



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO: Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda

AUTORES: ESCACHX ESTÉVEZ, BRYAN; GARCÍA VILORIA, JAVIER
ALEJANDRO

FECHA: Junio, 2022

APELLIDOS: ESCACHX ESTÉVEZ

NOMBRE: BRYAN

TITULACIÓN: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PLAN: 2022

DIRECTOR: ANTONIO MIGUEL LÓPEZ MARTÍNEZ

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

APELLIDOS: GARCÍA VILORIA

NOMBRE: JAVIER

TITULACIÓN: INGENIERÍA ELÉCTRICA

PLAN: 2022

DIRECTOR: ANTONIO MIGUEL LÓPEZ MARTÍNEZ

DEPARTAMENTO: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CALIFICACIÓN DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

FECHA DE LECTURA:

Este proyecto tiene en cuenta aspectos medioambientales: Sí

RESUMEN

Se estudia el diseño de un sistema de autoconsumo para una vivienda simulado en el software Simulink. Se quiere implementar la hibridación de la capacidad energética, compuesta por una batería química convencional y un electrolizador que transforma, a través de la electrólisis del agua, la energía eléctrica en hidrógeno, el cual se almacena en un depósito para posteriormente, cuando se requiera de esa energía, mediante una pila de combustible, se inyecte electricidad al bus de potencia.

El trabajo se divide en varias fases:

Una primera fase consiste en buscar un perfil de irradiación y temperatura. Además se obtiene un perfil de carga real de la vivienda, al cual se le añade el consumo de un puesto de carga de un vehículo en las horas nocturnas. Aunque en el trabajo, a modo de ejemplo, se realiza un estudio generalizado del consumo de una vivienda a lo largo del año.

Una segunda fase donde se calculan el dimensionado de los componentes necesarios del sistema y se crea un modelo simple de electrolizador, que cuente con la carga y proporcione el valor de hidrógeno producido.

Una tercera fase, donde con los componentes calculados y los modelos necesarios conocidos, se desarrolla una estrategia de control para cumplir con los requerimientos de consumo de la carga y la durabilidad de los componentes del circuito de potencia.

Una cuarta fase donde se crea el modelo del sistema en Simulink y se simula todo el conjunto, del cual se valida el dimensionado y las estrategias de control previamente diseñadas.

Palabras clave (máximo 10):

Sistema híbrido	Pilas de combustible	Convertidores	Autoconsumo
Capacidad	Baterías	Modelo	Hidrógeno verde

ABSTRACT

The design of a self-consumption system for a house simulated in Simulink software is studied. The aim is to implement the hybridisation of the energy capacity, consisting of a conventional chemical battery and an electrolyser that transforms, through the electrolysis of water, electrical energy into hydrogen which is stored in a tank so that later, when this energy is required, electricity is injected into the power bus using a fuel cell.

The work is divided into several phases:

A first phase consists of finding an irradiance and temperature profile. In addition, a real load profile of the house is obtained, to which the consumption of a vehicle charging station at night is added. Although in the work, as an example, a generalised study of the consumption of a house throughout the year is made.

A second phase where the sizing of the necessary components of the system is calculated and a simple electrolyser model is created, which takes into account the load and provides the value of hydrogen produced.

A third phase, where with the calculated components and the necessary models known, a control strategy is developed to meet the consumption requirements of the load and the durability of the power circuit components.

A fourth phase where the system model is created in Simulink and the whole system is simulated, from which the sizing and control strategies previously designed are validated.

Keywords (10 maximum):

Hybrid system	Fuel cells	Converters	Self-consumption
Capacity	Batteries	Model	Green Hydrogen

APORTACIÓN INDIVIDUAL AL GRUPO

Como ingeniero eléctrico: Instalación, equipo, energías renovables, vehículos eléctricos.

Como ingeniero electrónico: Programación, control, modelación, simulación.

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	10
1. ANÁLISIS DEL HIDRÓGENO	12
1.1 EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO	12
1.2 SISTEMA ENERGÉTICO ACTUAL	13
1.3 UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO	13
1.4 PROBLEMÁTICA.....	15
2. ESTUDIO DEL CONSUMO ELÉCTRICO	16
2.1 ESTUDIO DEL CONSUMO DE LA VIVIENDA.....	16
2.2 PUESTO DE CARGA PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO	19
3. CIRCUITO DE POTENCIA	24
3.1 COMPONENTES.....	24
3.1.1 PLACA FOTOVOLTAICA.....	24
3.1.2 ELECTROLIZADOR.....	28
3.1.3 INVERSOR DC/AC	29
3.1.4 CONVERTIDOR DC/DC.....	30
3.1.5 PILA DE HIDRÓGENO.....	35
3.1.6 BATERÍAS.....	39
4. DISEÑO DE LOS COMPONENTES	42
4.1 ELECTROLIZADOR	43
4.1 BATERÍAS.....	44
4.2 PILA DE COMBUSTIBLE	47
4.3 PLACAS FOTOVOLTAICAS	48
5. SIMULACIÓN	51
5.1 PARÁMETROS Y REQUISITOS.....	51
5.2 ESTRUCTURA	52
5.3 HEURÍSTICA DE SIMULACIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LOS ELEMENTOS	53
5.4 MODELO DEL SISTEMA.....	59
5.4.1 PERFILES DE CARGA, IRRADIACIÓN Y TEMPERATURA	60
5.4.2 CONJUNTO PLACAS FOTOVOLTAICAS-CONVERTIDOR.....	61
5.4.3 CONJUNTO PILA DE COMBUSTIBLE-CONVERTIDOR	61
5.4.4 CONJUNTO ELECTROLIZADOR-CONVERTIDOR.....	62
5.5 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES.....	62
5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
6. DEMOSTRACIÓN PRÁCTICA	66
6.1. INTRODUCCIÓN.....	66
6.2. ESQUEMA ELÉCTRICO	66
6.3. COMPONENTES.....	67
6.4. MONTAJE COMPLETO	71
6.5. PROGRAMA	71
6.6. FUNCIONAMIENTO	74
CONCLUSIONES	75
TRABAJOS FUTUROS	76
AGRADECIMIENTOS	76
BIBLIOGRAFÍA	78

SUMARIO DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. GRÁFICO COMPARATIVO DE VENTA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS[5].....	20
ILUSTRACIÓN 2. MODO DE CARGA 1.....	21
ILUSTRACIÓN 3. MODO DE CARGA 2.....	21
ILUSTRACIÓN 4. MODO DE CARGA 3.....	22
ILUSTRACIÓN 5. MODO DE CARGA 4.....	23
ILUSTRACIÓN 6. CELDA P-N.....	24
ILUSTRACIÓN 7. CELDA MONOCRISTALINA.....	25
ILUSTRACIÓN 8. CELDA POLICRISTALINA.....	25
ILUSTRACIÓN 9. CELDA DE SILICIO AMORFO.....	25
ILUSTRACIÓN 10. CIRCUITO EQUIVALENTE CONVERTIDOR BUCK.....	31
ILUSTRACIÓN 11. MODO CONDUCCIÓN CONTINUA INTERRUPTOR CERRADO BUCK.....	31
ILUSTRACIÓN 12. MODO CONDUCCIÓN CONTINUA INTERRUPTOR ABIERTO BUCK.....	32
ILUSTRACIÓN 13. MODO CONDUCCIÓN DISCONTINUA BUCK.....	32
ILUSTRACIÓN 14. CIRCUITO EQUIVALENTE CONVERTIDOR BOOST.....	33
ILUSTRACIÓN 15. MODO CONDUCCIÓN CONTINUA INTERRUPTOR CERRADO BOOST.....	34
ILUSTRACIÓN 16. MODO CONDUCCIÓN CONTINUA INTERRUPTOR ABIERTO BOOST.....	34
ILUSTRACIÓN 17. MODO CONDUCCIÓN DISCONTINUA BOOST.....	35
ILUSTRACIÓN 18. DIFERENTES VALORES DE E_0 EN DIVERSOS PARES REDOX [8].....	37
ILUSTRACIÓN 19. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN E_a EN FUNCIÓN DEL USO DE CATALIZADOR.....	38
ILUSTRACIÓN 20. CURVA DE POLARIZACIÓN DE UN PILA DE COMBUSTIBLE [9].....	39
ILUSTRACIÓN 21. GRÁFICA DE RELACIÓN ENTRE LOS CICLOS Y LA DOD [10].....	42
ILUSTRACIÓN 22. ESQUEMA DEL PROCESO DE ELECTRÓLISIS PEM.....	43
ILUSTRACIÓN 23. REPRESENTACIÓN DE VALORES DE LA HORA SOLAR PICO MEDIA ANUAL [12].....	49
ILUSTRACIÓN 24. CARACTERÍSTICAS DE LA PLACA SOLAR [13].....	49
ILUSTRACIÓN 25. ESTRUCTURA DEL SISTEMA.....	53
ILUSTRACIÓN 26. MODELO DEL CONTROLADOR DEL CONVERTIDOR.....	55
ILUSTRACIÓN 27. GRÁFICA DE VOLTAJE Y CORRIENTE DE LA PILA DE COMBUSTIBLE.....	56
ILUSTRACIÓN 28. MODELO DE MÁQUINA DE ESTADOS.....	57
ILUSTRACIÓN 29. FLUJOGRAMA DE MÁQUINA DE ESTADOS.....	59
ILUSTRACIÓN 30. MODELO DE TODO EL SISTEMA.....	60
ILUSTRACIÓN 31. PERFIL DE CARGA DE UNA SEMANA.....	61
ILUSTRACIÓN 32. MODELO DEL CONJUNTO EN SIMULINK.....	61
ILUSTRACIÓN 33. MODELO DEL CONJUNTO EN SIMULINK.....	62
ILUSTRACIÓN 34. MODELO DEL CONJUNTO ELECTROLIZADOR-CONVERTIDOR.....	62
ILUSTRACIÓN 35. DETALLE DE LA RELACIÓN ENTRE LOS FLUJOS DE CORRIENTE Y EL SOC.....	63
ILUSTRACIÓN 36. DETALLE DE LOS FLUJOS DE CORRIENTE DEL SISTEMA.....	63
ILUSTRACIÓN 37. DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA DURANTE UNA SEMANA.....	64
ILUSTRACIÓN 38. DEMOSTRACIÓN DE LA INDEPENDENCIA CLIMÁTICA DEL SISTEMA.....	65
ILUSTRACIÓN 39. ESQUEMA ELÉCTRICO.....	66
ILUSTRACIÓN 40. ARDUINO UNO.....	67
ILUSTRACIÓN 41. SENSOR DE NIVEL DE AGUA.....	68
ILUSTRACIÓN 42. MÓDULO DE RELÉS.....	68
ILUSTRACIÓN 43. MÓDULO SOLAR.....	69
ILUSTRACIÓN 44. PILA DE COMBUSTIBLE.....	69
ILUSTRACIÓN 45. PROBETAS.....	70
ILUSTRACIÓN 46. MOTOR.....	70
ILUSTRACIÓN 47. ELECTROVÁLVULAS.....	70
ILUSTRACIÓN 48. MAQUETA DEL SISTEMA.....	71
ILUSTRACIÓN 49. FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO.....	72
ILUSTRACIÓN 50. PROGRAMA.....	73
ILUSTRACIÓN 51. FUNCIONAMIENTO DURANTE UNA SEMANA DE ENERO.....	82
ILUSTRACIÓN 52. FUNCIONAMIENTO DURANTE UNA SEMANA DE ABRIL.....	82
ILUSTRACIÓN 53. FUNCIONAMIENTO DURANTE UNA SEMANA DE JULIO.....	83
ILUSTRACIÓN 54. FUNCIONAMIENTO DURANTE UNA SEMANA DE NOVIEMBRE.....	83

SUMARIO DE TABLAS

TABLA 1. CONSUMO EN LOS MESES DE VERANO.....	17
TABLA 2. CONSUMO EN LOS MESES DE INVIERNO	18
TABLA 3. CONSUMO EN LOS MESES DE PRIMAVERA Y OTOÑO	18

GLOSARIO DE SIGNOS, SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y TÉRMINOS

PVGIS: Photovoltaic Geographical Information System

HSP: Horas Solar Pico

SOC: State of Charge

DOD: Depth of Discharge

MPPT: Punto de máxima potencia

E_{red} : Potencial de reducción

\dot{m} : Caudal másico

CO₂: Dióxido de Carbono

H₂: Hidrógeno

Stack: Conjunto de celdas electrolíticas dispuestas en serie

INTRODUCCIÓN

Desde hace años gobiernos, industrias y ciudadanía se está concienciando de que hay que cambiar el modelo de consumo energético, enormemente dependiente de los combustibles fósiles finitos, prueba de ello son las convenciones entre países[1], limitando las emisiones de CO₂ y las multas impuestas a los gobiernos que incumplen los tratados firmados, las industrias también conscientes del problema dan pasos en este ámbito, haciendo grandes inversiones en producción de energía a través de renovables, o la electrificación de la automoción.

Este cambio hacia un modelo más sostenible medioambiental, tiene retos importantes por delante, pero hay dos que son el motor impulsor de este proyecto.

El primer reto tiene que ver con las granjas solares. Actualmente existe un modelo de negocio que consiste en comprar grandes extensiones de terreno y cubrirlo de placas solares, para producir electricidad que se entrega a la red por determinado precio. Estas granjas solares ocupan amplias extensiones de terreno y si se tuvieran que abastecer toda la demanda de un país con este modelo de producción, el porcentaje de campo ocupado sería inaceptable.

El segundo reto, va asociado con el almacenamiento de la energía producida, la mayoría de energías renovables que existen hoy en día son de producción intermitente, ya que muchas de ellas dependen de factores climáticos como, el viento, el Sol o los caudales de los ríos. No existen métodos de almacenamiento de energía eléctrica masivos que aseguren el abastecimiento de energía continuo a la red. Si la producción de energía disminuyera drásticamente no hay reserva de energía almacenada, capaz de suplir a la red, o al contrario, si hay una sobreproducción no hay espacios habilitados, donde almacenar esa energía y por ende se desperdiciaría.

Es por eso que una de las soluciones naturales al problema es el Autoconsumo. En el ámbito doméstico ya viene practicándose desde hace tiempo. Se produce energía con placas solares o molinos eólicos, y se deposita en grandes baterías para cuando la producción decaiga, suplir el sistema con esa energía previamente almacenada.

Es aquí donde tropezamos con el mismo inconveniente que presenta el uso de los combustibles fósiles. Estas baterías en su mayoría están hechas de Litio, una materia

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

prima finita, cuyo reciclaje en baterías es caro y no 100% aprovechable. Aunque se practique el reciclaje intensamente, la materia se ira agotando gradualmente, en este mismo proceso [2]. Teniendo en cuenta su uso en el parque automovilístico, la falta de este recurso será un grave problema en este siglo, si no se mantiene un reciclaje exhaustivo de las baterías de litio. El problema se agudiza cuando se empieza a observar que un porcentaje alto del parque móvil eléctrico conlleva al uso de baterías no solo en vehículos sino también en puestos de recarga de todo tipo y en el caso del autoconsumo, si se quiere asegurar un suministro resistente a la variaciones climáticas el sobredimensionamiento de las baterías es de 3 a 5 veces mayor que si solo se tuviera que suministrar energía a la vivienda.

Es por eso que en el presente trabajo se plantea un diseño y control de una planta doméstica de autoconsumo respetuoso con el medioambiente con un sistema de almacenamiento de energía híbrido, compuesto por una batería convencional y un depósito de hidrógeno, que ayude a reducir el tamaño de la batería química para almacenar parte de la energía en forma de hidrógeno verde, y sea capaz de abastecer a la vivienda más un punto de recarga para un vehículo eléctrico.

1. ANÁLISIS DEL HIDRÓGENO

1.1 EVOLUCIÓN DEL HIDRÓGENO

Antes de entrar en detalles históricos del uso del hidrógeno, se debe entender qué es y de dónde viene. Este es uno de los elementos más abundantes en el Universo además de ser el más básico, puesto que su composición atómica consta únicamente de un protón y un electrón. Ser básico no es proporcional a ser prescindible, ya que juega un papel importante en el planeta.

Se puede decir que el hidrógeno se encuentra de distintas formas en cualquier parte. Como todos sabemos el agua es un compuesto esencial para el ser humano, formado por hidrógeno y oxígeno principalmente.

Este elemento es uno de los gases más abundantes, sin embargo, es difícil encontrarlo en la Tierra de forma natural. Gran parte del hidrógeno se obtiene mediante procesos químicos. Esto se debe a que es un gas muy ligero, y de ahí su tendencia a elevarse hacia las zonas altas de la atmósfera, saliendo posteriormente de la misma.

Según el artículo del Dr. Omar Solorza Feria [3], el descubrimiento del hidrógeno fue, como en muchos casos de la historia de la ciencia, un hallazgo casual. El proceso fue sencillo, al verter ácido sobre hierro se obtuvo una sustancia inflamable. Más adelante, y gracias a que el científico Henry Cavendish demostró que el residuo resultante de la combustión entre el Oxígeno y el Hidrógeno era agua, otros científicos comenzaron a investigar este fenómeno.

Uno de estos científicos fue Antoine Lavoisier, quien le dio nombre al elemento.

Desde entonces los interesados en la materia investigan el uso del hidrógeno como fuente de energía y como se puede observar, esto no es algo que se haya empezado a desarrollar en la actualidad, puesto que estamos hablando del siglo XVIII.

Dos siglos después que se comenzó a utilizar para generar de electricidad. Esto fue idea del científico William Robert Grove que decidió invertir el proceso de electrólisis con el resultado de la obtención de la primera pila de combustible, basada en uso del hidrógeno. Con el paso del tiempo, a este descubrimiento se le fueron dando distintos usos.

1.2 SISTEMA ENERGÉTICO ACTUAL

Actualmente, a nivel mundial, la principal fuente de generación energética proviene de combustibles fósiles y como bien se sabe están llegando a sus límites. Todos son conscientes de la principal problemática que supone el uso de este tipo de energías, que son los gases nocivos expulsados a nuestra atmosfera.

Esto supone además un problema social, ya que los lugares donde se encuentran la gran mayoría de estos combustibles son zonas específicas, con lo que tienen el control de la exportación del recurso. Como se puede ver en caso de que un país que obtenga el control y explotación de la materia prima entre en conflicto, el resto de países se ve afectado. Dificultando así la obtención y aumentando por consecuencia los precios.

Todo lo comentado anteriormente hace una necesidad y una obligación la búsqueda de alternativas eficientes y sobretodo limpias.

El problema que tienen estas alternativas es que su almacenamiento es complicado y además su producción es intermitente. Por ello, centrarnos en encontrar métodos para almacenar esta energía para los momentos bajos de producción es una prioridad, no podemos centrarnos solo en mejorar los métodos de producción.

El uso del hidrógeno como vector energético se ha convertido en uno de los más prometedores, ya que su almacenamiento es muy sencillo y sobretodo porque tiene muy poco impacto ambiental, sobre todo si su producción viene ligada a métodos limpios como lo son la energía solar. Cabe destacar que el hidrógeno es el compuesto más ligero y con un contenido energético por unidad de masa más elevado si lo comparamos con el resto de combustibles.

1.3 UTILIZACIÓN DEL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

Antes de entrar en detalle veamos el significado de vector energético. Esto no son más que dispositivos con capacidad de almacenar energía para posteriormente ser utilizadas de forma controlada. Estas han tenido que elaborarse previamente por lo que tiene un gasto energético previo, diferencia principal que tiene con las fuentes primarias.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Puede ser un recurso renovable cuando se produce a partir de otras fuentes renovables como lo es la energía solar, esto se conoce como hidrógeno verde.

Partiendo de la información ofrecida por la hoja de ruta del hidrógeno del gobierno de España [4], actualmente la mayoría del hidrogeno que se produce es a partir de gas natural y otros hidrocarburos ligeros, lo que llamamos como hidrógeno gris.

A pesar que no es un ciclo 100% renovable, es un gran avance producirlo como alternativa.

Actualmente se estima que en un futuro a corto plazo la producción de hidrógeno sea el doble que el actual.

En cuanto a España, el uso del hidrógeno proporciona varios beneficios, desde empresariales hasta ambientales además de traer mejoras económicas y sociales. Entre los beneficios más importantes destacan los siguientes.

Lógicamente se disminuyen las emisiones nocivas al medio ambiente, objetivo principal a cumplir según las fases del tratado para reducir las emisiones para el 2050.

Permite ampliar el uso de energías renovables en el sector eléctrico. Esto es algo a tener en cuenta debido a que la mayoría de las energías renovables tienen cierta intermitencia de acción, lo que hace que solo podamos depender de ellas durante un cierto tiempo.

El hidrógeno abre la posibilidad de aprovechar estas en mayor medida ya que permite un almacenamiento. Esto deriva en disminuir la dependencia energética, ya que puede ser producido de forma autóctona, todo lo contrario a los combustibles fósiles, ya que estos tienen que ser importados. Gracias a ser capaces de cada vez depender menos de este tipo de combustibles, favorecemos la descarbonización en los sistemas energéticos.

Con todo lo comentado anteriormente y gracias al potencial que tiene España gracias a su clima y terreno en el que instalar esta tecnología, podría llegar a ser una potencia europea en cuanto a generación de energía renovable.

Un tema muy importante a tratar es que esto crea una gran cantidad de puestos de trabajo, lo que mejoraría la economía además de impulsar la investigación y desarrollo en el ámbito energético.

1.4 PROBLEMÁTICA

Uno de los problemas más importantes que presenta el hidrógeno es que no está presente en la naturaleza de manera unitaria, esta se encuentra combinada con otros elementos como el oxígeno obteniendo la molécula del agua. En comparación con el resto de combustibles es un inconveniente ya que la obtención de la materia prima es menos rentable que en otros casos.

Hay que añadir que normalmente la producción de esta energía se coloca lo más cerca posible del consumo para así conseguir un ahorro en la distribución. La razón principal del porque no es rentable la distribución y el transporte del hidrógeno se debe a los procesos que se debe someter para lograr este objetivo. La inversión inicial tanto económica como temporal es elevada, ya que para poder distribuir este hidrogeno se debería construir una infraestructura desde la zona de producción hasta el consumo, algo que por el momento no es rentable.

Como se ha comentado anteriormente, el hidrógeno es el gas más ligero, por lo que requiere de ser almacenado a altas presiones. Esto según la aplicación en la que se va a utilizar, puede resultar en un aumento de costes, y esto lo podemos ver en los precios de los vehículos de hidrogeno.

