



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE
INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

MODELADO DE UN SISTEMA HÍBRIDO
CON ENERGÍAS RENOVABLES PARA
PROPULSIÓN ELÉCTRICA EN
EMBARCACIONES. APLICACIÓN A UNA
PLATAFORMA FLOTANTE ROBOTIZADA

Autor: José Manuel Jiménez Ariza

Director: Dr. Salvador Ángel Gómez Lopera

Octubre, 2016





Con especial agradecimiento a...

mi familia, mi tutor y mis amigos en esta etapa de mi vida.



MOTIVACIÓN

Este proyecto nace como consecuencia de mi paulatino interés en el ámbito de las energías renovables, en un mundo donde los combustibles fósiles están tocando fondo y, se requiere la inversión económica para el desarrollo en las energías limpias, de fuente virtualmente inagotable en nuestro ecosistema.

Tras meses de divagación, y de muy interesantes propuestas por diversos profesores, finalmente opté por el presente proyecto final de grado, el cual está amparado principalmente por la energía solar fotovoltaica. No obstante la energía solar no es la única renovable puesta en juego en el mismo, sino que también tienen cabida la hidráulica así como la energía de hidrógeno, convirtiendo al mismo en un proyecto innovador en el ámbito naval de la ingeniería, así como en el puente perfecto para estudios futuros en el ámbito de las energías renovables.

Por último, uno de los motivos definitivos a la realización del mismo es la gran capacidad de ampliación que el sector solar tiene en el mundo y en España, donde en el futuro próximo, cuando se piense algo más en el planeta en el que vivimos y en el individuo, pienso que se apostará más por este tipo de energía, generando así mayor crecimiento en todos los aspectos del sector en términos de potencia, solamente equiparable a lo que la eólica pueda suponer.





ÍNDICE

1	Planificación del proyecto: gráfico Gantt.....	11
2	Objetivos del proyecto	13
3	Introducción: Estado actual de la técnica.....	15
3.1	Historia y evolución de las células solares	21
3.2	Historia de las células solares sensibilizadas con colorante (DSSC).....	23
3.3	Principio de operación de las células sensibilizadas con colorante	25
3.4	Mejoras en los diseños de células DSSC	27
3.5	Novedades en las propiedades de nuevos materiales.....	28
3.6	Aplicaciones en el ámbito naval	30
3.6.1	Buques	30
3.6.2	Plataformas flotantes.....	34
3.6.3	Sensores marinos	37
3.6.4	Sistemas de señalización marítima	41
4	Modelado de un sistema híbrido con energías renovables para embarcaciones	48
4.1	Modelo híbrido de propulsión eléctrica	48
4.1.1	Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
4.2	Elementos del modelo.....	49
4.2.1	Panel solar fotovoltaico	49
4.2.2	Hidrogenerador	49
4.2.3	Electrolizador	50
4.2.4	Pila de combustible de hidrógeno	50
4.2.5	Batería.....	53
5	Aplicación del modelo a una plataforma flotante robotizada	55
5.1	Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
5.2	Elementos del sistema.....	56
5.2.1	Módulo fotovoltaico	56
5.2.2	Hidrogenerador	66
5.2.3	Batería principal y batería de reserva.....	68
5.2.4	Pila de combustible	72
5.2.5	Sistema de almacenamiento del hidrógeno.....	75
5.2.6	Propulsor eléctrico	79



5.2.7	Electrolizador (en tierra)	80
5.3	Diagrama conceptual	81
6	Simulación computacional del modelo	83
6.1	Diseño 3D con el Software Rhinoceros 5.0	83
6.2	Aproximación de la resistencia al avance con el Software Delftship	86
7	Resultados experimentales y discusión	91
8	Conclusiones	93
9	Bibliografía.....	95



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Fachada fotovoltaica en el edificio <i>MNACTEC (Tarrasa, España)</i>	15
Fig. 2. Cronología de las eficiencias de conversión logradas en células solares fotovoltaicas (fuente: National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos) 23	
Fig. 3. Barco SOLEMAR	30
Fig. 4. Buque Auriga Leader	31
Fig. 5. Sun21.....	32
Fig. 6. Turanor.....	33
Fig. 7. Recreación de una de las plataformas frente a la Ópera de Sídney.....	35
Fig. 8. Planta solar flotante de Japón.....	36
Fig. 9. Dispositivo sensor submarino	38
Fig. 10. Boya inteligente	39
Fig. 11. Boceto de boya inteligente	39
Fig. 12. Boya con luces alimentadas con energía solar estacionada en puerto	42
Fig. 13. Diseño conceptual de Tritón	43
Fig. 14. El nuevo faro de Valencia	45
Fig. 15. Producción y uso de hidrógeno con una celda combustible.....	50
Fig. 16 y 17. Funcionamiento básico de una celda de combustible de hidrógeno	52
Fig. 18. Esquema de una celda elemental.....	52
Fig. 19. Esquema de captación de las tres clases de radiación solar	57
Fig. 20. Distribución de horas solares a lo largo del año	61
Fig. 21. Irradiancia y Potencia durante el año	61
Fig. 22. Potencia como función lineal de la Irradiancia	62
Fig. 23. Irradiancia y Potencia en el mes de Enero	63
Fig. 24. Irradiancia y Potencia en el mes de Junio	63
Fig. 25. Diversos parámetros a lo largo de las horas solares de un día arbitrario del mes de Enero.....	64
Fig. 26. Diversos parámetros a lo largo de las horas solares de un día arbitrario del mes de Junio.....	64
Fig. 27. Diagrama eléctrico base de los paneles solares, regulador y batería	65
Fig. 28. Curvas potencia – velocidad de modelos de hidrogenadores [41].....	66
Fig. 29. Hidrogenador escogido para la plataforma, con detalle de la hélice [41].....	67
Fig. 30. Batería de la casa <i>TAB</i> [42].....	68
Fig. 31. Potencia en función de la hora del día en un día arbitrario del mes de Enero ..	69



Fig. 32. Potencia en función de la hora del día en un día arbitrario del mes de Junio ...	70
Fig. 33. Regulador solar ChargeMaster SCM-60 MPPT-MB de MASTERVOLT [43]	70
Tabla 5 y Fig. 34. Especificaciones de la pila de combustible (1).	73
Fig. 35. Especificaciones de la botella	76
Fig. 36. Propulsor escogido en 3D	79
Fig. 37. Diagrama de flujos del sistema	81
Fig. 38. Diseño del dispositivo. Vista superior.	84
Fig. 39. Diseño del dispositivo. Vista desde popa.....	84
Fig. 40. Diseño del dispositivo. Vista desde babor.	84
Fig. 41. Diseño del dispositivo. Vista en perspectiva 1.....	85
Fig. 42. Diseño del dispositivo. Vista en perspectiva 2.....	85
Fig. 43. Sección del casco con los elementos montados	86
Fig. 44. Sección vista transversal acotada en metros	86
Fig. 45. Análisis de curvatura del aka	87
Fig. 46. Curva Resistencia – Velocidad del aka.....	87
Fig. 47. Análisis de curvatura del ama	88
Fig. 48. Curva Resistencia – Velocidad del ama.....	88



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Planificación inicial del proyecto	11
Tabla 2. Datos y valores promedio de la irradiancia y las horas de sol.....	58
Tabla 3. Modelo de célula VS-60P PV con sus especificaciones, <i>VISEL PLACAS S.L.</i> [39]	59
Tabla 4. Valores de la potencia obtenida.....	60
Tabla 5 y Fig. 32. Especificaciones de la pila de combustible (1).	73
Tabla 6. Especificaciones de la pila de combustible (2).....	74
Tabla 7. Catálogo escogido de propulsores eléctricos.....	79



CAPÍTULO 1

PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO: GRÁFICO GANTT



1 Planificación del proyecto: gráfico Gantt

DIAGRAMA GANTT									
		Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
#	Fases del Proyecto								
1	Planificación del Proyecto: Gráfico Gantt		■	■					
2	Objetivos del Proyecto				■	■			
3	Introducción: Estado Actual de la Técnica	■	■						
4	Modelado de un Sistema Híbrido con Energías Renovables Para Propulsión Eléctrica en Embarcaciones		■	■	■	■			
5	Aplicación del Modelo a una Plataforma Flotante Robotizada				■	■	■		
6	Simulación Computacional del Modelo			■	■	■	■		
7	Resultados Experimentales y Discusión						■	■	
8	Conclusiones							■	■
9	Bibliografía	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabla 1. Planificación inicial del proyecto



CAPÍTULO 2

OBJETIVOS DEL PROYECTO



2 Objetivos del proyecto

El presente trabajo tiene como objeto proponer un modelo híbrido con energías renovables, siendo la de mayor exponente en el mismo la fotovoltaica, para propulsión eléctrica en embarcaciones. El modelo se hace llamar híbrido, estrictamente hablando, debido a que la energía principal es almacenada en una batería mientras que otra parte de ella se encontrará almacenada inicialmente en forma de hidrógeno.

El caso se ejemplificará con el modelado de una plataforma flotante robotizada según el sistema propuesto. Dicha plataforma se encargará de realizar labores de soporte o inspección navales.

Una de sus aplicaciones principales pudiera ser operar un robot subacuático por control remoto capaz de realizar tareas propias de inspección naval, esto es, un ROV. Dada la posibilidad de integrar a bordo diferente instrumentación, las aplicaciones de un ROV son muy variadas y útiles en el mundo naval, como por ejemplo:

- Inspección de emisarios, gaseoductos, casco de barco, muelles, presas, fondeos, aulas de acuicultura...
- Estudios de impacto ambiental: censo de Posidonia, artes de arrastre, emisarios, redes fantasmas, arrecifes artificiales...
- Misiones de rescate y reconocimiento de naufragios.
- Estudios científicos con toma de muestras.
- Documentación gráfica en general.
- Salvamento y recuperación de objetos.
- Búsqueda de tesoros.
- Estudio de fauna y flora submarina.

No obstante, y aunque se haya detallado un poco más a la primera, existen otras aplicaciones para la plataforma como, por ejemplo, la posibilidad de servir de “práctico” o “guía” para nuevos buques que pretendan entrar a puerto, todo lo dicho hasta ahora, como ya se intuye, con el objetivo de cero emisiones a la atmósfera.



CAPÍTULO 3

INTRODUCCIÓN: ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA



3 Introducción: Estado actual de la técnica

La radiación solar incidente sobre la superficie terrestre, desde el punto de vista energético, alcanza valores mayores a lo consumido por los humanos en todo un año.

De ahí que, en la búsqueda de soluciones para la sustitución de las fuentes convencionales de energía, contaminantes y no renovables, la energía solar esté jugando un papel de creciente importancia, puesto que es la única que, a largo plazo, podría satisfacer la creciente demanda energética existente en el planeta.

La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol [1].

La radiación solar que alcanza la Tierra ha sido aprovechada por el ser humano desde la Antigüedad, mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando con el tiempo desde su concepción.

En España, es una de las fuentes de energía renovables más asentadas.

Es precisamente ese recurso tan admirado y buscado por los turistas que visitan el país, el sol, que España es uno de los puntos donde mejor aprovechamiento tiene la energía solar. Además, también se constituye como uno de los países de Europa que tiene mayor consumo energético, y en consecuencia, mayor dependencia energética exterior. Es gracias a esta necesidad que se ha erigido como uno de los principales países que lideran la investigación en el campo de las energías renovables y, principalmente, de la energía solar [2].



Fig. 1. Fachada fotovoltaica en el edificio MNACTEC (Tarrasa, España)



En los últimos años, avalados por las reformas positivas en la legislación en materia energética, en España se han construido las mayores centrales fotovoltaicas del mundo.

La primera planta de energía solar inaugurada en España, fue en el Sur, en Andalucía, muy cerca de Sevilla, en el año 2007. A ésta le seguirían nuevas plantas que entraron en funcionamiento en años posteriores, 2010 y 2011. Esto multiplicó la producción de energía solar en España donde en el 2013 ocupó el puesto número 3 del ranking de productores de energía solar de la Unión Europea, por detrás de Alemania e Italia.

La energía solar fotovoltaica tiene un casi infinito radio de aplicación, llegando a haberse utilizado células solares para la captación de energía no sólo en edificios, plataformas sobre mar o tierra, sino también en objetos tan cotidianos o personales como pueden ser automóviles alimentados plenamente por energía solar, aviones, barcos, ordenadores portátiles, o incluso bolsos solares que tienen una labor tan práctica como permitir al usuario cargar los aparatos electrónicos portátiles que lleve encima en un par de horas.

Si hacemos una clasificación general, se puede decir que se dividen en dos grandes apartados:

1. Sistemas aislados.
2. Sistemas conectados a la red eléctrica.



SISTEMAS AISLADOS

- Telecomunicaciones.
- Electrificación rural.
- Aplicaciones agrícolas.
- Aplicaciones ganaderas.
- Iluminación Pública.
- Señalización.
- Control.
- Desarrollo Rural.

A continuación, y para detallar los apartados anteriores, vamos a realizar un pequeño desarrollo de cada uno de ellos:

TELECOMUNICACIONES

- Telefonía móvil.
- Repetidores de radio y televisión.
- Postes S.O.S. de carreteras.
- Telemando.
- Telecontrol para redes de riego.
- Telemetría.
- Radares.
- Radiotelefonía en general y para militares o puestos de vigilancia forestal.
- Telefonía rural vía satélite.
- Teleondas.
- Cabinas telefónicas de uso público.
- Centrales de conmutación.
- Radioenlaces.
- Sistemas TRUNKING.
- Cobertura de radio y comunicaciones en túneles del Ferrocarril.



