida a la batería se haría el siguiente cambio en la ecuación de la Capacidad de Peukert con la I del paso anterior:

$$CR_{n+1} = CR_n - \frac{\delta t \times I}{3600}$$

Véase que en esta ecuación se ha eliminado el Coeficiente de Peukert, dado que en el proceso de la carga tiene un valor muy pequeño, tanto es así que lo consideraremos despreciable (1).

2.3.2.4 Implementación en Simulink

Una vez desarrolladas las ecuaciones para el modelado de la batería, se procede a su implementación bajo el entorno de Simulink®. En la Figura 26 se aprecia un esquema del sistema general de la simulación de la batería. A continuación se explicaran cada uno de los bloques existentes detalladamente:

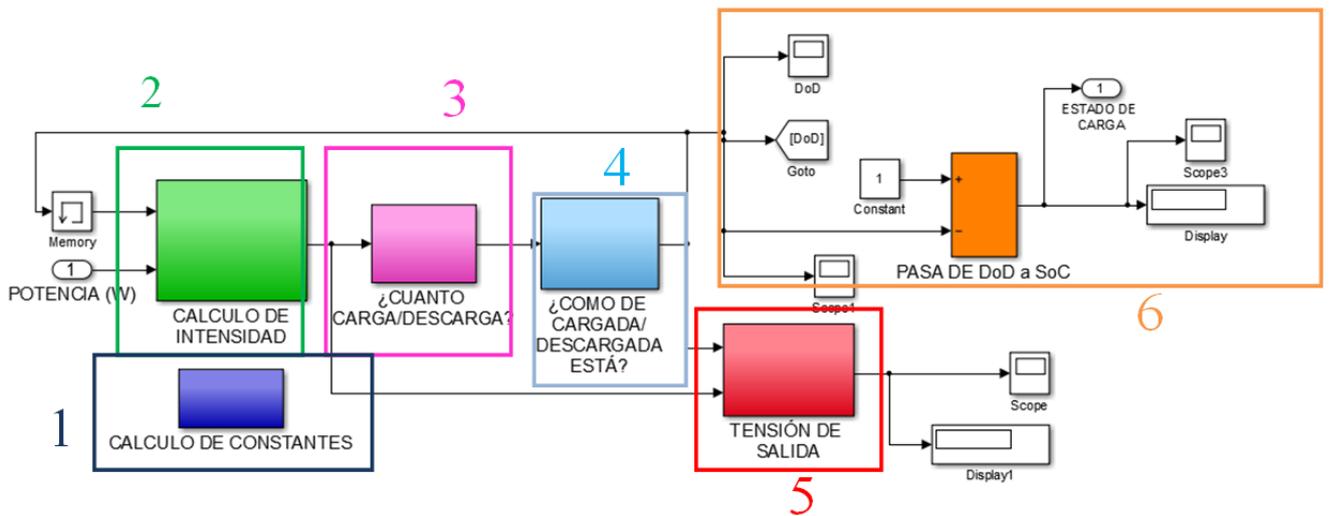


Figura 26: Diagrama global de la batería.

1 CONSTANTES:

En la Figura 27 encontramos constantes que van a ser utilizadas en las operaciones de la simulación. Estas constantes son: el número de celdas de la batería, el Coeficiente de Peukert, la capacidad de la batería en 10 horas, la resistencia interna y la Capacidad de Peukert. Estos datos suelen ser generalmente dados por las hojas de especificaciones del fabricante.

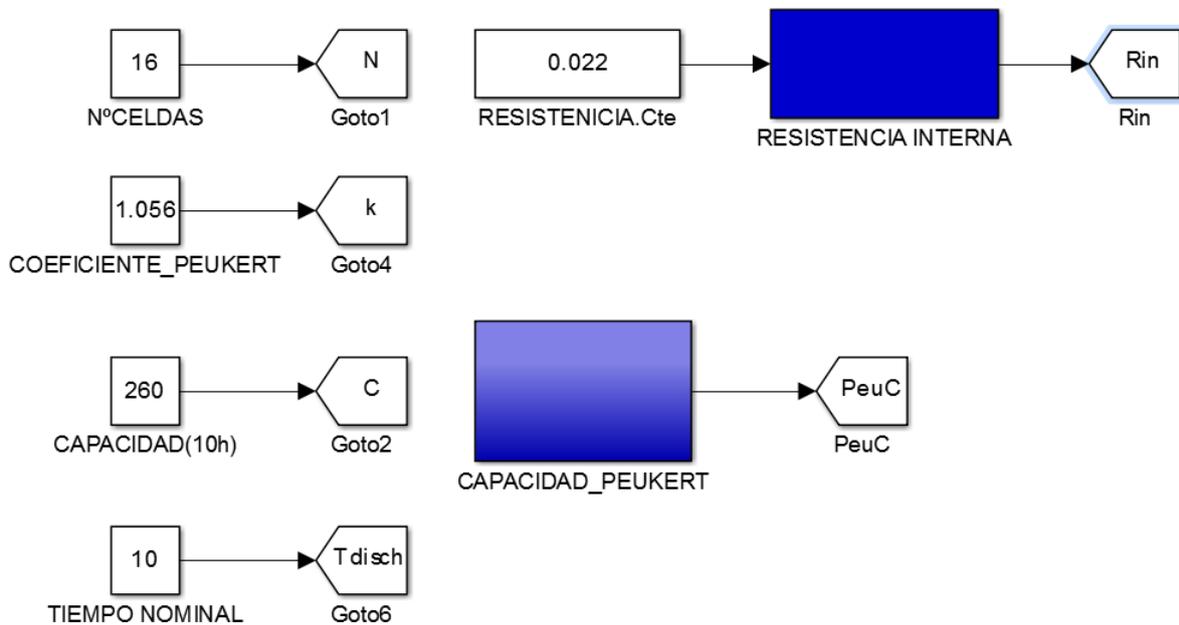


Figura 27: Extracto del bloque 1 de Matlab/Simulink®.

A partir de estas constantes y de las ecuaciones anteriormente descritas se calcula la resistencia interna de la batería y la Capacidad de Peukert.

2 CALCULO DE INTENSIDAD

En este bloque (Figura 28) se obtiene la intensidad (I) que es aportada a la batería con la energía que logra la turbina eólica, la tensión del circuito abierto (V) y la resistencia interna (R).

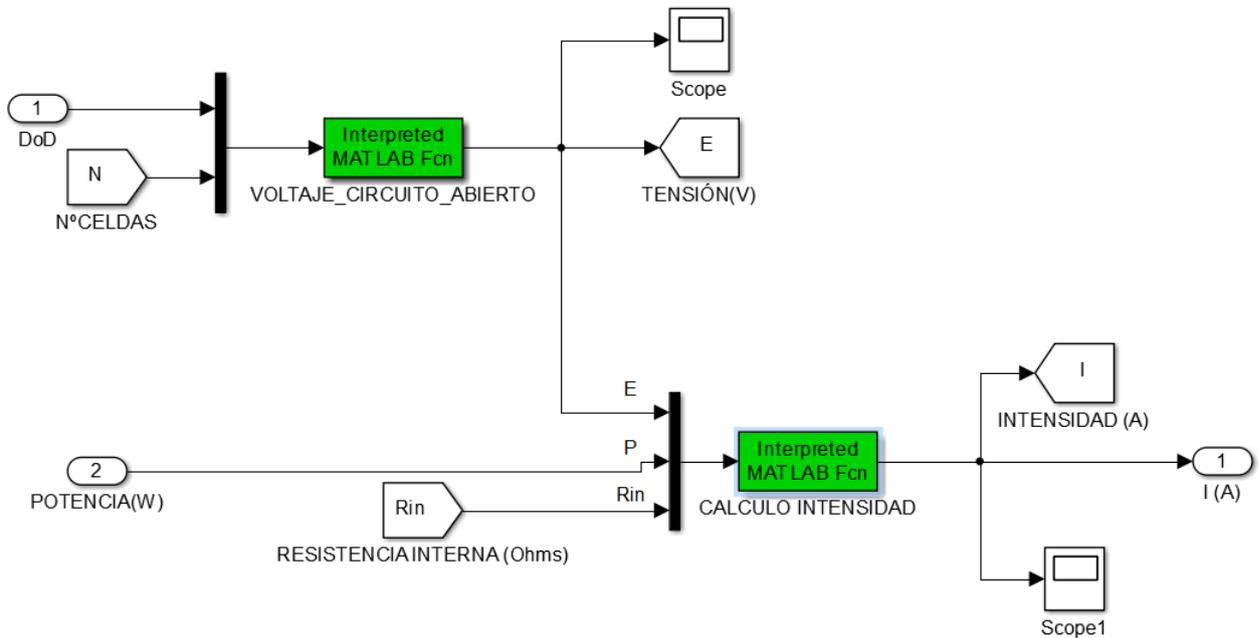


Figura 28: Extracto del bloque 2 de Matlab/Simulink®.

3. CARGA ELIMINADA O AÑADIDA

En este bloque (Figura 29) se calcula la cantidad de amperios hora (Ah) que se eliminan o suministran a la capacidad total de la batería. La entrada de dicho bloque sería la intensidad de corriente en Amperios y la salida los amperios suministrados.

Se aprecian dos diferentes funciones con un “switch”, uno para cargar y otro para descargar y que utilizan las ecuaciones anteriormente descritas.

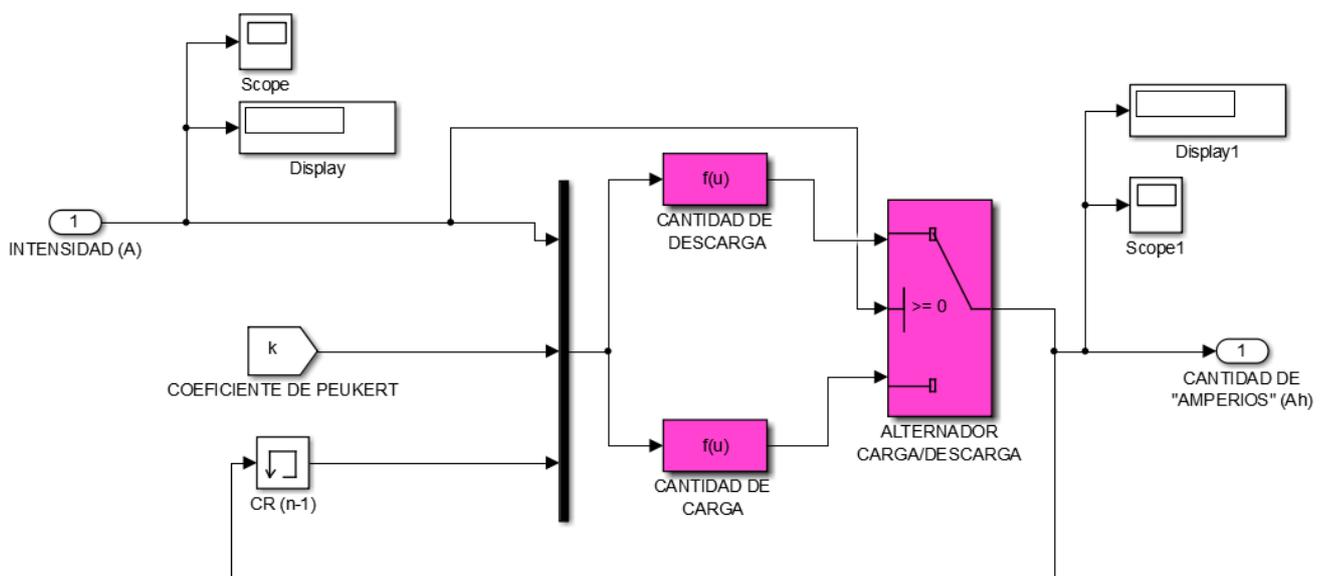


Figura 29: Extracto del bloque 3 de Matlab/Simulink®.