Un vehículo eléctrico puede costar de media 30.000€, este precio oscila según la autonomía y la gama. En comparación un coche de hidrógeno, el cual ronda los 60.000€, no es rentable económicamente, además del problema que hay muy pocas zonas de recarga por hidrógeno.

2. ESTUDIO DEL CONSUMO ELÉCTRICO

2.1 ESTUDIO DEL CONSUMO DE LA VIVIENDA

En este apartado se explica los pasos a seguir para determinar el consumo de un hogar partiendo de la potencia instalada y las horas de utilización. Esto se hace únicamente para observar las diferencias de consumo en los diferentes meses del año.

A continuación, se verán los cálculos necesarios para obtener cuanta energía consume la vivienda que queremos abastecer con nuestro sistema. Este consumo se ve reflejado en las siguientes tablas. Para ello se han tenido unos factores en consideración, como lo son las estaciones del año.

Como ejemplo de estos factores se puede tomar el verano, esta es una estación en la que hay más horas de sol de las que se pueden tener en invierno, por lo que el gasto energético en iluminación será inferior.

Los cálculos se obtienen mediante la potencia del electrodoméstico y de sus horas de utilización, aunque se ha tenido en cuenta también que no es habitual el uso de la potencia máxima en ciertos aparatos. Un ejemplo de ello podría ser la vitrocerámica, normalmente se hace uso de uno o dos fogones a la vez y con un volumen medio alto.

A continuación se presentan las tablas de cálculos de consumo de todos los aparatos que se han tenido en cuenta para la vivienda:

	CONSUMO (Wh)	UTILIZACIÓN AL DIA (h)	CONSUMO TOTAL (Wh)	USO MENSUAL (DIAS)	CONSUMO MENSUAL TOTAL (Wh)
LAVADORA	700	1	700	12	8400
HORNO	750	1	750	12	9000
LAVAPLATOS	246	2	492	15	7380
AIRE ACONDICIONADO	975	2	1950	18	35100
ORDENADOR	250	8	2000	22	44000
TELEVISORES	220	4	880	30	26400
MONITOR	25	8	200	22	4400

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

CALEFACCION	1400	0	0	0	0
MICROONDAS	1200	0,25	300	30	9000
VITROCERAMICA	1500	1	1500	30	45000
ILUMINACION	120	4	480	30	14400
NEVERA	822	6	4932	30	147960
ASPIRADORA	215	1	215	30	6450
TOTAL (Wh)	8423	38,25	14399	281	357490
TOTAL (kWh)	8,423		14,399		357,49
VERANO (3 MESES)		(3 1072,47			

Tabla 1. Consumo en los meses de verano

Siguiendo con el ejemplo de la vitrocerámica y teniendo en cuenta el uso comentado, se considera un consumo diario de 1.500 Wh y una estimación del uso diario y mensual nos da como resultado el consumo aproximado de este electrodoméstico durante un mes.

	CONSUMO (Wh)	UTILIZACIÓN AL DIA (h)	CONSUMO TOTAL (Wh)	USO MENSUAL (DIAS)	CONSUMO MENSUAL TOTAL (Wh)
LAVADORA	700	1	700	12	8400
HORNO	750	1	750	12	9000
LAVAPLATOS	246	2	492	15	7380
AIRE ACONDICIONADO	975	0	0	0	0
ORDENADOR	250	8	2000	22	44000
TELEVISORES	220	4	880	30	26400
MONITOR	25	8	200	22	4400
CALEFACCION	1400	2	2800	15	42000
MICROONDAS	1200	0,25	300	30	9000
VITROCERAMICA	1500	1	1500	30	45000
ILUMINACION	120	6	720	30	21600
NEVERA	822	6	4932	30	147960
ASPIRADORA	215	1	215	30	6450

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

TOTAL (Wh)	8423	40,25	15489	278	371590
TOTAL (kWh)	8,423		15,489		371,59
INVIERNO	1114,77				

Tabla 2. Consumo en los meses de invierno

Como se ve en la tabla 2, a diferencia del verano, las horas que necesitan el uso de la iluminación es mayor, por lo que el consumo de la misma se eleva.

	CONSUMO (Wh)	UTILIZACIÓN AL DIA (h)	CONSUMO TOTAL (Wh)	USO MENSUAL (DIAS)	CONSUMO MENSUAL TOTAL (Wh)
LAVADORA	700	1	700	12	8400
HORNO	750	1	750	12	9000
LAVAPLATOS	246	2	492	15	7380
AC	975	0	0	0	0
PC	250	8	2000	22	44000
TELEVISORES	220	4	880	30	26400
MONITOR	25	8	200	22	4400
CALEFACCION	1400	0	0	25	0
MICROONDAS	1200	0,25	300	30	9000
VITROCERAMICA	1500	1	1500	30	45000
ILUMINACION	120	4	480	30	14400
NEVERA	822	6	4932	30	147960
ASPIRADORA	215	1	215	30	6450
TOTAL (Wh)	8423	36,25	12449	288	322390
TOTAL (kWh)	8,423		12,449		322,39
PRIMAVERA/OTOÑO	1934,34				

Tabla 3. Consumo en los meses de primavera y otoño

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Se ha querido agrupar las estaciones restantes en la tabla 3, ya que el uso que se da a los electrodomésticos es similar.

Una vez hechos los cálculos de consumo de las estaciones que tiene el año, se obtiene el consumo anual de energía.

Consumo energético anual= 1.072,47 kWh + 1.114,77 kWh + 1.934,34 kWh =
4.121,58 kWh/año (2.1)

2.2 PUESTO DE CARGA PARA VEHÍCULO ELÉCTRICO

Actualmente vivimos en una sociedad en constante crecimiento, es por esto que cada vez hay más usuarios en la carretera. Esto provoca que el crecimiento de gases de efecto invernadero sea elevado. En estas últimas décadas, la huella medioambiental que se ha dejado por el uso de los automóviles es negativa. De aquí la importancia del uso de vehículos eléctricos o, como alternativa, los híbridos.

Por todo esto son cada vez más las empresas que se suman a la producción de este tipo de vehículos.

Las ventajas más notables de los coches eléctricos son, como bien sabemos, que no producen gases nocivos. Además, las baterías que se utilizan son reciclables ya que se trata en su mayoría de baterías de ion litio.

La población, que en estos últimos años, se ha estado concienciando de forma progresiva con respecto al cambio climático y cada vez son más los usuarios de vehículos respetuosos con el medio ambiente.

Como se puede ver en la siguiente gráfica, la evolución en la compra de coches eléctricos es cada vez mayor. Se aprecia que la diferencia de matriculaciones entre febrero de 2022 con respecto a 2021 es más del doble y si comparamos los datos con respecto a 2018 son casi 6 veces más.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

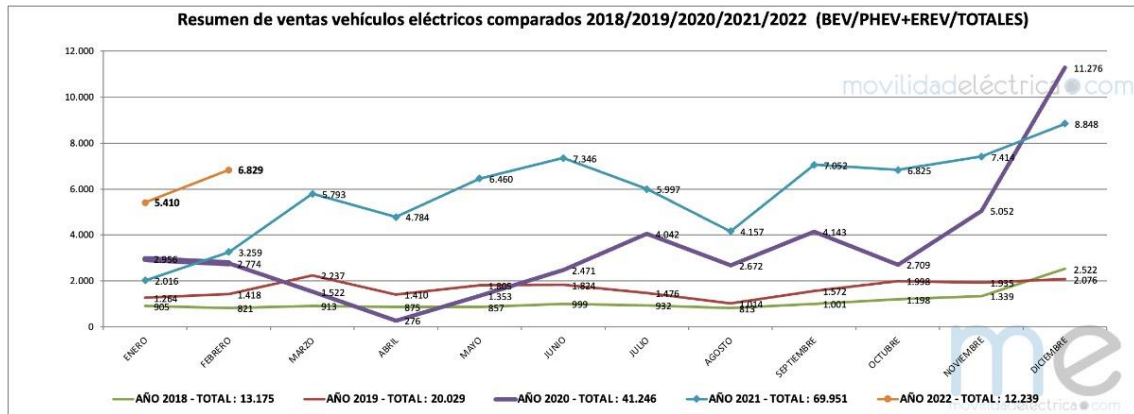


Ilustración 1. Gráfico comparativo de venta de vehículos eléctricos[5]

Por todo lo comentado anteriormente, en este proyecto se ha considerado incluir el consumo de la carga de un vehículo eléctrico. Esto se hace mediante un puesto de recarga doméstico que se alimenta mediante nuestro sistema.

Debemos tener en cuenta que las puestas de carga doméstica siguen una normativa y hay distintos tipos y modos de carga para los vehículos.

Primeramente se explican los distintos modos de carga que existen. Entendemos modo de carga como el tipo de estructura que se utiliza para cargar el coche. Existen 4 modos y la elección de estos vendrá determinada por el tipo de vehículo y por la zona donde se hará la instalación, si es doméstica o de uso público.

- Modo 1: Esta instalación es la más sencilla ya que no requiere de ninguna instalación externa o una caja de conexión. Realiza un tipo de carga lenta, entendemos carga lenta como un tiempo de unas 6 a 8 horas, y se caracteriza por el tipo de conexión ya que utiliza la conexión de toma de corriente normalizada que encontramos en las viviendas. Como conclusión podemos decir que es una buena elección para una carga domestica siempre que sea un vehículo como una moto pequeña.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García



Ilustración 2. Modo de carga 1

- Modo 2: El segundo modo es similar al primero, con la particularidad de necesitar un piloto de control, el cual nos proporciona una seguridad en la operación, que encontramos entre el enchufe del vehículo y la toma de corriente. Este es también un modo de carga lenta y de uso doméstico. Utilizaremos este tipo de recarga para vehículos híbridos de poca autonomía o vehículos eléctricos pequeños. Un ejemplo de cuadríciclo es el Citroën Ami, el cual dispone de una autonomía de 75 km.

Por más seguridad se puede incorporar a la instalación una caja como punto de recarga para uso exclusivo del coche, ya que al ser una conexión doméstica se podría conectar cualquier cosa lo cual podría ser perjudicial ya que en este modo tenemos una corriente de hasta 32 amperios.



Ilustración 3. Modo de carga 2

- Modo 3: El tercer modo de recarga es también conocida como de carga semi-rápida, de 3 a 4 horas de recarga. Este modo requiere de un aparato externo

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

llamado Wall box, al cual conectamos nuestro vehículo. Es el más recomendado para la recarga doméstica y además el estandarizado para lugares de trabajo, centros comerciales, garajes y todo tipo de establecimientos. La Wall box que se ha comentado ya tiene todas las protecciones necesarias para la seguridad tanto de la instalación eléctrica como la del vehículo. La recarga se hace a 32 amperios, pudiendo entregar una potencia mínima de 7,2 kW.

Hay que tener en cuenta que es el idóneo para coches eléctricos puros e híbridos de una autonomía elevada, ya que el modo 2 se queda corto con este tipo de vehículos.

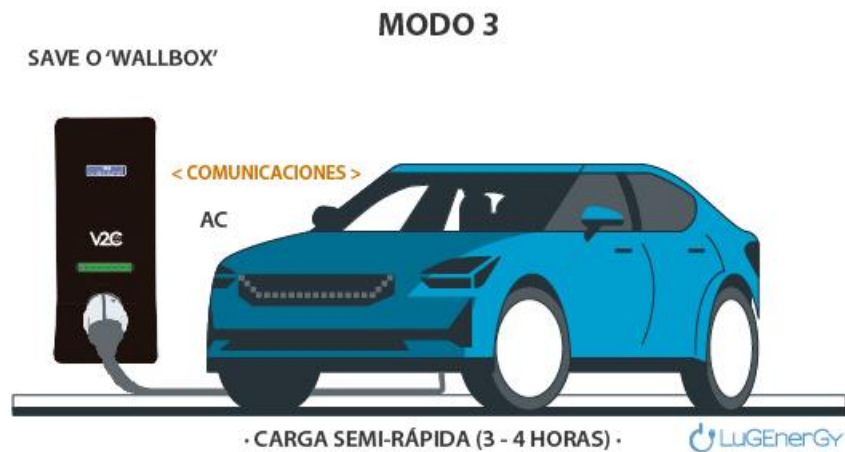


Ilustración 4. Modo de carga 3

- Modo 4: El último modo es el de carga rápida. Consiste en una carga del 70 a 80% de la capacidad de la batería en un tiempo de 30 minutos. Esto se hace con una elevada potencia. Esta no es recomendable tenerla en la vivienda, ya que no es bueno para el vehículo someter a este tipo de recarga de forma habitual, está destinada al uso público.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

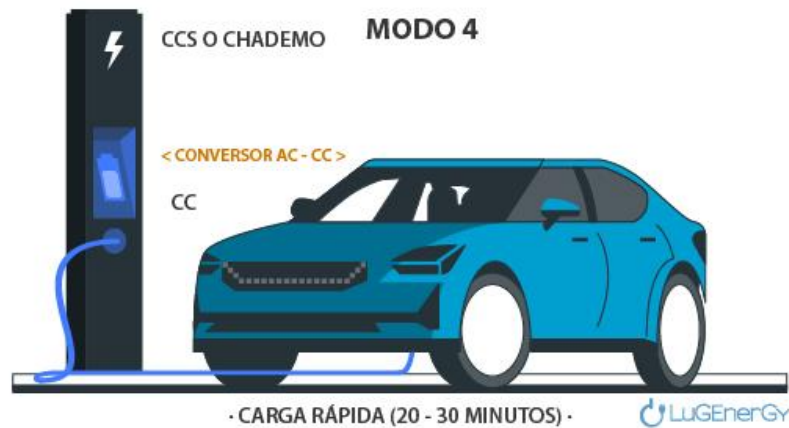


Ilustración 5. Modo de carga 4

Por todo lo comentado anteriormente, se utilizará el modo 3.

Para realizar el cálculo del consumo que nos genera la recarga del vehículo, se supone una autonomía de 400 km. Además, tendremos en cuenta un uso del coche normal, donde el usuario lo utilice para ir y volver del trabajo y algún trayecto extra como lo puede ser ir al gimnasio o cualquier otra actividad que implique una distancia corta.

Teniendo este contexto se estima un tiempo de carga de 3h diarias.

Como hemos comentado anteriormente, el modo de carga escogido para nuestra instalación es el modo 3, por lo que la potencia que utilizaremos será de 7,2 kW.

En este caso se calcula cuanta energía se consume anualmente si suponemos este periodo de recarga. Al imponer una carga diaria y partiendo de la potencia son 7,2 kW y el tiempo de carga son 3 horas, sabemos que la energía que consumirá en un día será de 21,6 kWh

$$E_{\text{consumida}} = 21,6 \text{ kWh} \cdot 365 \text{ días} = 7.884 \text{ kWh al año (2.2)}$$

Una vez realizados estos cálculos, se obtiene que el consumo anual del vehículo será de 7.884 kWh al año.

3. CIRCUITO DE POTENCIA

3.1 COMPONENTES

3.1.1 PLACA FOTOVOLTAICA

Las placas fotovoltaicas se componen por un conjunto de celdas, células solares, que están conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura. Generalmente se fabrican con silicio debido al comportamiento semiconductor de este material, ya que es capaz de convertir la luz del sol que incide en energía eléctrica. Esto sucede porque el silicio absorbe la energía de los fotones del sol y libera un electrón, lo que crea un circuito eléctrico.

El funcionamiento de la célula solar es simple, se comporta como un diodo, elemento que es capaz de conducir la corriente eléctrica en un sentido fabricado con una unión P-N, en el cual la parte que queda expuesta a la radiación solar es la N y la parte que dejamos en la zona de oscuridad es la P.

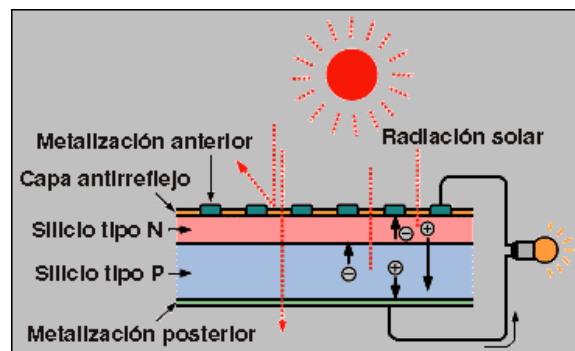


Ilustración 6. Celda P-N

Se puede dividir la variedad de paneles solares en la tecnología que se usa para su fabricación, generalmente se agrupan en silicio cristalino y silicio amorfo. Dentro del silicio cristalino también se encuentran dos grupos, el monocristalino y el policristalino:

- Silicio monocristalino: Estos se obtienen mediante el silicio fundido, seccionado y cristalizado en una sola pieza, los cristales de silicio con los que se trabaja tienen una pureza elevada, lo que provoca que el rendimiento sea más alto que el resto, este varía entre el 20% y 25%.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García



Ilustración 7. Celda monocristalina

- Silicio policristalino: La fabricación del policristalino, como su nombre indica, se forma por numerosos cristales, esto hace que el rendimiento sea inferior que las monocristalinas, pero tienen como ventaja que son más baratas de producir.



Ilustración 8. Celda policristalina

- Silicio amorfo: Es la forma no cristalina del silicio, se constituye por una fina capa depositada sobre vidrio, metal o plástico. Estas son las que tienen una eficiencia más baja, pero tienen la ventaja que son las más respetuosas con el medio ambiente ya que no usan metales pesados.



Ilustración 9. Celda de silicio amorfo

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Una de las partes más importantes de este proyecto, que se debe tener en cuenta es la irradiación, que se podrá utilizar para nuestro sistema, ya que a partir de esta, y con el uso de las placas fotovoltaicas, se obtiene la potencia que podremos aprovechar.

Gracias al software PVGIS [6], se podrán obtener datos tanto de irradiación como de temperatura ambiente en intervalos de una hora. Lo interesante de este software es que se puede hacer el estudio de todo el año, esto se aprovecha para realizar un proyecto más realista.

Para los cálculos de potencia, corriente y tensión máxima que será aprovechable se utiliza el modelo de Araujo-Green [7]:

$$T_{OpC}(T_{amb},G)=T_{amb}+\frac{G}{G(TONC)} \cdot (T_{OpC}(TONC) - T_{amb}(TONC)) \quad (3.1)$$

$$I_{sc}(G)=I_{sc}(STC) \cdot \frac{G}{G(STC)} \quad (3.2)$$

$$V_{OC}(T_{OpC})=V_{OC}(STC) \cdot (1+\beta \cdot (T_{OpC}(T_{amb},G) - T(STC))) \quad (3.3)$$

$$V_t(T_{OpC})=0,025 \cdot \frac{T_{OpC}(^{\circ}C)+273,15}{300} \quad (3.4)$$

$$u_{OC}(T_{OpC})=\frac{V_{OC}(T_{OpC})}{V_t(T)} \quad (3.5)$$

$$FF(STC)=\frac{V_{pm}(STC) \cdot I_{pm}(STC)}{V_{OC}(STC) \cdot I_{sc}(STC)} \quad (3.6)$$

$$FF_0=\frac{u_{OC}-\ln(u_{OC}+0,72)}{u_{OC}+1} \quad (3.7)$$

$$r_s=1-\frac{FF(STC)}{FF_0} \quad (3.8)$$

$$a= u_{OC} + 1 - 2 \cdot u_{OC} \cdot r_s \quad (3.9)$$

$$b=\frac{a}{1+a} \quad (3.10)$$

$$V_{pm}=V_{OC} \cdot [1 - \frac{b}{u_{OC}} \cdot \ln(a) - r_s \cdot (1-a^{-b})] \quad (3.11)$$

$$I_{pm}=I_{sc} \cdot (1-a^{-b}) \quad (3.12)$$

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

$$P_{pm} = V_{pm} \cdot I_{pm} \quad (3.13)$$

Donde:

V_{oc}(STC): Tensión de circuito abierto

I_{sc}(STC): Corriente de cortocircuito

V_{pm}(STC): Tensión en el punto de potencia máxima

I_{pm}(STC): Corriente en el punto de potencia máxima

T_{OpC}(TONC): Temperatura de operación del modulo

β: Coeficiente de temperatura del modulo

G: Irradiancia en W/m²

T_{amb}: Temperatura ambiente

V_t: Tensión térmica

G(TONC): Irradiancia en condiciones TONC (800 W/m²)

T_{amb}(TONC): Temperatura ambiente en condiciones TONC (20°C)

G(STC): Irradiancia en condiciones STC (1000 W/m²)

T(STC): Temperatura en condiciones STC (25°C)

Para poner un ejemplo de cómo se utilizarán estas fórmulas para nuestro proyecto, se utilizan los datos del PVGIS, más en concreto el del 1 de enero de 2020 a las 11:10 h. Para esta hora y fecha hay una irradiancia de 811,65 W/m² y una temperatura ambiente de 10,52°C.

$$T_{OpC}(T_{amb}, G) = 10,52 + \frac{811,65}{800} \cdot (46,70 - 20) = 37,6088^\circ\text{C} \quad (3.14)$$

$$I_{sc}(G) = 10,17 \cdot \frac{811,65}{1000} = 8,25448 \text{ A} \quad (3.15)$$

$$V_{oc}(T_{OpC}) = 47,75 \cdot (1 + (-0,0028) \cdot (37,6088 - 25)) = 46,0642 \text{ V} \quad (3.16)$$

$$V_t(T_{OpC}) = 0,025 \cdot \frac{37,6088 + 273,15}{300} = 0,025897 \text{ V} \quad (3.17)$$

$$u_{oc}(T_{OpC}) = \frac{46,0642}{0,025897} = 1778,747 \text{ V} \quad (3.18)$$

$$FF(STC) = \frac{38,78 \cdot 9,54}{47,75 \cdot 10,17} = 0,7618 \quad (3.19)$$

$$FF_0 = \frac{1778,747 - \ln(1778,747 + 0,72)}{1778,747 + 1} = 0,995 \quad (3.20)$$

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

$$r_s = 1 - \frac{0,7618}{0,995} = 0,234 \quad (3.21)$$

$$a = 1778,747 + 1 - 2 \cdot 1778,747 \cdot 0,234 = 947,293 \quad (3.22)$$

$$b = \frac{947,293}{1 + 947,293} = 0,99894 \quad (3.23)$$

$$V_{pm} = 46,0642 \cdot \left[1 - \frac{0,99894}{1778,747} \cdot \ln(947,293) - 0,234 \cdot (1 - 947,293^{-0,99894}) \right] = 35,1193 \text{ V} \quad (3.24)$$

$$I_{pm} = 8,25448 \cdot (1 - 947,293^{-0,99894}) = 8,24569 \text{ A} \quad (3.25)$$

$$P_{pm} = 35,1193 \cdot 8,24569 = 289,58 \text{ W} \quad (3.26)$$

Como se puede observar a esta hora se pueden aprovechar 289,58 W con un módulo.