ELECTRIFICACIÓN RURAL

- Viviendas de uso temporal.
- Viviendas de uso permanente.
- Electrificación centralizada con control individual de consumos por vivienda, en núcleos rurales.
- Electrificación de refugios y albergues de montaña.
- Postas sanitarias (iluminación, conservación de medicamentos y vacunas con frigoríficos).
- Escuelas y centros comunales.
- Puestos de policía y fronteras.
- Instalaciones religiosas (ermitas, misiones, etc.).

APLICACIONES AGRÍCOLAS

- Bombeos de agua.
- Electrificación de naves.
- Controles de riego.
- Invernaderos (automatización de ventanas e iluminación).

APLICACIONES GANADERAS

- Bombeos de agua para proporcionar agua al ganado.
- Electrificación de granjas (iluminación, motores, esquiladoras, etc.).
- Sistemas de ordeño y refrigeración de leche.

ILUMINACIÓN

- Carteles publicitarios.
- Farolas de alumbrado público.
- Paradas de autobuses.
- Iluminación de túneles, cuevas, etc.



SEÑALIZACIÓN

- Faros y boyas de uso marítimo.
- Radiofaros y radiobalizas de uso aéreo.
- Señalización viaria para señalización de curvas, obstáculos, rotondas, etc. en ciudades y carreteras mediante led's.
- Indicadores de hora y temperatura en vías públicas.
- Pasos a nivel de Ferrocarriles.
- Plataformas petrolíferas.

CONTROL

- Caudalímetros y anemómetros.
- Accionamiento de válvulas (electroválvulas).
- Controles y estaciones meteorológicas y sísmicas.
- Cámaras de TV para control y medida de tráfico.
- Motorización y automatización de puertas.
- Repetidores de señal con fibra óptica.
- Estaciones de medida medioambiental.
- Control en gasoductos y oleoductos.
- Toma de datos.
- Control y operación remota de presas.
- Protección catódica.



OTRAS APLICACIONES

- Cloración mediante bombas dosificadoras.
- Depuración por lagunaje alimentando los motores limpia-rejas y caudalímetros.
- Oxigenadores para el agua mediante compresores.
- Desalinización de agua salobre (osmosis inversa).
- Básculas para el pesaje de camiones. (vertederos, centros industriales, etc.).
- Sistemas para detección de incendios mediante cámaras de infrarrojos.
- Sistemas de seguridad perimetral con infrarrojos.
- Vigilancia y control de accesos (videoportero, apertura y cierre de puertas, mando a distancia).
- Ionización para Pararrayos.
- Suministro para uso didáctico en Universidades, Colegios Profesionales, etc.
- Barcos veleros y autocaravanas.
- Equipamiento de áreas recreativas.

El segundo gran grupo de los sistemas fotovoltaicos lo constituyen los conectados a la red eléctrica:

SISTEMAS CONECTADOS A LA RED ELECTRICA

Es una de las últimas aplicaciones y más novedosas de los sistemas fotovoltaicos, consiste en la instalación de un campo fotovoltaico y un inversor capaz de transformar la energía que suministran los paneles e inyectarla a la red eléctrica. El inversor en este tipo de instalación es el núcleo central y tiene que disponer de ciertas protecciones, ante situaciones que se pueden dar en la red eléctrica como son:

- Tensión fuera de rango.
- Corte de la red.
- Desfase en la red.

Para conseguir la viabilidad económica de estos sistemas, el país debe de disponer de una normativa legal y unas líneas de ayudas económicas, que compensen el mayor costo por KWh generado [3]



3.1 Historia y evolución de las células solares

La conversión de energía fotovoltaica se trata de un proceso de generación de energía eléctrica a partir de la energía lumínica. La energía de los fotones en el espectro visible es suficiente para producir la excitación de los electrones y colocarlos en niveles de energía más altos, que se encuentran en la banda de conducción del material. El fenómeno se asemeja al efecto fotoeléctrico que explico Albert Einstein en uno de sus famosos cinco artículos de 1905 con el cual ganó el premio nobel, en este caso la luz ultravioleta proporciona el trabajo de extracción necesario para arrancar los electrones de un metal en un circuito.

Lo que ocurre normalmente sobre un material cuando incide un fotón es la excitación de un electrón a estados más altos del material, pero rápidamente se relajan volviendo a su estado fundamental, sin embargo en un sistema fotovoltaico el material tiene una asimetría que permite a los electrones permanecer en ese estado excitado y estos pueden alimentar un circuito externo actuando como fuerza electromotriz del mismo.

El efecto fotovoltaico fue visto por primera vez por Edmund Becquerel en 1839, observo que la luz que incidía sobre un electrodo de platino recubierto de plata en el interior de un electrolito genera una corriente eléctrica. En 1876 William Adams y Richard Day encontraron que se podría producir una fotocorriente en un material de Selenio cuando entra en contacto con dos metales de platino a alta temperatura.

En 1894 Charles Fritts diseñó el primer dispositivo solar de gran superficie uniendo una capa de Selenio entre el oro y otros metales. Años posteriores se vieron otros efectos fotovoltaicos en películas delgadas de óxidos de cobre introducidas en sulfuro de plomo y sulfuro de talio, estas fueron las primeras células de barrera Schottky de película delgada, con una capa superficial semitransparente de metal depositada sobre el semiconductor que proporcionaba la unión electrónica asimétrica y el acceso de luz del exterior. Este tipo de dispositivos trabajaban debido a un flujo de corriente en una de las interfaces de los semiconductores, fue explicado por Goldman y Brodsky en 1914. Durante los años treinta, la teoría de las capas de barrera metal-semiconductor fue desarrollado fundamentalmente por Walter Schottky y Neville Mott.

El fenómeno de la fotoconductividad cautivó a estos investigadores, que profundizaron en la explicación de este comportamiento. Pudieron comprobar que la intensidad lumínica era proporcional a la corriente y dependía de la longitud de onda con la que se incidiese, por lo que estos materiales eran ideales para ser utilizados como sensores de luz fotográficos. Además, el fenómeno fotovoltaico en estructuras de barrera, daba una ventaja adicional puesto que el dispositivo medidor podía trabajar sin una fuente de alimentación externa.

En la década de los años cincuenta se desarrollaron las primeras obleas de silicio con el avance de la física del estado sólido aplicada a la electrónica. Este paso se pudo dar gracias al descubrimiento de la fabricación de uniones "p-n" aplicadas al silicio, las primeras en realizarse fueron las "n", que tras un proceso de exposición al tricloruro de boro gas quedaba revistiendo al semiconductor que le otorgaba



características tipo "p". Posteriormente esta capa externa podía ser atacada para dar acceso a la capa inferior de tipo "n".

Estas uniones p-n mejoran la acción de rectificación de las barreras Schottky, aumentando la capacidad fotovoltaica del material.

La primera célula solar de Silicio fue fabricada por Chapin, Fuller y Pearson en 1954 cuya eficiencia de conversión de la luz solar era del 6 %, lo que mejoró seis veces el primer intento en un material de silicio. El costo era de uno 200 dólares por watio pico producido, lo que las dejaba fuera del mercado energético a pesar de la mejora en el rendimiento años más tarde. Solo fue considerado seriamente como dispositivo útil en el uso de satélites como fuente de energía, ya que cumplía los requisitos de fiabilidad y bajo peso que restaba importancia al alto costo de fabricación de estos dispositivos. Durante los años 50 y 60 fueron desarrollados y mejorados gracias a las aplicaciones en el mercado espacial.

Al mismo tiempo, en 1954 se produjeron dispositivos fotovoltaicos de uniones p-n con otros materiales, como el de sulfuro de cadmio con una eficiencia del 6 % y otros más tarde como el arseniuro de galio, fosforo de indio y telurio de cadmio, que fueron estudiados a nivel teórico. Actualmente y para dar una idea del avance en el sector, las células de arseniuro de galio tienen una eficiencia promedio

En la década de los años setenta se produjo el primer paradigma de la energía a nivel mundial, que llevó a replantearse fuentes de energía alternativas y un mayor impulso en la investigación en áreas de energías limpias, impulsados por los estudios que estimaban las cantidades de crudo disponible en el planeta.

Este cambio de perspectiva en el mercado de la energía, dio un empuje al estudio de nuevos dispositivos fotovoltaicos y una mayor financiación en la investigación.

Algunas rutas actuales de menor costo implican uniones foto-electroquímicas y materiales alternativos como el silicio amorfo, policristalino y otros materiales orgánicos conductores de capa fina. Otras estrategias son el uso de células tándem.

En los años noventa se les dio un gran impulso por la necesidad de eliminar la dependencia con los combustibles fósiles. La producción fotovoltaica creció en este periodo entre un 15 % y un 25 % anual, lo que redujo los costes de fabricación, esto abrió el mercado fotovoltaico a otros campos de la industria como navegación, telecomunicaciones y electrificación rural.

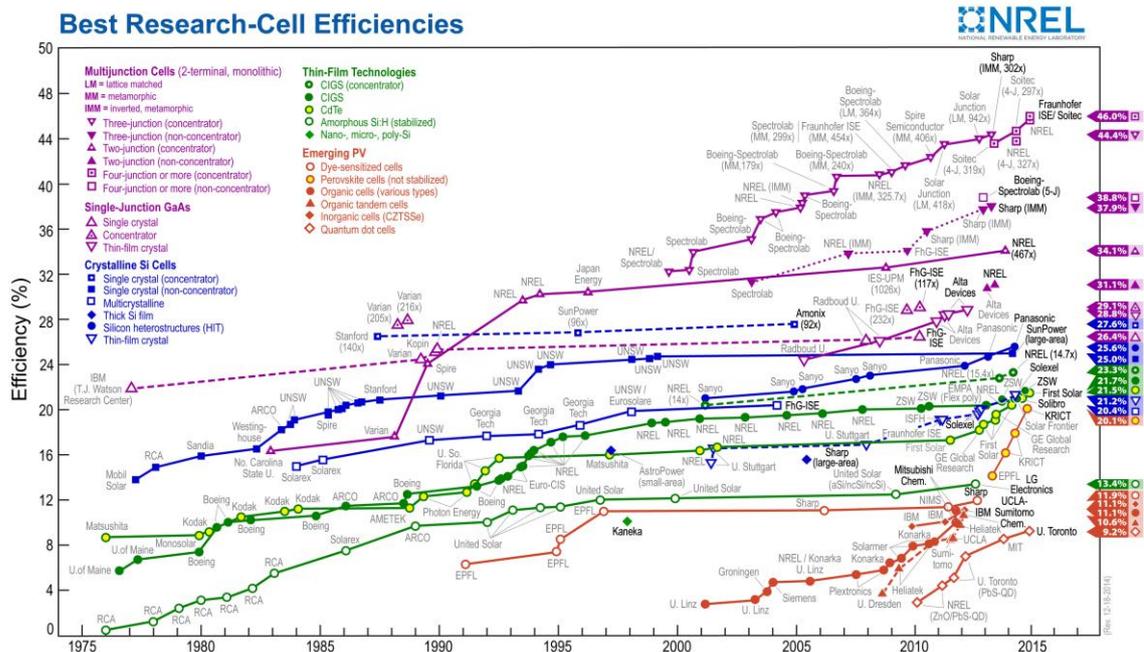


Fig. 2. Cronología de las eficiencias de conversión logradas en células solares fotovoltaicas (fuente: National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos)

3.2 Historia de las células solares sensibilizadas con colorante (DSSC)

Las células solares sensibilizadas con colorante o DSSC son una interesante convergencia de la fotografía y la fotoelectroquímica, las cuales se basan en la separación de carga fotoinducida en una interfase líquido-sólido.

Los haluros de plata utilizados en fotografía sedan con saltos de banda del orden de 2.7- 3.2 eV, y son por lo tanto insensibles a gran parte del espectro visible, como es el TiO_2 que ahora se utilizan en estos dispositivos fotoelectroquímicos. La primera película pancromática, fue capaz de representar la imagen de una escena realista en blanco y negro, seguido en el trabajo de Vogel en Berlín después de 1873, en el que se asocia a colorantes con los granos de haluro de semiconductores.

Los autores Qi-Li, Rongcai Xie y Jian Ku Shang en su artículo sobre la síntesis y propiedades ópticas del TiO_2 [4] nos describen el interés en materiales a base de semiconductores como fotocatalizadores, tanto para la conversión de energía solar como para aplicaciones medioambientales. El TiO_2 es el único candidato catalizador adecuado para el uso industrial debido a su alta estabilidad química, buena fotoactividad, un costo relativamente bajo, y es inocuo. Sin embargo, la capacidad fotocatalítica de TiO_2 se limita solo a los rayos ultravioleta (UV) (para longitudes de onda próximas a los 400 nm), que proporciona energía suficiente para excitar electrones a través de la relativamente ancha banda prohibida de 3.2 eV en la fase cristalina anatasa de TiO_2 . Debido a que el TiO_2 está en la región la banda ultravioleta que representa 3%-4% del espectro solar, es de gran interés el desarrollo de fotocatalizadores que pueden absorber la luz



visible de manera que una parte importante del espectro solar podría ser utilizado para reacciones fotocatalíticas. Los intentos previos para ampliar el límite de la banda de absorción de TiO_2 de UV a la región de luz visible han incluido los metales de transición de dopaje en el TiO_2 , o la reducción de TiO_2 a TiO_x (XO_2). Sin embargo, debido a la falta de reproducibilidad y estabilidad química, estos enfoques no han encontrado aplicaciones industriales extensas. Recientemente, dopantes aniónicos, tales como nitrógeno, se emplean para extender la actividad fotocatalítica de TiO_2 en La región de luz visible con la mejora de la estabilidad, la eficiencia fotocatalítica, y la facilidad del proceso de dopaje. Posteriormente, TiO_2 dopado con nitrógeno (TiON) ha atraído considerable atención y se ha hecho en polvos y películas delgadas.