4. PROFUNDIDAD DE DESCARGA (DoD)

En este bloque (Figura 30) se simula el porcentaje de carga de 0 a 1 de la batería, siendo 0 un 100% cargada y 1 un 0% cargada. Para ello se divide la “cantidad de amperios” retirados/introducidos en la batería y se divide por la Capacidad de Peukert. Con el objetivo de saber como de cargada o descargada está la batería.

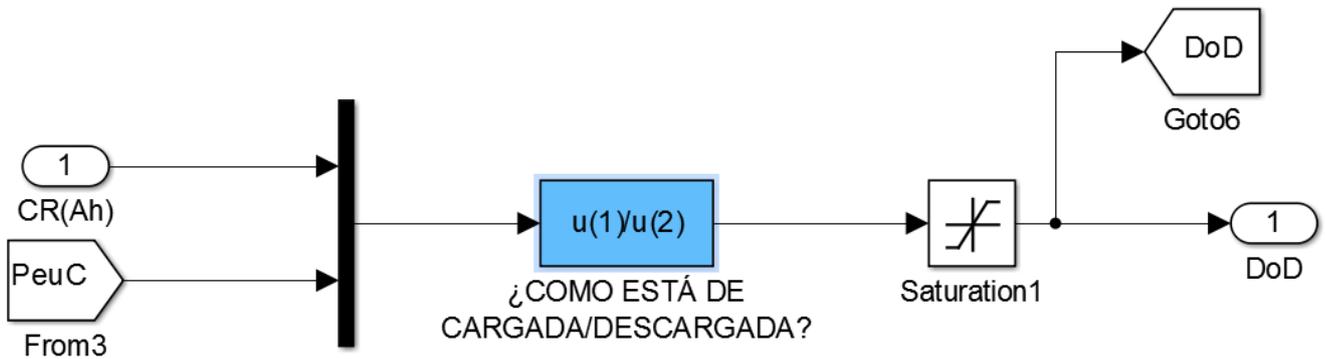


Figura 30: Extracto del bloque 4 de Matlab/Simulink®.

5. TENSION DE SALIDA

En el siguiente bloque (Figura 31) se representa como varía la tensión de salida (V) de la batería en función de la profundidad de descarga (DoD). Esto es a partir de la ecuación obtenida en el apartado “2.3.2.1 Modelado del comportamiento dinámico de la batería (OCV)”.

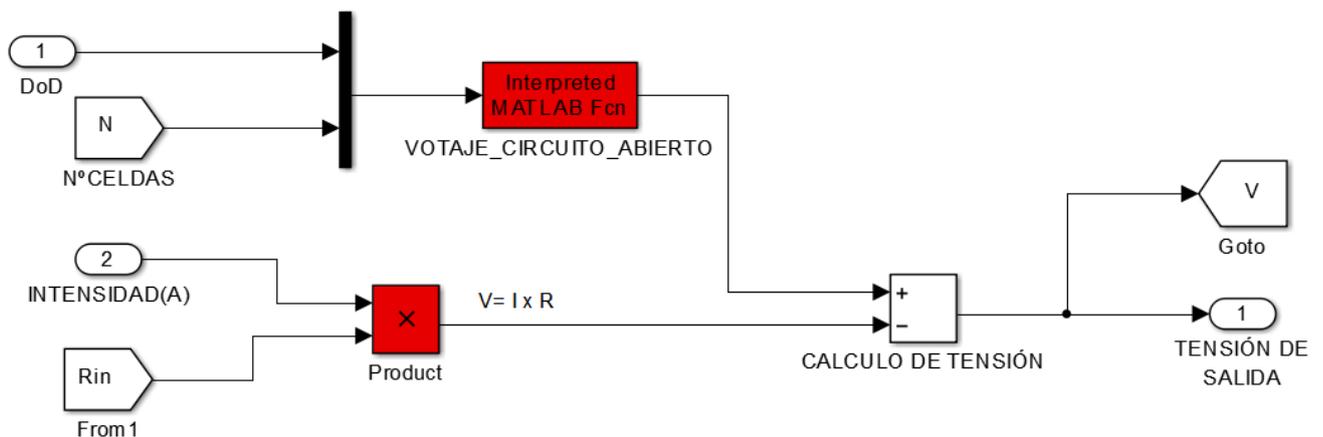


Figura 31: Extracto del bloque 5 de Matlab/Simulink®.

6. MUESTRA DE LOS VALORES FINALES

Por último, el siguiente bloque (Figura 32) muestra los resultados de interés, como son la profundidad de descarga (*DoD*) y el estado final de carga (*SoC*). Los cuales serán utilizados para determinar el estado de carga de la batería y poder generar un circuito de gobierno y control del sistema.

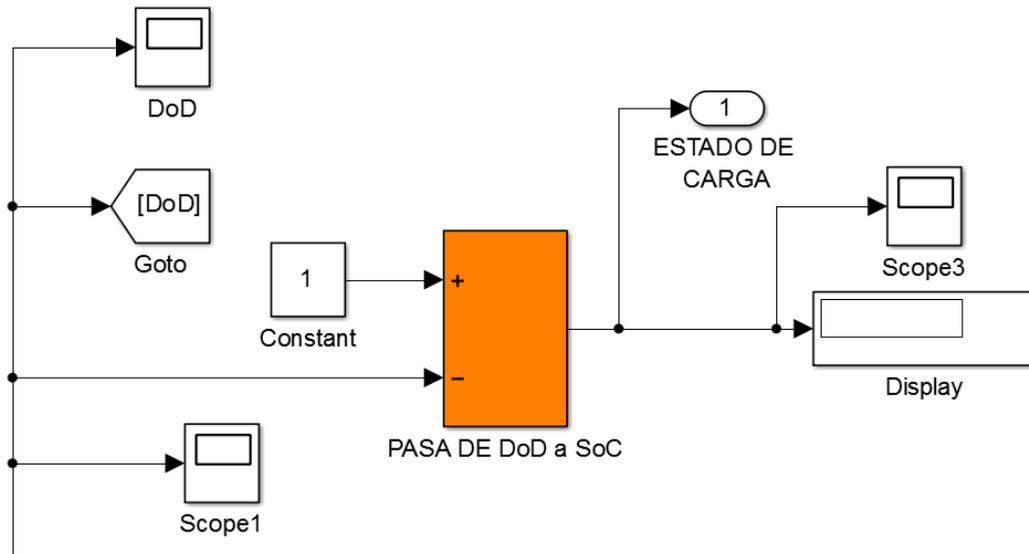


Figura 32: Extracto del bloque 6 de Matlab/Simulink®.

De tal manera queda explicado todo lo que acontece a la batería.

2.4 Electrolizador

Un electrolizador es un dispositivo en el cual se produce la electrólisis del agua. Esta es una reacción no espontánea donde se separa el agua en hidrógeno y oxígeno al hacer circular una corriente continua. El electrolizador es alimentado por la potencia que genera el molino eólico o en su defecto por la batería, de tal manera que se pretende tener en un casi funcionamiento continuo o siempre que se necesite rellenar el tanque de hidrógeno.

2.4.1 Electrolizador seleccionado

Para el sistema propuesto se ha seleccionado el Generador de Hidrógeno NMH2-500 de la casa MATHESON TRI-GAS®, ya que se tiene conocimiento que ha sido utilizado, obteniendo buenos resultados (Figura 33). Además puede producir hidrógeno puro al 99,9999% de pureza y cuenta con un compresor interno que permite tener una presión máxima de salida de 10.5 bar.



Figura 33: NMH2-500 de la casa MATHESON TRI-GAS®.

En la Tabla 6 se muestran las principales características del electrolizador según el fabricante.

Especificaciones del electrolizador NMH2-500, MATHESON TRI-GAS®	
Tasa de producción de Hidrogeno a PTE PTE: Presión y Temperatura Estándar. (20°C/ 1 bar)	0-500cc/min a PTE
Máxima presión de salida	10.5 bar
Pureza del Hidrógeno producido	99.9999%
Peso	19 kg
Potencia de consumo	300W
Precisión de presión	0.1 bar (± 0.5%)
Pantalla	Display grafico, 128x64 pixeles
Condiciones de trabajo	
-Temperatura	15°C - 40°C
-Humedad relativa	0-80%, sin condensación
Temperatura que almacena en sus componentes	2°C - 60°C
Nivel de presión de sonido	46dB
Dimensiones de la caja	230 x 355 x 410 mm

Tabla 6: Especificaciones técnicas del electrolizador NMH2-500 de MATHESON TRI-GAS®.

Para la simulación del electrolizador es necesario conocer el número de celdas utilizadas para la electrolisis. Se trata de un dato no disponible a priori, pero para la realización de este trabajo de fin de grado se disponía de una unidad de dicho electrolizador. En la Figura 34, y una vez desmontado el dispositivo, se puede apreciar el número de celdas que tiene el NMH2 500, y que es de dos celdas electroquímicas.



Figura 34: Interior del electrolizador NMH2-500.

Este electrolizador no usa ácidos ni alcalinos libres, y el único elemento líquido que se puede poner en contacto con la celda es el agua destilada. Tan pronto se consume el agua tiene que ser rellenado dicho depósito con la frecuencia que corresponda (17).

El hidrógeno generado en forma de gas es almacenado en un acumulador, que previamente se le hace pasar por un deshumidificador. La presión interna es variable dependiendo de la cantidad de hidrógeno generado en la celda y la presión de salida se controla con una válvula.

Las condiciones de trabajo están garantizadas por los siguientes aspectos de seguridad:

- Válvula de sobrepresión.
- Monitorización inteligente de la presión en el circuito.
- La producción de hidrógeno se detiene automáticamente cuando no se necesita más hidrógeno (el tanque de hidrógeno está lleno) o existe una fuga en la línea de salida.

2.4.2 Modelo del electrolizador

Para la modelización del electrolizador se ha utilizado la eficiencia de Faraday como clave de la simulación para ver el volumen de gas producido, como se aprecia en la siguiente ecuación general de la eficiencia de Faraday.

$$V = \frac{R \times I \times T \times t}{F \times p \times z}$$

Donde, V es el volumen de gas producido en m^3 , R es la Constante universal de los gases ($8.314J/(mol \times K)$), T es la temperatura ambiental (K), I es la corriente (A), t es tiempo (s), p es la presión ambiental (101312 Pa), F es la Constante de Faraday (96485 C/mol) y z es el número de electrones en exceso (Valencia).

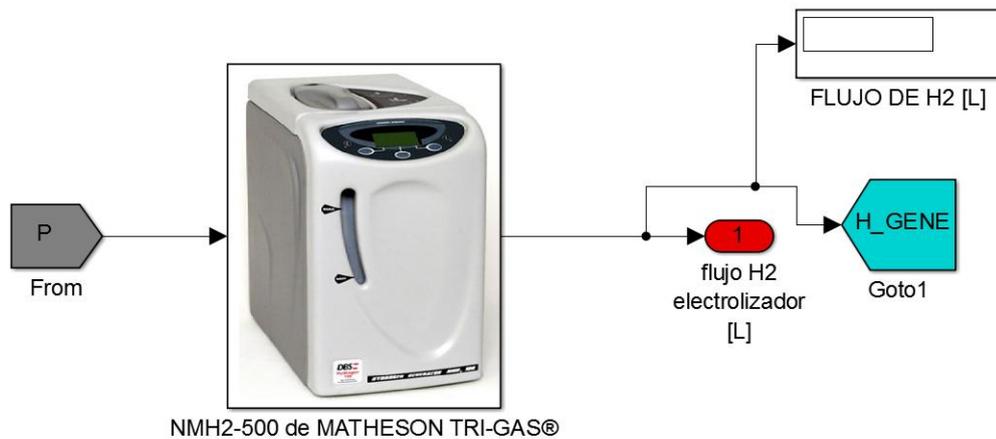


Figura 35: Diagrama de flujo del electrolizador.

También se utilizan cálculos como el paso de corriente alterna a corriente continua, cálculo de la intensidad y el uso de constantes como la de Faraday F , para pasar de Culombios a moles. La Figura 35 muestra el conjunto del subsistema, el cual está despiezado en la Figura 36.