3.1.2 ELECTROLIZADOR

El electrolizador es el dispositivo que se encarga de separar las moléculas de oxígeno e hidrógeno que están depositadas en el agua mediante electrodos conductores. El proceso por el que se realiza es la electrólisis.

El proceso que se lleva a cabo consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por los electrodos que quedan sumergidos. La reacción que se produce es la siguiente:



Este tipo de tecnología está bastante desarrollada en la actualidad, por lo que hay distintos tipos de electrolizadores.

- Electrolizadores alcalinos: Estos usan un electrolito, como lo puede ser el hidróxido de potasio, y agua. Se suelen utilizar en aplicaciones de gran escala debido a su buen funcionamiento en este ambiente.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

- **Electrolizadores de membrana polimérica (PEM):** Es la opción que más tiene en cuenta el cuidado del medio ambiente, ya que no usan metales pesados en su construcción. Son más utilizados para pequeñas o medias escalas, favoreciendo así el uso de una fuente de energía renovable para su producción.
- **Electrólisis a altas temperaturas:** Está basado en la tecnología de células de combustible a altas temperaturas. La electricidad requerida para romper al agua a 1000°C es menor que la necesaria para electrólisis a 100°C. Esto significa que los electrolizadores a altas temperaturas pueden operar a una mayor eficiencia que los electrolizadores ordinarios. A estas temperaturas las reacciones de electrodo son más reversibles y la reacción de la celda de combustible se revierte más fácilmente a la reacción de electrólisis.

3.1.3 INVERSOR DC/AC

Cuando el abastecimiento de energía viene de fuentes como lo son los paneles solares, los cuales entregan corriente continua, es común el uso de inversores para poder así alimentar la instalación doméstica.

El inversor es un dispositivo capaz de transformar corriente continua en corriente alterna. Estos se caracterizan por tener una alta eficiencia, que puede oscilar entre 90% y 94%. Todo ello viene determinado por las distintas pérdidas que nos podamos encontrar en el sistema como lo pueden ser los diferentes elementos pasivos.

Generalmente se clasifican en inversores monofásicos o trifásicos, aunque una clasificación más exhaustiva sería la de cómo se dispone la conexión:

- **Inversores centrales:** son aquellos que disponen de una potencia y eficiencia más elevada. El mayor inconveniente es que al ser un único inversor en el sistema, si este falla, todo el circuito se vería afectado por lo que la producción caerá.
- **Inversores de cadena:** en esta disposición se encuentra una cadena de paneles conectadas en serie a la entrada del inversor lo que permite que no todas las cadenas queden orientadas de la misma forma.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

- Inversores híbridos: estos tipos permiten conectarse tanto a las baterías como al suministro eléctrico con la particularidad de que es capaz de priorizar una de las fuentes según sea necesario.
- Inversores de aislada: la característica principal de estos inversores es que se diseñan para trabajar con baterías en aquellas instalaciones en las que no hay un suministro eléctrico.

Por todo lo comentado anteriormente, el inversor es un elemento imprescindible para la instalación doméstica, tanto para las instalaciones fotovoltaicas aisladas como para las conectadas a red.

3.1.4 CONVERTIDOR DC/DC

La función del convertidor es elevar o disminuir un voltaje continuo entre dos circuitos, en el caso de este proyecto se encargan, con un controlador PI, de inyectar un corriente de abastecimiento al bus de potencia o de consumo por parte del electrolizador.

Principalmente se centra en dos arquitecturas sencillas de convertidores DC/DC, primero el convertidor reductor BUCK y segundo el convertidor elevador BOOST.

Convertidor tipo BUCK

El convertidor tipo Buck, es también conocido como un convertidor reductor, ya que con su aplicación, podemos convertir la tensión de entrada a una tensión de salida reducida. El funcionamiento de este convertidor implica dos estados, el estado ON, que es cuando el dispositivo permite que la corriente pueda circular, y el estado OFF, en el que el circuito se queda abierto por lo que no hay circulación, aislando así la tensión de entrada.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

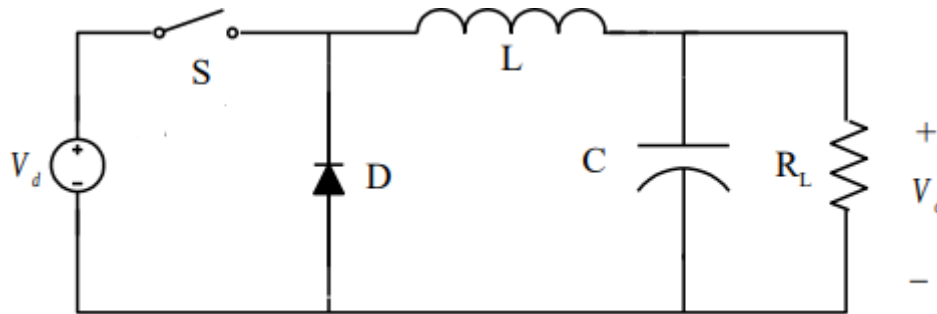


Ilustración 10. Circuito equivalente convertidor Buck

Como podemos ver, el convertidor consta de bobinas y capacitores. La función del condensador es mantener la tensión y minimizar el rizado que podemos encontrar a la salida, es importante tenerlo en cuenta ya que un elevado rizado en la tensión equivale a que la capacitancia no es suficiente.

Modo de conducción continua

Cuando el estado de conmutación está en el intervalo T_{ON} se dice que está en modo continuo, ya que la corriente está circulando por la bobina y nunca quedara en cero, en el momento en el que el conmutador se abra, vemos que el diodo estará conduciendo y la energía que queda almacenada en la bobina ira decreciendo. La función de la bobina es la de transferir energía desde la entrada a la salida.

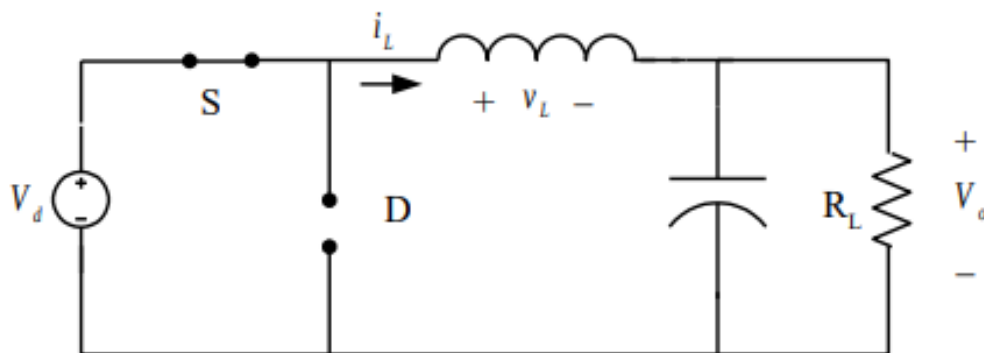


Ilustración 11. Modo conducción continua interruptor cerrado Buck

Como se puede observar, al analizar el circuito con el interruptor (S) cerrado, el diodo en este modo de conducción se representa como un circuito abierto ya que no es capaz de conducir de cátodo a ánodo. Esto implica que haya una diferencia de potencial en la bobina provocando que a medida que pasa el tiempo la corriente va en aumento.

Por ultimo analizamos el mismo circuito pero con el interruptor abierto.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

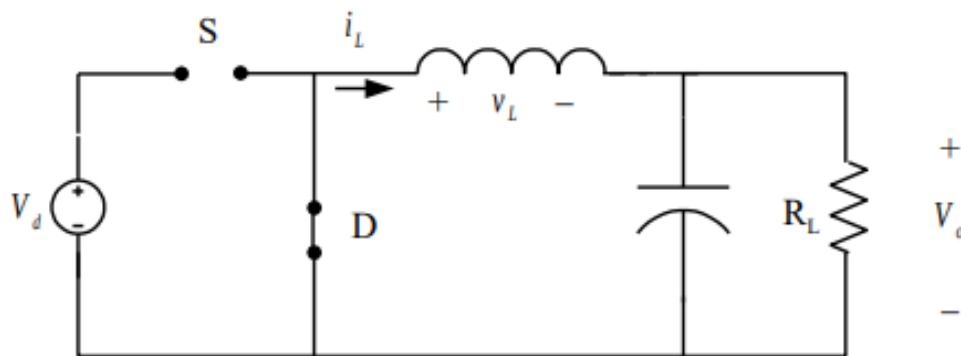


Ilustración 12. Modo conducción continua interruptor abierto Buck

En este caso se puede ver que la alimentación está desconectada, este caso es conocido como intervalo T_{OFF} , por lo que el inductor es el encargado de hacer circular corriente por el circuito alimentando así el capacitor y la carga, y el diodo. Se encarga de mantener la continuidad de circulación por el inductor. Como consecuencia vemos que la corriente en la bobina irá decreciendo conforme pase el tiempo.

Todo este modo de conducción se puede reducir a dos topologías, como se ha comentado anteriormente, los intervalos. La duración de este modo vendrá definida por el tiempo total de estos intervalos, $T = T_{ON} + T_{OFF}$.

Modo de conducción discontinua

Este modo parte del funcionamiento del modo continuo añadiendo una tercera topología. Esta es cuando tanto el interruptor como el diodo quedan abiertos al mismo tiempo, lo que quiere decir que la circulación de corriente por la bobina es nula. El capacitor en este caso es el encargado de distribuir la energía hacia la carga.

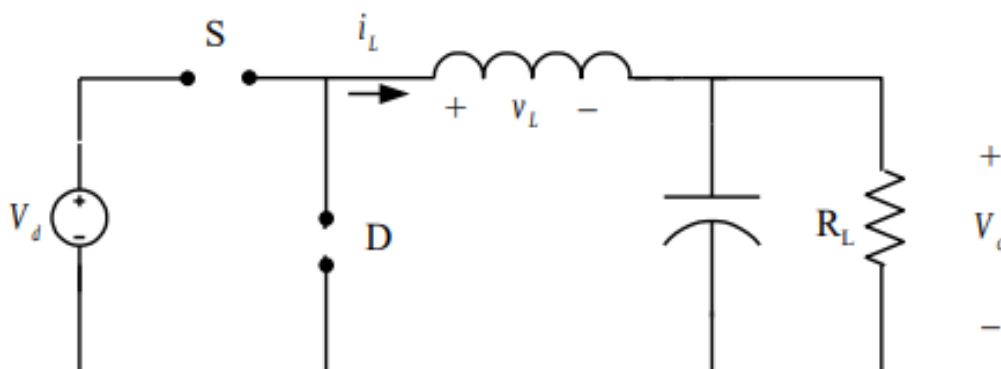


Ilustración 13. Modo conducción discontinua Buck

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Convertidor tipo BOOST

El convertidor tipo Boost es un elevador, el cual aprovecha tanto al inductor como al capacitor, que son los elementos encargados de almacenar la energía, para elevar la corriente que le llega desde la fuente.

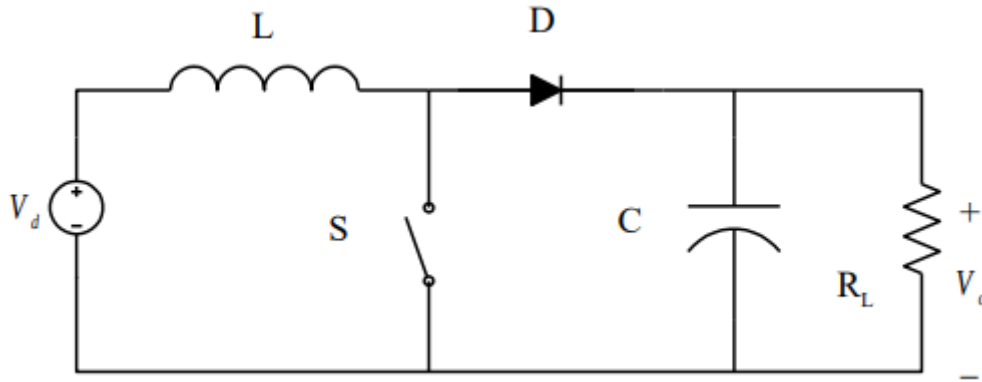


Ilustración 14. Circuito equivalente convertidor Boost

Como sabemos la corriente llega desde la fuente de alimentación hasta la bobina, donde se ira almacenando energía en el momento en el que el elemento de conmutación este cerrado. Cuando el conmutador se abre, la corriente comienza a circular, gracias al paso por el diodo, hacia el condensador.

Del mismo modo que el convertidor BUCK, este también presenta dos modos de conducción.

Modo de conducción continua

El modo continuo del BOOST sigue el mismo principio que el BUCK, cuando el interruptor se encuentra en estado ON, la corriente que circula por la bobina no queda en ningún momento a 0.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

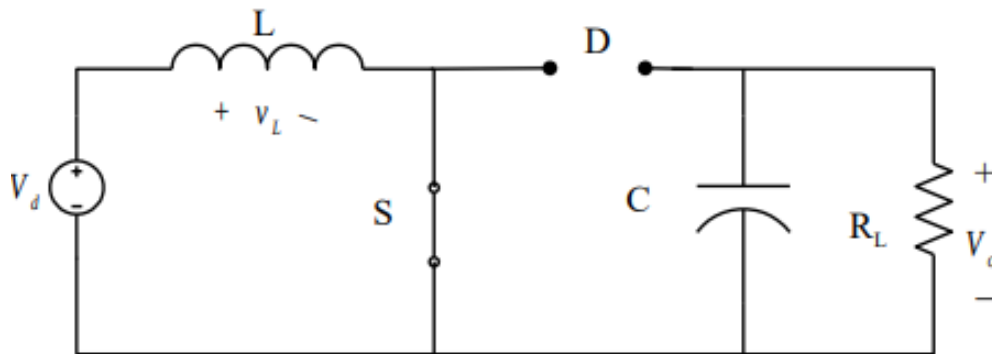


Ilustración 15. Modo conducción continua interruptor cerrado Boost

Como se ve en este caso el diodo queda abierto por lo que no circula corriente en esa zona del circuito. En este momento la bobina recibe corriente en aumento de forma constante almacenando así energía en el inductor. Este estado se conoce como intervalo T_{ON} .

Una vez ha finalizado el intervalo anterior, el interruptor se abre, entrando así en el intervalo T_{OFF} .

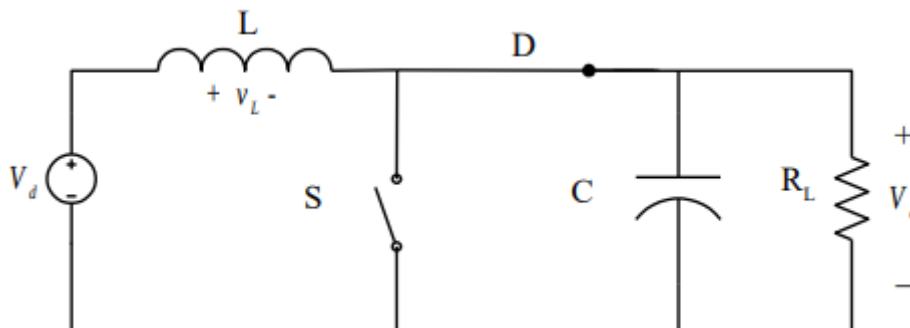


Ilustración 16. Modo conducción continua interruptor abierto Boost

Como se ve al analiza el circuito, en este modo la tensión que obtenemos es la suma de la tensión de entrada y la tensión de la bobina. Con esto conseguimos cargar el condensador al mismo tiempo que alimentamos la carga. Esto hace que poco a poco la bobina se va descargando.

Modo de conducción discontinua

Como se ha visto anteriormente, en este modo la corriente que circula por la bobina es nula. Se sabe que esto pasa una vez transcurridos los intervalos anteriores. Se ha visto

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

que en este caso tanto el interruptor como el diodo quedan en circuito abierto al mismo tiempo.

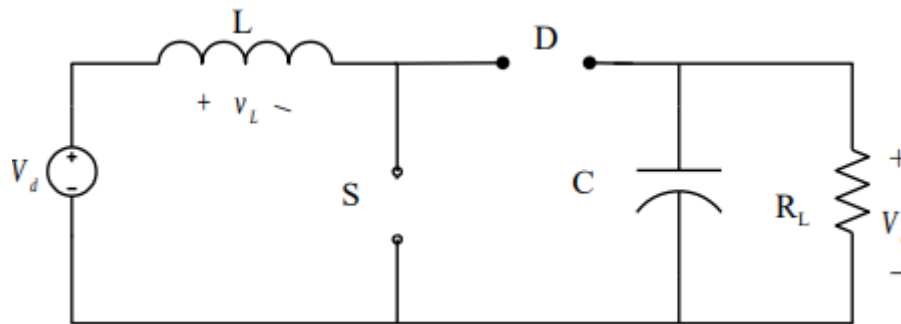


Ilustración 17. Modo conducción discontinua Boost

Como se puede observar, del mismo modo con el BUCK, el condensador es el encargado de alimentar la carga.

3.1.5 PILA DE HIDRÓGENO

Las pilas de combustible son elementos generadores de naturaleza electroquímica que permiten la transformación de energía química en energía eléctrica. Para ello, emplean las características de las reacciones de oxidación-reducción que permiten la extracción directa de electricidad. Tienen la ventaja de no emitir gases contaminantes o de efecto invernadero.

Aunque existen diversos tipos de pilas con distintas configuraciones, modos de funcionamiento y combustibles utilizados, este proyecto se centra en las pilas de hidrógeno, concretamente en las denominadas Pilas de Membrana de Intercambio Protónico a las que también nos referiremos más adelante como PEM o PEMFC (Protón Exchange Membrane Fuel Cell).

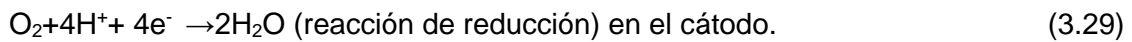
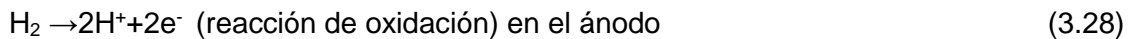
Este tipo de pilas son las más extendidas, debido principalmente a que tienen un montaje relativamente sencillo y a que operan en condiciones poco exigentes de temperatura y presión. Las PEMFC usan como combustible hidrógeno (H_2) de alta pureza, que reacciona con oxígeno (O_2) y dando como resultado exclusivamente agua (H_2O).

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Modelo Electroquímico

El funcionamiento de una pila de hidrógeno se basa en las características de la reacción de oxidación-reducción (redox) del hidrógeno. Una reacción redox es básicamente una reacción en la cual participan dos agentes químicos y donde uno de ellos pierde electrones (el reductor) y otro los recibe (el oxidante).

E^0 es el voltaje ideal termodinámico de la pila, que se calcula con la $E_{\text{cátodo}} - E_{\text{ánodo}}$.