Varias estrategias han tratado de mejorar La actividad de TiO_2 en la región visible, incluyendo la introducción con otros dopantes, como Se, Pr, Pt, N, Mn, en la introducción de impurezas al material con el fin de modificar sus características eléctricas. Un dopante ideal debe aumentar el borde de la banda de valencia, reduciendo así la brecha de banda sin bajar la banda de conducción. También debe mejorar o minimizar la recombinación electrón/agujero, a fin de reducir cualquier pérdida en el rendimiento cuántico.

Se ha comprobado que los metales tales como Fe, Mn, Cr, V, y Ni sintonizan con la estructura electrónica de TiO_2 y mejoran su actividad fotocatalítica en el rango visible. Alex T. Kuvarega, Rui W. M. Krause and Bhekia B. Mamba en un reciente artículo de investigación [5] nos explican el efecto positivo del dopaje de un metal en la mejora de la separación de los electrones y agujeros en la superficie del fotocatalizador.

La fotoactividad de estas muestras dopadas no es suficiente debido a una baja capacidad oxidativa y débil eficiencia cuántica debido a un aumento en la recombinación de portadores. Se pudo comprobar que algunos metales en la superficie de TiO_2 no parecen tener ninguna influencia, o que incluso son perjudiciales actuando en la degradación fotocatalítica. Un método convencional orgánico para la prevenir la recombinación es la utilización de catalizadores metálicos del grupo del platino (PGM), por ejemplo, platino, osmio, paladio, y rodio, que son capaces de recopilar un gran número de electrones y mejorar la fotoactividad mediante el aumento de la vida útil de los agujeros. Por otro lado, el uso de metales nobles como co-catalizadores es un problema desde el punto de vista del coste y se han identificado especies aniónicas tales como nitrógeno, carbono y azufre para formar potencialmente nuevos niveles de impurezas cerca de la banda de valencia o de conducción de TiO_2 , lo que reduce el ancho de banda y el desplazamiento del borde de absorción a la región visible. El dopante aniónico mas estudiado es el nitrógeno. Esto se debe a que el nitrógeno tiene un tamaño similar al oxígeno así como una baja energía de ionización.

La primera sensibilización de un fotoelectrodo siguió poco después, usando una química similar. Allá por la década de los años sesenta los investigadores de este campo, impulsados por el paralelismo entre los dos procedimientos donde los mismos colorantes en principio podrían funcionar, dieron paso a su verificación que lo realizaron a través de un mecanismo por inyección de electrones de las moléculas de colorante fotoexcitado a la banda de conducción de un sustrato semiconductor tipo



n. En los años siguientes se desarrolló la idea de que el tinte podría funcionar con mayor eficiencia si se absorbía químicamente sobre la superficie del semiconductor. El concepto surgió de utilizar partículas dispersas para proporcionar una interfaz, y a continuación, fotoelectrodos donde emplearlos. El colorante estándar en el momento era tris (2,2' - bipyrimidil - 4,4'- Carboxilato) rutenio (II). La función del carboxilato era ser implementado por quimisorción del cromóforo al sustrato de óxido. El progreso a partir de entonces, basta el anuncio en 1991 de un dispositivo fotovoltaico electroquímico sensibilizado con una eficiencia de conversión del 7,1% bajo una iluminación solar, fue gradual, con el uso de una sinergia en la estructura, en la rugosidad del sustrato y morfología, en la fotofísica de tintes y en la química redox de electrolito. Esa evolución ha continuado progresivamente desde entonces, con la eficiencia certificada ahora más del 10%.

El dióxido de titanio se convirtió en el semiconductor de elección por excelencia. El material tiene muchas ventajas para el sensibilizado fotoquímico y fotoelectroquímico: es de bajo costo, ampliamente disponible, no tóxico y es un material biocompatible, y como tal se utiliza incluso en productos de cuidado de la salud, así como en pinturas. Tal y como nos describe A. Slav et al. [6] es uno de los óxidos metálicos más estudiados, con aplicaciones en el campo de los dispositivos electrónicos, descomposición de elementos contaminantes, protección de obras de arte por oxidación, fotorreacciones para diversas síntesis, conversión de energía solar así como su uso en la producción de hidrogeno molecular. Presenta una ancha banda prohibida, gran transparencia en el rango del visible, y un buen índice de refracción en un rango que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo lejano. Así mismo, el dióxido de titanio nanocristalino contiene peculiaridades interesantes para aplicaciones fotoconductoras. Su banda óptica anda alrededor de los 3 a 3.6 eV, en la región ultravioleta. Una síntesis común para su fabricación es la llamada pulverización catódica reactiva. Igualmente se utiliza como colorante sensibilizado, sin embargo el complejo orgánico es muy inestable y el transporte de carga aun supone una complejidad en estos sistemas.

3.3 Principio de operación de las células sensibilizadas con colorante

El corazón del sistema es una capa de óxido mesoporoso compuesto por partículas de tamaño nanométrico, que han sido sinterizadas en conjunto para permitir la conducción electrónica. El material por excelencia es el TiO_2 en fase anatasa, aunque el ancho de banda prohibida de óxidos alternativos tales como ZnO , y Nb_2O_5 han sido también investigados. Se une a la superficie de la película nanocristalina una monocapa de colorante utilizada para la transferencia de carga, tal como mostró Michael Gratzel [7].

El fotoelectrodo es una lámina mesoporosa de óxido de tamaño nanométrico. Unida a la superficie del óxido se encuentra la monocapa de colorante responsable de la absorción lumínica. La absorbancia que ocurre en las moléculas de colorante resultan de una excitación de un electrón desde el orbital molecular más alto ocupado (HOMO) hasta el más bajo desocupado (LUMO).



La fotoexcitación como resultado provoca la inyección de un electrón a la banda de conducción del óxido. El estado original del colorante se recupera más tarde por donación de electrones del electrolito, que por lo general es un disolvente orgánico embebido en un proceso redox, tales como la pareja de yoduro/triyoduro. El yoduro se regenera a su vez por la reducción de triyoduro en el contraelectrodo de Pt, el circuito se cierra con la migración de electrones a lo largo de la carga externa. El voltaje generado bajo iluminación, corresponde a la diferencia entre el nivel de Fermi del electrón en el sólido y el potencial redox del electrolito.

En general, el dispositivo genera energía eléctrica a partir de la luz sin sufrir ninguna transformación química permanente.

Como hemos descrito anteriormente las células solares electroquímicas están formadas por tres elementos: un fotoelectrodo, un electrolito redox y un contraelectrodo.

Para el fotoelectrodo se pueden hacer uso de una diversidad de semiconductores, como pueden ser compuestos por Si, GaAs, InP o CdS.

Como desventaja a destacar de estas células son el desgaste que sufren en el electrodo cuando está bajo condiciones de irradiación al ser atacado por la solución electrolítica que lo va deteriorando. Lo que finalmente afecta a la estabilidad de la célula por completo. Como queda reflejado en el trabajo de fin de Máster de Wilmer E. Cumbicus [8].

Una realización a alterna reciente del concepto DSSC es la heterounión sensibilizada, en general con una amplia banda prohibida, se tiene semiconductores nanocristalinos inorgánicos de tipo n como receptor de electrones, la restauración de la neutralidad de carga se da con la entrega de un hueco dado por la complementariedad existente de semiconductores inorgánicos u orgánicos de tipo p. La variante fotoelectroquímica anterior. Siendo más avanzadas en el desarrollo dado por Michael Gratzel. Tiene una eficiencia de conversión solar AM 1.5 de más del 10%. Mientras que la del dispositivo de estado sólido es por el momento significativamente menor.

La fotogeneración de corriente está directamente relacionada con la cantidad de luz solar recolectada por el sensibilizador en la parte espectral del visible. En consecuencia, las moléculas de colorante juegan un papel crítico en la captura del fotón y por esta razón el progreso de las DSSC han sido seguidas muy de cerca debido al constante desarrollo de una nueva porfirina y sensibilizadores orgánicos D- π -A que tienen altos coeficientes de extinción y una mayor amplitud de espectro óptico de absorción. Estos han sido sustituidos por el común uso del sensibilizador Ru (II) poriripidil líquido y también por un electrolito de estado-sólido.

Otros materiales de tipo p de banda prohibida directa como semiconductores CsSnI₃ han sido usados recientemente para la conducción de huecos que apuntan a reemplazar el electrolito líquido basado en yoduro/triyoduro. Este conductor de huecos, tiene el record de eficiencia del 8.5% para DSSC de estado sólido.

Una interesante e inexplorada clase de materiales órgano-metálicos haluros de perovskita, han sido usados como sensibilizadores en un electrolito líquido basado en células foto-electroquímicas con una eficiencia de conversión del 3.5 al 6.5%. Estos



materiales proveen un excelente soporte para enlazar componentes orgánicos e inorgánicos para formar un compuesto molecular que no solo actúa como sensibilizador, sino también como conductor de huecos y electrones.

Otra específica perovskita, metilamonio de plomo ioduro-cloruro ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2\text{Cl}$) fue usado como material absorbente de luz en conjunto con el dióxido de Titanio como componente transparente de tipo-n. Los huecos son transportados desde la superficie de la perovskita al contraelectrodo usando una lámina de spiro-OMeTAD. El dispositivo alcanzó el 8% de eficiencia. Curiosamente los autores encontraron que reemplazando el fotoelectrodo de TiO_2 por un marco aislante de AlO_3 , la eficiencia de conversión mejoró hasta el 11%. Aparentemente el material de perovskita empleada es mucho mejor conductor de electrones que el fotoelectrodo de TiO_2 , y el AlO_3 solo actúa como andamio que soporta y provee de una superficie para que la perovskita sea recubierta.

Otro avance significativo como propuesta de trabajo es una plataforma innovadora que incluya un nanocompuesto tridimensional y una arquitectura bicapa con una heterounión híbrida orgánica-inorgánica como el uso del sistema $\text{TiO}_2/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PBI}_3/\text{polímero HTMs}/\text{Au}$, resultando una eficiencia del 12% para una célula solar mesoscópica de estado-sólido. Aunque uno puede argumentar que los dispositivos se desvían de la típica célula DSSC, hay que estar siempre abiertos a nuevas posibilidades para un desarrollo de células solares de bajo costo y altas eficiencias.

Los principales procesos en un sistema DSSC son la absorción de la luz, la inyección de carga, el transporte de electrones, y la difusión del electrolito. Desde 1991 muchas de las mejoras en eficiencia sobre células DSSC han sido alcanzadas gracias al perfeccionamiento en las moléculas sensibilizadoras y electrolitos redox.

3.4 Mejoras en los diseños de células DSSC

Actualmente se intenta realizar mejoras en las tres partes que componen una célula DSSC como ya explicamos en el apartado anterior. Si bien es cierto, cobra gran importancia el progreso en el desarrollo de fotoelectrodos para obtener materiales de gran transparencia y buena flexibilidad. Como primer ejemplo tenemos un artículo de H.Chang et al. [9] donde hacen un estudio pormenorizado en La fabricación de células DSSC flexibles, para ello utilizan dos capas como fotoelectrodo compuesta de una fina lamina de acero inoxidable de un espesor de 0.07 nm y otra de Titania de 0.25 nm. El gran paso que dieron estos autores fueron una fabricación rápida del fotoelectrodo de bajo coste a través de La técnica de electroforesis por deposición (EPD), que aplicaron dos veces sobre las muestras. Después de ello, lo sometieron a un campo eléctrico de 40 V/cm con el que pudieron controlar la nanopelícula delgada que depositarían de dióxido de Titanio de unos 13 micrómetros de espesor, con el cual consiguieron adquirir la menor rugosidad.

Para poder depositar películas de espesor variado de Pt sobre ITO-PET, usaron un método por bombardeo iónico, logrando conseguir espesores de 5, 8, 11 y 14 nm. En el proceso EDP concluyeron que la solución coloidal mejoraba los resultados experimentales, lo lograron con una mezcla de 100 ml de alcohol isopropílico (IPA)



con 0.4 g de nanopartículas de dióxido de titanio comercial. Finalmente optimizaron la conversión de eficiencia fotoeléctrica con un contraelectrodo de espesor de 11 nm de Pt, dando un valor de eficiencia que podría llegar a ser del 2.91 %.