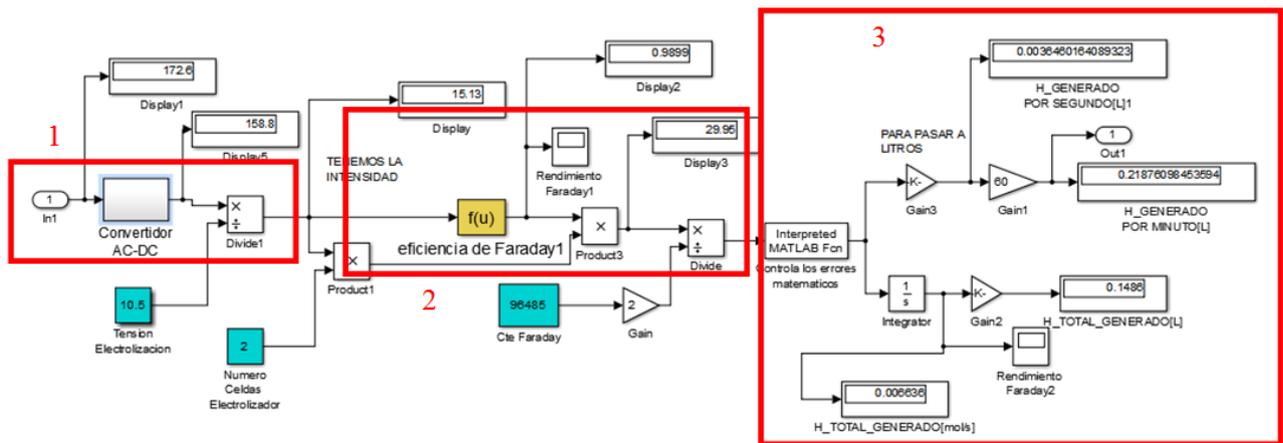


Figura 36: Diagrama completo del electrolizador en SIMULINK®.

En el rectángulo 1 simplemente se le aplica un factor a la potencia P , generada por el aerogenerador para pasar de corriente alterna a continua, a su vez se divide entre la tensión V y de tal manera se obtiene el la intensidad I (A) que corre por los electrodos. Como muestra la siguiente ecuación:

$$I = \frac{P}{V}$$

En el área recuadrada con el número 2 se calcula mediante la Eficiencia de Faraday, cuanta carga eléctrica medida en Culombios produce la intensidad I de corriente que le llega a los electrodos.

$$\frac{\left(\frac{I}{0.01}\right)^2 \times 0.99}{150 + \left(\frac{I}{0.01}\right)^2} [C]$$

Este valor se multiplica por el número de celdas y por último se divide entre la Constante de Faraday F .

$$F = 96485,3399 \text{ C mol}^{-1}$$

En el cuadro 3 se introduce una función que se encarga de controlar los valores problemáticos como el 0, de tal manera que se ajusta más a la realidad. Después se multiplica la cantidad de moles obtenidos en 2 por 22.4, que es la cantidad de litros que hay en 1 mol y también se multiplica por 60 para obtener la cantidad de litros de hidrógeno por minutos.

2.5 Tanque de almacenamiento

Este dispositivo es esencial para el sistema propuesto, ya que será el encargado de almacenar a una cierta presión todo el hidrógeno producido por el electrolizador. Se recuerda que el hidrógeno es el elemento portador de energía.

Este tanque será un mero trámite de almacenamiento entre el electrolizador y la pila de combustible. El electrolizador introduce hidrógeno en el tanque y la pila de combustible lo retira del mismo para la producción de corriente.

2.5.1 Tanque de almacenamiento seleccionado

Se ha elegido el tanque de hidrógeno H2-MHS2200 de la casa VONEN® porque limpia y almacena hidrógeno mediante una estructura de hidruros metálicos. El hidruro metálico de este depósito permite eliminar tanto el oxígeno como el nitrógeno procedente de la alimentación del depósito. Esto es porque la producción de hidrógeno puede resultar que esté mezclada mínimamente

con gases contaminantes como oxígeno e nitrógeno. Los hidruros metálicos de este depósito solo absorben el H₂. Entonces los gases contaminantes quedan sueltos dentro del depósito, y estos son extraídos automáticamente por válvulas incorporadas del sistema. Es por esto por lo que se garantiza una pureza de H₂ superior al 99,999%. Este dispositivo se define como un depósito de hidrógeno de hidruro metálico de baja presión, véase Figura 37. En la Tabla 7 se puede contemplar las especificaciones facilitadas por el fabricante.



Figura 37: Depósito de hidrógeno H2-MHS2200 de la casa VONEN®

Especificaciones del Depósito de hidrógeno H2-MHS2200 de VONEN®	
Capacidad	2.200 l
Presión del depósito	4 bar
Hidrógeno absorbido	Dentro de cristales del hidruro metálico
No presenta efecto de auto descarga	
Pureza del hidrogeno admisible	99.99973%
Dimensiones	Altura= 635 mm, Ø = 140mm
Peso	26 Kg

Tabla 7: Especificaciones del depósito de hidrógeno H2-MHS2200 de la casa VONEN®.

2.5.2 Modelado del tanque de almacenamiento

Para la simulación del tanque se ha usado dos entradas, una que incrementa la cantidad de hidrógeno (perteneciente al electrolizador) y otra que retira hidrógeno del tanque (perteneciente a la pila de combustible). Estas dos entradas se suman y el resultado se almacena. Esto es gracias a la función de acumulador que tiene un módulo de SIMULINK®, el cual es el elemento principal del diagrama de flujo de Figura 38.

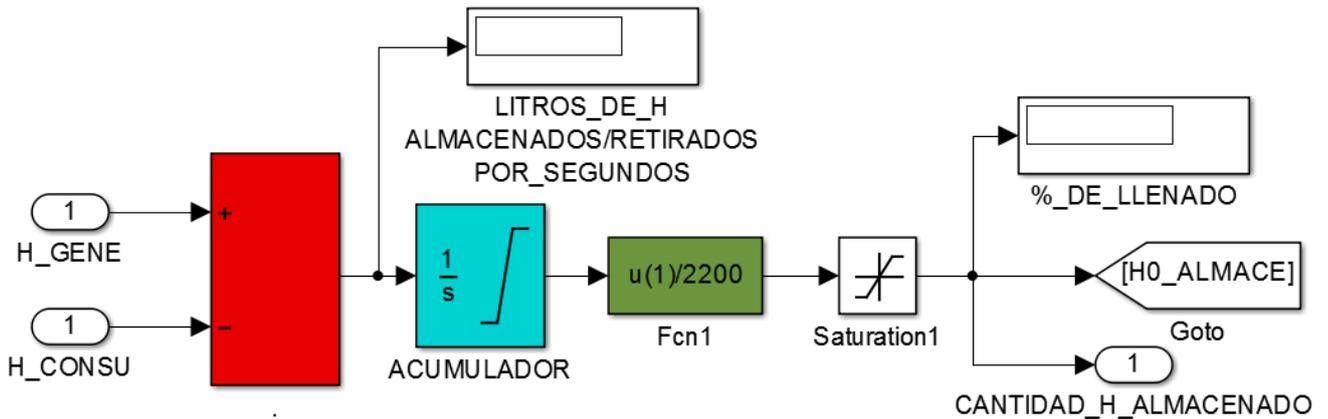


Figura 38: Diagrama de flujo que simula el tanque de hidrógeno en SIMULINK®.

La Figura 38 muestra como resultado la cantidad de litros almacenados o retirados (dependiendo del signo de este valor) en cada instante de tiempo, así como el porcentaje de llenado del tanque de hidrógeno.

2.6 Pila de Combustible.

La pila de combustible es la responsable de obtener energía a partir del hidrógeno almacenado y del aire. Se trata de un dispositivo de conversión energética que se basa en celdas electroquímicas que generan electricidad por oxidación de un combustible y reducción de un oxidante a la vez, estos dos en estado gaseoso, véase la Figura 39 (18).

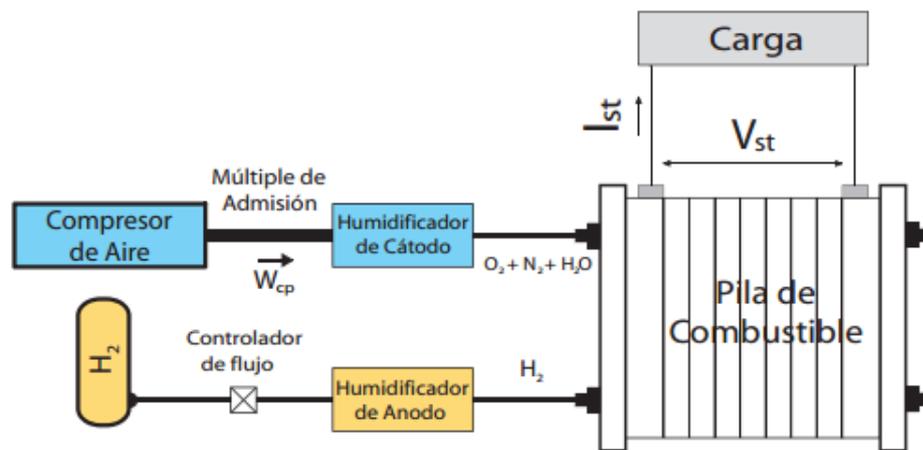


Figura 39: Diagrama esquemático del sistema general.

2.6.1 Pila de combustible seleccionada

Se trata de la Nexa™ 1200W de la casa BALLARD®, (Figura 40). Se ha elegido este dispositivo ya que es un módulo pequeño de bajo mantenimiento, que consta de un completo sistema de proceso automatizado, y que está diseñado para trabajar en usos móviles de energía y almacenamiento. Además es capaz de generar una energía hasta de 892,8 kWh en un mes, siempre y cuando tenga el flujo de hidrógeno necesario.

DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE COMBUSTIBLE PARA LA ENM



Figura 40: Pila de combustible Nexa™ 1200W de la casa BALLARD ®.

En el manual de usuario facilitado por BALLARD ® se registran las siguientes especificaciones de entrada a la pila y de salida, mostradas en la Tabla 8.

Salidas	Requisitos	Definición	Cantidad
Potencia	Potencia nominal	Capacidad en Condiciones Estándares	1200W
	Voltaje	Rango de funcionamiento	22V - 50V
	Tiempo de arranque	Mínimo tiempo para trabajar a condiciones estándares	2 minutos
Emisiones	Ruido	Máxima emisión de ruido a 1m	72dBA
	Agua	Máxima cantidad de agua producida	870mL/h
Dimensiones	Largo x Ancho x Alto	560x250x330 mm	
Peso	13Kg		
Tiempo de vida estimado(mínimos)	Vida en funcionamiento	Mínimo número de horas de funcionamiento	1500 Horas
	Ciclos de vida	Mínimo número de arranques	500
Combustible	Pureza	Concentración más baja aceptable	99.99% H ₂
	Presión	Rango de suministro permitido de presión	70 - 1720 kPa
Voltaje de alimentación DC	Voltaje	Rango permitido de entrada	18V - 30V
	Potencia	Máxima potencia durante arranque	60W
Lugar de funcionamiento	Localización	Exteriores e Interiores	

	Temperatura	Temperatura ambiente recomendable de trabajo	3°C - 40°C
	Humedad relativa	Humedad relativa del ambiente recomendada	0% - 95% (sin condensar)

Tabla 8: Especificaciones de entrada y salida de la pila Nexa™ 1200W de BALLARD®.

2.6.2 Modelado de la pila de combustible

El fabricante en los manuales de este dispositivo proporciona los datos necesarios para calcular la potencia de salida a través de una gráfica mostrada en Figura 41. En dicha gráfica se puede observar la relación existente entre el hidrógeno consumido en litros por minuto (SLPM), la corriente en amperios por segundo que esto genera y la potencia generada en Vatios.