Entonces siguiendo la fórmula $E_o = E_{\text{catodo}} - E_{\text{anodo}}$

En la ilustración 18 se muestra la tabla con valores de E^0 para diversos pares redox, es decir, para el conjunto de la forma oxidada y reducida (en ese orden) de una especie química.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda Bryan Escachx y Javier García

Par redox	E°	Par redox	E°
$F_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2HF(aq)$	3.06	$2H_2SO_3 + 2H^+ + 4e \rightleftharpoons S_2O_3^{2-} + 3H_2O$	0.40
$F_2 + 2e \rightleftharpoons 2F^-$	2.87	$Fe(CN)_6^{3-} + e \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$	0.36
$O_3 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons O_2 + H_2O$	2.07	$VO^{2+} + 2H^+ + e \rightleftharpoons V^{3+} + H_2O$	0.36
$S_2O_8^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2SO_4^{2-}$	2.01	$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu$	0.34
$Co^{3+} + e \rightleftharpoons Co^{2+}$	1.82	$Hg_2Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Hg + 2Cl^-$	0.28
$H_2O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.77	$IO_3^- + 3H_2O + 6e \rightleftharpoons I^- + 6OH^-$	0.26
$MnO_4^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons MnO_2 + 2H_2O$	1.70	$AgCl + e \rightleftharpoons Ag + Cl^-$	0.22
$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons PbSO_4 + 2H_2O$	1.69	$HgBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4Br^-$	0.21
$Au^+ + e \rightleftharpoons Au$	1.68	$Cu^{+} + e \rightleftharpoons Cu$	0.15
$HClO_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HClO + H_2O$	1.64	$Sn^{4+} + 2e \rightleftharpoons Sn^{2+}$	0.15
$HClO + H^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Cl_2 + H_2O$	1.63	$S + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2S$	0.14
$Ce^{4+} + e \rightleftharpoons Ce^{3+}$	1.61	$CuCl + e \rightleftharpoons Cu + Cl^-$	0.14
$Bi_2O_4 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons 2BiO^+ + 2H_2O$	1.59	$AgBr + e \rightleftharpoons Ag + Br^-$	0.10
$BrO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}Br_2 + 3H_2O$	1.52	$S_4O_6^{2-} + 2e \rightleftharpoons 2S_2O_3^{2-}$	0.08
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 4H_2O$	1.51	$CuBr + e \rightleftharpoons Cu + Br^-$	0.03
$PbO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Pb^{2+} + 2H_2O$	1.46	$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2$	0.00
$Cl_2 + 2e \rightleftharpoons 2Cl^-$	1.36	$Hg_4^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg + 4I^-$	-0.04
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e \rightleftharpoons 2Cr^{3+} + 7H_2O$	1.33	$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb$	-0.13
$MnO_2 + 4H^+ + 2e \rightleftharpoons Mn^{2+} + 2H_2O$	1.23	$CrO_4^{2-} + 4H_2O + 3e \rightleftharpoons Cr(OH)_3 + 5OH^-$	-0.13
$O_2 + 4H^+ + 4e \rightleftharpoons 2H_2O$	1.23	$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn$	-0.14
$IO_3^- + 6H^+ + 5e \rightleftharpoons \frac{1}{2}I_2 + 3H_2O$	1.20	$AgI + e \rightleftharpoons Ag + I^-$	-0.15
$ClO_4^- + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons ClO_3^- + H_2O$	1.19	$CuI + e \rightleftharpoons Cu + I^-$	-0.19
$Br_2(aq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.09	$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni$	-0.25
$Br_2(liq) + 2e \rightleftharpoons 2Br^-$	1.07	$V^{3+} + e \rightleftharpoons V^{2+}$	-0.26
$Br_3^- + 2e \rightleftharpoons 3Br^-$	1.05	$PbCl_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Cl^-$	-0.27
$VO_2^+ + 2H^+ + e \rightleftharpoons VO^{2+} + H_2O$	1.00	$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co$	-0.28
$AuCl_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Cl^-$	1.00	$PbBr_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2Br^-$	-0.28
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO + 2H_2O$	0.96	$PbSO_4 + 2e \rightleftharpoons Pb + SO_4^{2-}$	-0.36
$NO_3^- + 3H^+ + 2e \rightleftharpoons HNO_2 + H_2O$	0.94	$PbI_2 + 2e \rightleftharpoons Pb + 2I^-$	-0.37
$2Hg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg_2^{2+}$	0.92	$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd$	-0.40
$AuBr_4^- + 3e \rightleftharpoons Au + 4Br^-$	0.87	$Cr^{3+} + e \rightleftharpoons Cr^{2+}$	-0.41
$Cu^{2+} + I^- + e \rightleftharpoons CuI$	0.86	$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe$	-0.44
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons Hg$	0.85	$2CO_2(g) + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2C_2O_4(aq)$	-0.49
$Ag^+ + e \rightleftharpoons Ag$	0.80	$Cr^{3+} + 3e \rightleftharpoons Cr$	-0.74
$Hg_2^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2Hg$	0.79	$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn$	-0.76
$Fe^{3+} + e \rightleftharpoons Fe^{2+}$	0.77	$H_2O + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}H_2 + OH^-$	-0.83
$PtCl_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Cl^-$	0.73	$Cr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cr$	-0.91
$Q + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2Q$	0.70	$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn$	-1.18
$O_2 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_2O_2$	0.68	$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al$	-1.66
$PtBr_4^{2-} + 2e \rightleftharpoons Pt + 4Br^-$	0.58	$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg$	-2.37
$MnO_4^- + e \rightleftharpoons MnO_4^{2-}$	0.56	$Na^+ + e \rightleftharpoons Na$	-2.71
$H_3AsO_4 + 2H^+ + 2e \rightleftharpoons HAsO_2 + 2H_2O$	0.56	$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca$	-2.87
$I_3^- + 2e \rightleftharpoons 3I^-$	0.54	$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr$	-2.89
$I_2(s) + 2e \rightleftharpoons 2I^-$	0.54	$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba$	-2.90
$Cu^+ + e \rightleftharpoons Cu$	0.52	$K^+ + e \rightleftharpoons K$	-2.93
$4H_2SO_3 + 4H^+ + 6e \rightleftharpoons S_4O_6^{2-} + 6H_2O$	0.51	$Li^+ + e \rightleftharpoons Li$	-3.05

Ilustración 18. Diferentes valores de E_0 en diversos pares Redox [8]

El potencial de reducción en el cátodo ($E_{red} O_2/H_2O$) según la tabla de potenciales de reducción es de 1,23 V y el potencial de reducción en el ánodo ($E_{red} H^+/H_2$) es de 0V.

Por lo tanto, siguiendo la fórmula tenemos un potencial ideal en la celda electroquímica de 1,23V.

Pero en la realidad tenemos un conjunto de pérdidas que hacen que ese potencial baje, principalmente esas pérdidas son:

- Energía de activación: Es la energía externa necesaria para que la reacción se pueda producir, independientemente de la energía que cueste llevar a cabo la reacción o que aporte la reacción en el transcurso de la misma, son importantes a bajas densidades de corriente.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Esta energía (E_a) de activación se reduce gracias a los catalizadores, en el caso de las pilas PEMFC sería las partículas de platino en la membrana.

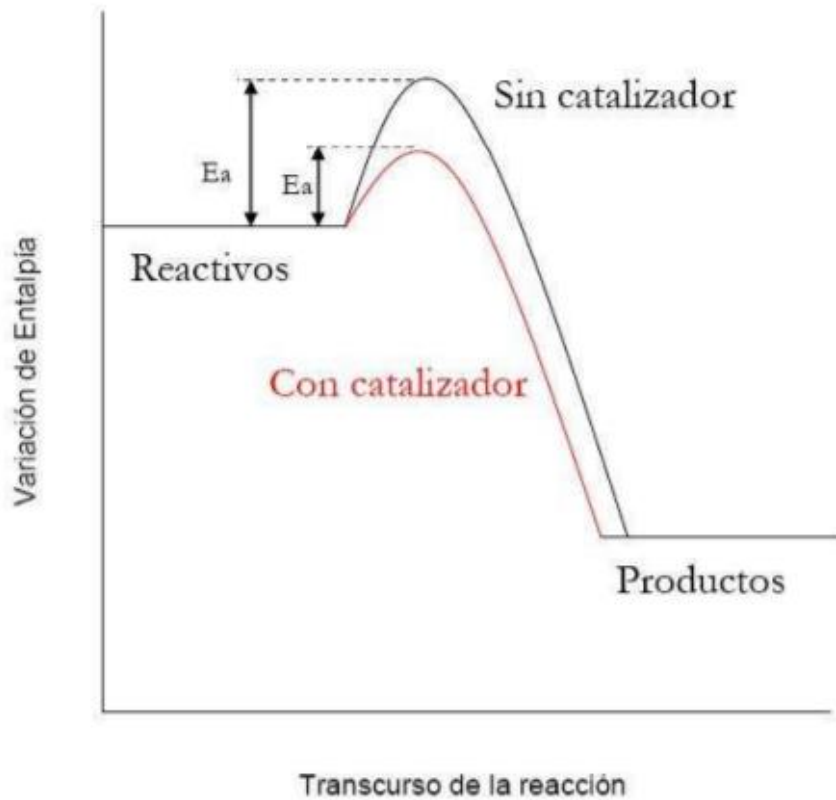


Ilustración 19. Energía de activación E_a en función del uso de catalizador

- Pérdidas por transporte de cargas óhmicas: Este tipo de pérdidas son mayoritariamente causadas por la resistencia interna de la pila de combustible, y tienen importancia a periodos de corrientes medias en la pila de combustible.
- Pérdidas por concentración: se debe a la limitación de los reactantes a alcanzar la capa catalizadora, es decir, esta es una pérdida debido a que no se puede mantener la concentración de los gases en dicha capa y es importante a altas densidades de corriente ya que el caudal es proporcional a la corriente producida.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

En la literatura se utiliza un tipo de relación para evaluar el rendimiento de una pila de combustible y sus características bajo una variedad de situaciones de carga. Esta es la llamada curva de polarización, y en ella se representa la relación entre la corriente que produce la pila y su tensión. En la ilustración 20 podemos ver una curva típica de polarización de una PEMFC.

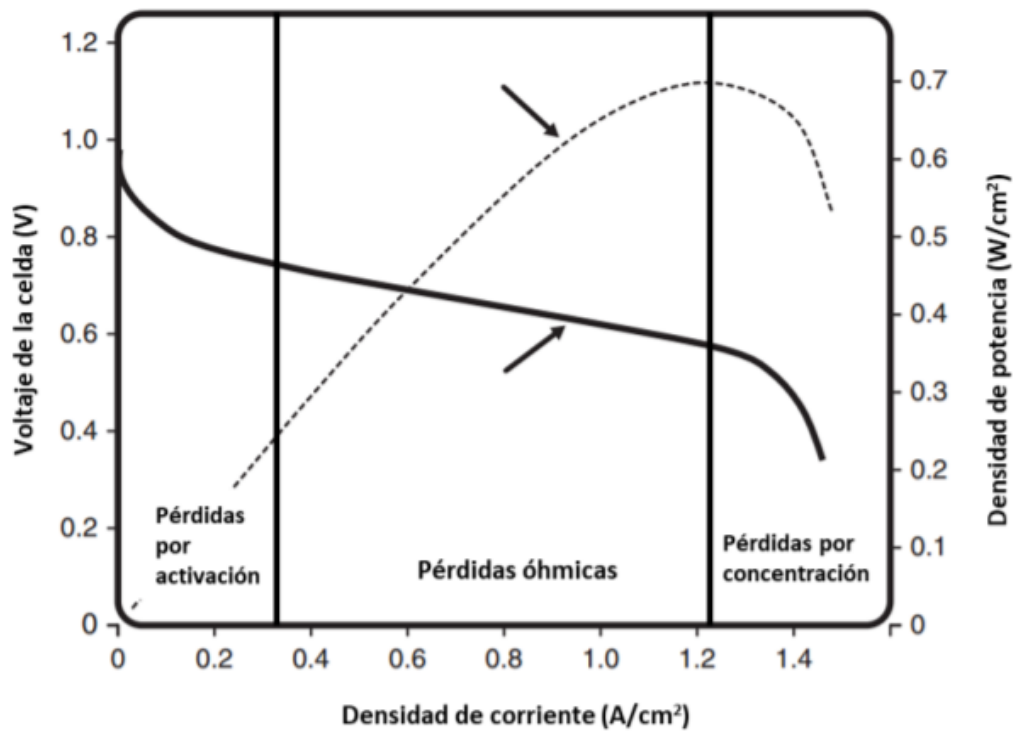


Ilustración 20. Curva de polarización de un pila de combustible [9]

3.1.6 BATERÍAS

Las baterías son los dispositivos que se encargan de almacenar la energía para posteriormente suministrar esta energía. Consiste en dos o más celdas electroquímicas que son capaces de transformar la energía química en corriente eléctrica. Como bien sabemos están compuestas por ánodos, cátodos y electrolitos.

Hay muchos tipos de baterías en el mercado y cada una de ellas con una función específica. Para el estudio de nuestro sistema únicamente nos centramos en aquellas pilas que han sido diseñadas para las instalaciones fotovoltaicas, diferenciando así

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

todas las ventajas e inconvenientes que tiene el uso de cada tipo y cuál podría ser la que más se adecua.

- Baterías monoblock

Están destinadas a instalaciones eléctricas de pequeño consumo y son usadas debido a su relación calidad-precio. Son las más baratas y más sencillas que podemos encontrar. Estas baterías forman un único bloque con dos terminales, positivo y negativo.

- Baterías de ciclo profundo

Las baterías de ciclo profundo tienen un formato en cuanto a la disposición similar a las monoblock, con la ventaja de ser más grandes y más duraderas. Están pensadas para instalaciones que requieren un uso diario. Son una buena elección para instalaciones con un consumo estándar, que se utilice durante todo el año, esto se debe a que son un tipo de baterías que tienen una vida útil elevada, pudiendo llegar a los 7 años. Además, una de las características más importantes de estas baterías que las diferencian de las demás es la capacidad de resistir descargas completas sin que se deterioren.

- Baterías AGM (absorbed glass material)

Las AGM son pilas que no requieren de mantenimiento debido a que tienen el electrolito inmovilizado y tienen además unas válvulas para la regulación de gases y evitar así pérdidas. Estas baterías son usadas en pequeñas instalaciones donde el mantenimiento es difícil de realizar.

También disponen de un diseño que resiste vibraciones y golpes y el electrolito no se derrama gracias a las placas que lo absorben e inmovilizan.

Tienen una larga vida útil aun sometándolo a descargas profundas. Disponen además de una potencia y una rapidez de carga elevada, por lo que a corto plazo pueden entregar altas corrientes.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

- Baterías estacionarias

Este tipo de baterías tienen una vida útil elevada y se utilizan en instalaciones donde hay un consumo diario. Son capaces de acumular una gran cantidad de energía. Estas baterías son diseñadas para dar una cantidad constante de corriente y aguantar ciclos de descarga profunda.

- Baterías de litio

Las baterías de litio son quizás las más conocidas, estas tienen unas dimensiones pequeñas y no emiten gases. Su tiempo de carga es el más rápido, tienen una elevada densidad de energía lo cual les permite almacenar una mayor carga por unidad de volumen y son capaces de realizar descargas totales sin que su vida útil se vea afectada lo cual es una gran ventaja. Uno de los principales inconvenientes de estas baterías es su coste, el cual es bastante elevado.

Algo muy importante a tener en cuenta es la profundidad de descarga y la vida útil de las baterías.

La profundidad de descarga es el valor en tanto por ciento que se ha sacado de la batería cargada durante un ciclo. Distinguimos entre descargas superficiales, las cuales son de aproximadamente el 20% de la capacidad nominal, y descargas profundas, que va del 60% al 80% de la capacidad nominal. Esto es algo a tener en cuenta ya que cuanto mayor sea la profundidad de la descarga de la batería, menos ciclos va a permitir tener, por lo que su vida útil se verá afectada.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

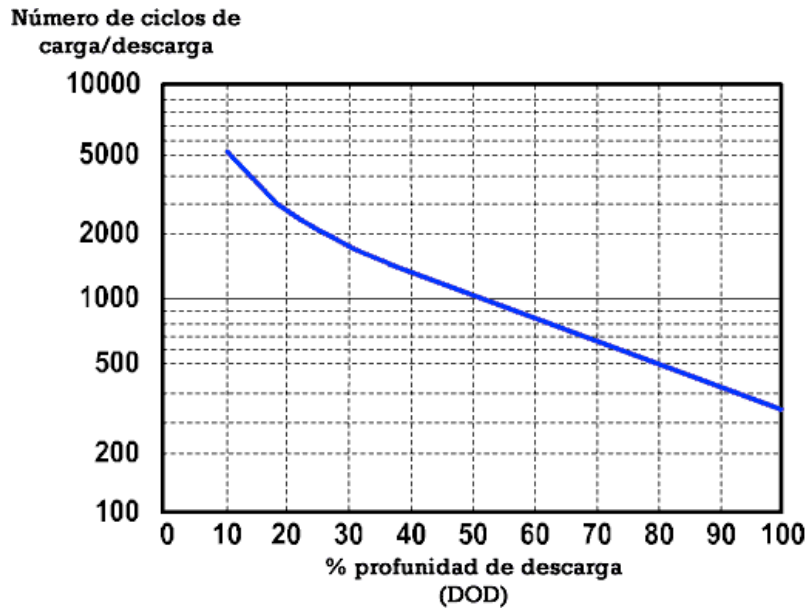


Ilustración 21. Gráfica de relación entre los ciclos y la DOD [10]

La vida útil no es más que el número de ciclos que soporta la batería. En instalaciones fotovoltaicas esta vida útil se mide en ciclos, por lo que cuantos más ciclos se le sometan a la batería, su vida útil reduce.

4. DISEÑO DE LOS COMPONENTES

En este capítulo se verán los cálculos necesarios para el dimensionado de los componentes principales del sistema. Estos cálculos serán utilizados posteriormente en la simulación, por lo que se utilizan datos reales de consumo, extraídos a partir de DATADIS [11], software que nos proporciona el consumo de una vivienda real cada hora a lo largo de un año.

Gracias a los cálculos y la simulación se podrá comprobar que el sistema estudiado cumple con los requisitos necesarios para poder ser implementado en una situación real.

La idea del sistema híbrido es la posibilidad de dividir el peso de la carga entre la batería y la pila de hidrógeno, es por eso que se parte de la hipótesis de distribuir un 60% del consumo hacia la batería y un 40% con el hidrógeno. Esto hace que la capacidad de baterías necesarias sea inferior con lo que limitamos su uso.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

4.1 ELECTROLIZADOR

En el electrolizador idealmente obtenemos la reacción contraria que en la pila de combustible, por lo tanto el sobre potencial mínimo para que la reacción se produzca es el mismo pero en sentido contrario:

$$E_{rev} = -1.229V.$$

Y al igual que en la pila de combustible tenemos las mismas pérdidas que en este caso hacen aumentar el voltaje para que la reacción se produzca.

$$E_{cell} = E_{rev} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} + \eta_{activ} \quad (4.1)$$

Estos electrolizadores requieren un potencial de celda de aproximadamente 1,7 V que variará ligeramente según la tecnología del fabricante.

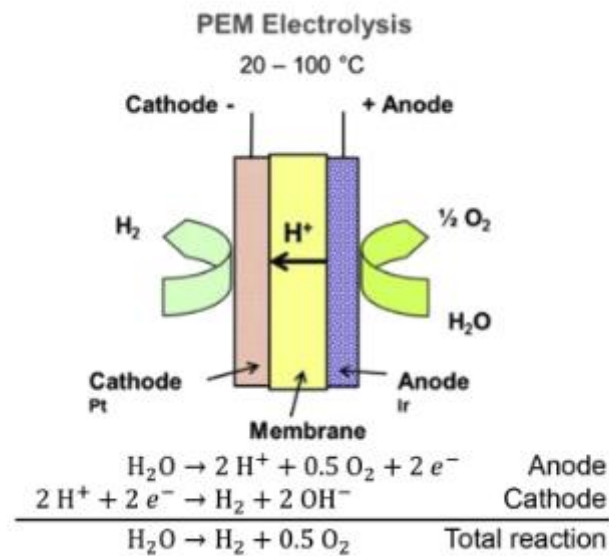


Ilustración 22. Esquema del proceso de electrólisis PEM

Para dimensionar el electrolizador debemos fijar cuanto caudal de hidrógeno queremos producir, para la aplicación en cuestión se ha puesto de objetivo un caudal de 100 gramos por hora, y el electrolizador lo conformaran unas 100 celdas en serie.

Con estos datos podemos sacar el caudal por segundo de cada celda que necesitamos:

$$\frac{100}{(3600 \cdot 100)} = 2,7 \times 10^{-4} \text{ g/s} \quad (4.2)$$

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

La ley unificada de la electrolisis de Faraday relaciona los amperios por la cantidad de masa producida.

$$m = Q * \frac{1 * M}{F * n} \quad (4.3)$$

Donde:

m es el valor de la masa producida

Q es la carga circulante en coulombios.

F es la constante de Faraday en C/equivalente de e-

n es la cantidad de electrones intercambiados

M es la masa molar del hidrógeno

Con la equivalencia de que un A son Q * s podemos hacer la equivalencia con el flujo másico que queremos producir.

Obtenemos:

$$\dot{m} = A \frac{1 \text{ C*s}}{\text{A}} \frac{\text{equivalente de e}^-}{96487 \text{ C}} \frac{1 \text{ mol H}_2}{2 \text{ equivalente de e}^-} \frac{2,0158 \text{ g}}{1 \text{ mol h}_2} \quad (4.4)$$

Si sustituimos:

$$\frac{2,7 \times 10^{-4} \text{ g/s}}{1,0446 \times 10^{-5}} = 26,84 \text{ A} \quad (4.5)$$

Y con este resultado podemos sacar la potencia necesaria a suministrar al electrolizador para producir ese flujo másico:

$$P_{\text{electrolizador}} = 25,84 \text{ A} * 1,7 \text{ V} * 100 \text{ celdas} = 4394,026 \text{ W} \quad (4.6)$$

4.1 BATERÍAS

Para los cálculos de la capacidad de la batería se ha tenido en cuenta 2 casos:

- 1- Vivienda sola
- 2- Vivienda más puesto de carga modo 3

Esto se hace para comprobar la diferencia de capacidad que supone incorporar la instalación del puesto de carga. Como se puede apreciar no se ha tenido en cuenta el electrolizador como carga, ya que las baterías se dimensionan únicamente para

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

aquellas cargas que se van a abastecer.

Para el cálculo de la capacidad de las baterías necesitamos conocer los datos siguientes:

- Consumo diario: consumo de 5.425 Wh, obtenido por DATADIS
- Consumo diario de la vivienda y el vehículo: este es el consumo que supone tener la instalación completa. Anteriormente se calculó el consumo que tiene el vehículo, por lo que este no es más que el conjunto de consumos.
- Autonomía: este dato hace referencia a los días en los que será necesario el uso de las baterías, al hacer los cálculos sobre toda la vivienda y además la carga de un vehículo, hemos supuesto una autonomía de 5 días.
- Tensión de la batería: se ha escogido un modelo de batería el cual dispone de una tensión de 48 V.
- La profundidad de descarga (P_d), para los cálculos de capacidad de batería se decidió utilizar un DOD del 80%.
- Pérdidas por temperatura y equipo: para este sistema se ha supuesto un total de pérdidas del 10% debido en su mayoría al equipo.

La fórmula para realizar este cálculo es la siguiente:

$$\text{Capacidad baterías (Ah)} = \frac{\text{Consumo (Wh)} \cdot \text{Autonomía}}{P_d \cdot V_t} \cdot 1,1 = \frac{5425 \cdot 5}{0,8 \cdot 48} \cdot 1,1 = 777,02 \text{ Ah} \quad (4.7)$$

Esta es la capacidad necesaria para abastecer energéticamente nuestra vivienda.

Como se ha comentado, la batería se dimensiona para que sea capaz de abastecer el 60% del consumo total.

$$\text{Consumo vivienda} + \text{consumo vehículo} = 21.600 + 5425 = 27.025 \text{ Wh} \quad (4.8)$$

$$\text{Consumo a dimensionar} = 27.025 \cdot 0,6 = 16.215 \text{ Wh} \quad (4.9)$$

$$\text{Capacidad baterías (Ah)} = \frac{\text{Consumo (Wh)} \cdot \text{Autonomía}}{P_d \cdot V_t} \cdot 1,1 = \frac{16.215 \cdot 5}{0,8 \cdot 48} \cdot 1,1 = 2322,46 \text{ Ah} \quad (4.10)$$

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Como se ha comentado en el capítulo 3, en el apartado de baterías, estas tienen una profundidad de descarga conocida como DOD. Un dato interesante a tener en cuenta sería el SOC (estado de carga) lo que nos permite conocer cuanta carga, en relación a la capacidad, tenemos disponible en un momento determinado. El SOC se puede determinar, de un modo sencillo, con la siguiente ecuación:

$$\text{SOC}=1-\text{DOD}$$

De igual forma que el DOD se expresa en tanto por ciento, el SOC es también adimensional. En caso de querer tener monitorizado el estado de la batería para conocer la disponibilidad de carga, se debe incorporar un dispositivo de medida.

Una parte importante de este sistema híbrido, es que sea capaz de repartir la energía necesaria entre todos los sistemas evitando un único sistema y además la cantidad necesaria para abastecer las cargas.