En el siguiente artículo de los autores Yeji Lee et al. [10], hicieron un estudio de caracterización de los nanoporos encontrados en estructuras de dióxido de titanio, concretamente poros de 10 nm de tamaño medio encontrados en una estructura hexagonal. Como avance significativo, estos autores vieron que mejoraban la conversión de eficiencia energética comparada con el uso de dióxido de titanio preparado usando un método hidrotermal, consiguiendo un valor de 8.71 % de eficiencia, con el uso del colorante N719 bajo 100 mW/cm² de luz. También pudieron comprobar que el colorante no solo se adhería a las paredes de las moléculas sino que de hecho la mayor cantidad de colorante se introdujo y fue absorbido en los poros de la estructura. El microscopio de fuerza electrostática (EFM) mostro como los electrones se transfirieron rápidamente a la superficie de la estructura.

En una revisión reciente (2013) del estudio de arte en La técnica (Hari M. Upadhyaya et al. [11] vemos los enormes avances que se han dado en apenas dos años, donde destaca el desarrollo de la eficiencia de un 5 % a un 15 % sobre todo por el uso de perovskitas de base mesoporosa, que además abarato enormemente el coste. Igualmente en este artículo, se habla sobre el desarrollo relativamente lento en la mejora de la eficiencia y de la estabilidad, así como un intento en la unión a través de líquidos, sólidos o geles.

En otro estudio reciente (2011) de Tsai-Te Wang et. Al [12], se estudió la deposición de InN sobre películas constituidas de nanopartículas de dióxido de titanio para la mejora del rendimiento en estas células solares. Un incremento de un 10-20 % en la eficiencia fue observado al aplicar esta deposición comparándolo con láminas de muestras que no fueron sometidas a este proceso. Utilizaron un colorante N3 en una película de dióxido de titanio de 5-8.5 micrómetros de espesor. El proceso de deposición química lo hicieron con el uso de un gas órgano-metálico en un rango de

573-723 K. El corrimiento espectral y el estudio DTF sugirieron que el colorante se encontrara en localizado en InN y en InN/TiO₂.

3.5 Novedades en las propiedades de nuevos materiales

Se está desarrollando un amplio campo de investigación en los materiales que dan nuevas perspectivas prometedoras en las propiedades ópticas y estructurales, que pueden darse uso en las aplicaciones fotocatalíticas y fotovoltaicas.

Como ejemplo interesante encontramos las nanopartículas co-dopadas con ZnO. Las múltiples facetas del dopado con ZnO dotan a los materiales de interesantes características cuyas aplicaciones prácticas pasan por ventanas luminiscentes, varistores, láseres, dispositivos optoelectrónicos y materiales ferromagnéticos a temperatura ambiente.



Concretamente el interés de un artículo de autores [13], se tiene en la presencia de una fuerte luminiscencia en el rango del visible.

Diseñaron a través de la técnica sol-gel nanopartículas de ZnO , $\text{Zn}_{0,9}\text{V}_{0,1}\text{O}$ y $\text{Zn}_{0,89}\text{V}_{0,1}\text{Al}_{0,01}\text{O}$, luego fueron estudiadas sus características estructurales y ópticas obteniendo muestras de polvo nanoscópico las cuales caracterizaron con técnicas de difracción de rayos X, microscopio electrónico de transmisión y espectroscopio fotoluminiscente. Tras un tratamiento térmico de 500°C , el compuesto en polvo de $\text{Zn}_{0,89}\text{V}_{0,1}\text{Al}_{0,01}\text{O}$ con un tamaño medio por partícula de 25 nm, presentó las características luminiscentes citadas anteriormente. Tras el riguroso estudio de estos autores, concluyeron que el dopante es el responsable de la banda de luminiscencia.

Otro trabajo de J. El Ghoul, K. Omri, S.A. Gómez-Lopera, L. El Mir [14] presentan materiales fabricados desde la técnica Sol-gel como el Zn_2SiO_4 sin dopar y dopados con vanadio y manganeso, en una matriz de SiO_2 , cuyo nanocompuesto obtenido $\text{SiO}_2/\text{Zn}_2\text{SiO}_4$, exhibe una fuerte banda de fotoluminiscencia centrada en torno a los 760 nm, atribuida a la transferencia de energía que se produce a partir de las partículas Zn_2SiO_4 a los intersticios de los defectos de la estructura. El compuesto $\text{SiO}_2/\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}$ mostró un pico dominante a 525 nm que se originó a partir de las transiciones de cationes Mn^{2+} , y para el caso de $\text{SiO}_2/\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{V}$, el espectro de fotoluminiscencia mostro una banda centrada a los 540 nm, que se le atribuye al efecto de V^{5+} en la matriz huésped.

Podemos citar el trabajo de L. El Mir et al (2013) [15], en la fabricación de un xerogel de TiO_2 dopadas con tierras raras para aplicaciones fotoluminiscentes. El compuesto es transparente entre 400 y 1400 nm así como amorfo, que tras un tratamiento térmico bajo 823 K, tras una fase de transición, paso a estado anatasa, cuyos cristales tenía tamaño nanométrico, según el estudio de rayos X realizado posteriormente, mientras quedaron integras las características de transmitancia en el UV a temperatura ambiental.

Por último, pero más importante, gracias al excelente trabajo realizado en [16] se tiene como resultado una amplia pero sintetizada reseña histórica y científica aquí comentada.



3.6 Aplicaciones en el ámbito naval

Se detallará una lista orientativa de lo que se ha llegado a diseñar o proyectar en el ámbito marino.

3.6.1 Buques

Proyectos que van desde el *SOLEMAR* de Seacleaner S.L. en España, al *MS Turanor* de Planet Solar, el mayor buque propulsado íntegramente por energía solar, pasando por el *Auriga Leader* o el *Sun21*, y sin olvidar el proyecto *Goldfish*, entre otros.

SOLEMAR

Un catamarán de 12 metros de eslora, con capacidad para 60 pasajeros, insumergible al estar rellenos sus dos cascos de espuma expandida.

Alcanza una velocidad máxima de 6 nudos gracias a sus generadores solares con paneles de última generación que les proporcionan una potencia de 4.650 Wp, cuarenta y ocho baterías de 1.000 Ah de capacidad y dos motores eléctricos con 4.600 W de potencia cada uno.

Su autonomía es indefinida con sol y hasta 150 horas sin sol. La energía utilizada es totalmente gratuita e inagotable, al no utilizar ninguna fuente de apoyo exterior.



Fig. 3. Barco SOLEMAR

Comparándolo con un barco similar con motores de gasóleo, a lo largo de su vida útil de 25 años, dejará de emitir Aproximadamente 7.214 Tm de dióxido de carbono a la atmósfera y dejará de consumir más de 1.000.000 de litros de gasóleo [17].



AURIGA LEADER

El *Auriga Leader* es el primer buque transoceánico en utilizar energía fotovoltaica: sus 328 paneles solares cubren el 0,3% de la propulsión y un 7% de los servicios auxiliares.

Así lo señalan sus responsables, las empresas japonesas Nippon Yusen K.K. (naviera) y Nippon Oil Corp. (petrolera). Su primer viaje lo realizó en 2009, tras salir del puerto nipón de Kobe. La generación solar pues, a gran escala es más bien testimonial, pero puede servir de ejemplo para el resto de grandes buques comerciales: la alta toxicidad de su combustible provoca una contaminación 240 veces mayor que los 760 millones de coches que hay en el mundo, según datos de Gunter Pauli, autor de "La Economía Azul" [19].



Fig. 4. Buque Auriga Leader



SUN 21

El *Sun21* entró en el libro Guinness de los Records como el barco más rápido en cruzar el Océano Atlántico impulsado con energía solar. Este catamarán de 20 personas y 14 metros de eslora salió de Chipiona (Sevilla) en octubre de 2006 y llegó a Nueva York en mayo del año siguiente.



Fig. 5. Sun21

Con una velocidad media similar a la de un velero (12 km/h), recorrió más de 12.000 kilómetros y pasó por islas como las Canarias o la Martinica, en el Caribe. Sus responsables, una fundación suiza con el apoyo de WWF, demuestran con él su iniciativa en la lucha contra el cambio climático.



TURANOR

El suizo Raphael Domjan cumplió su sueño de crear el primer barco que da la vuelta al mundo únicamente con energía solar.



Fig. 6. Turanor

Este catamarán de hidrodinámicas líneas dispone de 703 paneles solares por toda su cubierta, baterías de alta capacidad a prueba de agua salada o sistemas de navegación para aprovechar al máximo la luz solar. El *Turanor* también lleva dos motores diésel de emergencia, que según sus tripulantes no ha necesitado. En la página web de su compañía, PlanetSolar, Domjan ofrece los detalles del proyecto, que ha costado unos 15 millones de euros, y una galería de imágenes y vídeos.



3.6.2 Plataformas flotantes

De forma similar a la definición de plataforma de la RAE [19], una plataforma flotante se definiría como una superficie sólida horizontal, descubierta y elevada sobre el agua, donde se pueden montar personas y/o acoplar artefactos. Artefactos como puedan ser, por supuesto, paneles solares fotovoltaicos.

Las ventajas de las plataformas solares marinas con respecto a las situadas en tierra son bastante numerosas como se detallará a continuación, pero podemos resumirlas en:

- Producen más energía que las instaladas en tierra porque el agua enfría los paneles solares.
- Por otra parte, las plataformas evitan la evaporación.
- Mejoran la calidad del agua y reducen los costes de mantenimiento porque reducen el crecimiento de algas.
- No requiere excavar la tierra ni usar hormigón, así que, en ese sentido son más respetuosas con el medio ambiente.
- El problema de la falta de terreno se disuelve en la amplitud del mar.
- Los flotadores que soportan la plataforma pueden estar fabricados con plástico HDPE, y ser cien por cien reciclables y fáciles de desinstalar. Teniendo una vida útil de treinta años.
- Las plataformas de última tecnología pueden sobrevivir a un huracán (ref.8).

Se conocen varios proyectos de esta clase a lo largo de todo el mundo, algunos de ellos se comentarán en la siguiente página.



GOLDFISH

El proyecto *Goldfish*, de la empresa de energía suiza BKW FMB, se diseñó para ser la primera plataforma solar flotante del mundo capaz de alimentar a un submarino y adaptable a múltiples usos, como industriales, turísticos o de transportes [20].

Así, *Goldfish* flotaría sobre el lago Thun, en los Alpes suizos, donde se situaría como "una isla en medio del lago", según una de las responsables de la dirección del proyecto, Marie-Anne Kiener. La plataforma haría también las funciones de embarcadero y alimentaría tanto el submarino, como el trasbordador solar que trasladaría a los visitantes desde tierra firme.

Cuenta con cinco satélites laterales donde se encuentran las placas fotovoltaicas que se direccionan maximizando el aporte de energía. En total son 300 metros cuadrados de células fotovoltaicas, que cuentan con una potencia de 30 kilovatios. La movilidad de la "isla" se consigue a partir de los motores subacuáticos que otorgan a la plataforma una capacidad de giro de 360 grados.

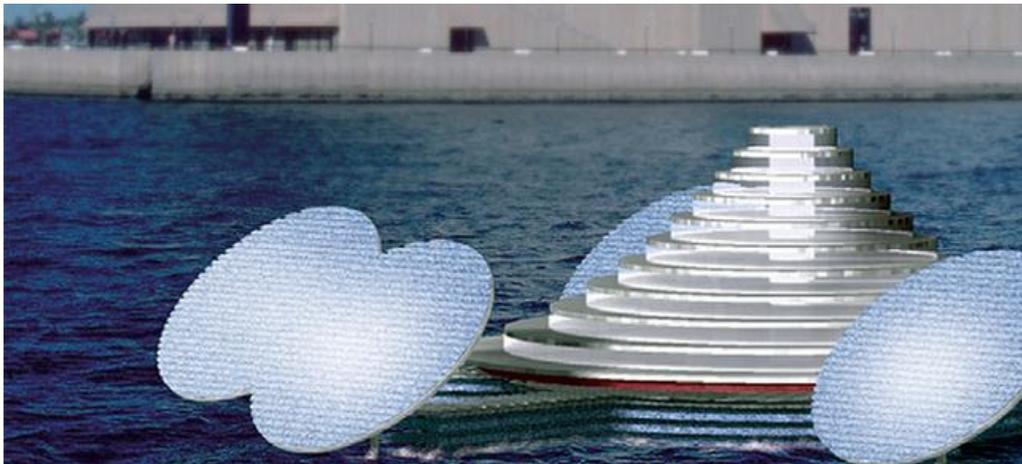


Fig. 7. Recreación de una de las plataformas frente a la Ópera de Sídney

Asimismo, tanto la plataforma como los diferentes elementos que desarrolla consiguen energía de una manera totalmente limpia. La planta almacena la energía generada en baterías, y carga los objetos dependientes de él mediante un cable.

Según los autores del proyecto, el proyecto *Goldfish* funciona sólo con energía solar, y se ha desarrollado un vehículo subacuático que puede oscilar de los 20 a 30 metros de longitud, y dependiendo de las dimensiones del submarino, albergar de 20 a 30 pasajeros. Además, tiene un consumo diario de 100 kilovatios hora, lo que les permite realizar hasta cuatro inmersiones diarias y descender a una profundidad de 300 metros.



LA PLANTA SOLAR FLOTANTE MÁS GRANDE DEL MUNDO EN JAPÓN

Kyocera Solar TCL fue creada conjuntamente en agosto de 2012 por Kyocera y Century Tokyo Leasing con el objetivo de construir y operar múltiples plantas de energía solar a escala comercial en Japón, y ha construido 28 plantas de energía solar desde el lanzamiento de la empresa.