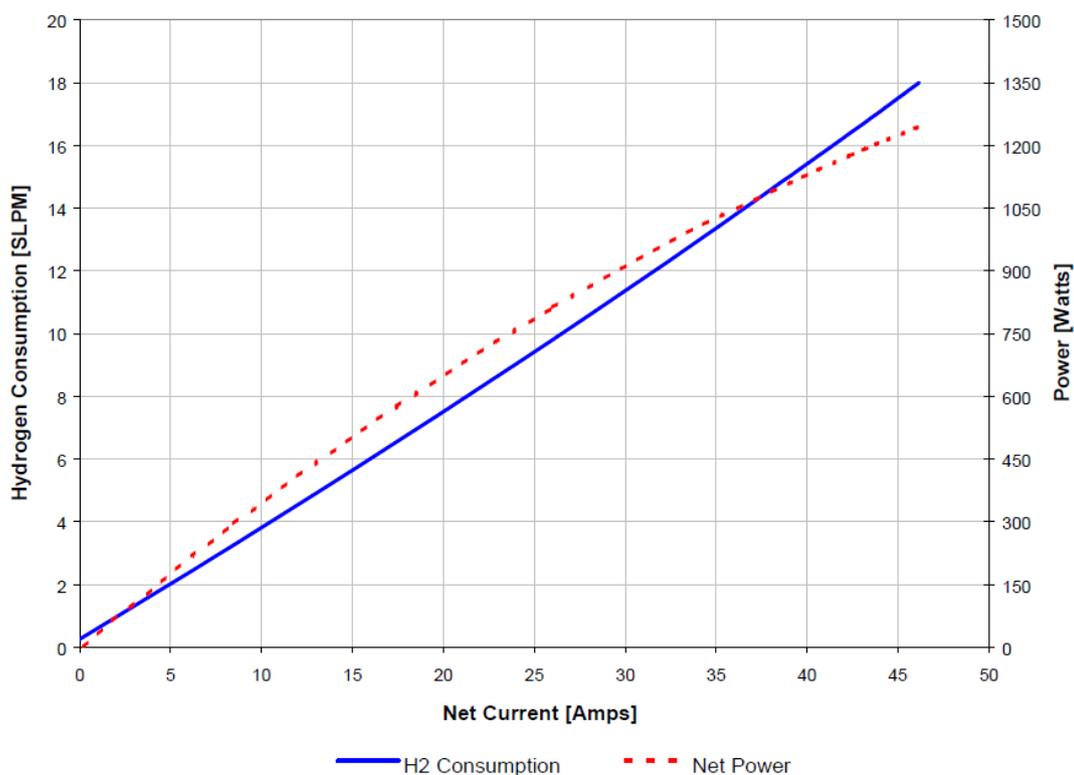


Figura 41: Gráfica relación hidrógeno consumido/potencia de salida, ofrecida por BALLARD®.

A partir de esta curva y mediante una herramienta para la obtención de datos de curvas a través de imágenes, (Web Plot Digitizer® (15)) se obtienen los datos de los puntos que la forman.

A partir de estos datos se ajusta dicha curva a un polinomio mediante la herramienta Ploty® (16), de uso público en la red (Figura 42 y Figura 43).

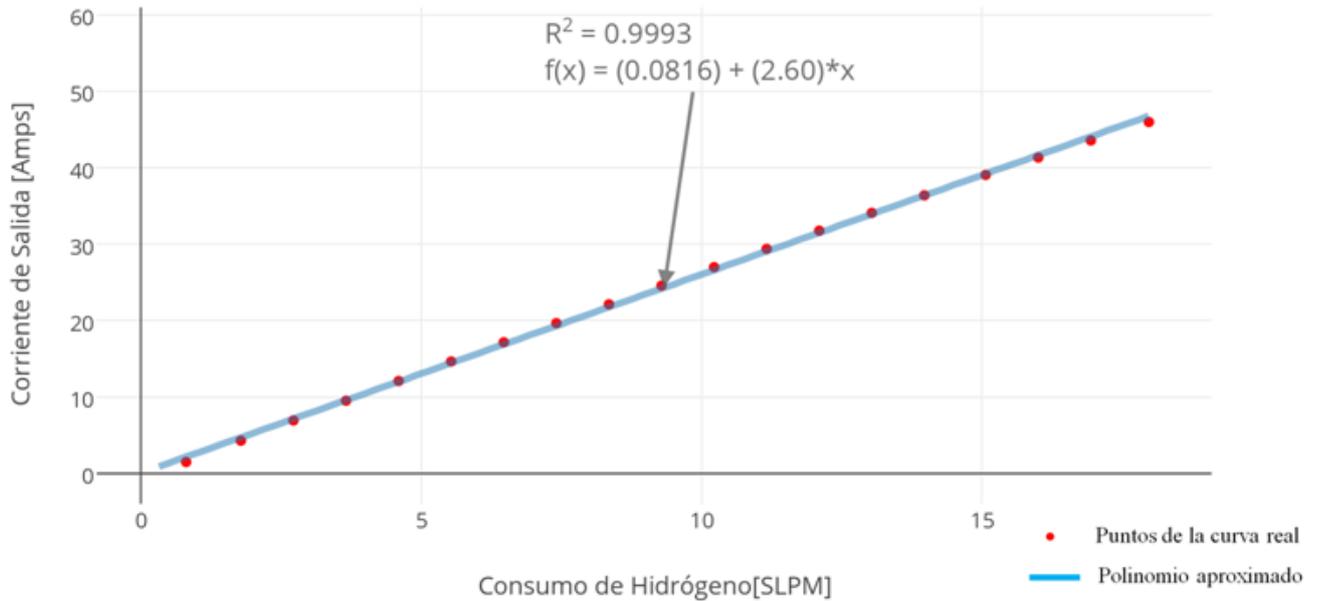


Figura 42: Superposición a la del polinomio calculado a la curva real del fabricante.

En la Figura 42 se muestra la similitud entre la curva de corriente frente a consumo de hidrógeno suministrada por la marca y el cálculo del polinomio. De la misma manera en la Figura 43 aparece representada la potencia en base a la corriente en la salida con su polinomio de ajuste.

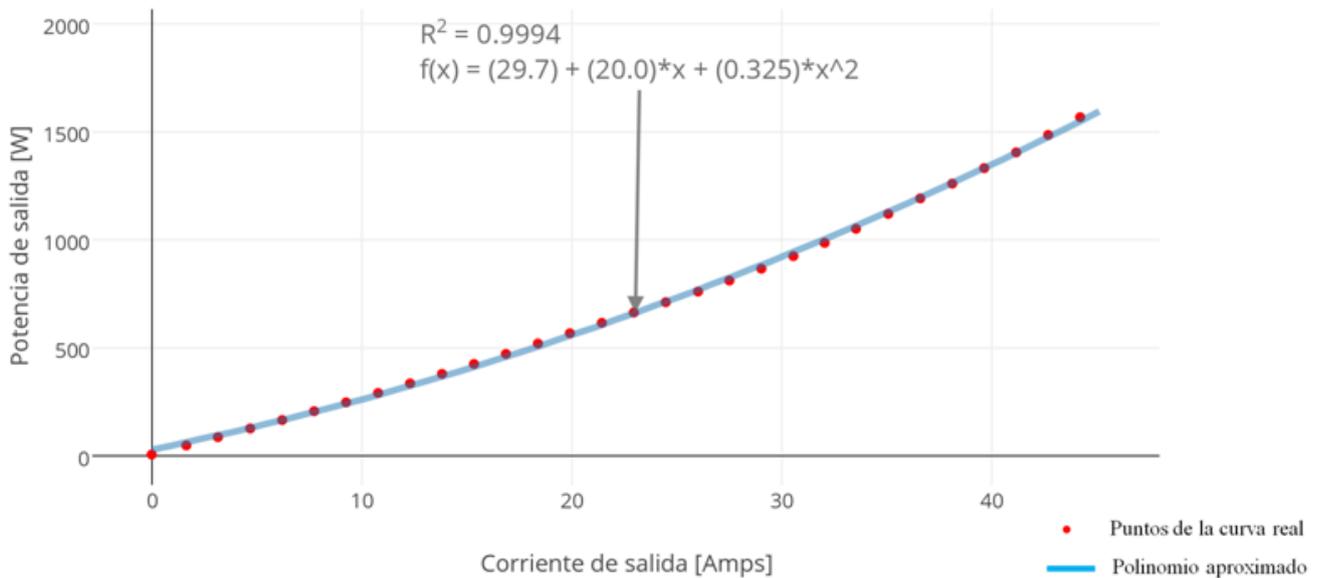


Figura 43: Superposición a la del polinomio calculado a la curva real del fabricante.

Estos polinomios calculados han sido introducidos en bloques de SIMULINK®, como se verá a continuación.



Figura 44: Diagrama general de la pila de combustible en SIMULINK®.

En la Figura 44(arriba) se muestra el modelo de la pila de combustible para implementar con el resto de los modelos, y en la Figura 44(debajo) se puede observar la estructura interna del bloque de la pila de combustible con las funciones de Matlab® que incorpora las ecuaciones de ajuste mostradas anteriormente.

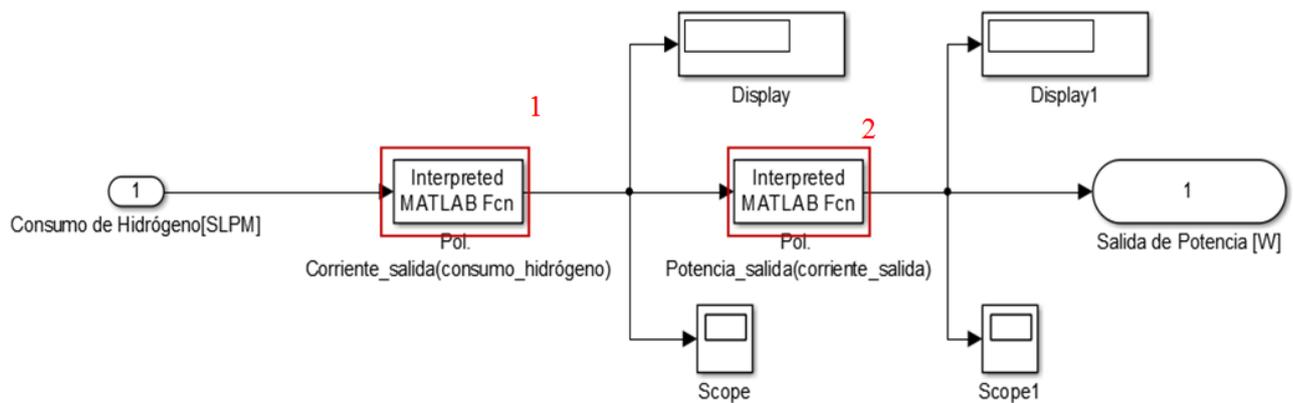


Figura 44: Diagrama de la simulación en SIMULINK® de la Nexa™ 1200W de la casa BALLARD®.

De tal manera quedan explicadas todas las descripciones, selecciones y modelos de los elementos que forman parte del sistema propuesto.

2.7 Modelo global

En este apartado se quiere mostrar mediante la Figura 45, como queda la compilación de todos los dispositivos anteriores.

En este bloque se simula la generación energética de la pila de combustible en kWh de cada mes del año 2014. Para que la simulación se lleve a cabo, solo es necesario introducir los datos de viento de Meteo Galicia de todos los meses del año 2014. Estos valores se introducen en diferentes bloques “Workspace” de MATLAB®. Dichos bloques son matrices de datos que se usan para introducir valores, que posteriormente se recurrirá a ellos para llevar a cabo la simulación.