El método más común para almacenar la energía son las baterías. Estas deben ser capaces de suplir energéticamente la vivienda en los momentos en que no seamos capaces de abastecer mediante energía solar.

Otros métodos que está ganando terreno cada vez más, es el almacenamiento mediante depósitos de hidrógeno, ya que es una alternativa más respetuosa.

Para dimensionar una instalación siempre debemos escoger el valor más alto, asegurando así un correcto desarrollo del sistema.

Como se ha comentado este es un sistema híbrido, por lo que esta capacidad se ha repartido en dos partes, en que la batería tiene el 60% de la capacidad total, otorgando un 40% al hidrógeno.

Según esta deducción, debemos ser capaces de cubrir los 10.810 Wh restantes con hidrógeno. Para realizar los cálculos de cuanto hidrógeno es necesario para producir esta cantidad, se debe tener en cuenta lo siguiente.

La energía específica que tiene es de 33,33 kWh/kg, además se debe tener en cuenta que la eficiencia de estas pilas no es muy elevada, suele estar por valores de alrededor el 50%, esto quiere decir que de 1 kg de hidrógeno generado solo se puede utilizar la mitad de la energía. Para este estudio se ha utilizado un modelo de pila con un rendimiento del 46% y una tensión nominal de 24 V.

Se inician los cálculos partiendo del cálculo de 1 kg de hidrógeno en estas condiciones. La energía específica que nos proporciona 1 kg son 33,33 kWh, teniendo en cuenta su rendimiento esto equivale a 15,3318 kWh. Esta es la energía que se obtiene, pero la

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

capacidad que es capaz de distribuir es:

$$C(\text{Ah}) = \frac{15,3318 \text{ kWh} \cdot 1000}{24 \text{ V}} = 638,825 \text{ Ah} \quad (4.11)$$

Con la misma ecuación anterior se obtiene la capacidad que se debe suministrar con hidrógeno:

$$C(\text{Ah}) = \frac{10,810 \text{ Wh}}{24 \text{ V}} = 450,42 \text{ Ah} \quad (4.12)$$

Por último, sabiendo que con 1 kg de hidrógeno se proporcionan 638,825 Ah, se calculan los kilos necesarios.

$$\text{Kg de } h_2 = \frac{1 \text{ kg} \cdot 450,42 \text{ Ah}}{638,825 \text{ Ah}} = 0,705 \approx 0,71 \text{ kg} \quad (4.13)$$

Se llega a la conclusión de que para repartir la carga entre la batería y las pilas de combustible, serán necesarios 0,71 kg de hidrógeno.

4.2 PILA DE COMBUSTIBLE

A la hora de escoger la pila de hidrógeno hay que tener en cuenta cuál es su principal función, que es ayudar a la batería por la noche cuando se conecte el vehículo eléctrico a reducir el consumo de potencia, y una vez se deje de cargar el vehículo seguir cargando la batería.

Entonces para el dimensionado real de la batería se han tenido en cuenta los modos de cargas estandarizados que existen, concretamente el modo 3, que requiere de unos 7.2 kWh, y se va a cargar por día una media de 3 h por lo tanto nos sale un consumo de 21.6 kWh al día, al tener este consumo tan grande la batería está mucho más sobredimensionada de lo normal para una vivienda, la pila de combustible no es necesario que se ocupe del 100% de la potencia requerida por la carga del vehículo eléctrico ya que en el periodo de descarga no va a peligrar de acercarse a zonas de SOC bajo.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

La pila de combustible usada en la simulación es de 1,24kW, que es un valor bastante común en pilas comerciales, con un rendimiento del 46% este dato es importante a la hora de calcular la capacidad energética del hidrógeno ya que necesita de la pila de combustible para convertir esa energía en potencia eléctrica.

4.3 PLACAS FOTOVOLTAICAS

En este apartado se calcula el número de placas necesario para poder suministrar la suficiente energía al sistema y poder abastecer el consumo. Para poder realizarlo se necesitan una serie de datos:

- Consumo diario (calculado previamente)
- Hora solar pico (HSP): este dato nos da una relación entre un tiempo en horas de una irradiación hipotética constante.
- Potencia pico de la placa (W_p)

Para el cálculo de las HSP, se ha utilizado un software en el que, poniendo la ubicación de nuestra vivienda y el grado de inclinación, nos realiza el cálculo de forma automática. Par este caso, hemos decidido utilizar 30° para la inclinación de las placas debido a que esta configuración nos permite obtener una mayor cantidad de HSP. El software nos da los siguientes datos.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

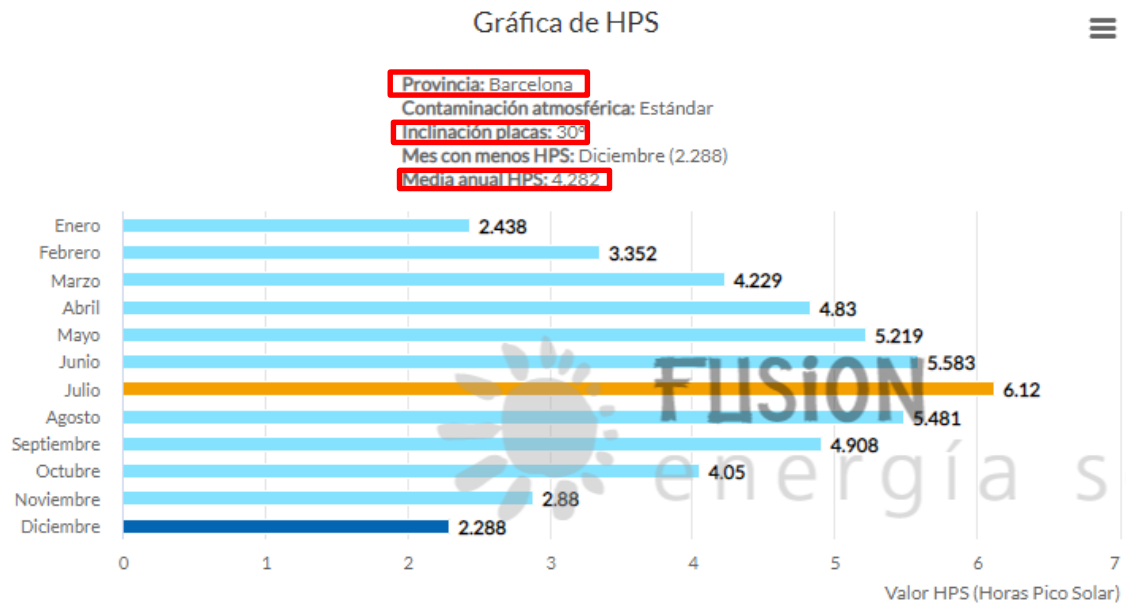


Ilustración 23. Representación de valores de la Hora Solar Pico media anual [12]

Como se observa en la ilustración 23, para cada mes la media de HSP que se obtiene con esta configuración. Para el cálculo se utiliza la media anual.

Por último, se necesita la potencia de la placa, se ha escogido una placa monocristalina. Este dato se encuentra en la ficha técnica del módulo escogido:

No. de Modelo	API345	API350	API355	API360	API365	API370
Garantía						
Garantía de Producto	10 Años					
Características Eléctricas en STC						
Potencia Máxima (Pmax)	345 Wp	350 Wp	355 Wp	360 Wp	365 Wp	370 Wp
Tensión en el Punto de Máxima Potencia (Vmax)	38,4 V	38,48 V	38,55 V	38,63 V	38,71 V	38,78 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	8,98 A	9,1 A	9,21 A	9,32 A	9,43 A	9,54 A
Tensión en Circuito Abierto (Voc)	47,28 V	47,37 V	47,47 V	47,56 V	47,66 V	47,75 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	9,72 A	9,81 A	9,9 A	9,99 A	10,08 A	10,17 A
Eficiencia	17,8 %	18 %	18,3 %	18,6 %	18,8 %	19,1 %
Tolerancia de Potencia (+)	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %

Ilustración 24. Características de la placa solar [13]

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Para el panel escogido se dispone de una potencia pico de 370W.

A modo de asegurar un abastecimiento suficiente, se hace un sobredimensionamiento (SD) del 30% al sistema para maximizar el valor de la energía y evitar problemas de falta de suministro.

La fórmula para saber cuántas placas necesitamos es la siguiente:

$$N^{\circ} \text{ placas} = \frac{\text{Consumo diario} \cdot SD}{HSP \cdot Wp} = \frac{5425 \cdot 1,30}{4,282 \cdot 370} = 4,45 \approx 5 \text{ placas} \quad (4.13)$$

Las placas fotovoltaicas son nuestro proveedor principal de energía, por lo que se debe tener en cuentas las cargas. Anteriormente se ha visto que para el consumo de una vivienda necesitamos 5 módulos. Este cálculo se ha hecho sin tener en cuenta una parte importante de nuestro sistema híbrido, el electrolizador cuya función es la de producir el hidrógeno mediante la electrolisis. Este proceso conlleva un consumo que se debe tener en cuenta y añadir al consumo total diario.

Para calcular el consumo del electrolizador se ha tenido en cuenta la cantidad de potencia necesaria para producir 100 g/h de hidrógeno. Como se ha visto en el apartado de la capacidad de hidrógeno necesario, para este sistema se necesitan 0,71 kg. No sería realista si se hace un cálculo para producir esa cantidad de hidrógeno en un solo día, ya que se necesitarían demasiadas placas y aproximadamente todo un día para producirlo. Para esto se ha tenido en cuenta que se recarga durante un periodo de 5 días a la semana por lo que con una recarga de 1,42 horas se genera así 142 gramos de hidrógeno al día.

Teniendo todos estos parámetros en cuenta, se procede a calcular:

Sabiendo que para producir 100 gramos de hidrógeno se necesitan aproximadamente 4.392,026 W y que este proceso se lleva a cabo durante 1,42 horas al día, serán necesarios 6.232,68 Wh al día. Esta es la energía requerida por el electrolizador, el consumo total será la suma de la vivienda, electrolizador y coche.

Se ha llegado a la conclusión en que la energía que es necesaria para producir el hidrógeno se ve compensada por su posterior abastecimiento al sistema por lo que solo se tiene en cuenta el 46% de su consumo.

$$\text{Consumo total (Wh)} = \text{consumo electrolizador} + \text{consumo vivienda} + \text{consumo coche} = 2.867,03 + 5.425 + 21.600 = 29.892,03 \text{ Wh}$$

La ecuación para determinar el número de módulos necesarios para proporcionar esta

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

energía es la siguiente:

$$N^{\circ} \text{ placas} = \frac{\text{Consumo diario} \cdot SD}{HSP \cdot Wp} = \frac{29.892,03 \cdot 1,30}{4,282 \cdot 370} = 24,52 \approx 25 \text{ placas} \quad (4.14)$$

Para este sistema y un funcionamiento autosuficiente serán necesarios 25 módulos fotovoltaicos.

5. SIMULACIÓN

La simulación se ha realizado en Simulink [14], que es una extensión de programación por bloques de Matlab, es ideal para simular sistemas físicos controlados por bloques de software con entradas y salidas como podría ser un micro-controlador o un PLC.

5.1 PARÁMETROS Y REQUISITOS

El modelo del sistema simulado, no contempla los siguientes parámetros:

- La energía necesaria consumida al comprimir los gases en un depósito de hidrógeno.
- Presiones relativas de la pila de combustible y del electrolizador.
- El porcentaje de humidificación de las membranas de la pila de combustible y el electrolizador.
- Perdidas de rendimiento por degradación de los componentes.
- Las no idealidades térmicas de la pila de combustible.

Los requisitos de la simulación son:

- Verificar que el dimensionamiento calculado de los diferentes elementos es el correcto.
- Implementar una heurística de control que haga que el sistema sea robusto en cuanto al suministro de energía al hogar y que alargue la vida de los componentes protegiéndolos de situaciones que acorten su vida útil.
- Que el concepto de diseño del sistema es válido.
- El modelo del stack de la pila y del electrolizador, se reduce a idénticas celdas electrolíticas tipo PEM conectadas en serie. Por lo tanto, el voltaje de trabajo total del stack se puede obtener multiplicando el voltaje de una celda por el número

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

de celdas conectadas en serie.

- Cabe aclarar que los convertidores simulados son balances de potencia con controladores, esto es así ya que para los tiempos de simulación necesarios se escoge un tiempo de muestreo de un segundo y en ese caso el dimensionamiento de los elementos de los convertidores se considera que no sería real y no aportaría un valor añadido a la simulaciones. En una aplicación real el sistema podría funcionar con convertidores boost controlados por corriente.

5.2 ESTRUCTURA

El circuito de potencia DC consistirá en 3 fuentes de potencia DC:

- Placa solar
- Pila de hidrógeno
- Batería

2 cargas:

- El electrolizador
- La entrada del inversor

Todo ello conectado a un bus de potencia.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

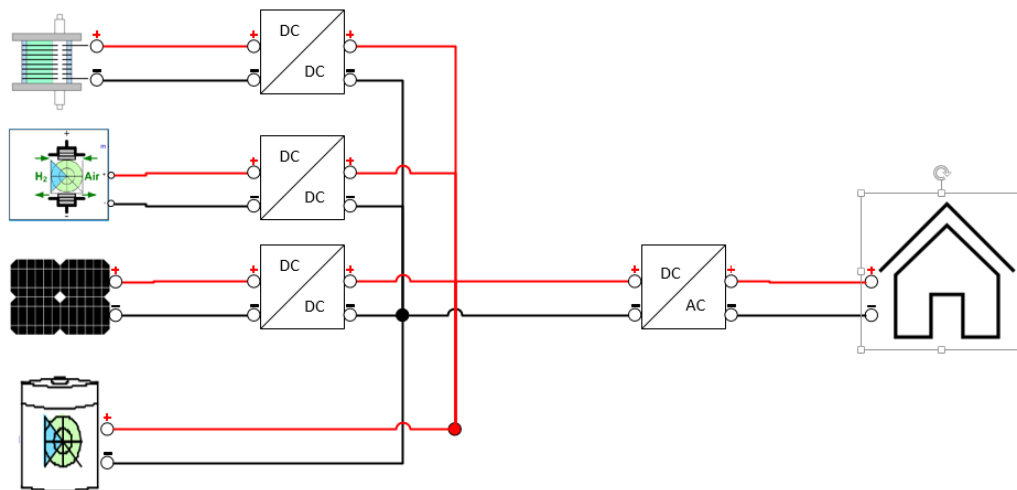


Ilustración 25. Estructura del sistema

En la imagen podemos observar la topología del sistema con la batería en pasivo en el bus de potencia y con los convertidores aseguramos que los elementos trabajen a diferentes voltajes.

Se ha escogido esta topología por dos razones principales:

- Al estar la batería en pasivo no es necesario otro convertidor ni otro control, simplificando el diseño.
- Los picos de corriente no acortaran la vida útil de la batería significativamente.

5.3 HEURÍSTICA DE SIMULACIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

El objetivo de control principal del sistema es alimentar la carga con la potencia que demande a una tensión marcada por la tensión de batería. Al mismo tiempo y mientras sea posible, mantener cargadas las baterías y producir hidrógeno para que sea almacenado. Dadas las limitaciones de los diferentes subsistemas (como la irradiación del sol a diferentes horas del día y las limitaciones de funcionamiento en la pila de combustible), es necesario un control supervisor del sistema que asegure que los flujos de energía sean distribuidos convenientemente entre todos los subsistemas.

El control también tiene que asegurar la protección de los diferentes componentes del

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

circuito para alargar su vida útil, a continuación, se definirán las situaciones en las que los componentes se verán dañados.

En el caso de la pila de combustible las principales causas de degradación son:

- **Dinámicas rápidas en la demanda de energía** [15], la potencia generada por la pila es directamente proporcional al caudal H₂ de entrada en la misma, un cambio brusco de la corriente no puede ser seguido instantáneamente por el caudal de consumo de H₂, produciendo un fenómeno llamado 'starvation', producido por la diferencia de combustible en el stack con la corriente que se le demanda a la misma.
- **Trabajar a voltajes muy altos cercanos al voltaje en circuito abierto** [15], trabajar a voltajes de celda superiores a 0.85 V degradan significativamente la celda, es por eso que se debe limitar el encendido y apagado de la pila ya que son en esos momentos cuando la pila trabaja en vacío y llevan un cierto tiempo para que se lleven a cabo.

En el caso de la batería las principales causas de degradación son:

- **Trabajar en los límites del SOC** [16], es bien conocido que a las baterías químicas no les conviene trabajar cerca de su porcentaje más bajo de carga ni el más alto, estos fenómenos vienen dados por las reacciones químicas que suceden dentro de la batería, que en el caso de la sobrecarga aumenta la temperatura de la batería y ha cierto nivel de temperatura la capacidad de la batería se ve afectada indefinidamente, al mismo tiempo una sobre descarga de la misma afectara a los electrodos de la batería reduciendo igualmente la capacidad de la misma.

Es por ello que el control presentado más adelante debe cumplir estos tres requisitos, Además de asegurar que siempre haya electricidad suficiente para suministrar al hogar.

Para evitar las dinámicas rápidas en la simulación se combinan dos estrategias:

- 1- La pila de combustible siempre trabaja en el punto nominal de potencia eléctrica
Por lo tanto, la referencia de corriente que queremos extraer de la pila de combustible y que le damos al controlador es fija, con esto se consigue estar el menor tiempo posible en voltaje de circuito abierto, limitándolo solo al encendido y el apagado de la misma.
- 2- Para evitar que la pila pase en un periodo de muestreo de una referencia 0 a la

referencia deseada se añade un 'rate limiter' que en la práctica se podría implementar en un microcontrolador, este atenuamiento en la variación de la señal de referencia difiere según la literatura, según [17] incrementa este valor un 2% de la potencia nominal por segundo, mientras que con pilas de mayor potencia según [14] utiliza un 10% aproximadamente, en el presente trabajo como se simula una pila de 1.24 kW se utilizara un porcentaje aproximado del 2% de la potencia nominal.

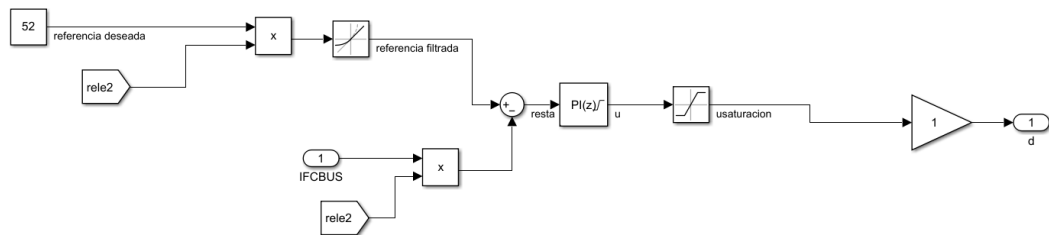


Ilustración 26. Modelo del controlador del convertidor

En la ilustración 26 vemos el control explicado anteriormente con una referencia deseada a corriente nominal de la pila de combustible, multiplicada por el relé que es el booleano que permite abrir el relé físico del circuito y a su vez permitir introducir la referencia al control, y la referencia pasada por un rate limiter que permite un 2% por tiempo de muestreo.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

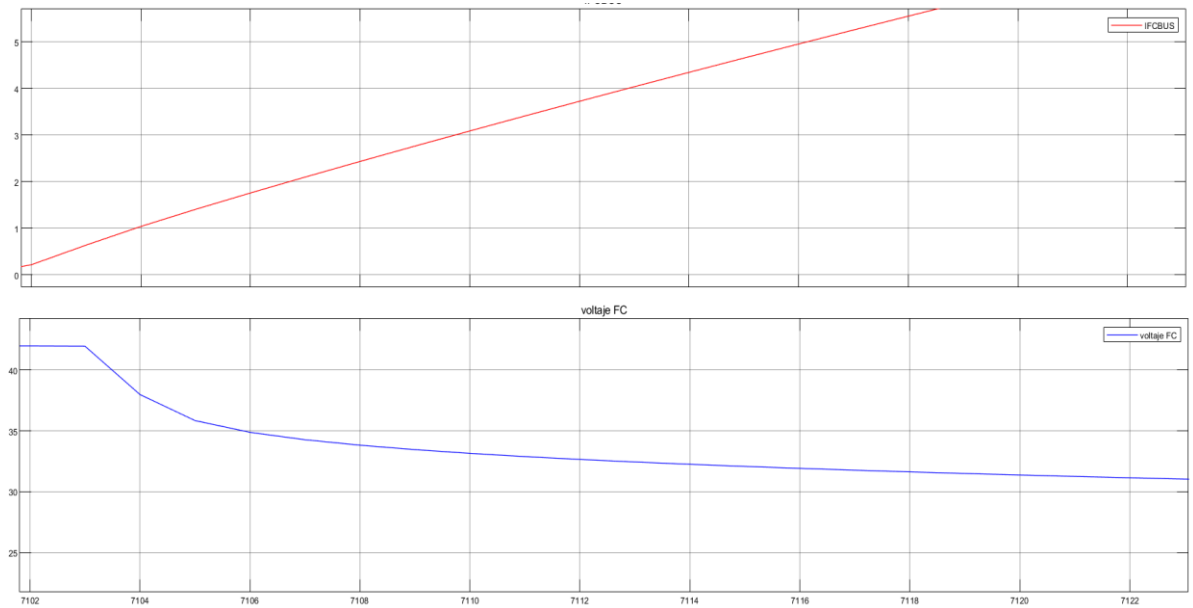


Ilustración 27 . Gráfica de voltaje y corriente de la pila de combustible

En la ilustración 27 se puede observar como en la simulación se cumplen los dos requisitos de protección de la pila de combustible, trabajando el menor tiempo posible en voltaje de circuito abierto y como el corriente sube aproximadamente un 2% por segundo evitando las dinámicas dañinas.

En el caso de la batería hay que evitar que trabaje estando muy cargada o muy descargada, como actuadores de nuestro sistema tenemos 3 salidas binarias, que controlan cuando se enciende el electrolizador, la pila de combustible, o cuando se vuelca la energía sobrante a la red.

Para controlar todo esto tenemos una máquina de estados restringida por unas condiciones sobre los inputs del de gestión de energía.

Las variables de entrada a la máquina de estados son:

- La potencia extraída de la placa fotovoltaica (PPM).
- La potencia demandada por la carga (PLOAD).
- La cantidad de hidrógeno disponible en el depósito (h2disponible).
- El estado de carga del hidrógeno (SOC_BAT).
- El estado en el cual se encuentra la máquina de estados (state).