La primera de estas instalaciones con la capacidad de potencia 1.7 MW se promociona a ser el sistema de generación de energía más grande del mundo flotante solar [21].

La instalación será construida en la superficie del estanque Nishihira en Japón Prefectura de Hyogo. La segunda planta solar tendrá una capacidad de 1,2 MW y se construirá en el lago Higashihira.

Estas plantas de energía solar flotantes pretenden ahorrar espacio, producir más electricidad que los sistemas de la azotea de montaje en suelo y debido al efecto de enfriamiento de agua, así como se reducirá la evaporación del depósito y el crecimiento de algas sombreando el agua.

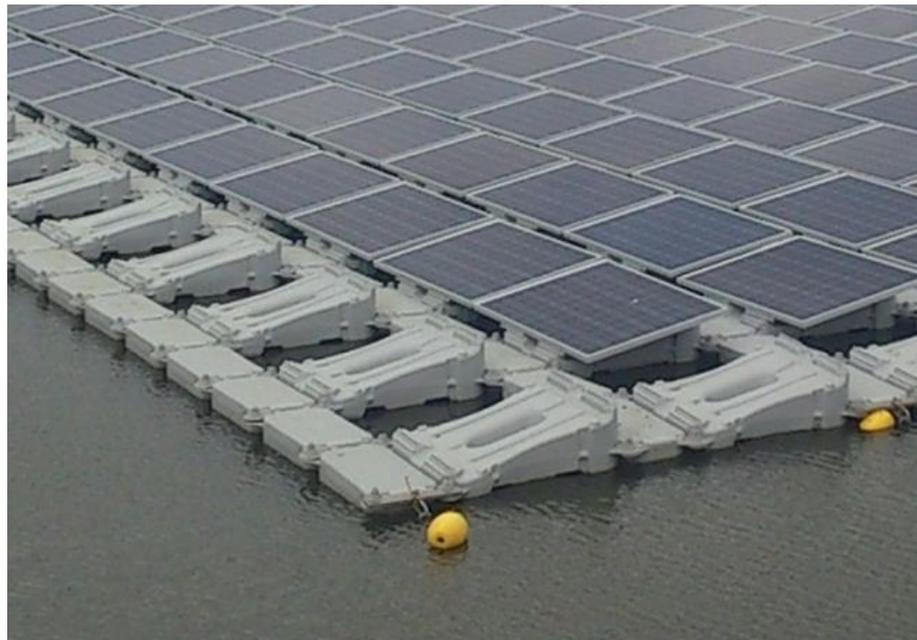


Fig. 8. Planta solar flotante de Japón

La energía generada por las plantas será suficiente para abastecer a unos 920 hogares, y se integrará en el servicio público local a través de sistema de feed-in-arancelaria del país. Se espera que las plantas entren en funcionamiento en 2015.

Kyocera Solar TCL tiene planes para desarrollar instalaciones flotantes para los embalses en el país un total de aproximadamente 60 MW a finales de este año fiscal, lo que hará que el uso de plataformas solares desarrollados y patentados por Ciel et Terre flotante [22].



3.6.3 Sensores marinos

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes y transformarlas en señales eléctricas.

En el ámbito naval, los sensores, entre otras, permiten tareas tan útiles como:

- Detección de objetos o personas (sonar o radar).
- Monitorizar velocidad del viento o de las corrientes marinas.
- Recoger datos meteorológicos y oceanográficos.
- Notificar cambios de presión drásticos (predicción de Tsunamis o maremotos).
- Asegurar la armonía del ecosistema marino (uno de muchos tipos de ejemplo serían los sensores acústicos usados para las ballenas francas del Atlántico Norte, especie amenazada, en un esfuerzo para reducir sus choques con embarcaciones, una de sus causas principales de muerte).

A continuación se estudiará teóricamente como alimentar sensores mediante energía solar fotovoltaica.

Este grupo será dividido en dos sub-grupos: la energía fotovoltaica submarina y la energía fotovoltaica marina usando boyas fotovoltaicas.



SENSORES SUBMARINOS

Los científicos del Laboratorio de Investigación Naval de Estados Unidos [23], estudian el potencial de energía fotovoltaica bajo el agua con objeto de producir la energía suficiente para hacer funcionar sistemas de sensores electrónicos a una profundidad de 9 metros. Los sistemas autónomos submarinos y plataformas de

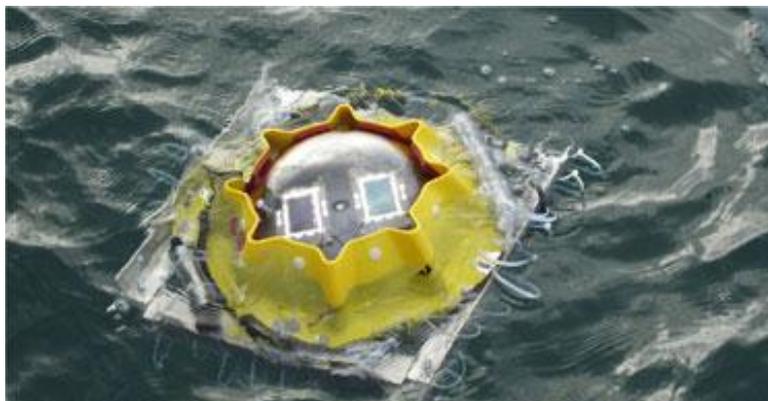


Fig. 9. Dispositivo sensor submarino

sensores están bastante limitados por la falta de fuentes de energía de larga duración. Hasta la fecha, estos sistemas deben confiar en la potencia on-shore, baterías o energía solar suministrada por una plataforma flotante. Los intentos de utilizar la energía fotovoltaica han tenido un éxito limitado, debido principalmente a

la falta de luz solar que penetra y el uso de células solares optimizadas más hacia el espectro solar terrestre que presenta menos impedimentos.

"El uso de sistemas autónomos para proporcionar conocimiento de la situación y la vigilancia del medio ambiente a largo plazo bajo el agua es cada vez mayor", según Phillip Jenkins, jefe de la subdivisión de sensores. "Aunque el agua absorbe la luz solar, el desafío técnico es desarrollar una célula solar que puede convertir de manera eficiente estos fotones submarinos a la electricidad."

A pesar de que la intensidad absoluta de la radiación solar es menor bajo el agua, el contenido espectral es estrecho y por lo tanto se presta a la alta eficiencia de conversión si la célula solar está bien adaptada a la gama de longitud de onda. Los intentos anteriores para operar células solares bajo el agua se han centrado en las células solares de Silicio cristalino y más recientemente, células de silicio amorfo.

Las células de alta calidad de fosforo de Galio e Indio (GaInP) son muy adecuadas para la operación bajo agua. Tienen alta eficiencia cuántica en longitudes de onda entre 400 y 700 nanómetros (luz visible) e intrínsecamente baja corriente de oscuridad, lo cual es fundamental para una gran eficiencia en condiciones de poca luz.

Las células solares (Silicio-izquierda y GaInP-derecha, respectivamente) montadas en el interior de una esfera de vidrio se bajan en el agua a una profundidad de 9 metros. Un dispositivo monitoriza tanto el rendimiento de las células solares como el espectro solar bajo el agua.

Se comprobó que las células de GaInP son más efectivas que las convencionales de Silicio.

Los resultados preliminares a una profundidad máxima de 9,1 metros determinaron una potencia 7 vatios por metro cuadrado proveniente de las células solares, suficiente para demostrar que hay energía solar útil para ser aprovechada a profundidades que se



encuentran habitualmente en las zonas litorales cercanas a la costa. No obstante, aún muy lejos de los aproximadamente 200 vatios por metro cuadrado que son capaces de producir las células de GaInP sin inmersión.

BOYAS SENSORAS

Dentro del estudio científico del medio marino, en numerosas ocasiones, es necesario llevar a cabo experimentos de larga duración para los que se instalan boyas sensoras, a las que se dota del instrumental necesario para la recolección y transmisión de datos relativos a los experimentos realizados.

Un aspecto crucial a la hora de realizar una plataforma de instrumentación con boyas sensoras es el coste que implica el acceso al mar, por lo que es necesario realizar un diseño que minimice el coste de despliegue, mantenimiento y repliegue de la red de boyas.

El suministro típico de energía a estos sistemas se realiza mediante acumuladores energéticos. En el caso de estancias prolongadas de las boyas en el medio marino, y para no tener que reponer los acumuladores periódicamente, se recurre habitualmente a la instalación de placas solares fotovoltaicas para recargar los referidos acumuladores. De la óptima orientación de estas placas respecto al sol depende el rendimiento de las mismas y, por tanto, la cantidad de energía suministrada a los sistemas de sensores de las boyas.

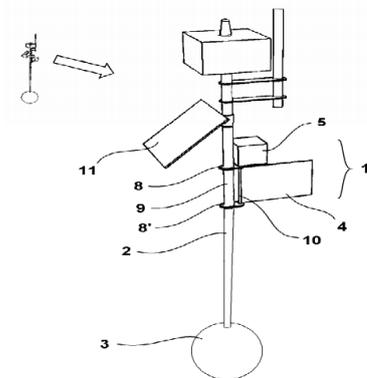


Fig. 11. Boceto de boya inteligente



Fig. 10. Boya inteligente

El principal problema para conseguir esta orientación proviene de la propia constitución de las boyas, la cual constituye una plataforma de naturaleza inestable: gira sobre sí misma por efecto de las corrientes marinas, las mareas y el viento. En estas condiciones, la correcta orientación respecto al sol de un panel solar fotovoltaico anclado a la boya es una tarea muy difícil [23].

Este problema ha quedado resuelto con la invención realizada por los investigadores del Grupo de Investigación División de Sistemas e Ingeniería Electrónica de la Universidad Politécnica de Cartagena con el nombre "Sistema y método para la orientación de una placa solar fotovoltaica instalada en una boya marina" [24].



Esta invención permite aprovechar eficazmente la energía proporcionada por el viento para estabilizar la boya, a través de una pala orientable, para seguir de forma continua la posición solar.



3.6.4 Sistemas de señalización marítima

Un sistema de señalización marítima [25], de forma general, indica:

- Los puntos a donde deben arribar los buques para entrar a los puertos.
- Los rumbos (direcciones) que se deben seguir en la navegación interior en puertos y bahías.
- Los canales de navegación en zonas de poca profundidad, o espacios reducidos (aguas restringidas), incluidos los de entrada a las bahías y accesos a los muelles.
- Los puntos de referencias para determinar la posición de los barcos, y conocer la región por donde se navega. Un sistema de señalización marítima es algo parecido a un sistema de señales del tránsito, que sirve para la orientación y la determinación de la posición del buque en el mar, señalar los canales naturales o artificiales, y los peligros a la navegación, pero con la particularidad de que está ubicado en el mar o en la costa, esto es, en lugares de difícil acceso, con todas las complejidades que esto implica. Estos sistemas tienen como objetivo garantizar la navegación segura de los buques, y son regidos por la IALA (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities).

Las aguas marinas constituyen un escenario de intenso tráfico marítimo. De ahí la importancia y la necesidad de estos sistemas de señalización marítima.

Actualmente, las principales señales marítimas de ayuda a la navegación que se emplean, tanto en nuestro país como a nivel mundial, son:

- Faros (de vigilancia y automáticos).
- Boyas lumínicas y ciegas (sin luces).
- Balizas lumínicas y ciegas.
- Enfilaciones lumínicas y ciegas.

Como ya se ha visto en el apartado anterior una boya además de soporte para sistemas de sensores acuáticos o subacuáticos también tienen un importantísimo papel en lo que a señalización se refiere, al igual que un faro, el otro tan conocido elemento de señalización naval.

En adelante se mostrarán aplicaciones de la energía solar fotovoltaicas en artefactos señalizadores como boyas y faros.



BOYAS PARA SEÑALIZACIÓN

Una boya es una baliza flotante situada en el mar y generalmente anclada al fondo, que puede tener diversas finalidades, principalmente para la orientación de las embarcaciones, como es el caso esta vez tratado.

Las boyas generalmente son huecas y a menudo están infladas con aire o con algún gas neutro, aunque también es común encontrar boyas rellenas de un material sólido más ligero que el agua, como puede ser la espuma de poliestireno, con el fin de impedir que el contenido se llene de agua o que se desinflen, perdiendo así su eficacia, en caso de un pinchazo o fuga tras un golpe. La flotación de las boyas se debe al Principio de Arquímedes, ya que su masa es inferior a la de su volumen equivalente en agua [26].



Fig. 12. Boya con luces alimentadas con energía solar estacionada en puerto



Otro proyecto sería el nuevo diseño conceptual del Dr. Hakan Gursu para Desingnobis, que obtuvo un primer premio en los Desingturkey Conceptual Desing Awards 2008. Trata de una boya que sirve de señalización para los barcos grandes y pequeños que es amigable con el medio ambiente ya que es autosuficiente.

La boya llamada *Tritón* aprovecha la energía solar y la energía eólica para funcionar, cuenta con unos paneles solares y una mini turbina eólica vertical incorporada en el diseño, también utiliza luces LED de bajo consumo para un mayor rendimiento.

La ventaja de que sea autosustentable además de ser amigable con el medio ambiente porque no genera residuos contaminantes, es que los costos de mantenimiento son muy bajos, porque no existen baterías que deben ser remplazadas [27].