3 SIMULACIÓN DEL SISTEMA

3.1 Presentación de resultados anuales.

Los resultados anuales sirven para hacerse una idea sobre el dimensionamiento de la instalación. Entonces se pretende analizar las limitaciones de los diferentes dispositivos y de la cantidad a utilizar de los mismos simulando un año completo. Por supuesto la cantidad, la calidad, y las dimensiones de los dispositivos a usar dependerá de la demanda energética que se quiera cubrir. Es por esto por lo que se ha supuesto por ejemplo que toda la potencia generada por el aerogenerador será usada por el electrolizador, y que todo el hidrógeno generado por el electrolizador será usado por la pila de combustible. Claro está que esto no es real, cada dispositivo cuenta con limitaciones, y es lo que se pretende ajustar con la simulación realizada.

3.1.1 Potencia generada

Para comenzar y dado que el viento es el origen del sistema, en la Figura 46 se aprecia la potencia suministrada por el aerogenerador en base al viento existe todos los días del año 2014.

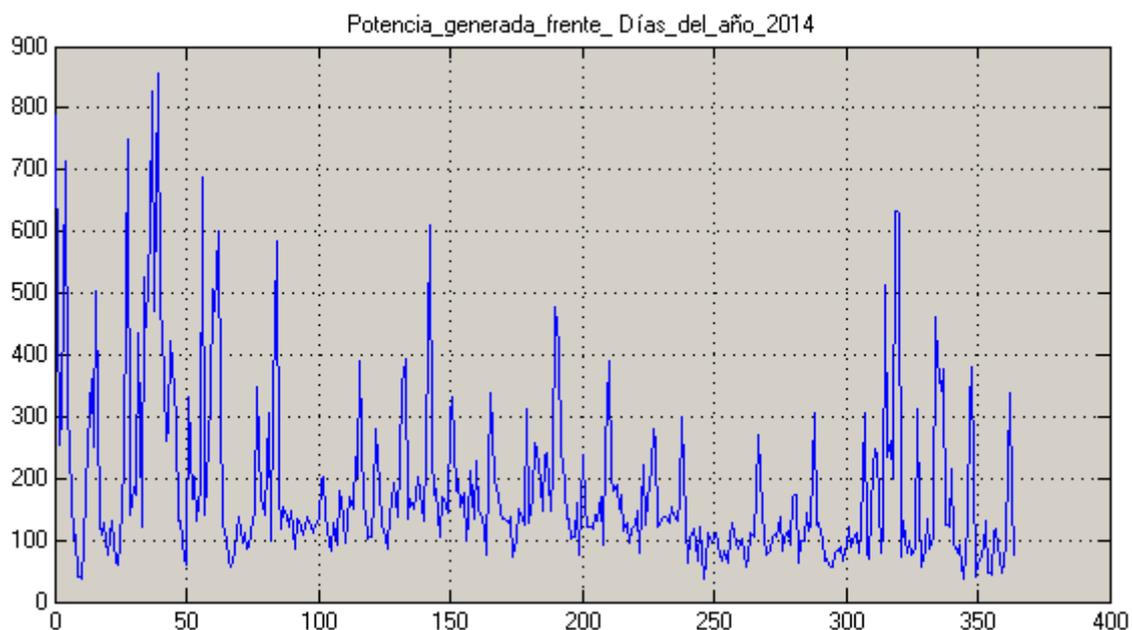


Figura 46: Esta gráfica muestra la potencia generada (W), frente al año 2014 (días)

En la gráfica se aprecian bastantes picos de potencia, el más alto de ellos es de 856,5W. Este dato es muy importante ya que va a ser el que indique la cantidad de electrolizadores que se tendrán que usar para que no haya ninguna pérdida de potencia. Aunque estos excesos de potencia serán almacenados en la batería, se debe maximizar y priorizar la generación de hidrógeno antes que el almacenamiento de la energía en baterías.

A pesar de que existe un máximo de potencia, se debe tener en cuenta los picos de potencia más comunes, los cuales se encuentran entre 300 y 600W. Dado que el electrolizador seleccionado trabaja con una potencia de 300W, se tendrán que usar un electrolizador para conseguir una óptima generación de hidrógeno, ya que la potencia que no sea usada por el electrolizadores se almacenará en la batería para suplir futuras caídas de viento y por consiguiente de potencia.

3.1.2 Hidrógeno generado

En el siguiente paso se va a analizar la cantidad de tanques de hidrógeno que tendríamos que utilizar. Para ello tenemos que saber la cantidad de H_2 que es generada por el electrolizador, para compararla con la capacidad del depósito y con el consumo de la pila de combustible.

Puesto que la pila de combustible tiene un consumo máximo de 18 litros/min y el pico máximo del electrolizador es de 0,42 litros/min (como se aprecia en la Figura 47), no habría problema con el sobrealmacenamiento, puesto que la demanda de H_2 es mayor que el aporte del mismo. Aún así, es de interés saber que tomando una generación media anual de 0,15litros/min el tanque se llenaría por completo (con la pila de combustible apagada) en 14.667,67 minutos, o lo que es lo mismo en 244 horas o en 10 días aproximadamente (dependiendo del mes). Siendo de 2200 litros la capacidad de almacenamiento del depósito.

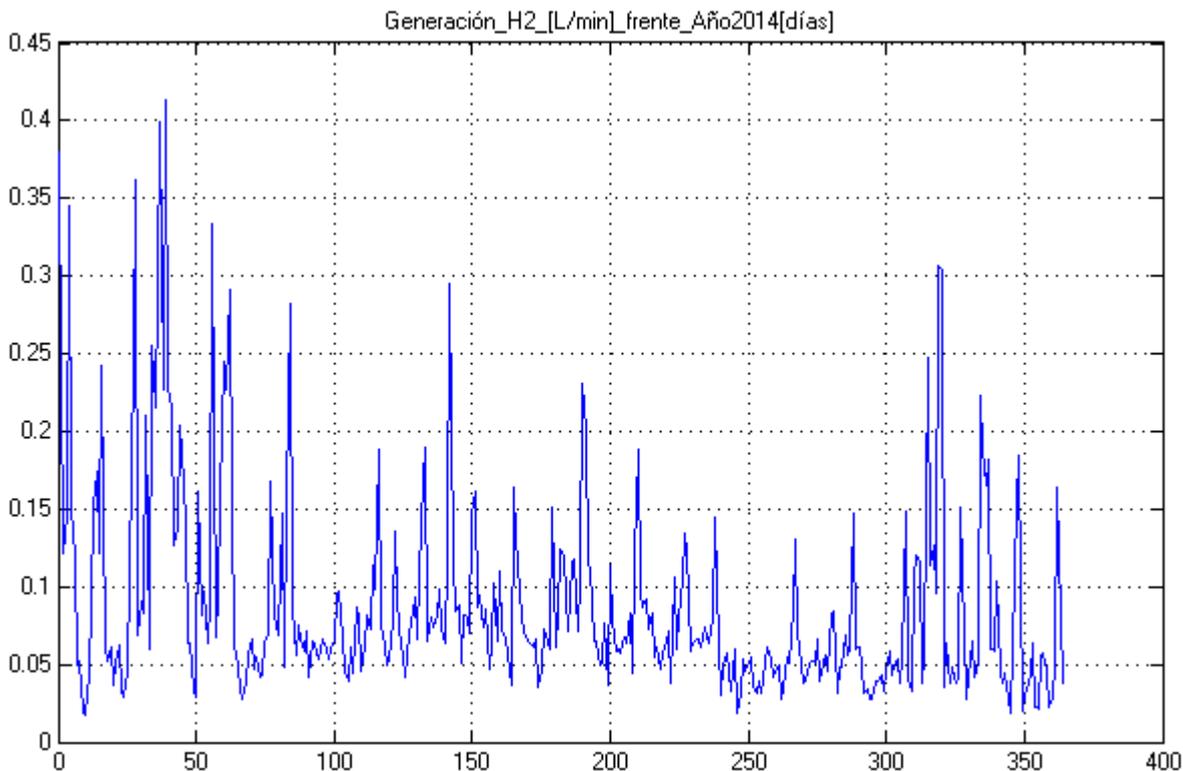


Figura 47: Generación de H_2 en litros por minuto frente a días del año 2014.

Es decir, usando la pila de combustible al menos una vez cada 10 días (uso regular), un solo depósito de hidrógeno sería suficiente. En caso de instalar más aerogeneradores, se instalarían más electrolizadores y sería necesario recalcular el número de tanques de almacenamiento.

3.1.3 Energía generada

La energía generada depende de la cantidad de hidrógeno que procese la pila de combustible y del periodo de tiempo que esté en funcionamiento, en nuestro caso se ha calculado para un año completo durante todos los días del año. Además se supone que la pila de combustible ha procesado todo el H₂ que el electrolizador ha producido. Obteniendo como resultado la grafica de la Figura 48 de energía en kWh por día.

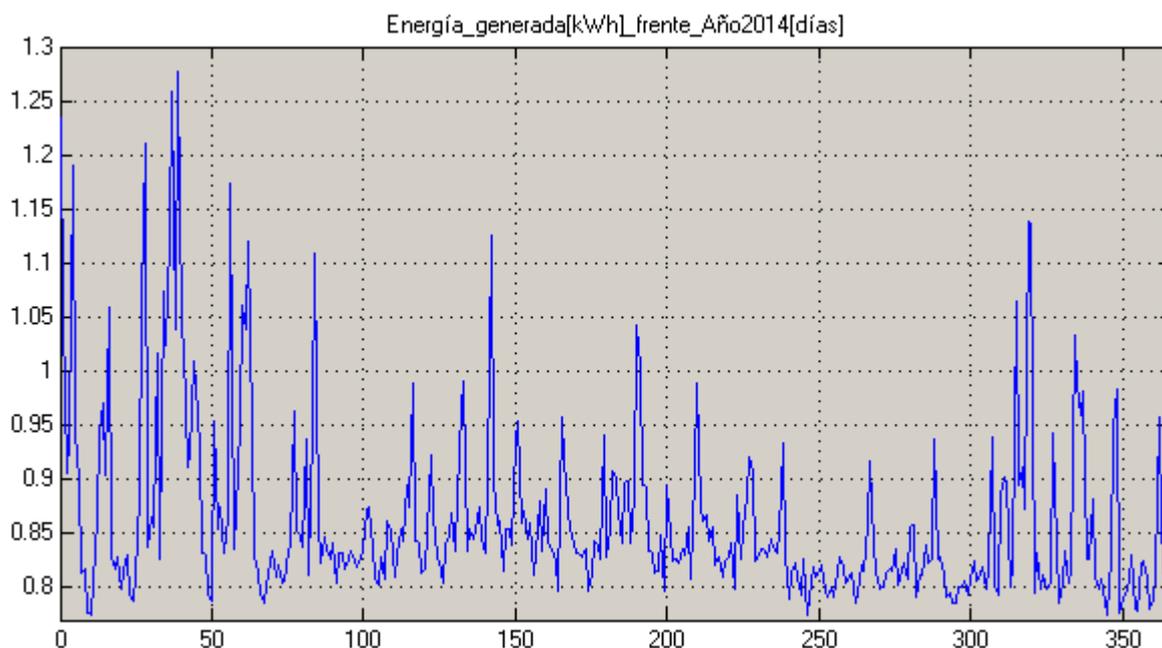


Figura 48: Energía generada en kWh cada día del año 2014.

Cada pila de combustible es capaz de generar un máximo de 1,3 kW por cada hora, es decir, un máximo de 31,2 kWh por día. Se aprecia en la gráfica que nunca se llega a dicho máximo, por lo que para el volumen de H₂ obtenido solo hace falta una pila de combustible.

Por otra parte si el tanque de hidrógeno seleccionado estuviera al 100% de su carga, se vaciaría por la pila de combustible entre 2 y 18 horas aproximadamente (dependiendo de la potencia que se quiera dar) aportando una energía de 2,8 kWh.

Sin embargo como he dicho en los anteriores apartados en el caso que se pusiera más de un aerogenerador habría que rehacer los cálculos y analizar de nuevo estos pasos.

3.2 Presentación de resultados mensuales

Los resultados mensuales son una mera presentación de los datos obtenidos de la simulación. Es por esto por lo que se adjuntará la generación energética mensual en el anexo I.