Y del sistema tenemos 3 salidas que controlan los relés del sistema y la salida del estado

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

en el que se encuentra el sistema, los relés controlan exactamente:

- Rele1, controla el encendido del electrolizador
- Rele2, controla el encendido de la pila de combustible
- Red, controla un actuador que permite verter la sobreproducción de energía a la red eléctrica general.

En la ilustración 28 se pueden observar gráficamente el modelo simulado en Matlab.

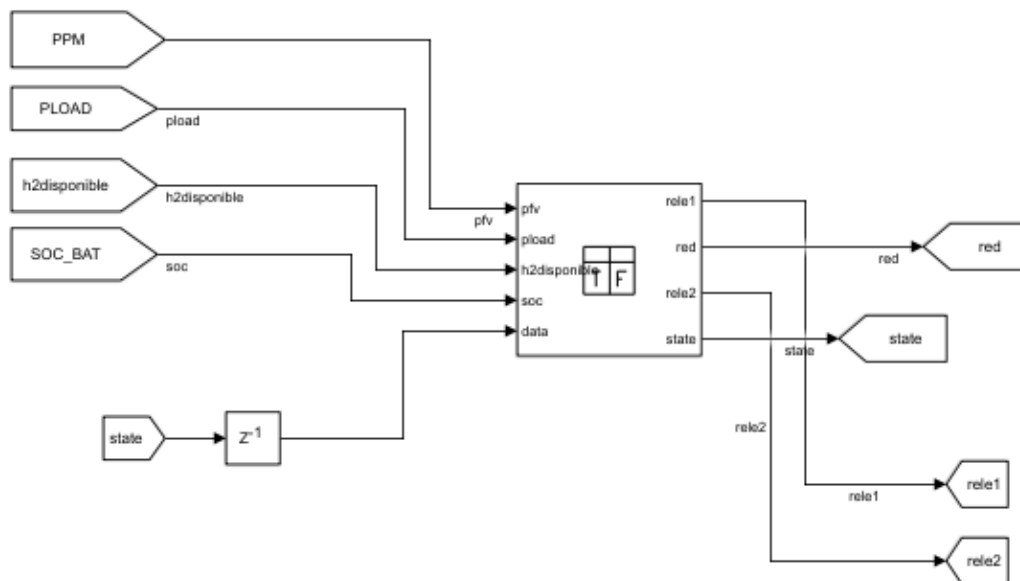


Ilustración 28. Modelo de máquina de estados

A continuación, se van a explicar los estados principales:

- Estado 0: Activa el electrolizador, solo se activa el electrolizador cuando la potencia suministrada por las placas fotovoltaicas es superior al de la carga, el estado de la batería es superior al 80% y el tanque de hidrógeno no está casi lleno, esta configuración restringe la producción de hidrogeno solo cuando el sistema tiene una gran capacidad de energía, porque al tener una capacidad de batería menor de la que el sistema necesitaría en una configuración sin depósito de hidrógeno su estado de carga varia más rápidamente, entonces frente a una conexión del vehículo eléctrico repentina y de carga completa este es el porcentaje de carga de batería que asegura no llegar a niveles de estado de carga tan bajos que degradarían la batería, que es precisamente lo que se busca evitar.
- Estado 1: Cuando el estado de carga de la batería esta entre el 80% y el 50%

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

se entra en un estado de funcionamiento solo con la batería, la explicación de este estado es limitar solo a cuando es necesario el encendido de la pila de combustible para alargar su vida útil lo máximo posible.

- Estado 2(2,3,4): Estos tres estados están en el encendido y el rango de trabajo según el SOC de la batería, el encendido de la pila de combustible esta para reducir el valor de la carga del vehículo eléctrico y recuperar un buen estado de SOC lo antes posible una vez se acabe la carga del vehículo eléctrico, al mismo tiempo para que no haya solapamiento entre cambio de estados se tiene que poner un estado intermedio que una vez se activa no se desactiva hasta que el SOC supere el 60%.
- Estado 3(5): Este estado sirve para mandar la sobreproducción de energía a la red eléctrica, cuando tanto la batería como el hidrógeno almacenado están en niveles máximos respectivamente, y sigue habiendo una producción de energía.

En la ilustración 29 se puede observar el flujograma de la máquina de estados

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

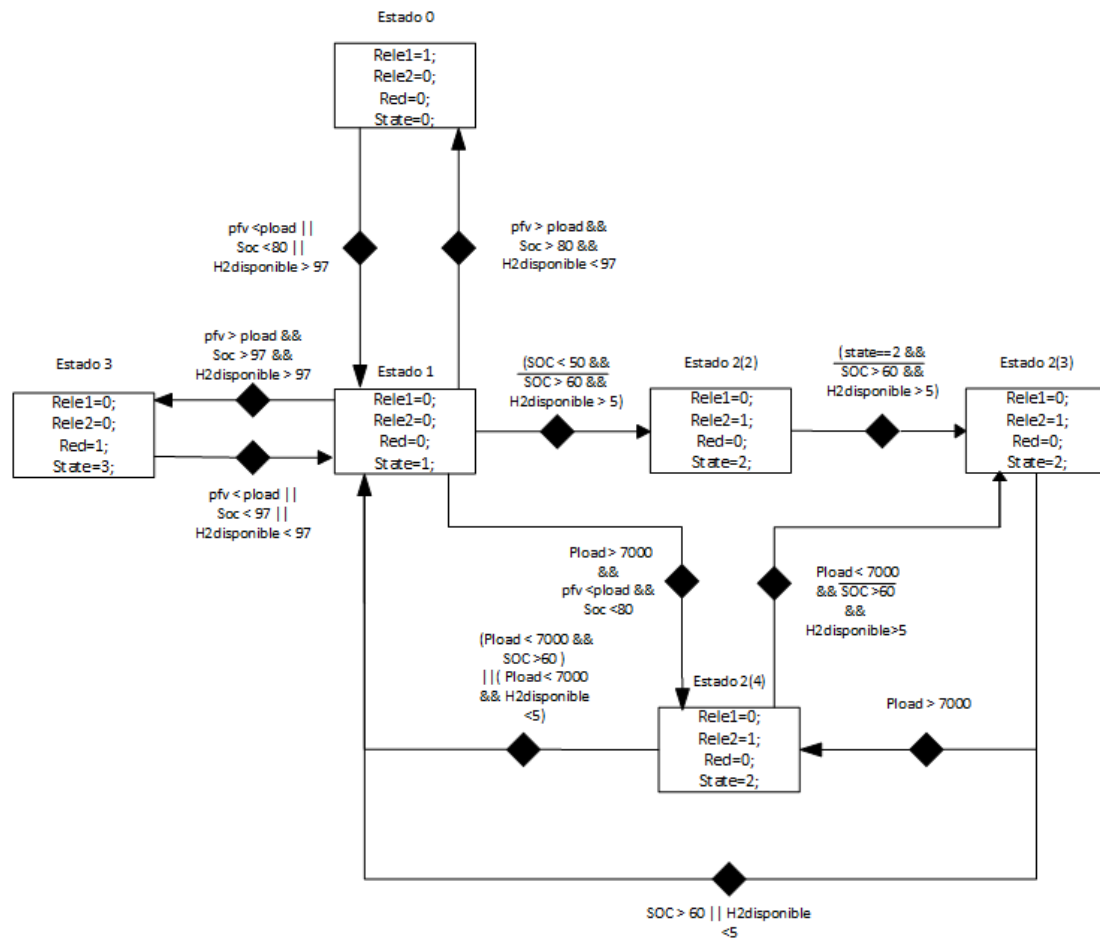


Ilustración 29. Flujo de máquina de estados

5.4 MODELO DEL SISTEMA

El modelo del sistema ha sido simulado utilizando el software Simulink de Matlab [14]. El software proporciona varios modelos de componentes del sistema que se han aprovechado para realizar las simulaciones, tales como la pila de combustible, la batería y las placas fotovoltaicas. En la ilustración 30 se puede observar el montaje del modelo completo.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

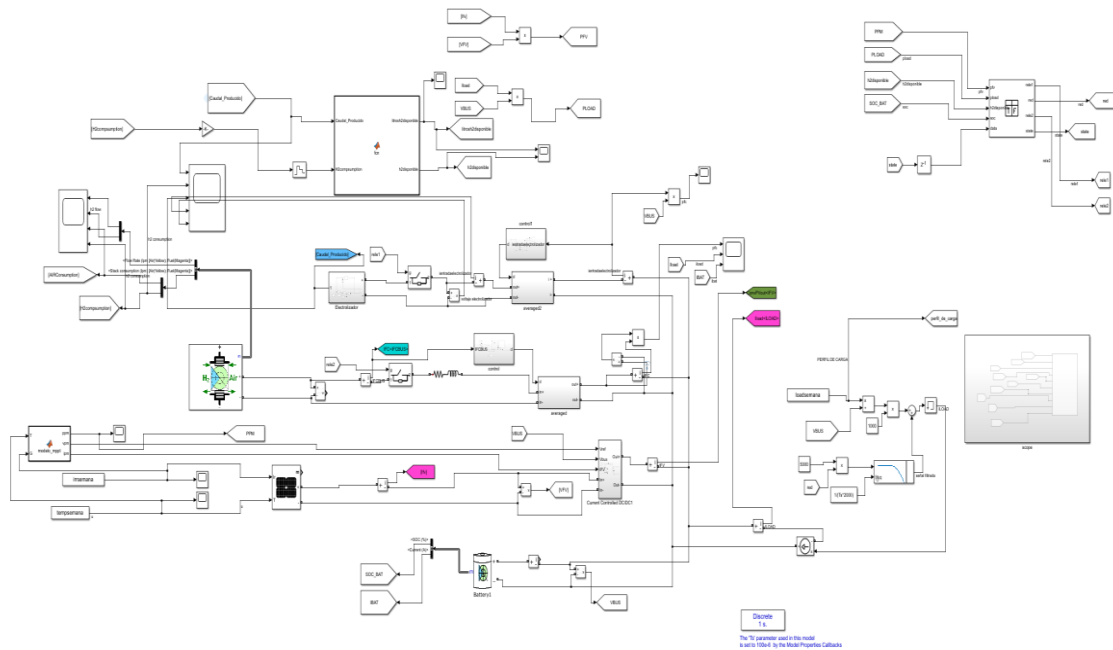


Ilustración 30. Modelo de todo el sistema

5.4.1 PERFILES DE CARGA, IRRADIACIÓN Y TEMPERATURA

Para validar el modelo es necesario tener unos datos reales sobre el consumo de una vivienda, la irradiación y la temperatura a lo largo de un año, los datos de irradiación y temperatura son necesarios para el cálculo del MPPT, ya que no se utiliza el seguidor típico de máxima potencia si no el modelo explicado en el apartado [3.1.1], y los datos han sido proporcionados gracias a [15].

En el caso de la carga de la vivienda los datos se han obtenido de [11], y posteriormente se les ha añadido el consumo del cargador de un vehículo eléctrico por las noches con el puesto de carga del modo 3, se ha tenido en cuenta que el coche se cargaría cada noche, pero no el mismo tiempo ya que el consumo del vehículo no es el mismo cada día, aun así, los tiempos de carga están bastante sobredimensionados para probar la robustez del sistema. En la ilustración 31 podemos observar la carga por la noche y sus diferentes longitudes.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

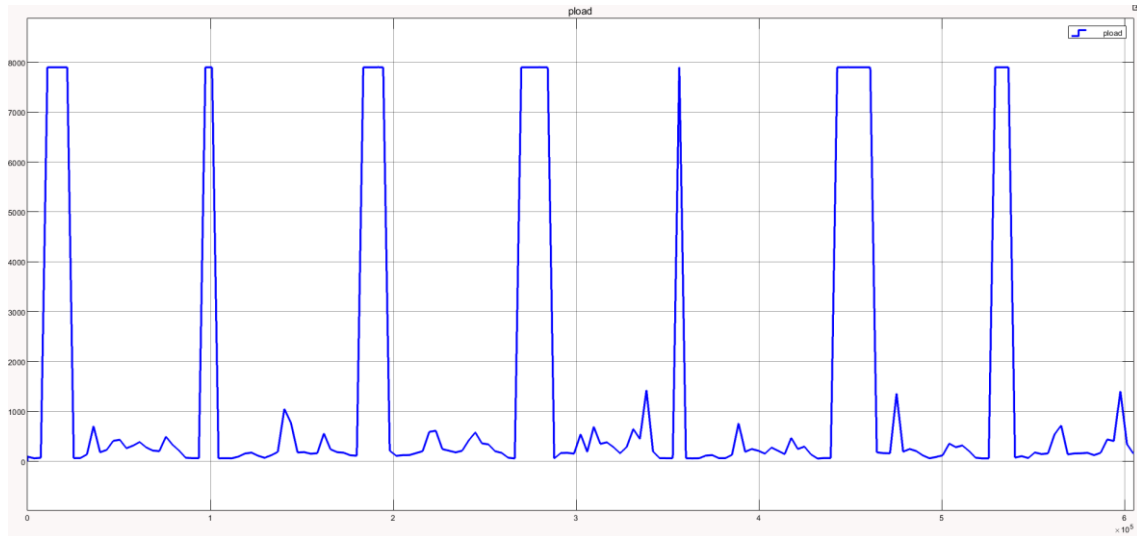


Ilustración 31. Perfil de carga de una semana

5.4.2 CONJUNTO PLACAS FOTOVOLTAICAS-CONVERTIDOR

El conjunto lo forman el modelo de Matlab [18] de las placas fotovoltaicas, con el algoritmo de MPPT de Araujo-Green y el convertidor de continua. Este conjunto funciona de manera autónoma ya que es el suministrador de energía al sistema, y es el seguidor del MPPT el que se encarga de extraer la máxima potencia de las placas según la irradiación y la temperatura. En la ilustración 32 se puede observar cómo está montado el modelo.

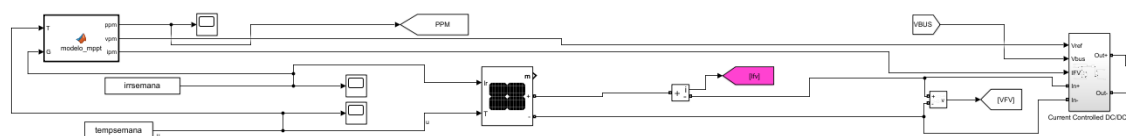


Ilustración 32. Modelo del conjunto en Simulink

5.4.3 CONJUNTO PILA DE COMBUSTIBLE-CONVERTIDOR

El conjunto lo forman el modelo de Matlab [19] y su convertidor, es el Rele2 quien controla la simulación del encendido y el apagado de la pila de combustible, en ese momento la referencia constante que se le da al convertidor para llevar a la pila a potencia nominal se filtra con un rate limiter evitando así picos en la pila de combustible en el momento del encendido, en la ilustración 32 se puede ver cómo está montado el

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
 Bryan Escachx y Javier García

modelo.

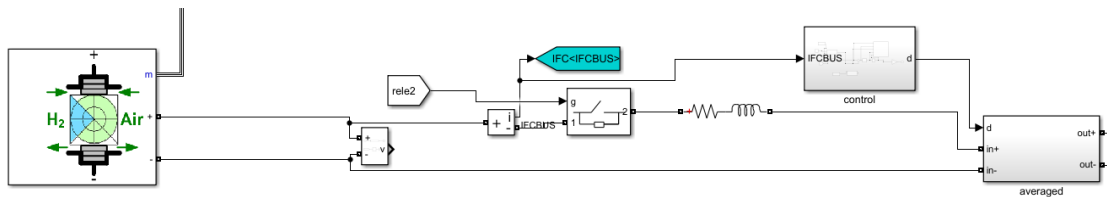


Ilustración 33. Modelo del conjunto en Simulink

5.4.4 CONJUNTO ELECTROLIZADOR-CONVERTIDOR

El conjunto lo forman el modelo de electrolizador explicado en el apartado 4.4 con su convertidor, es el Rele1 quien controla la simulación del encendido y el apagado del electrolizador, al igual que en la pila de combustible tenemos un rate limiter que evita un pico de potencia, en la ilustración 33 se puede ver cómo está montado el modelo.

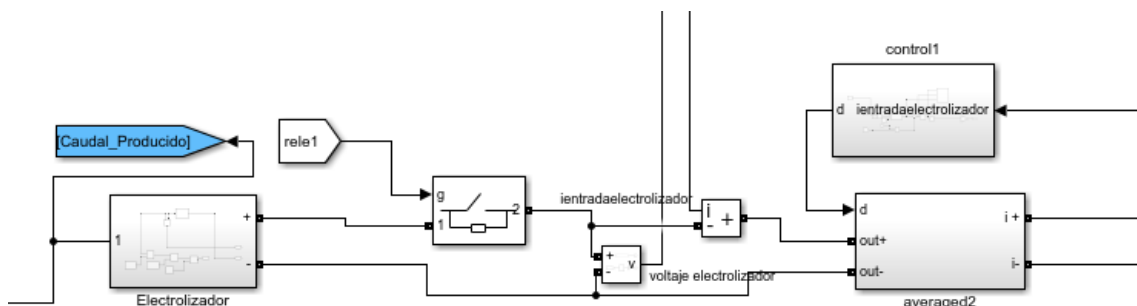


Ilustración 34. Modelo del conjunto Electrolizador-convertidor

5.5 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

A modo de comprobar que se cumple todo lo desarrollado a lo largo de este trabajo, a continuación se van a observar los objetivos cumplidos en la simulación de forma individual validando de esta manera el control propuesto y el dimensionado calculado de los elementos.

- 1- El estado de carga de la batería se mantiene en unos niveles estables que ayudan a prolongar su vida útil, en la ilustración 35 se pueden observar los flujos de corriente de entrada y salida de la batería dependiendo si se está cargando o si está siendo descargada por alguna carga del sistema.

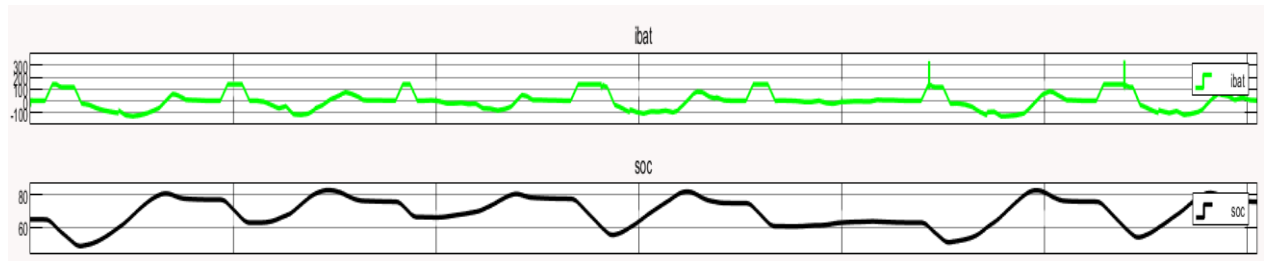


Ilustración 35. Detalle de la relación entre los flujos de corriente y el SOC.

- 2- En la ilustración 36 se pueden observar los flujos de corriente y la aportación de cada subsistema al bus de potencia. También se puede observar como la pila de combustible es una ayuda en las descargas y luego en la recarga de la batería hasta un nivel de SOC seguro.