Fig. 13. Diseño conceptual de Tritón

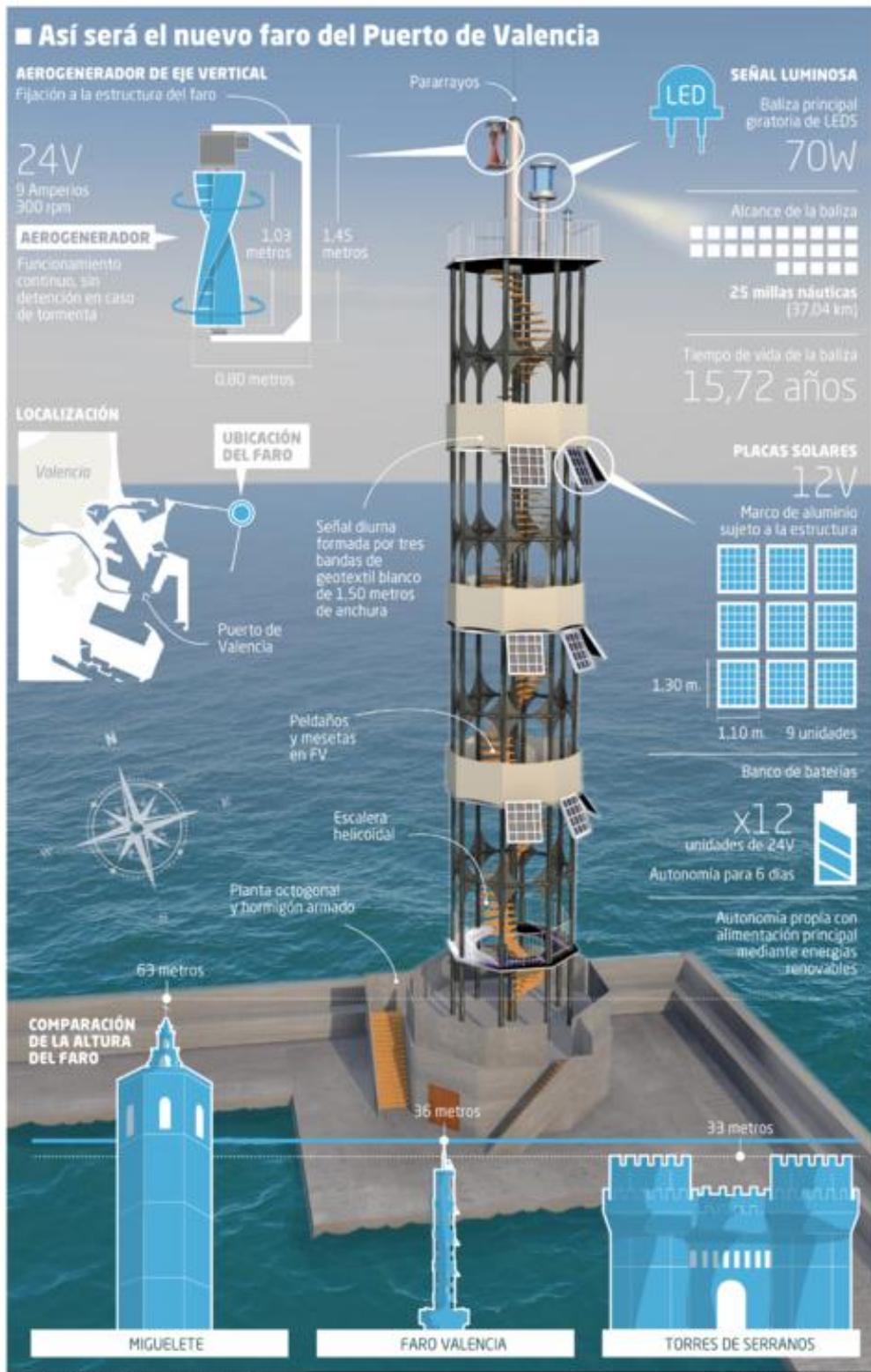


EL NUEVO FARO MARÍTIMO DE VALENCIA

Un faro es una torre situada cerca de la costa o junto a ella, aunque en algunas ocasiones se encuentra situado dentro del mar a cierta distancia de la costa, que se ubica en los lugares donde transcurren las rutas de navegación de los barcos y que dispone en su parte superior de una lámpara potente, cuya luz se utiliza como guía para señalar fundamentalmente a los barcos que en sus alrededores hay aguas poco profundas y que pueden encallar.

Hoy día con la tecnología del GPS (sistema de posicionamiento global, en inglés) los faros casi son algo obsoleto.

A pesar de lo dicho anteriormente, no significa que los pobres faros que siempre cautivaron a fotógrafos y turistas por su belleza y ese halo de misterio que siempre les rodeaba tengan que vivir de espaldas a la innovación, de hecho pueden beneficiarse de ella. Éste es el caso del nuevo faro de Valencia, de 5ª generación. Diseñado para cumplir tres objetivos (autonomía, mínimo consumo y mínimo mantenimiento), es el primero en usar materiales compuestos para no superar los 3.000 kilos de peso [28].



FUENTE: Autoridad Portuaria de Valencia

Pedro Jiménez / EL MUNDO

Fig. 14. El nuevo faro de Valencia



Las energías renovables, por su parte, le permitirían independizarse de suministros energéticos exteriores. La Autoridad Portuaria optó por la solar y la eólica. La torre incorporaría nueve paneles solares orientados al sur y un aerogenerador de hélice vertical. El equipo de Pascual escogió este tipo de molino porque es de funcionamiento continuo. No hay riesgo de que se detenga en caso de tormenta, ya que puede actuar hasta las 300 revoluciones por minuto.

La energía obtenida por el aerogenerador y los paneles solares se acumula en un banco de baterías de tecnología, formado por 12 unidades de 24 voltios. Este sistema permitiría que el faro pueda funcionar sin Sol ni viento durante seis días, algo muy difícil en Valencia. En el improbable caso de que eso ocurra, la infraestructura se puede conectar a un grupo electrógeno y, como último recurso, engancharse a la corriente eléctrica.

Como sabemos, los faros además de servir como señal marítima nocturna, también actúan como sistema de localización diurno. Para que la nueva torre se pueda distinguir de día, se incluyeron tres bandas blancas de un geotextil de 1,5 metros de ancho, por delante de los antepechos de las plataformas. Se trata de un material especial que deja pasar por su interior un 47% de aire. Es ligero y, sobre todo, permite que el viento no genere un efecto de empuje, uno de los principales problemas de los faros.

La Autoridad Portuaria de Valencia contrató la obra a Acciona, con amplia experiencia en el uso de materiales compuestos. Así, estimaron que el faro entrase en funcionamiento a mediados de 2015, antes de la finalización del presente proyecto.



CAPÍTULO 4

MODELADO DE UN SISTEMA HÍBRIDO CON ENERGÍAS RENOVABLES PARA EMBARCACIONES



4 Modelado de un sistema híbrido con energías renovables para embarcaciones

4.1 Modelo híbrido de propulsión eléctrica

4.1.1 Introducción

Al despuntar el siglo XXI, tenemos disponibles una gran variedad de alternativas para satisfacer nuestras necesidades de energía. Sin embargo, obtenemos la mayoría de nuestra energía por medio de la combustión.

Nuestros combustibles son en su mayor parte hidrocarburos, compuestos químicos que incluyen el hidrógeno y el carbono. Los hidrocarburos son combustibles de alto valor energético, pero su combustión introduce una variedad de contaminantes en la atmósfera.

Esto no solo resulta en smog y enfermedades respiratorias, sino que produce también grandes cantidades de dióxido de carbono. Este gas atrapa el calor del Sol en la capa inferior de nuestra atmósfera, elevando las temperaturas globales. Incluso, sin considerar la contaminación, tendremos que enfrentar el hecho que casi todos nuestros combustibles no son renovables. La cantidad de estos combustibles que podemos sacar de la tierra es limitada. Cuando se agote, tendremos que buscar nuevas fuentes de energía [29].

El siguiente trabajo trata de mostrar la viabilidad de un modelo conceptual de embarcación con un sistema híbrido eléctrico (pila de combustible – baterías) en el cual la energía es obtenida de fuentes renovables [30].

El elemento central del sistema es una batería que se carga gracias a la energía renovable generada a bordo gracias a los paneles solares, el hidrogenador, o el hidrógeno almacenado en botellas y convertido a electricidad mediante la pila de combustible también a bordo de la embarcación.

Cuando la demanda de potencia es imposible de suplir con las energías renovables (paneles solares, hidrogenador e hidrógeno almacenado en botellas) las baterías proporcionan la potencia necesaria.

Así pues, dependiendo de los requerimientos de potencia y de energía, la batería, así como la pila y las botellas de almacenaje se podrían diseñar en función de la irradiancia solar promedio que será captada por los paneles solares.

A continuación se detallará el modelado de los distintos elementos del sistema híbrido basado en energías renovables que se presenta, entre los que se encuentran la generación de energías renovables y su almacenamiento así como el modelado de la propulsión.



4.2 Elementos del modelo

4.2.1 Panel solar fotovoltaico

El modelo que se mostrará a continuación está basado únicamente en datos que podemos obtener del distribuidor escogido. La metodología usada para predecir la potencia eléctrica disponible de un panel fotovoltaico es consecuencia de un modelo fotovoltaico de cinco parámetros presentado en 2004.

Este mismo modelo fue modificado posteriormente para obtener una expresión con la cual obtener la potencia de salida máxima de una célula o módulo fotovoltaico en condiciones operativas.

La expresión, que posee mejor precisión para valores de $G > 125 \text{ W/m}^2$, como es el caso que nos ocupa, resulta de un modelo modificado por [31] para estimar la potencia máxima de salida en condiciones operativas [32]

$$P_{mp} = \frac{G}{G_{ref}} P_{mp,ref} \left[1 + \gamma (T - T_{ref}) \right]$$

Donde G es la irradiancia incidente, G_{ref} y T_{ref} representan la irradiancia así como la temperatura de referencia en condiciones estándar o standard rated conditions (SRC), respectivamente, γ es el coeficiente o factor de corrección de potencia para la temperatura nominal, $P_{mp,ref}$ es la potencia pico o máxima de salida, (esto es, cuando el producto de la tensión por la intensidad es máximo) y T es la temperatura.

4.2.2 Hidrogenerador

El hidrogenerador es un dispositivo compuesto por un brazo con una hélice en su extremo inferior y un soporte en su extremo superior que ancla al mecanismo en el espejo de popa de la embarcación.

El objetivo de los hidrogeneradores es el ahorro del combustible embarcado, para producir la energía eléctrica necesaria, mediante un sistema fácil de instalar, ligero, silencioso y limpio.

En puerto, el brazo está izado. Al salir a navegar se arria con la ayuda de un mecanismo tensor-polea, haciendo que la velocidad del barco accione la hélice, quien a su vez mueve el rotor de un alternador de imanes permanentes sin escobillas, y tras un convertidor y un regulador de tensión, se genera la tensión en continua: 12 V ó 24 V, que cargaría los bancos de baterías.

Las características de fiabilidad y la eficiencia del sistema son publicitadas por distintos suministradores: *Disvent Ingenieros*, por ejemplo, ofrece dos versiones de la marca *Watt&Sea*: una crucero y otra regata.

La principal diferencia es el uso del control electrónico de hélices de palas de paso variable en la versión regata, con la finalidad de adaptar la potencia generada por la hélice y la potencia absorbida por las baterías. Esta configuración ofrece la máxima potencia generada en cualquier régimen de velocidad del barco.



El modelado del generador marino o hidrogenador es similar al generador eólico, esto es, haciendo uso de un ajuste polinómico proporcionado por el fabricante.

4.2.3 Electrolizador

En el electrolizador, la corriente eléctrica pasa a través de unas celdas electrolíticas donde hay una entrada de agua. Debido a la electrólisis provocada por la corriente eléctrica, el agua es dividida en dos corrientes de gases distintas: hidrógeno y oxígeno. La localización de este dispositivo estará supeditada al dimensionamiento del sistema y será, o bien en tierra, o bien a bordo.

4.2.4 Pila de combustible de hidrógeno

Necesitamos una forma de energía que se pueda almacenar y convertir fácil y rápidamente en electricidad. Ya se conocen las baterías, los volantes de inercia, y los ultra-condensadores, pero el hidrógeno está emergiendo como la manera más efectiva para almacenar la energía.

El hidrógeno no es fuente primaria de energía. No es un combustible que podamos extraer directamente de la tierra como el gas natural. Pero se puede producir hidrógeno a partir del agua utilizando un electrolizador, impulsado por electricidad obtenida de la energía solar o eólica. Este electrolizador divide el agua, produciendo oxígeno puro e hidrógeno.

El hidrógeno se puede comprimir y almacenar en tanques por horas, días, e incluso por varios meses hasta que se lo necesite. El hidrógeno representa energía almacenada. El hidrógeno se puede quemar como cualquier combustible para producir calor, impulsar un motor, o producir electricidad en una turbina. Pero la celda de combustible es una manera más limpia y más eficiente de utilizar el hidrógeno. Debido a su importancia en el modelado que nos concierne, le es dedicada esta pequeña introducción.