4 CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones

Una vez se eligen todos los diferentes dispositivos, se simula el sistema completo y se ajusta a las limitaciones y capacidades de cada dispositivo se llega a las siguientes conclusiones.

El aerogenerador seleccionado es un dispositivo tecnológico muy capaz de aprovechar al máximo la energía presente en el viento, es por lo que no presenta ninguna limitación si no que marca el dimensionamiento del sistema una vez que se conoce para que vaya a ser usado. Para que se hagan una idea, un hogar medio español tiene un consumo de 340 kWh al mes y esta turbina con una velocidad media de 3 m/s (baja velocidad) obtiene una energía de 140 kWh al mes, es decir cubriría un 41% del consumo energético mensual del hogar.

Se ha calculado que el tiempo de llenado de un tanque de hidrógeno con un electrolizador es de aproximadamente 10 días, también se ha calculado el tiempo de vaciado por un electrolizador y es de entre 2 y 18 horas. De tal manera se aprecia que se emplea más tiempo en llenar el tanque que en vaciarlo. Esto es una conclusión importante ya que se deberían de usar más electrolizadores en serie para reducir el tiempo de llenado del tanque de hidrógeno y por lo tanto implementar en el sistema más generadores (por cada aerogenerador se deben de usar dos electrolizadores para hacer un consumo óptimo de dicha potencia), o usar un tanque de mayor capacidad para ser usado durante un mayor periodo de tiempo en el caso que se necesite.

Entonces, puesto que la generación de hidrógeno es baja, la generación de potencia por la pila de combustible es muy baja. También es una generación de hidrógeno lenta en comparación con el consumo del mismo por la pila de combustible, así que o se dispone de un gran número de electrolizadores (lo que implica mayor número de aerogeneradores) o no puede haber un flujo continuo de generación de energía. Es por este motivo por el que se llega a la conclusión que este sistema de almacenamiento y utilización de energía renovable alcanzaría su mayor rendimiento en situaciones específicas como por ejemplo: sistema de alimentación de alumbrado de emergencia, recarga de dispositivos electrónicos, recarga de baterías de los barcos presentes en la escuela... De tal modo que mientras estas situaciones no se están llevando a cabo, se están llenando los tanques de hidrogeno poco a poco por parte de los electrolizadores.

Es cierto que para la simulación del sistema se ha optado por un electrolizador de laboratorio, de tal modo que la “limitación” o “cuello de botella” de energía se encuentra en la capacidad de generar hidrógeno, este problema se soluciona optando por un electrolizador con mayores prestaciones que además no existe problema alguno para su asentamiento dado las dimensiones de la Escuela Naval Militar. Del mismo modo se puede optar por pilas de combustibles con mayores capacidades para poder optar a mayores niveles de energía suministrada.

Es por todo esto que en el caso que se llevase a una instalación real se debe ser consciente que no puede ser una fuente principal ni secundaria de energía para un recinto como es la Escuela Naval Militar, sino que más bien para un suministro de algún destino, modulo, camaretas, o como sistemas de emergencia de iluminación, por ejemplo.

5 LÍNEAS FUTURAS

Este proyecto ha sido muy educativo e interesante ya que se tratan temas relevantes de actualidad como son las energías renovables y también de un novedoso sistema de almacenamiento de energía mediante hidrógeno. Es por esto por lo que se motiva a que se siga desarrollando este proyecto con las siguientes propuestas:

- Obtener un consumo mensual medio de algún edificio de la Escuela Naval Militar y a partir de ahí, realizar una simulación real. Teniendo en este TFG las primicias o pautas como guía, y a su vez desarrollar un sistema de control y gobierno de dicha simulación.
- Realizar esto mismo en diferentes unidades de la armada, enfocándose como recurso energético en caso de emergencia a bordo.
- Tal vez en varios TFG's "grupales" podría plantearse la simulación al completo de un vehículo propulsado por un sistema de pila de combustible, este trabajo requiere amplios conocimientos en SIMULINK®.
- Analizar las posibles optimizaciones de un electrolizador, enfocado a buscar un mayor flujo de generación de hidrógeno.
- Realizar la simulación de diferentes ventajas y desventajas de dispositivos usados en este TFG, con el objetivo de mostrar cuales serían los mas recomendados para diferentes situaciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

1. **Alfonsín Pérez, Victor Ángel.** *SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS DE EMISIÓN CERO (ZEV)*. Vigo : s.n., Enero de 2011.
2. **Villarubia López, Miguel.** *Ingeniería de la Eólica*. 2012.
3. **Talayero Navales, Ana Patricia y Telmo Martínez, Enrique.** *Energía eólica*. Zaragoza : s.n., 2008.
4. **Corona, Sonia y Marcial Pérez, David.** *El país*. 13 de Enero de 2015.
5. *El País*. 15 de Enero de 2014.
6. http://elpais.com/tag/energia_eolica/a/. *El País*. 20 de Enero de 2014.
7. **Noceda, Miguel Ángel.** *El País*. 21 de Diciembre de 2014.
8. **Monforte, Javier.** 2014, ENERGETICA XXL.
9. **Fragoso Reyes, Mario.** ESTADO DEL ARTE DE LAS ENERGÍAS ALTERNAS EN MÉXICO. México D.F. : s.n., Agosto de 2007.
10. **Peña Ordóñez, Carlos.** ESTUDIO DE BATERÍAS PARA VEHÍCULOS. Madrid : s.n., Mayo de 2011.
11. **Américo Perretti, Hernán y Visintin, Arnaldo.** HIDRÓGENO, COMBUSTIBLE DEL FUTURO: ¿POR QUÉ, CÓMO Y DÓNDE?
12. **López Ramirez, Juan Rafael.** Modelo dinámico de un electrolizador alcalino.
13. **Peña Martínez, Juan, y otros.** Pilas de combustible.
14. **HONEYWELL TM.** *Owner´s Manual*. Ontario : s.n.
15. **Web Plot Digitizer.** <http://arohatgi.info/WebPlotDigitizer/app/>.
16. **Plotly.** <https://plot.ly/external>.
17. **MATHESON TRI-GAS®.** *Hydrogen generator model NM Series II*.
18. **Kunusch, Cristian, y otros.** *Modelado Dinámico y Validación*.
23. **Google.** Google.
24. **Matlab/Simulink®.**
25. **TROJAN BATTERY COMPANY ®.** *T.1275 PLUS DATA SHEET*.
26. **Peukert´s Calculator.**

27. **BALLARD®**. *User's Manual*. 2003.

ANEXO I: RESULTADOS MENSUALES OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN.

Enero:

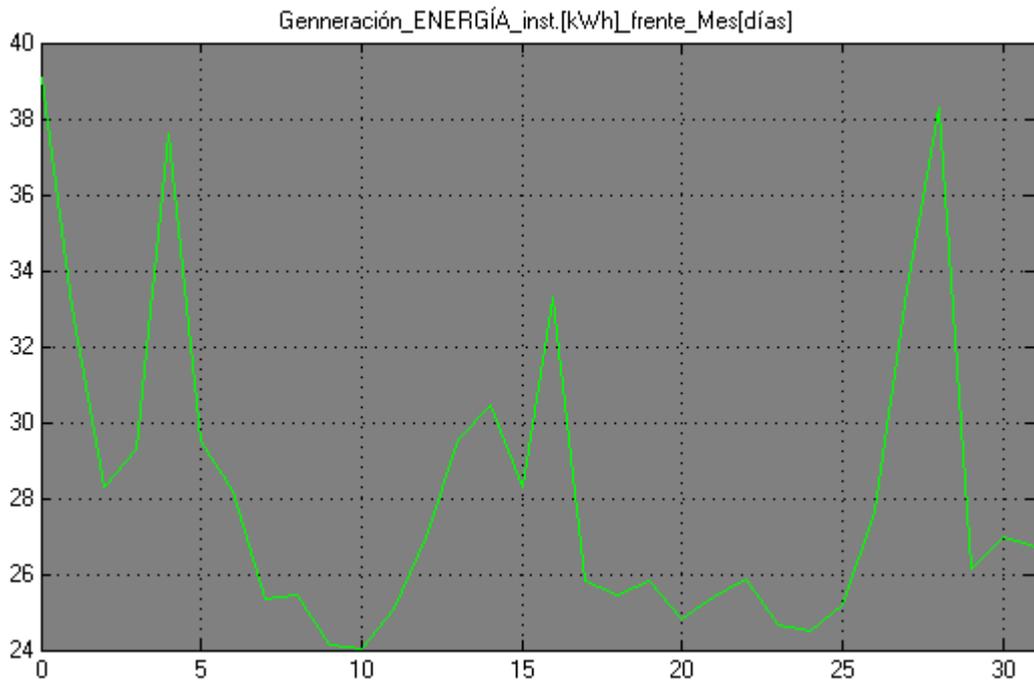


Figura 49: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de enero.

Febrero:

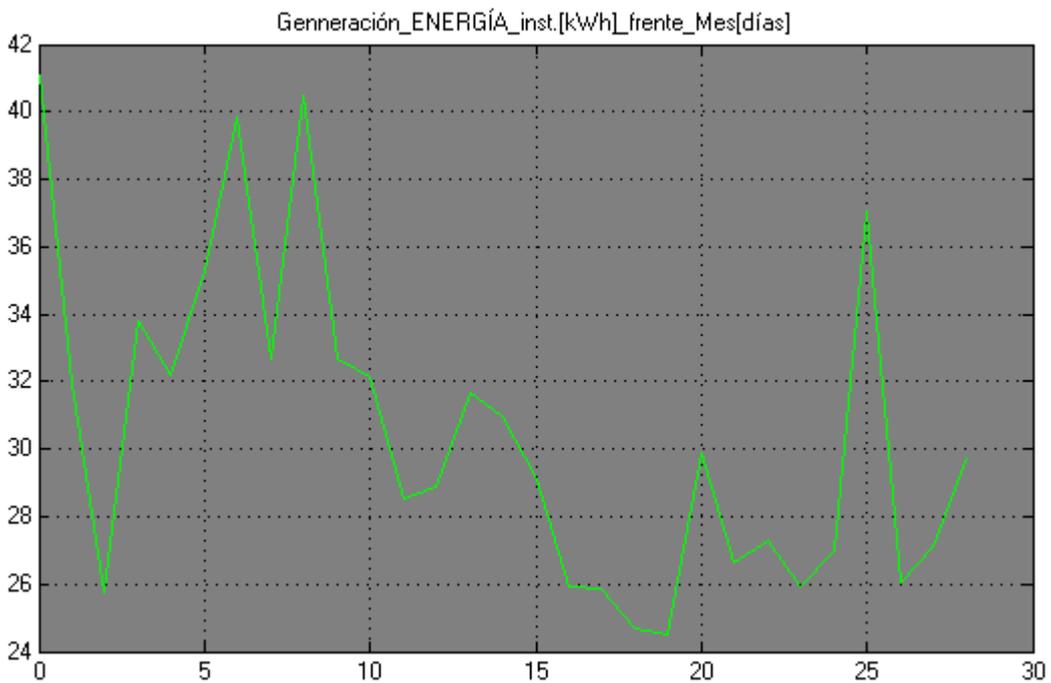


Figura 50: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de febrero.

DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE COMBUSTIBLE PARA LA ENM

Marzo:

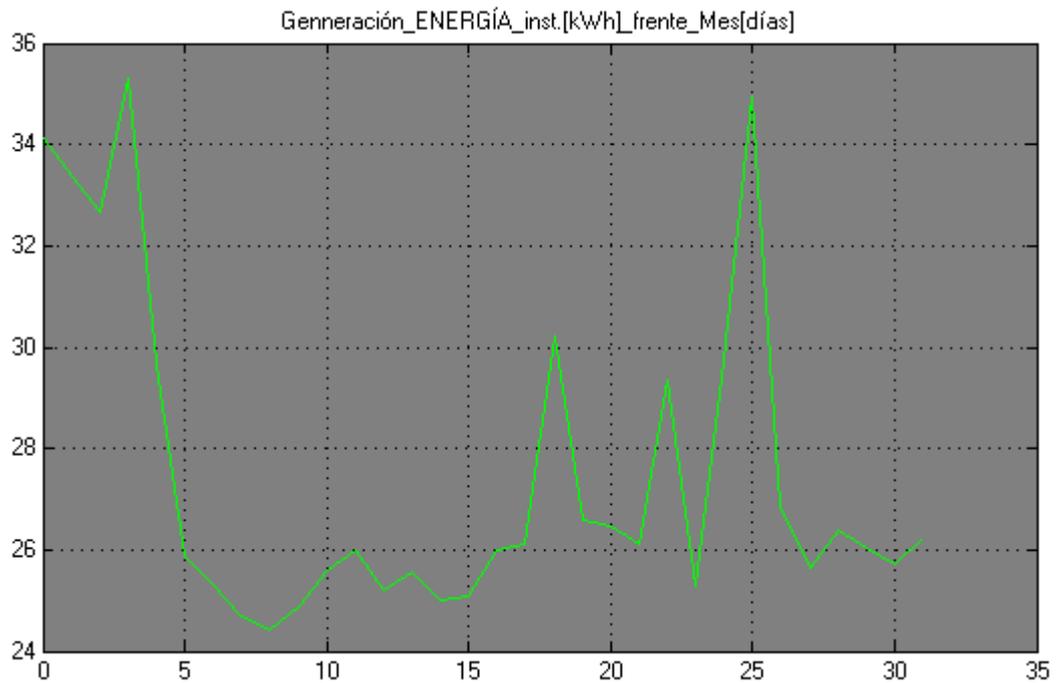


Figura 51: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de marzo.

Abril:

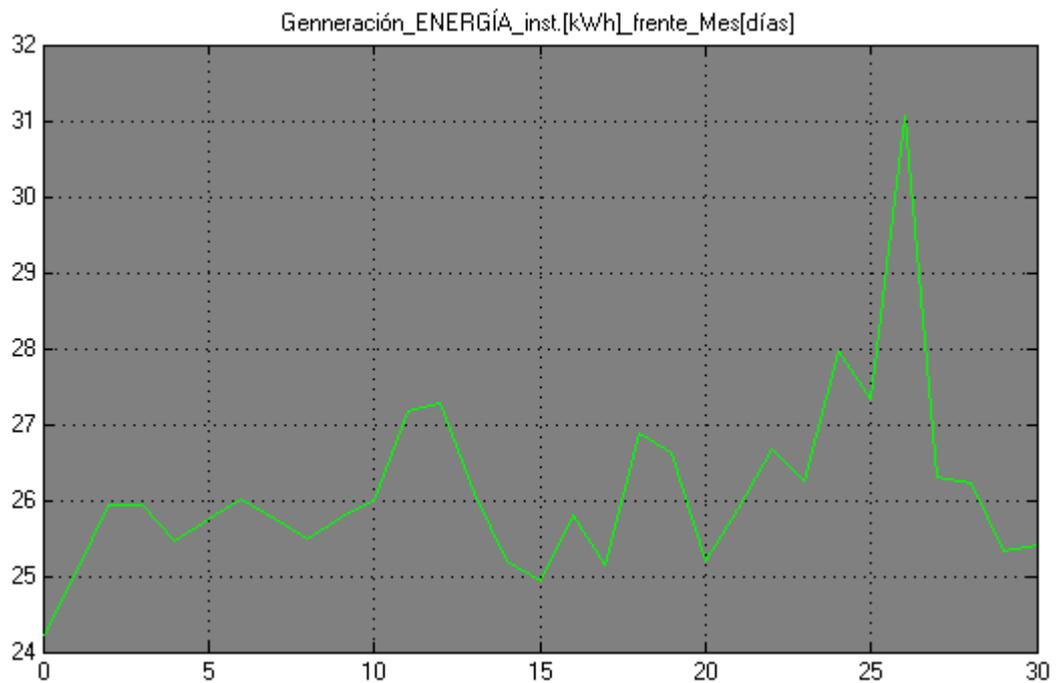


Figura 52: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de abril.

Mayo:

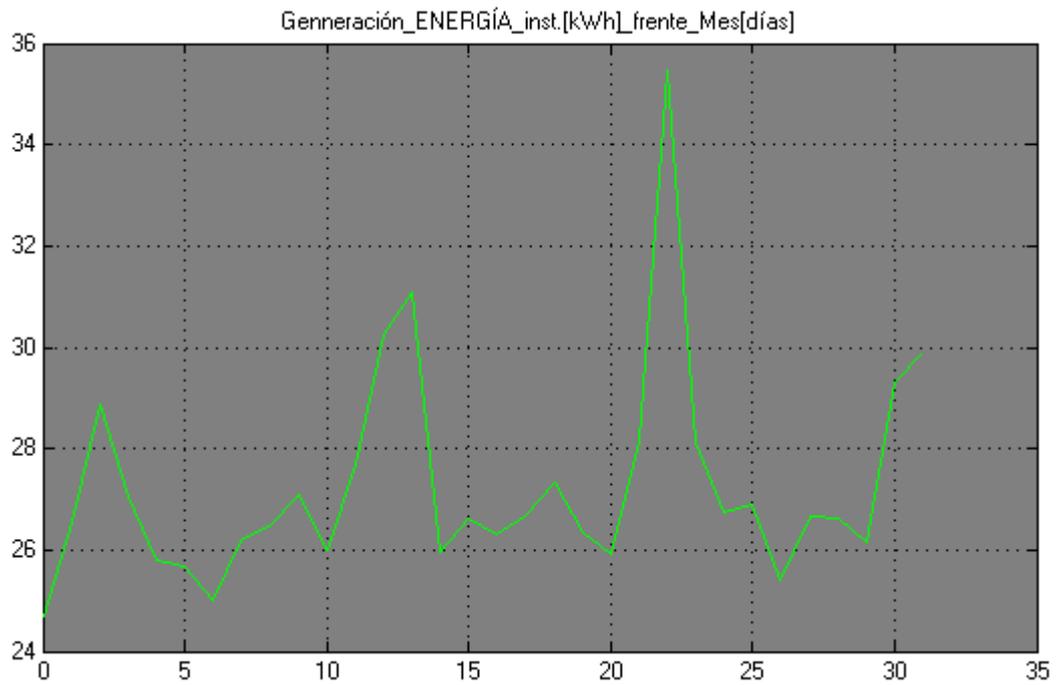


Figura 53: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de mayo.

Junio:

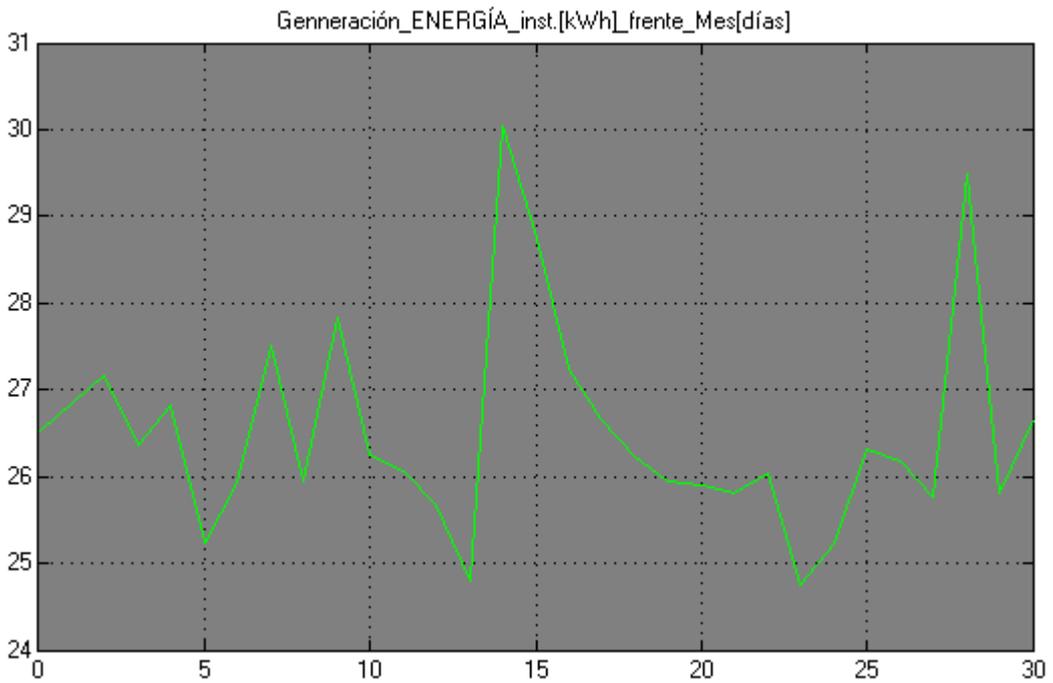


Figura 54: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de junio.

DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE COMBUSTIBLE PARA LA ENM

Julio:

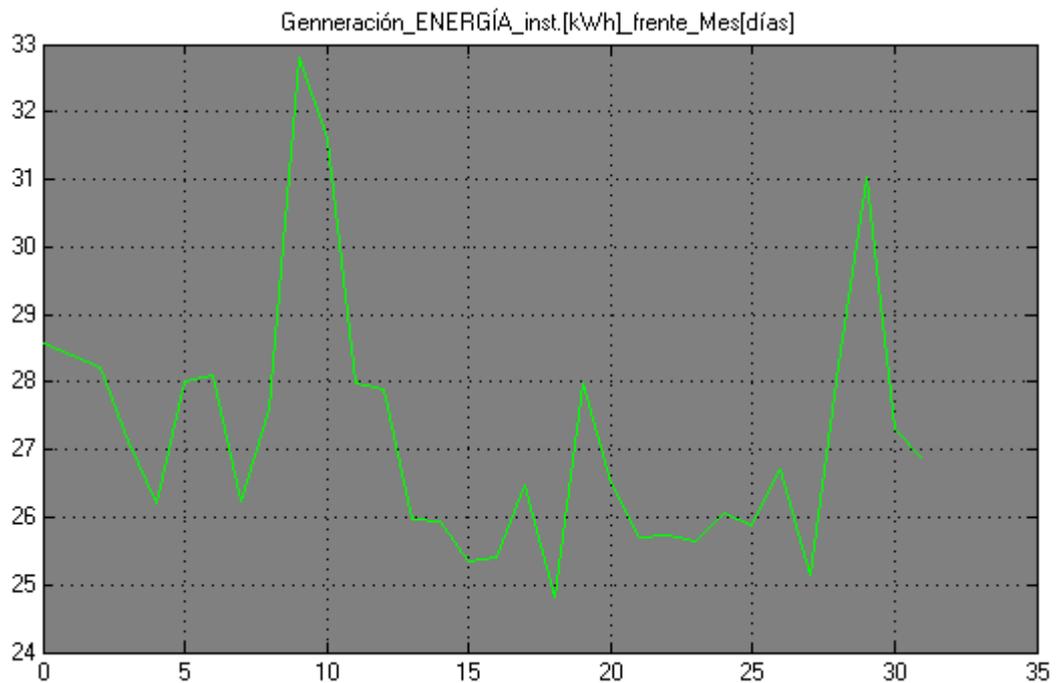


Figura 55: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de julio.