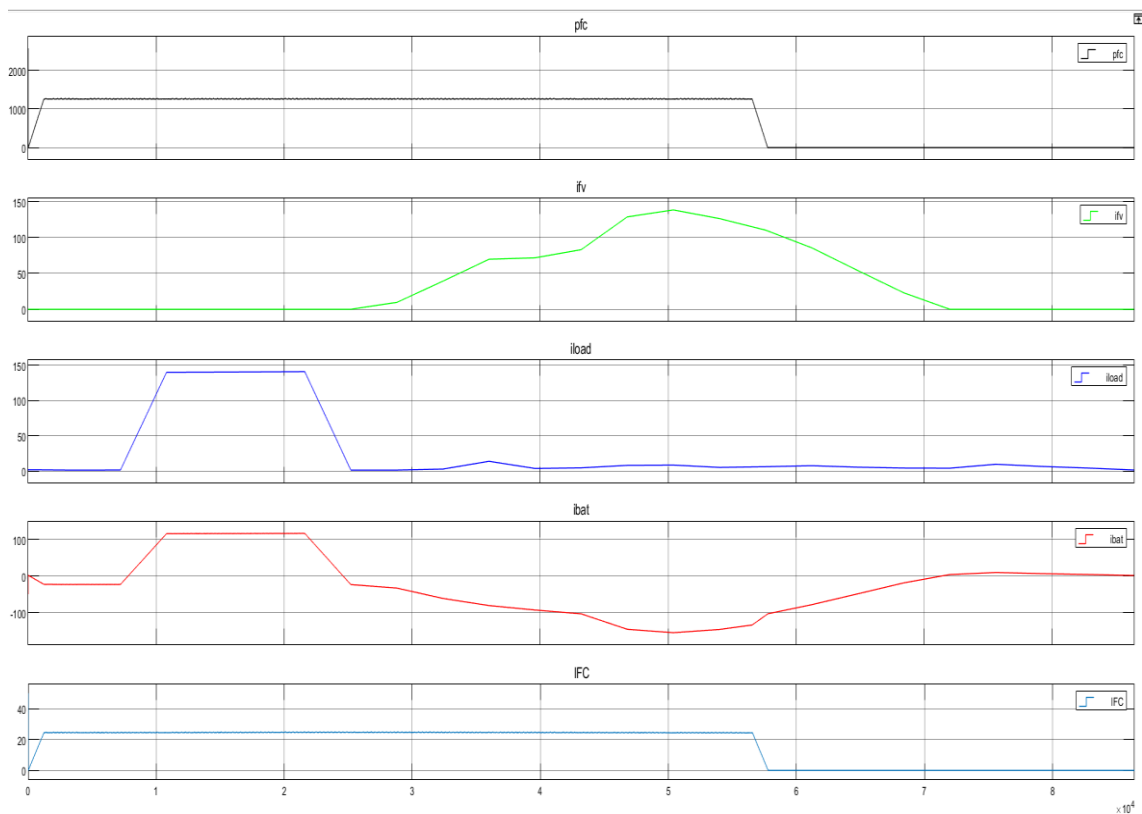


Ilustración 36. Detalle de los flujos de corriente del sistema

- 3- Ni el electrolizador ni la pila de combustible se encienden y se apagan en periodos cortos de tiempo, siendo esta una medida para alargar su vida útil. En la ilustración 37 podemos ver como los periodos de trabajo de los relés son largos y no, se encienden en cortos espacios de tiempo.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

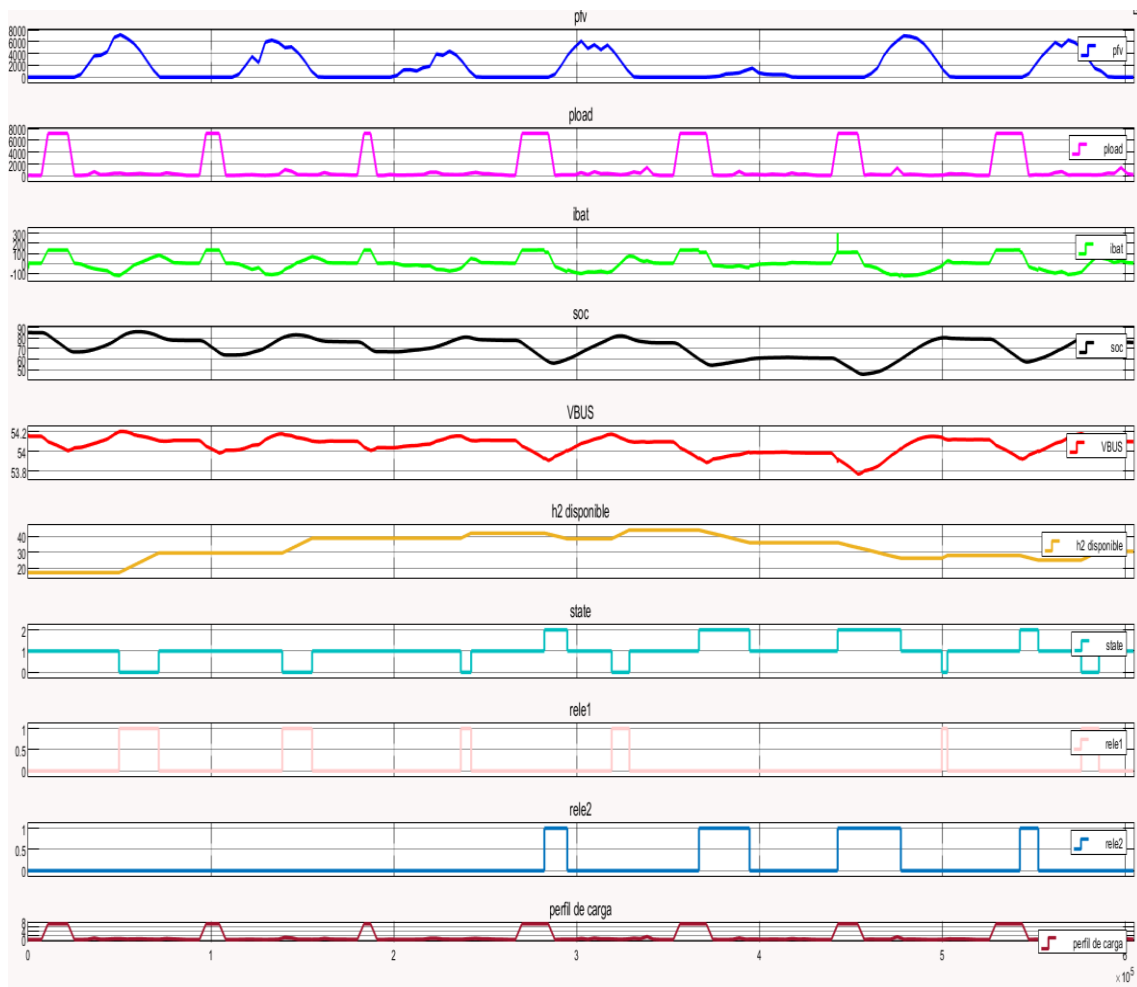


Ilustración 37. Datos obtenidos del sistema durante una semana

- 4- Vemos una mayor independencia de los factores climáticos al tener una fuente de energía independiente de los mismos, característica que permite que la batería del sistema sea más pequeña. Esto se puede ver en la ilustración 38 como la placa fotovoltaica no proporciona ninguna energía y es la pila de combustible que va cargando la batería poco a poco.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

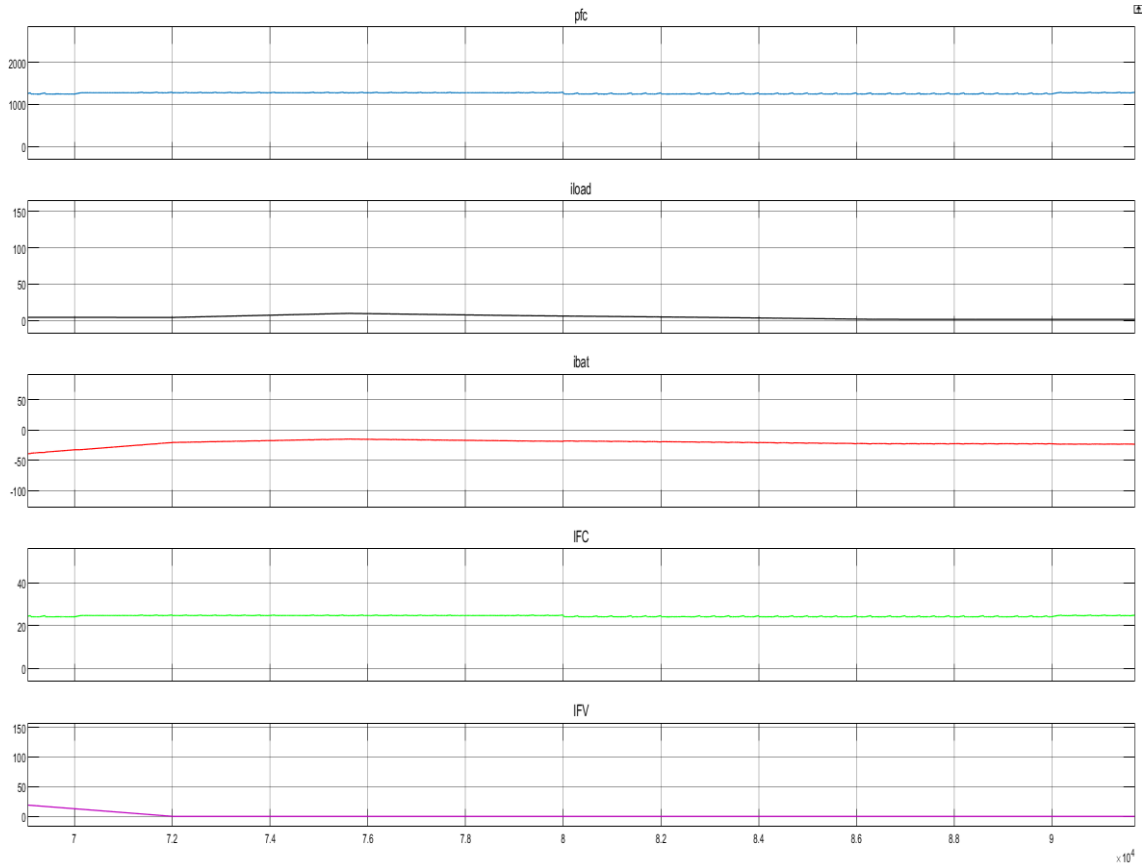


Ilustración 38. Demostración de la independencia climática del sistema

5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Observando el funcionamiento del sistema durante diferentes épocas del año, se puede concluir, que el concepto de estructura, dimensionado y control del mismo es adecuado para los requisitos expuestos en apartado 5.1, aunque observando las simulaciones se ha llegado a la conclusión de que es necesario aumentar la pila de combustible en potencia, ya que la carga del vehículo eléctrico es mucho mayor, y la ayuda de la pila de combustible a la batería es casi insignificante, y en el tramo de recarga de la batería una vez finalizada la carga del coche tarda un tiempo considerable a llevar la carga de la batería a unos estados seguros, por lo tanto le da robustez al sistema frente condiciones en las que no hay irradiación solar durante días, pero se considera que no es suficiente. En el Anexo 1 se pueden observar 4 graficas pertenecientes a diferentes estaciones del año donde se puede observar el funcionamiento del sistema a lo largo de las mismas.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

6. DEMOSTRACIÓN PRÁCTICA

6.1. INTRODUCCIÓN

En los siguientes apartados se hará una breve presentación de la demostración práctica que se ha realizado. El fin de esto es dar un enfoque más visual y sencillo al sistema híbrido que se ha estudiado.

Para el correcto funcionamiento se han utilizado un módulo de relés, estos seguirán las órdenes de la placa programable. Se ha decidido utilizar la placa Arduino ya que es sencilla de utilizar y muy versátil.

6.2. ESQUEMA ELÉCTRICO

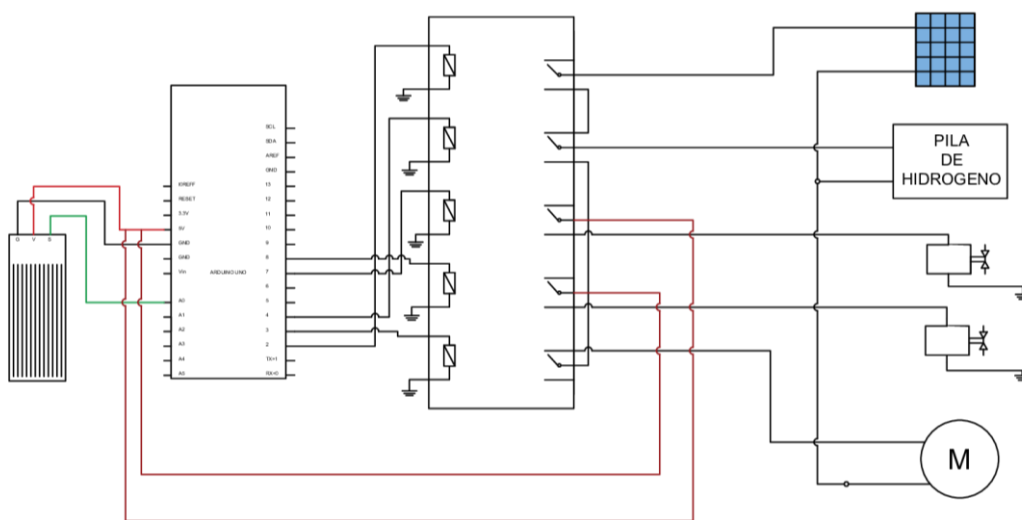


Ilustración 39. Esquema eléctrico

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

6.3. COMPONENTES

A continuación se hace una breve explicación de los componentes implicados en la demostración práctica de nuestro proyecto. En este caso la placa solar, la pila de combustible, las probetas y el motor vienen de un kit educativo [20] que se ha adecuado para poder incluirlo todo en un sistema funcional.

- Arduino uno: La placa Arduino será la que tenga el programa que controlara todo el sistema mediante el microcontrolador. Para la maqueta se ha decidido utilizar la placa Arduino Uno, una de las más comunes. Incorpora 14 pines que sirven como entradas o salidas digitales y 6 entradas analógicas, a la que se conectara el sensor.



Ilustración 40. Arduino Uno

- Sensor: Son dispositivos capaces de detectar señales físicas externas y transformarlas en señales que Arduino es capaz de utilizar. Los sensores se pueden clasificar según el tipo de salida, sensores digitales o analógicos, lo que determinara el tipo de conexión que se debe aplicar. Hay muchos tipos de sensores pero por la aplicación que necesitamos para la demostración, se usa un sensor de nivel de agua.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

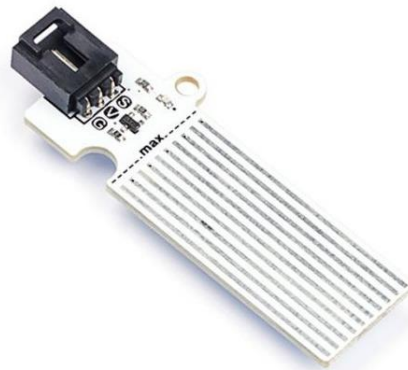


Ilustración 41. Sensor de nivel de agua

Como se puede observar, este tiene tres pines de conexión, el pin G es el que irá conectado a tierra. El pin V es el que alimentara el sensor. Estos sensores se pueden alimentar a 5 V o a 3,3 V por lo que son ideales para trabajar con Arduino. Por último el Pin S es el que se conectara a Arduino como entrada analógica. Estos tienen un funcionamiento sencillo en el cual mediante un cierto volumen de agua, el cual sirve de conductor, nos da una señal analógica con la que poder trabajar.

- Relé: El relé es un tipo de interruptor que accionamos mediante una señal eléctrica. Nos permiten abrir o cerrar el circuito mediante una programación previa.

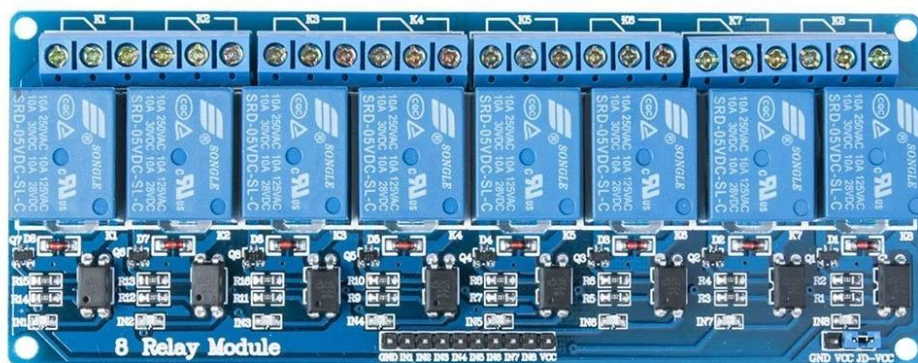


Ilustración 42. Módulo de relés

Debido a la cantidad de dispositivos que necesitamos controlar, se usará un módulo de 8 relés.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

- Módulo solar: La placa fotovoltaica será la encargada de cargar la pila y alimentar el motor en el caso de no poder hacerlo con la pila. Esta funciona mediante la radiación de una lámpara incandescente.



Ilustración 43. Módulo solar

- Pila de hidrogeno: Es uno de los dispositivos principales del sistema. Mediante los relés se podrá elegir cuando alimentar con la pila y cuando con la placa. Se trata de un módulo de pila de combustible reversible, capaz de realizar el proceso de la electrolisis y de proporcionar energía en un mismo dispositivo.



Ilustración 44. Pila de combustible

- Probetas: Estas son tubos con una graduación, es una parte esencial del montaje ya que en ellas se deposita el agua con la que se hace la electrolisis y por tanto la recarga de la pila. En este caso se utilizan dos probetas, una encargada del oxígeno y otra del hidrógeno, la más importante.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García



Ilustración 45. Probetas

- Motor: En este caso el motor simula la carga que debemos alimentar.



Ilustración 46. Motor

- Lámpara incandescente: Este componente simula la función de sol. Las bombillas incandescentes emiten radiación que podemos aprovechar para hacer funcionar la placa fotovoltaica, ya que el modulo puede trabajar con luz artificial aunque su rendimiento no son tan elevados.
- Electroválvulas: Estas son válvulas capaces de controlar el caudal. La función de este dispositivo será la de impedir que los gases que se producen en la pila de combustible se escapen para que haya un mayor rendimiento.



Ilustración 47. Electroválvulas

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

6.4. MONTAJE COMPLETO

En este apartado se muestra el montaje de la maqueta con todos los componentes del sistema tal y como se ha visto en el esquema eléctrico. En los siguientes apartados se explica el funcionamiento que tiene y como se ha programado para que se asemeje lo más posible al proyecto.

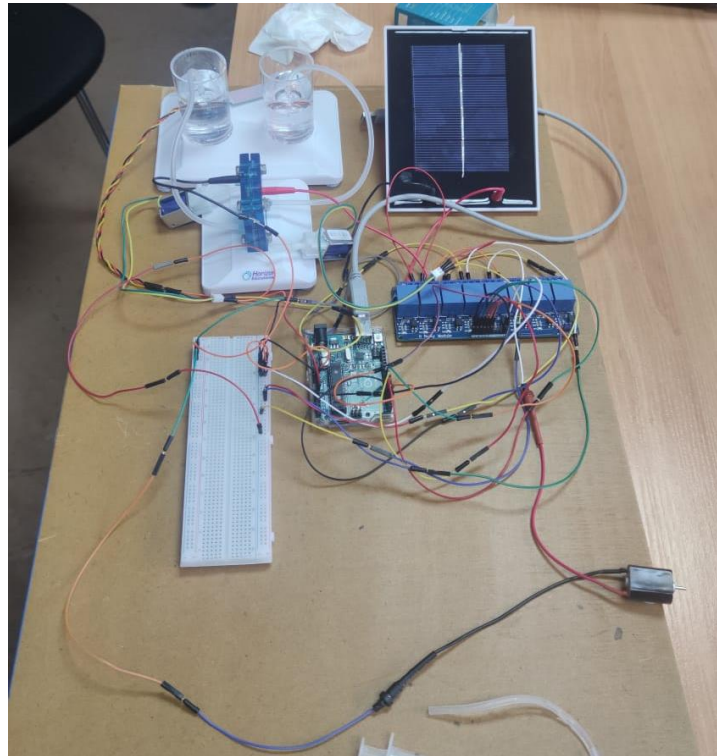


Ilustración 48. Maqueta del sistema

6.5. PROGRAMA

En este apartado se muestra el programa que se ha utilizado para controlar el sistema. Se debe tener en cuenta que los relé utilizados tienen un funcionamiento por lógica negativa, lo que quiere decir que al entregar un 0 en el programa se activa el relé, e imponiendo un 1 este quedara desactivado.

Lo primero que se hace es definir tanto las variables como el pin de conexión con Arduino. En el apartado de void setup() indicamos que tipo de variable es la que se ha definido anteriormente, además de incluir el serial.begin(9600), esta instrucción hará que Arduino comience a comunicar con el ordenador a 9600 bits por segundo.

En void loop() es donde se hace el programa principal y donde se imponen las

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

condiciones. Para este caso se ha decidido utilizar las sentencias while y do while. Estas dos tienen un funcionamiento básico de true o false.

El while funciona siempre y cuando la condición que se le impone sea cierta, en el momento en que se deje de cumplir esta condición será falsa por lo que pasa al siguiente estado.

Una vez se deja de cumplir el bucle de while, se imponen las variables establecidas en el do, esta será así hasta que la condición de while se deje de cumplir, en ese momento se reinicia el bucle.

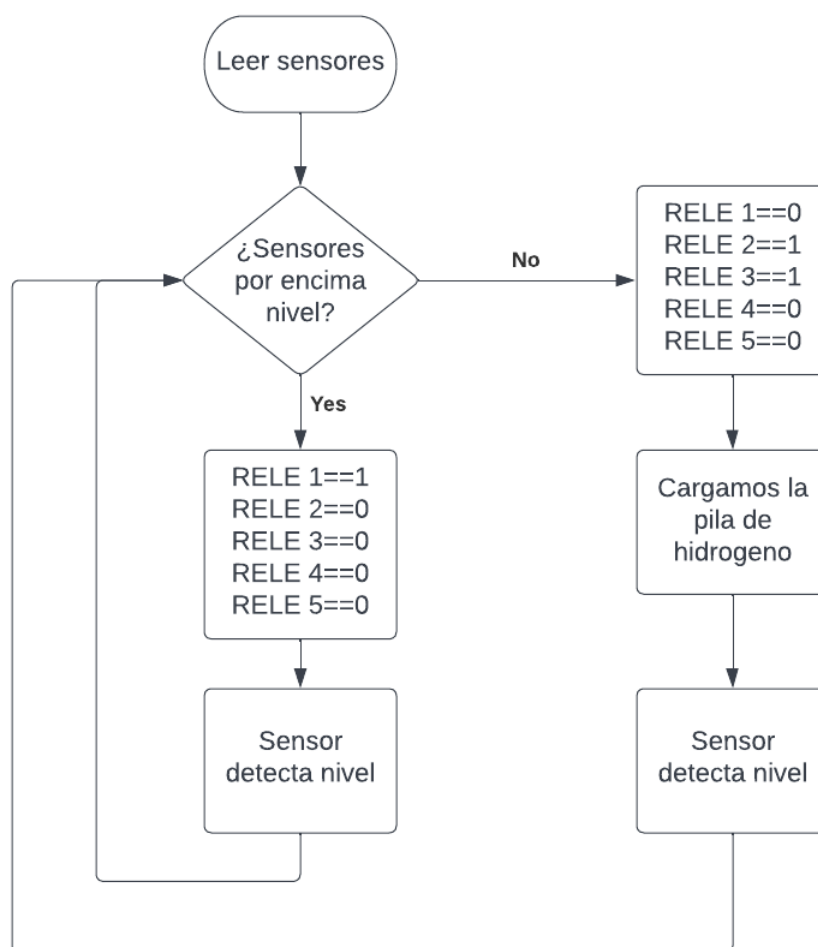


Ilustración 49. Flujograma de funcionamiento

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

```
int SENSOR_1; //Sensor de nivel de agua
int PLACA = 2; //La placa estara conectada a la salida con el pin 2
int PILA = 4; //La pila estara conectada a la salida con el pin 4
int ELEC_1 = 7; //La electrovalvula 1 estara conectada a la salida con el pin 7
int ELEC_2 = 8; //La electrovalvula 2 estara conectada a la salida con el pin 8
int CAR = 3; //La carga estara conectada a la salida con el pin 3

void setup() {
  pinMode(PLACA, OUTPUT); //Definimos el pin conectado a la placa como salida
  pinMode(PILA, OUTPUT); //Definimos el pin conectado a la pila como salida
  pinMode(ELEC_1, OUTPUT); //Definimos el pin conectado a la electrovalvula 1 como salida
  pinMode(ELEC_2, OUTPUT); //Definimos el pin conectado a la electrovalvula 2 como salida
  pinMode(CAR, OUTPUT); //Definimos el pin conectado a la carga como salida
  Serial.begin(9600); //
}

void loop() {
  SENSOR_1=analogRead(A0); //Iniciamos el programa haciendo que el sensor detecte el nivel que tenemos
  Serial.print(SENSOR_1);
  Serial.println();
  delay(1000);

  while ((SENSOR_1<720) and (SENSOR_1>100 )){
    SENSOR_1=analogRead(A0);
    Serial.print(SENSOR_1);
    Serial.println();
    delay(1000);
    digitalWrite(ELEC_1,LOW);
    digitalWrite(ELEC_2,LOW);
    digitalWrite(PLACA,HIGH);
    digitalWrite(CAR, LOW);
    digitalWrite(PILA,LOW);
  }
  do
  {
    SENSOR_1=analogRead(A0);
    Serial.print(SENSOR_1);
    Serial.println();
    delay(1000);
    digitalWrite(ELEC_1,LOW);
    digitalWrite(ELEC_2,LOW);
    digitalWrite(PILA, HIGH);
    digitalWrite(PLACA,LOW);
    digitalWrite(CAR, LOW);
  }while (SENSOR_1 < 300);
}
```

Ilustración 50. Programa

6.6. FUNCIONAMIENTO

Esta demostración tiene un funcionamiento sencillo. Se divide en dos estados en los que actúan unos relés específicos. Estos relés son los que activan o desactivan la placa fotovoltaica, la pila de combustible, las electroválvulas y el motor. El sensor de nivel de agua es el encargado, mediante el programa comentado anteriormente, de guiar el funcionamiento de un estado a otro midiendo el nivel de agua que hay en la probeta. Este nivel nos muestra la cantidad de hidrógeno del que se dispone. El estado 1 es el que se comanda mediante la sentencia while mientras que el estado 2 viene definido por la sentencia do while.