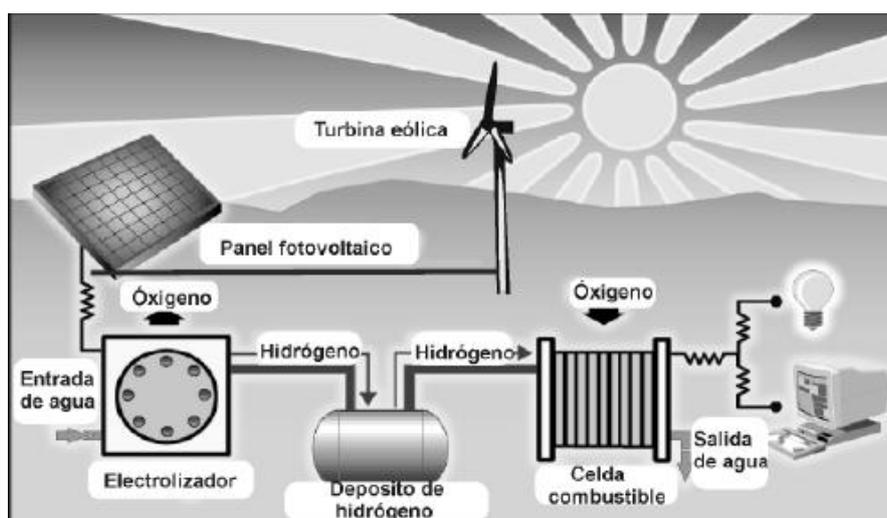


Fig. 15. Producción y uso de hidrógeno con una celda combustible



Una pila de combustible [33], también llamada célula o celda de combustible es un dispositivo electroquímico que transforma de forma directa la energía química en eléctrica. Dado que la diferencia de potencial generada por una única pila de combustible es pequeña (0.7 voltios aproximadamente), en la práctica se combinan varias de éstas en serie para conseguir que el voltaje de salida sea el adecuado para la aplicación deseada. Lógicamente, las interconexiones entre las pilas unitarias se realizan mediante materiales con alta conductividad eléctrica. De entre los numerosos tipos de apilamientos o "stacks" posibles, los más usuales son los que tienen estructura plana, aunque también los hay tubulares.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos similares a las baterías; en ambas se convierte la energía química de una reacción directamente en electricidad. Las baterías convencionales almacenan energía llevando a cabo reacciones químicas con las sustancias contenidas en ella, en las que ésta depende de la cantidad de reactivos almacenados, dejando de producirla cuando estos últimos se agotan; como consecuencia, sus electrodos se consumen. A diferencia, las celdas permiten la conversión de energía química en electricidad y calor en tanto se les provea de combustible, sin la necesidad de etapas de combustión intermedias, por lo que ofrecen altas eficiencias con mínimas emisiones de contaminantes

Parte de unos reactivos, un combustible – generalmente hidrógeno- y de un comburente – en muchos casos oxígeno – para producir agua, electricidad en forma de corriente continua y calor.

Tiene diversas partes:

- Electrodos (ánodo, donde se reduce el H_2 y cátodo, donde reacciona H^+ y O_2).
- Electrolito (separa los gases, permite el paso de iones H^+ al cátodo y separa los e^-).
- Placas bipolares (que separan las celdas, “conducen” los gases y evacúan H_2O).

La figura siguiente muestra el funcionamiento básico de una celda de combustible: el hidrógeno penetra por el electrodo negativo (ánodo) y en presencia del catalizador se disocia en iones H^+ y electrones. El oxígeno procedente del aire penetra por el electrodo opuesto (cátodo) y se disocia en iones O^{2-} . Los iones positivos del hidrógeno se escapan a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo. Si existe un camino eléctrico entre el ánodo y el cátodo los electrones lo recorrerán, produciendo corriente eléctrica. En el cátodo los iones hidrógeno, el oxígeno y los electrones, se vuelven a combinar para formar moléculas de agua [34].

El eficiente aprovechamiento de la energía solar para la generación sostenible de hidrógeno, requiere de bajos costos en los diseños, combinado con materiales funcionales y métodos de fabricación económicamente rentables a gran escala.

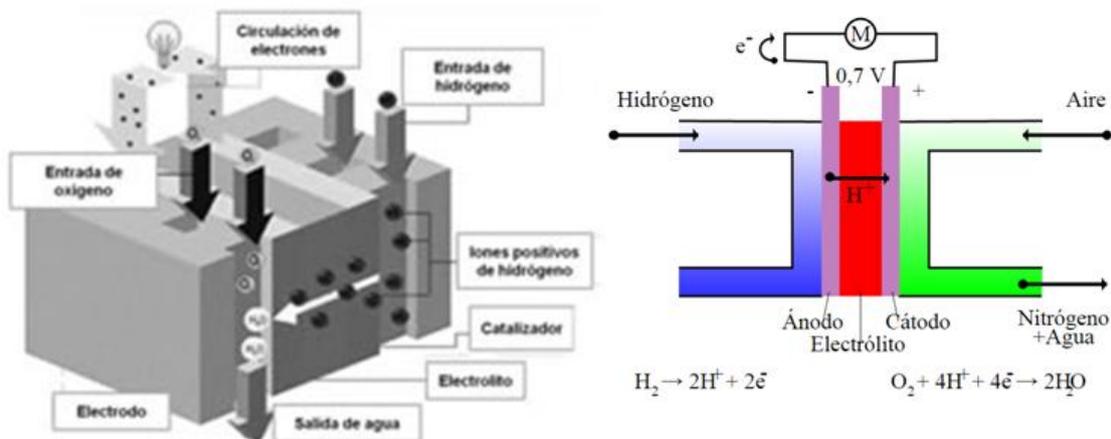


Fig. 16 y 17. Funcionamiento básico de una celda de combustible de hidrógeno

En el laboratorio del Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), como parte del *Proyecto hidrógeno Solar*, fue desarrollado un electrolizador de laboratorio para el estudio de procesos de descomposición electroquímica del agua, materiales para electrodos, diafragmas y otros elementos componentes de los equipos. Este equipo es un aporte básico para profundizar en la aplicación de materiales y tecnologías propios para la obtención de hidrógeno y oxígeno por el método de descomposición electroquímica del agua, que, según la bibliografía actual, es uno de los más utilizados a escala industrial.

Un electrolizador es básicamente un aparato en el cual se realiza la electrólisis, y de este modo se puede obtener hidrógeno, se compone de un ánodo, un cátodo, una fuente de alimentación y un electrolito, tal y como se muestra en la figura 5. Un flujo directo de corriente continua se aplica para que la electricidad fluya desde el terminal negativo de la fuente de corriente continua al cátodo, lugar en donde los electrones son consumidos por los iones de hidrógeno (protones) para formar hidrógeno, para mantener la carga eléctrica en equilibrio los iones de hidróxido se transfieren a través de la solución electrolítica al ánodo, donde los electrones regresan a la terminal positiva de la fuente de corriente continua.

La celda elemental de H₂ está compuesta por los elementos representados en la figura siguiente:

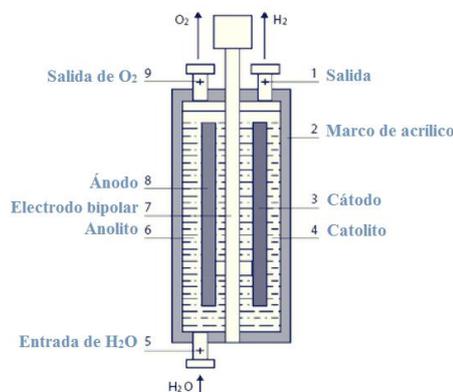


Fig. 18. Esquema de una celda elemental



4.2.5 Bateria

La batería o conjunto de baterías son los dispositivos electrónicos que se encargan de almacenar y suministrar la energía eléctrica obtenida gracias a las diversas fuentes de origen renovable que conforman el sistema. Las baterías, por tanto, son el medio más usado para este fin, alcanzando altos rendimientos eléctricos entre la energía que suministran y la que acumulan. Además, se puede recurrir a la energía almacenada en el momento que se requiera, y en las cantidades que se requiera, de tal forma que cuanto mayor sea la demanda de corriente eléctrica, menor será la duración de la energía eléctrica en su interior, y viceversa.



CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DEL MODELO A UNA PLATAFORMA FLOTANTE ROBOTIZADA



5 Aplicación del modelo a una plataforma flotante robotizada

5.1 Introducción

Como recordamos anteriormente, el siguiente trabajo trata de mostrar la viabilidad de un modelo conceptual de embarcación con un sistema híbrido eléctrico (pila de combustible – baterías).

Como ya sabemos, el sistema híbrido de pila de combustible tiene una batería en paralelo con el sistema de pila de combustible. El funcionamiento del mismo permite un uso más eficiente de la alta densidad de energía de la pila y de la alta densidad de potencia de la batería.

Cuando la demanda de potencia es alta e inalcanzable de suplir con las energías renovables, las baterías proporcionan la potencia necesaria. Cuando la demanda de potencia es baja, las baterías se recargarán. Así pues, dependiendo de los requerimientos de potencia y de energía, la pila se podría diseñar en función de la irradiancia solar promedio que será captada por los paneles solares. Por contraparte, la batería podrá proporcionar potencia adicional cuando la irradiancia genere insuficiente energía para mover la embarcación.

En este capítulo se desarrollarán las ecuaciones necesarias para la aplicación real y el diseño de una embarcación a modo de plataforma flotante robotizada.

Para ello se eligen algunos de los modelos propuestos en el capítulo anterior, lo que deja el modelo de la plataforma constituido por los siguientes componentes:

1. Módulo fotovoltaico.
2. Hidrogenerador.
3. Batería principal y batería de reserva.
4. Botellas de almacenamiento de hidrógeno.
5. Sistema propulsivo eléctrico.
6. Electrolizador (en tierra).
7. Pila de combustible.



5.2 Elementos del sistema

5.2.1 Módulo fotovoltaico

El motivo esencial por el cual se pretende diseñar la plataforma solar flotante móvil es para ubicar sobre ella un panel fotovoltaico de dimensión tal que sea capaz de abastecer los requerimientos energéticos del ROV.

A continuación se procederá a la determinación de la radiación global media mensual, esto es, los Vatios por unidad de superficie de panel solar, o irradiancia, con el fin de estimar los metros cuadrados de células solares necesarias a colocar.

La irradiancia [2], por tanto, es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m². Y se define como:

$$I = \frac{P_{inc}}{S}$$

Donde:

P_{inc} es la potencia incidente.

S es la superficie en que incide la onda.

Para poder definir la radiación global hay que conocer previamente, cada una de sus componentes:

- Radiación Directa. Proviene del Sol sin cambiar su dirección.
- Radiación Difusa. Cambia de dirección por reflexión y dispersión.
- Radiación Albedo. O reflejada antes de llegar al panel solar.

A la suma de estas tres componentes se le llama Radiación Global.

Por ejemplo, en un día nublado, toda la radiación es difusa en la superficie terrestre, sin embargo, en un día totalmente despejado siempre hay algo de radiación difusa además de la directa.



En nuestro caso, además, podemos anticipar que la radiación albedo será nula, debido a la no inclinación de la superficie de captación solar. Véase en el siguiente esquema los tres tipos de radiación antes mencionados [35].

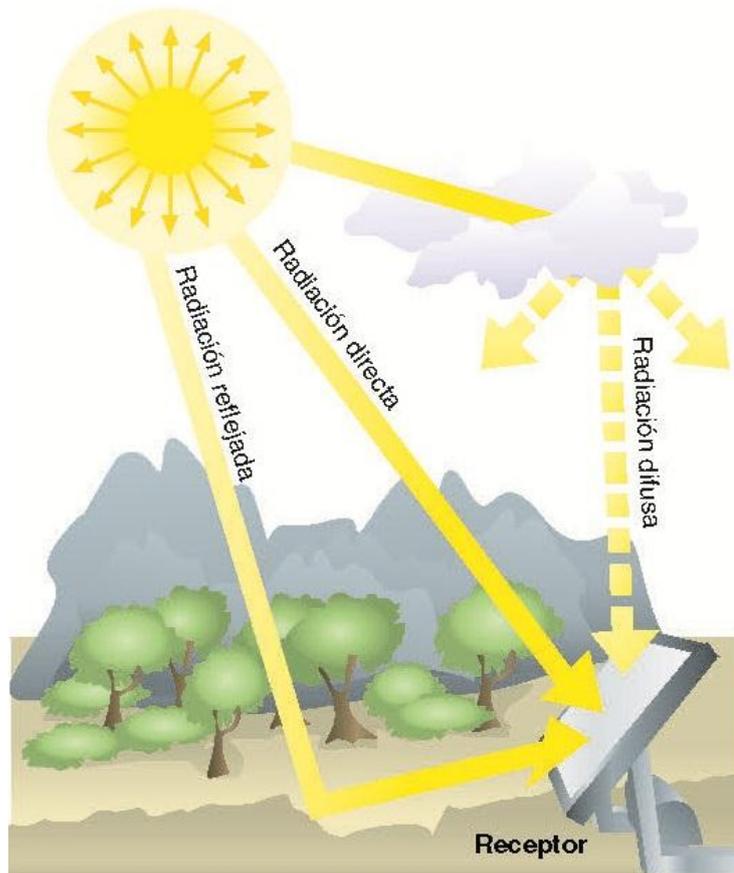


Fig. 19. Esquema de captación de las tres clases de radiación solar

No obstante, tras comentar un poco el significado de irradiancia, debemos saber que realmente, el modelado de un módulo o panel fotovoltaico está normalmente basado en una aproximación no lineal de las curvas I-V obtenidas de un circuito fotovoltaico ideal (array).