Agosto:

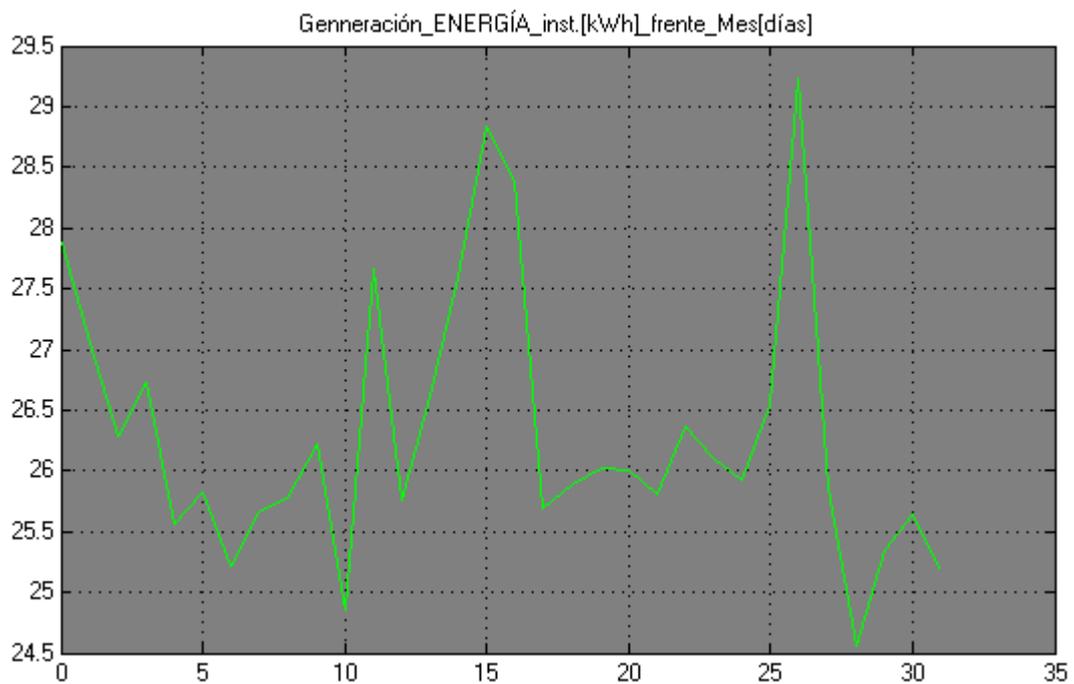


Figura 56: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de agosto.

Septiembre:

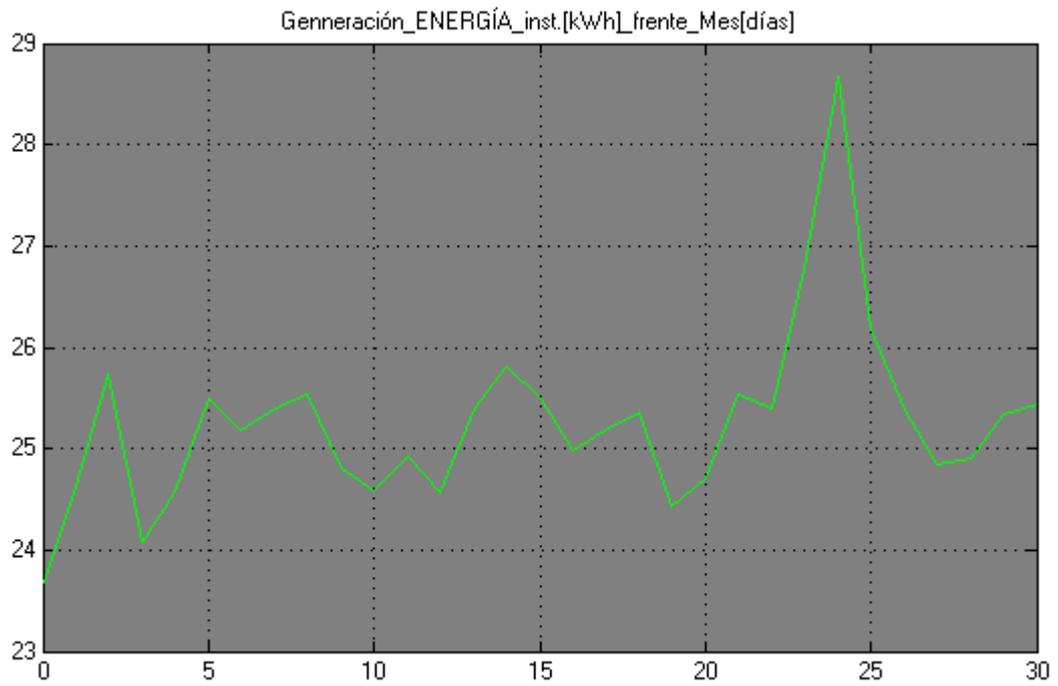


Figura 57: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de septiembre.

Octubre:

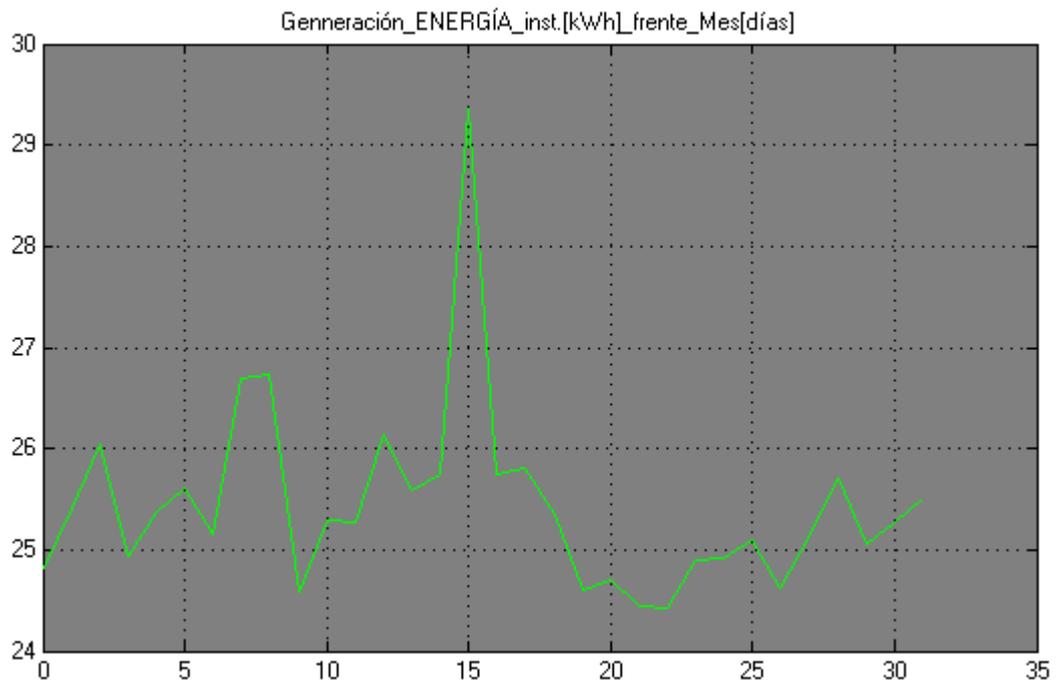


Figura 58: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de octubre.

DISEÑO DE UN GENERADOR ELÉCTRICO MEDIANTE HIDRÓGENO EÓLICO Y PILA DE COMBUSTIBLE PARA LA ENM

Noviembre:

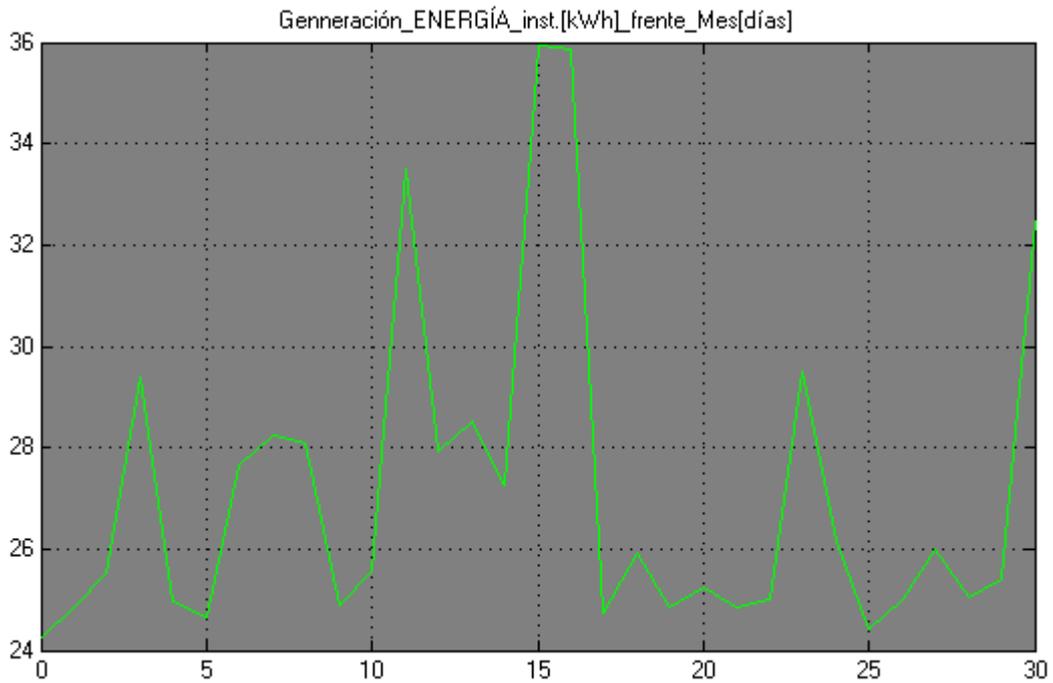


Figura 59: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de noviembre.

Diciembre:

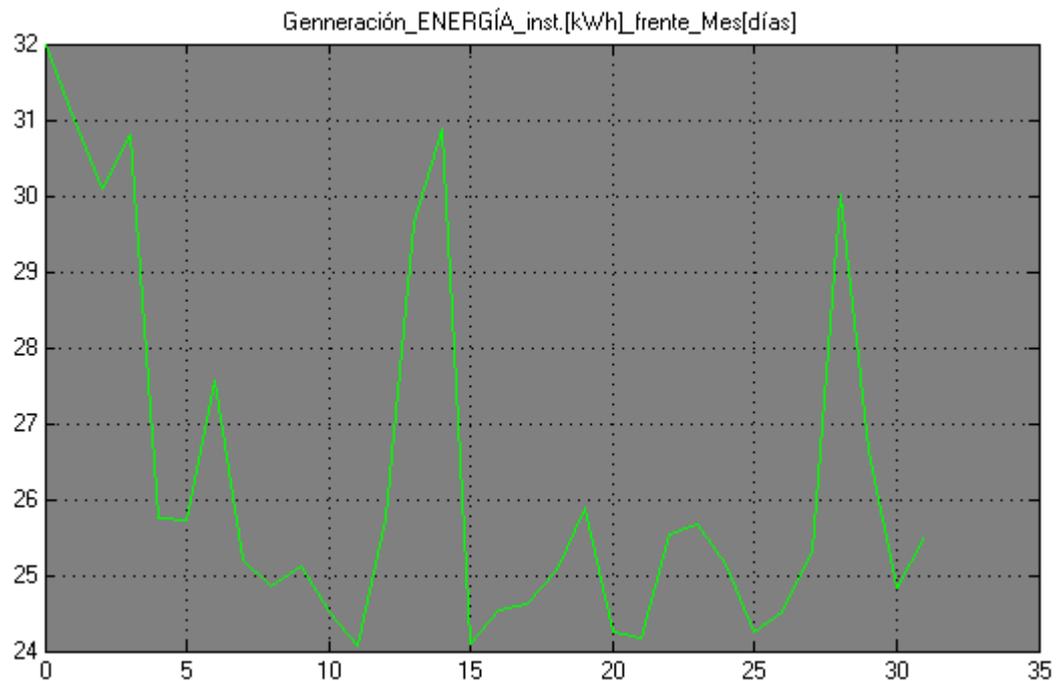


Figura 60: Generación de energía instantánea en kWh, frente los días del mes de diciembre.

No sería exacto obtener un solo valor de la energía generada (kWh) del mes, porque el suministro de potencia (W) de la pila de combustible depende de la velocidad del viento (m/s), y por lo tanto no es constante. Sin embargo, se podría hacer una estimación de energía mensual generada haciendo la media de los valores representados en las gráficas.