- Estado 1: Activa el funcionamiento de la pila por lo que el motor queda alimentado. En este estado se mantiene la placa desconectada y las electroválvulas en funcionamiento. A medida que pasa el tiempo el nivel va bajando y gracias al sensor y un muestreo por segundo monitorizamos la cantidad que tenemos, una vez llega ha bajado del nivel impuesto (100), el estado interrumpe su funcionamiento.
- Estado 2: El nivel de carga de la pila está por debajo del nivel seleccionado (100) por lo que en este estado se desconecta la pila y el motor, y se activa la placa fotovoltaica, la cual se encarga de realizar la recarga de la pila de combustible. De nuevo el sensor realiza un muestreo que recibe posteriormente Arduino y una vez se detecta que el nivel de agua contenido en las probetas supera el límite impuesto (300), cambia de estado indicando así que se ha obtenido una cantidad de hidrógeno suficiente para reanudar el funcionamiento del motor.

CONCLUSIONES

La electrificación del parque móvil y la descentralización de la producción de energía, presentan retos a corto-medio plazo, donde tanto industrias como gobiernos da la sensación de que no están prestando la suficiente atención pese a los informes[21], produciendo coches con baterías cada vez más grandes con mayor autonomía y no investigando lo suficiente el reciclaje del Litio, o la falta de impulso a alternativas verdes al coche eléctrico como son los vehículos de pila de combustible, lastrados por el aumento de costes frente a los eléctricos.

En el presente trabajo se ha demostrado que en el caso del autoconsumo con un puesto de recarga de un vehículo eléctrico, el tamaño de las baterías aumenta drásticamente, y si extrapolamos esta situación a electrolineras o puestos de recarga públicos que sean capaces de abastecer el fuerte incremento de vehículos eléctricos en las próximas décadas, las suposiciones [22] hechas solo para el vehículo eléctrico se quedan cortas.

Se ha planteado una arquitectura y dimensionamiento de componentes en viviendas de autoconsumo, que ayudaría a reducir el tamaño de las baterías convencionales, a cambio de un incremento en el número de placas de la vivienda causadas por las grandes pérdidas del electrolizador y la pila de combustible, que aumenta el coste notablemente y que sin ayudas gubernamentales ni investigaciones en abaratar los costes asociados a los diversos componentes del sistema será una opción poco viable económicamente para los consumidores.

Se ha diseñado una heurística de control, implementada a diferentes niveles en base a las limitaciones de las tecnologías estudiadas y de los requisitos energéticos que conlleva la carga a la que se conecta el sistema.

Se ha desarrollado un modelo simplificado en Simulink del sistema, donde se ha podido comprobar que los dimensionamientos de los componentes son realistas, y que las estrategias de control tanto individuales como globales son las adecuadas para cumplir los requisitos energéticos de las cargas y prolongar adecuadamente la vida útil de los elementos del sistema.

Por último, se ha realizado el montaje de un pequeño sistema híbrido a modo de ejemplo compuesto por una celda de combustible reversible, una placa fotovoltaica y una carga, todo ello controlado por un micro controlador donde conceptualmente se pueden

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

observar similitudes con el trabajo realizado en las simulaciones, y ver de manera física como interactúan las diferentes tecnologías.

Las tecnologías PEM de hidrogeno son la alternativa verde con mayor peso frente a la baterías convencionales en el almacenamiento de energía en vehículos. En la mayoría de los casos serán sistema híbridos de almacenamiento dado a las limitaciones de esta tecnología, lo cual debería por si solo ser razón más que suficiente para incrementar el número de recursos en este ámbito. En España hay varios proyectos en marcha en tecnologías relacionadas con el hidrogeno, y una hoja de ruta [4] para el 2030 bastante ambiciosa que da a entender la predisposición del gobierno a ofrecer los recursos.

En nuestra opinión, estamos en un momento clave de transición y las decisiones que tomemos ahora como sociedad determinará un no tan lejano futuro, del cual seremos fuertemente responsables. Nuestro deseo, y este trabajo es prueba de ello, es el de dedicarnos al sector de la producción de energía mediante renovables y con ello aportar nuestro granito de arena en la transición hacia una sociedad más sostenible energéticamente.

TRABAJOS FUTUROS

Añadir un control predictivo al modelo que gestione los flujos de energía eficientemente, aproximando la potencia producida por las placas fotovoltaicas a través del modelo Araujo, la previsión de irradiación y la temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada queremos agradecer el esfuerzo y la dedicación que hemos tenido para este proyecto. Ha sido un trabajo al que se le han dedicado muchas horas debido a la falta de conocimientos en cierta materia. En parte esto ha sido un factor por el que no hemos ampliado este trabajo tanto como queríamos.

A pesar de todo lo comentado, es un orgullo haberlo realizado, ya que hemos aprendido muchas cosas muy interesantes para nuestro futuro y para el sector al cual nos queremos dedicar. Además de haber aprendido a utilizar herramientas que sin la realización de este proyecto no hubiésemos usado.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Queríamos agradecer a amigos y familiares, ya que el apoyo ofrecido en momentos de estrés a lo largo de la carrera y la paciencia demostrada ha sido de gran ayuda.

También queremos agradecer a todos los profesores que han influenciado en las distintas asignaturas para realizar el proyecto ya que se han requerido la mayoría de los conocimientos que nos han transmitido.

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

BIBLIOGRAFÍA

[1] El acuerdo de París [Consulta: Marzo del 2022]

Disponible en: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>

[2] The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles

Duncan Kushnir n, Bjorn A. Sandén

Environmental Systems Analysis, Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg 412 96, Sweden [Consulta: Diciembre del 2022]

Disponible en: <https://research.chalmers.se/en/publication/153059>

[3] Historia del hidrogeno, Energía Renovable, Dr. Omar Solorza [Consulta: Octubre del 2021]

Disponible en: <http://www.relaq.mx/RLQ/tutoriales/hidrogeno/hidrohistoria.html>

[4] Hoja de ruta del hidrógeno: una apuesta por el hidrógeno renovable. [Consulta: Noviembre 2021]

Disponible en: https://energia.gob.es/es-es/Novedades/Documents/hoja_de_ruta_del_hidrogeno.pdf

[5] Informe actualizado con los datos de las ventas de coches eléctricos. [Consulta: Marzo 2022]

Disponible en: <https://movilidadelectrica.com/venta-coches-electricos-febrero/>

[6] Photovoltaic Geographical Information System. [Consulta: Mayo 2022]

Disponible en: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/

[7] Carrasco Morrilla, Daniel. Estudio para realizar una instalación solar fotovoltaica de autoconsumo en la EPSEVG. Universitat Politècnica de Catalunya, 2020. Página 49 de 96. [Consulta: Mayo 2022]

Disponible en:

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/181584/1.%20Memoria%20-%20Estudio%20para%20realizar%20una%20instalaci%C3%B3n%20solar%20fotovoltaic>

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

[aica%20de%20autoconsumo%20en%20la%20EPSEVG%20-%20Daniel%20Carrasco%20Morillas.pdf](#)

[8] Tabla de potenciales de reducción. [Consulta: Noviembre del 2021]

Disponible en: <https://navarrof.orgfree.com/Docencia/Quimica/Auxiliares/potred.htm>

[9] DELGADO, S. Estudio de viabilidad acerca del uso de un sistema de almacenamiento basado en hidrogeno como alternativa al almacenamiento en batería de una instalación fotovoltaica aislada para abastecer a una vivienda. Universidad de Sevilla, 2018 [Consulta: Noviembre de 2021]

Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/85103/TFM-1301-DELGADO.pdf;sequence=1>

[10] Conceptos básicos sobre baterías solares. [Consulta: Enero 2022]

Disponible en: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/equipos-fotovoltaicos-baterias-solares-parte-iii/#2-Profundidad-de-descarga>

[11] Datadis/datos. La plataforma de datos de consumo eléctrico. [Consulta: Abril 2022]

Disponible en: <https://datadis.es/data>

[12] Cálculo Horas Pico Solar. [Consulta: Febrero 2022]

Disponible en: <https://fusionenergiasolar.es/contenido/14-calculo-hps>

[13] ENF solar. Página de datos del modulo solar. [Consulta: Abril 2022]

Disponible en: <https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/44069>

[14] Simulink Version 10.3 (R2021a) 14-Nov-2020 [Consulta: Octubre del 2021]

Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

[15] Ramos, G. A., de Pérez-Cabrero, T. M., Domènech-Mestres, C., & Costa-Castelló, R. (2021). Industrial Robots Fuel Cell Based Hybrid Power-Trains: A Comparison between Different Configurations. Electronics 2021, Vol. 10, Page 1431, 10(12), 1431.[Consulta: Marzo de 2022]

Disponible en: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/261200/1/electronics-10-01431-v3.pdf>

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

[16] Ana Barbón Núñez UNIVERSIDAD DE OVIEDO Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón Página 2 de 118 Índice. (n.d.).[Consulta: Marzo 2022]

Disponible en:
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/48646/TFMAAnaBarbonRUO.pdf?sequence=3>

[17] L. Valverde, C. Bordons and F. Rosa, "Integration of Fuel Cell Technologies in Renewable-Energy-Based Microgrids Optimizing Operational Costs and Durability," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 1, pp. 167-177, Jan. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2465355.[Consulta: Mayo de 2022]

Disponible en:
https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/116529/Integration_of_Fuel_Cell_technologies_in.pdf

[18] Implement PV array modules-Simulink-Mathworks España [Consulta: Octubre de 2021]

Disponible en: <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pvarray.html>

[19] Implement generic hydrogen fuel cell stack model-Simulink-Mathworks España [Consulta: Octubre de 2021]

Disponible en:
<https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/fuelcellstack.html>

[20] Solar hydrogen science kit [Consulta: Mayo 2022]

Disponible en: <https://www.horizoneducational.com/solar-hydrogen-science-kit/p1224>

[21] B. Jones, F. Acuña y V. Rodríguez, "Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina", Documentos de Proyectos (LC/TS.2021/89), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2021. [Consulta: Octubre de 2021]

Disponible en:
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47136/1/S2100341_es.pdf

[22] The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles
Duncan Kushnir n, Bjorn A. Sandén

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

Environmental Systems Analysis, Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Göteborg 412 96, Sweden [Consulta: Octubre de 2021]

Disponible en: <https://research.chalmers.se/en/publication/153059>

[23] CHOQUE YUPANQUI, SANTOS. Estudio técnico-económico de un sistema de paneles fotovoltaicos e hidrógeno. Universidad Politécnica de Madrid, 2017[Consulta: Diciembre de 2021]

Disponible en: https://oa.upm.es/47398/1/TFG_SANTOS_CHOQUE_YUPANQUI.pdf

[24] CAMPOS RAMS, PABLO. Fuel cells, hydrogen production and implementation in the public transport services. Universitat Politècnica de Valencia, 2019 [Consulta: Enero de 2022]

Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/161439/Campos%20-%20Pilas%20de%20combustible%20de%20hidr%C3%B3geno%20producci%C3%B3n%20e%20implementaci%C3%B3n%20en%20el%20transporte%20p%C3%ABlico.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

[25] Componentes fotovoltaicos para la instalación. [Consulta: Enero 2022]

Disponible en: Web: <https://www.hogarsense.es/placas-solares/componentes-instalacion-fotovoltaica>

[26] Erickson, R. W. (Robert W. (2020). Fundamentals of power electronics (D. Maksimović, Ed.; 3rd ed.) [Book]. Springer.[Consulta:Noviembre de 2021]

[27] Carignano, M. G., Costa-Castelló, R., Roda, V., Nigro, N. M., Junco, S., & Feroldi, D. (2017). Energy management strategy for fuel cell-supercapacitor hybrid vehicles based on prediction of energy demand. Journal of Power Sources, 360, 419–433.[Consulta: Marzo de 2022]

Disponible en: <https://www.iri.upc.edu/publications/show/1899>

[28] Mauricio Primucci.Diseño y validación de estrategias de diagnosis para pilas de combustible tipo PEM [Consulta:Marzo de 2022]

Disponible en: <http://www.iri.upc.edu/files/academic/thesis/4-Thesis-project.pdf>

ANEXO 1

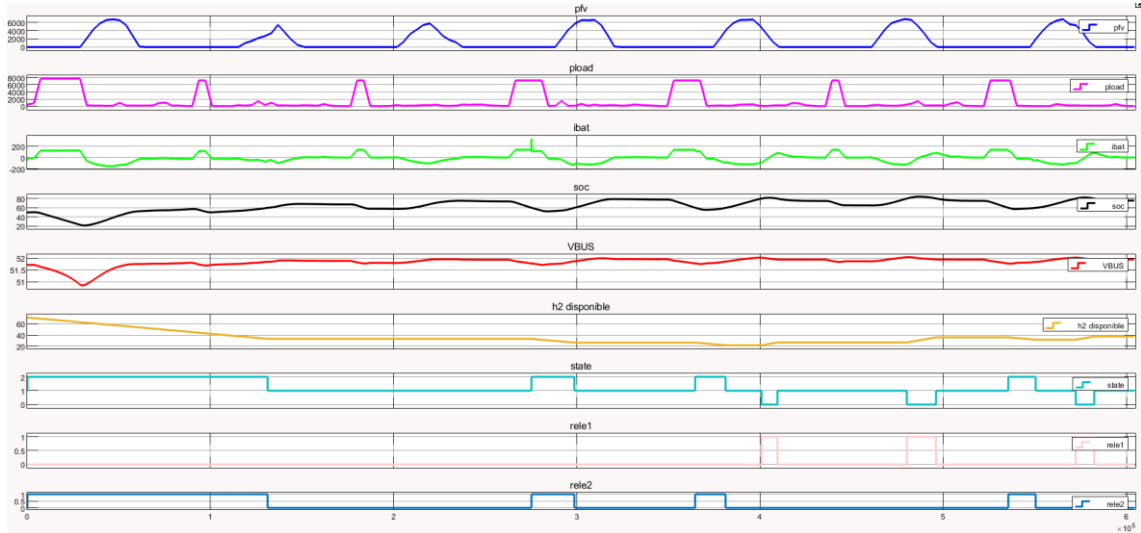


Ilustración 51. Funcionamiento durante una semana de Enero

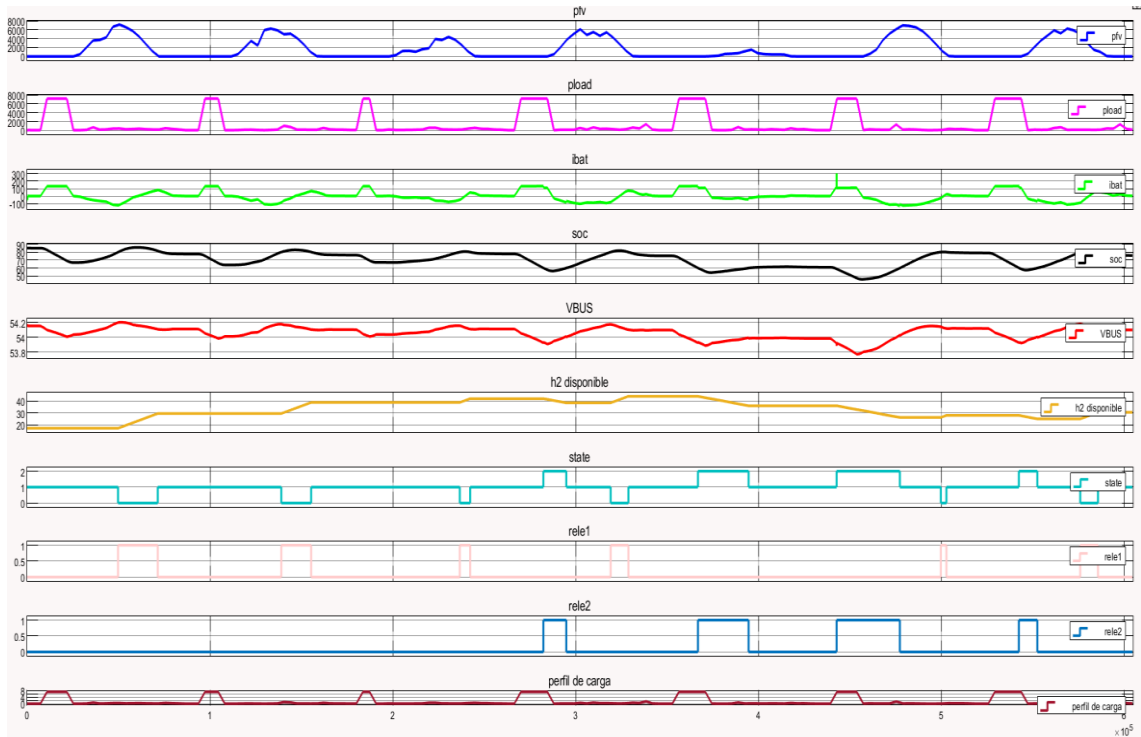


Ilustración 52. Funcionamiento durante una semana de Abril

Diseño de un sistema híbrido autónomo para generación de electricidad e hidrógeno verde con la finalidad de suministrar energía eléctrica a una vivienda
Bryan Escachx y Javier García

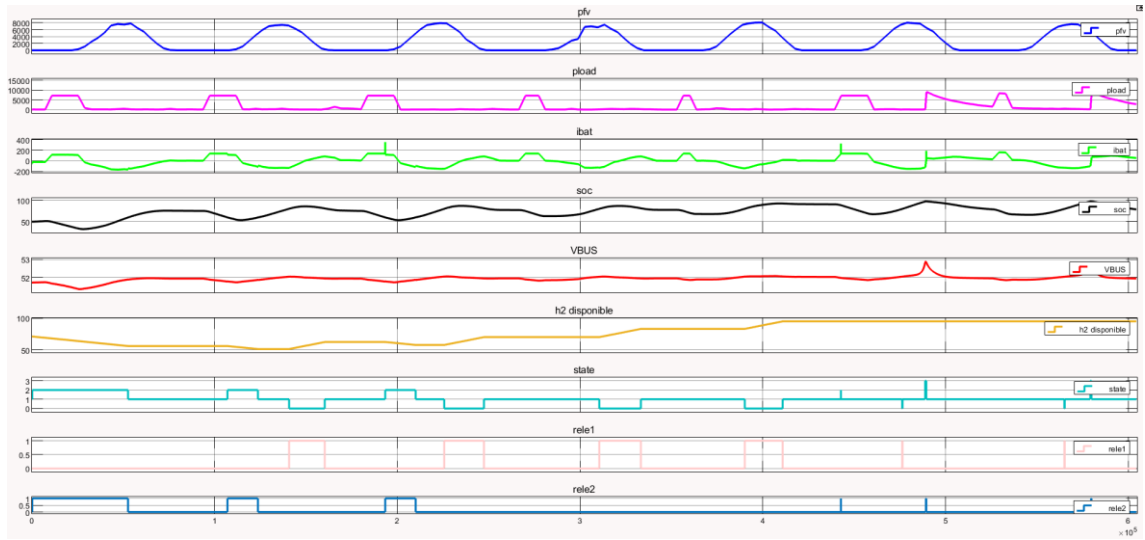


Ilustración 53. Funcionamiento durante una semana de Julio

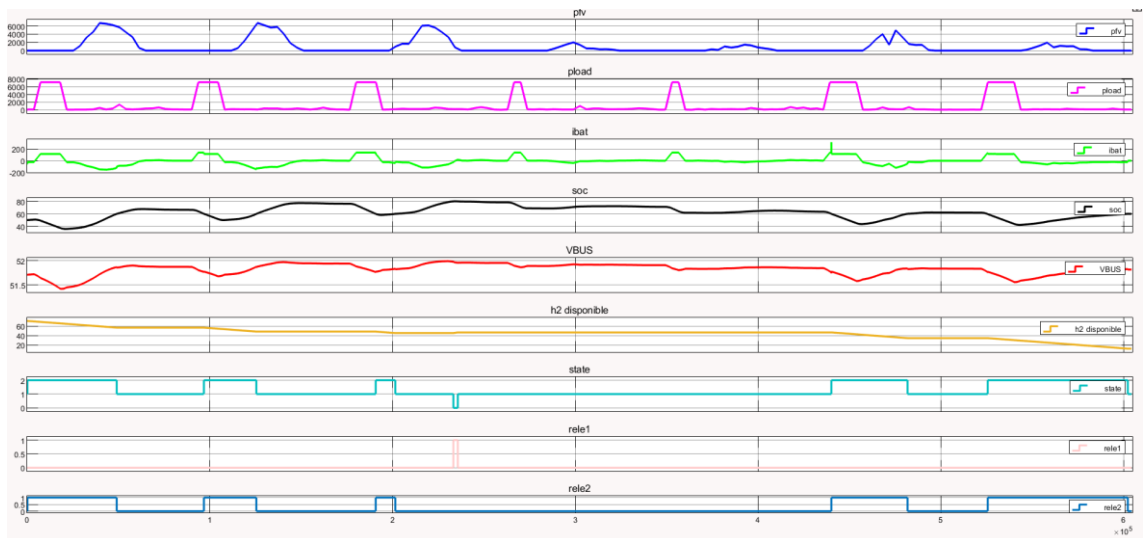


Ilustración 54. Funcionamiento durante una semana de Noviembre