Aunque en el capítulo 2 se ha hecho una revisión más enfocada a los avances con células DSSC, no usaremos dichas células para conformar el panel solar de la plataforma flotante robotizada, esto es debido en primer lugar a su baja eficiencia actualmente, y en segundo lugar a su limitada comercialización.

Por otra parte, gracias al exhaustivo estudio realizado en [36] y [37], por parte de la *NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center*, y *weatherbase*, respectivamente, se consultan los valores de irradiancia solar para la localidad de Cartagena.

Un módulo fotovoltaico, en condiciones operativas, suele operar a algo más que 25 °C y recibe un valor bastante más inferior a 1000 W/m². Para determinar la potencia de



salida de la célula, se requiere conocer la temperatura a la que ésta se encuentra en condiciones de trabajo.

Para ello se hace uso de la Nominal Operating Cell Temperature (NOCT), la cual queda definida como la temperatura alcanzada por células en circuito abierto pertenecientes a un módulo solar bajo las siguientes condiciones [38]:

- Irradiancia = 800 W/m^2
- Temperatura del aire = 20°C
- Velocidad del viento = 1 m/s
- Montaje = open back side

Y el valor típico para un módulo promedio es de unos 48°C aproximadamente.

Teniendo en cuenta dichos datos se puede usar la siguiente expresión para calcular la temperatura operativa de la celda

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{80} \cdot S$$

Siendo T la temperatura referida al aire en $^\circ\text{C}$, $NOCT$ la temperatura nominal de la célula en condiciones operativas en $^\circ\text{C}$ y S la irradiancia en mW/cm^2 .

Se muestran los cálculos en la siguiente tabla:

MES	IRRADIANCIA promedio mensual ($\text{Wh/m}^2 \cdot \text{día}$)	HORAS DE SOL / día	IRRADIANCIA en W/m^2 en un día entero	IRRADIANCIA EN H DE SOL (W/m^2)
ENERO	2700,00	9,88	112,50	273,28
FEBRERO	3630,00	10,80	151,25	336,11
MARZO	4840,00	11,90	201,67	406,72
ABRIL	6180,00	13,10	257,50	471,76
MAYO	6840,00	14,10	285,00	485,11
JUNIO	7620,00	14,70	317,50	518,37
JULIO	7610,00	14,14	317,08	538,19
AGOSTO	6720,00	13,60	280,00	494,12
SEPTIEMBRE	5380,00	12,40	224,17	433,87
OCTUBRE	3970,00	11,20	165,42	354,46
NOVIEMBRE	2790,00	10,20	116,25	273,53
DECIEMBRE	2330,00	9,63	97,08	241,95
AVERAGE	5050,83	12,14	210,45	416,13

Tabla 2. Datos y valores promedio de la irradiancia y las horas de sol

Tenemos un valor medio mensual de $5050.83 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \cdot \text{día})$, como un día tiene ciertas horas solares, bastaría dividir entre dicho valor para convertirlo en W/m^2 .



A continuación se muestran las especificaciones del módulo solar policristalino que se usará como modelo para el cálculo de la potencia máxima en condiciones operativas así como de la superficie necesaria para llevar a cabo el diseño de la plataforma objeto de este proyecto.

ELECTRIC SPECIFICATION			
Model Type	VS245P-60	VS250P-60	VS255P-60
Max. Power (Pmax)	245Wp	250Wp	255Wp
Max. Power Voltage (Vmp)	29,9V	30.1V	30.3V
Max. Power Current (Imp)	8.20A	8.31A	8.42A
Open-Circuit Voltage (Voc)	37.7V	37.9V	38.0V
Short-Circuit Current (Isc)	8.56A	8.64A	8.72A
Module Efficiency (%)	14.98%	15.29%	15.59%
Power Tolerance		0/+3%	
Max. System Voltage		1000V	
Max. Series Fuse Rating		15A	
Temp. Coefficient of Pmax		-0.44%	
Temp. Coefficient of Voc		-0.33%	
Temp. Coefficient of Isc		0.04%	
NOCT		48 +/-2%	

These values are effective for irradiation 1000W/m2, AM 1.5 and a cell temperature of 25 °C (standard test conditions)

MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Cell Type	Multy-crystalline 156 x 156 mm
Nº of Cells	60 (6 x 10)
Module Dimension	1650 x 991 x 50 mm
Weight	19.5 Kg
Glass	3.2 mm, High transmission, low iron, tempered
Frame	Anodized aluminium alloy
Junction box	With 6 bypass diode, IP67 resistance level
Cable	PVF-1, 1 x 4.0 mm ² , 900 mm length
Cell encapsulation	EVA (ethylene-vinyl-acetat)

OPERATING CONDITIONS	
Temp. cycling range	-40°C / 80°C
Humidity freeze, famp heat	85% RH
Maximun surface load capacity	5400 Pascal
Hailstone impact resistance	Max. diameter 25 mm impact speed of 83 Km/h

Tabla 3. Modelo de célula VS-60P PV con sus especificaciones, VISEL PLACAS S.L.
[39]



Conociendo pues, los datos necesarios, se construyó una tabla para poder hallar la potencia de salida en función del tiempo y estudiar su evolución junto con la del resto de parámetros influyentes.

MES	IRRADIANCIA promedio mensual (Wh/m ² *día)	IRRADIANCIA EN H DE SOL (W/m ²)	POTENCIA DE SALIDA en 9 horas de sol (W)
JANUARY	2700,00	273,28	70,46
FEBRUARY	3630,00	336,11	85,80
MARCH	4840,00	406,72	102,15
APRIL	6180,00	471,76	116,37
MAY	6840,00	485,11	118,00
JUNE	7620,00	518,37	123,43
JULY	7610,00	538,19	126,17
AUGUST	6720,00	494,12	116,19
SEPTEMBER	5380,00	433,87	104,02
OCTOBER	3970,00	354,46	87,32
NOVEMBER	2790,00	273,53	69,33
DECEMBER	2330,00	241,95	62,33
AVERAGE	5050,83	416,13	102,39

Tabla 4. Valores de la potencia obtenida



En el modelo fotovoltaico desarrollado se hizo un estudio de los datos citados para estaciones del año apuestas. A continuación se muestran gráficamente los resultados.

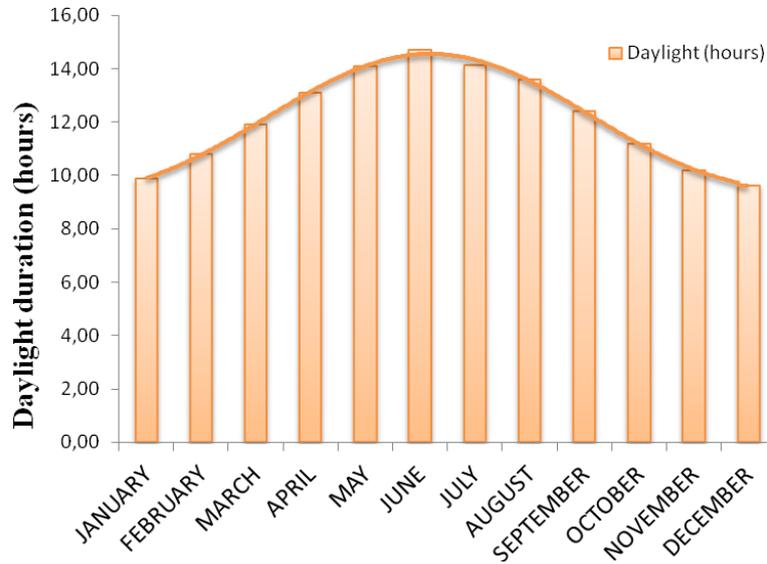


Fig. 20. Distribución de horas solares a lo largo del año

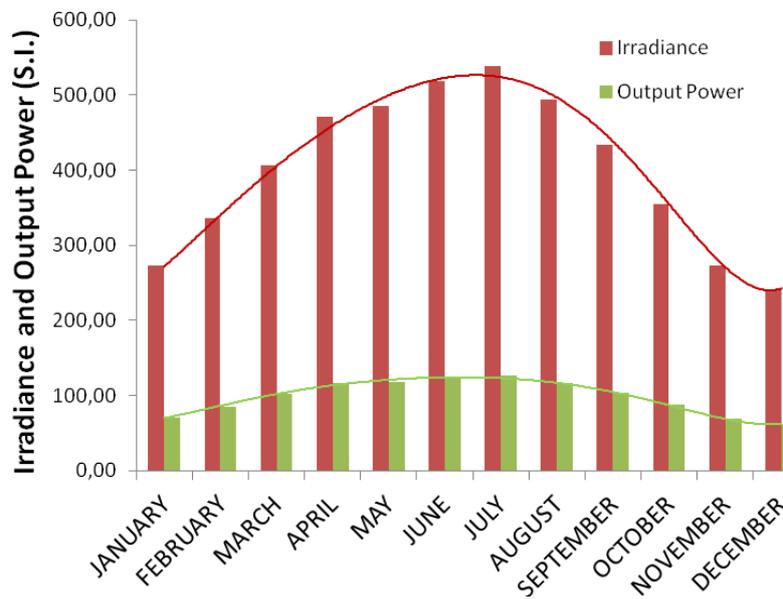


Fig. 21. Irradiancia y Potencia durante el año

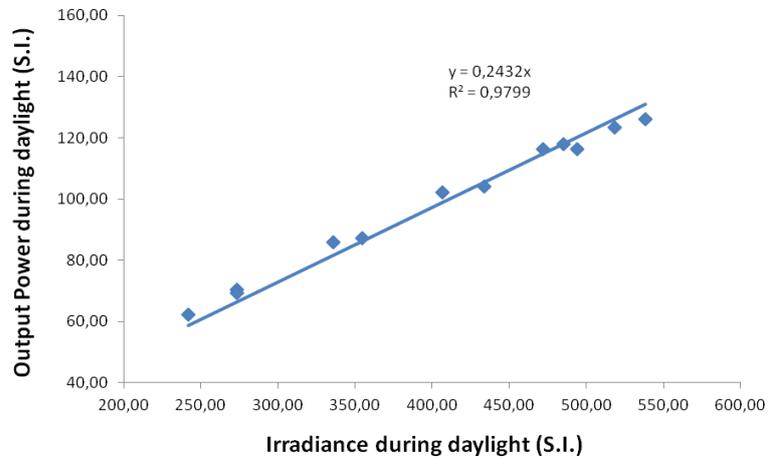


Fig. 22. Potencia como función lineal de la Irradiancia

En los gráficos anteriores [Fig.20], [Fig.21] y [Fig.22], la irradiancia usada es la promedio mensual de la radiación total incidente en una superficie horizontal obtenida en intervalos de 3 horas en cada mes dado, promediada para cada mes durante un periodo de 22 años.

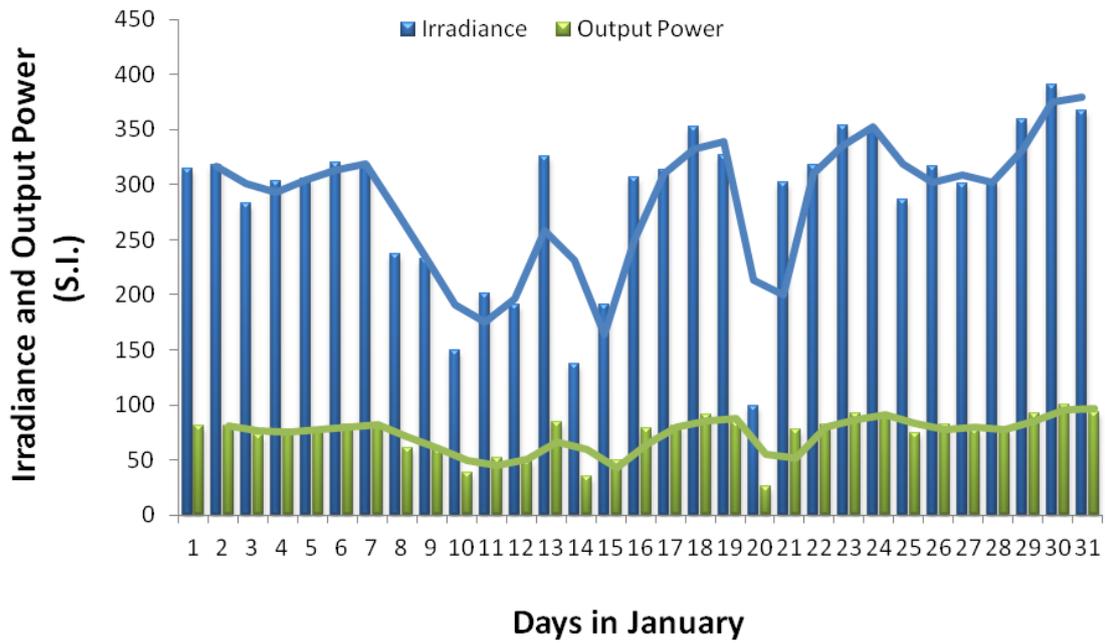


Fig. 23. Irradiancia y Potencia en el mes de Enero

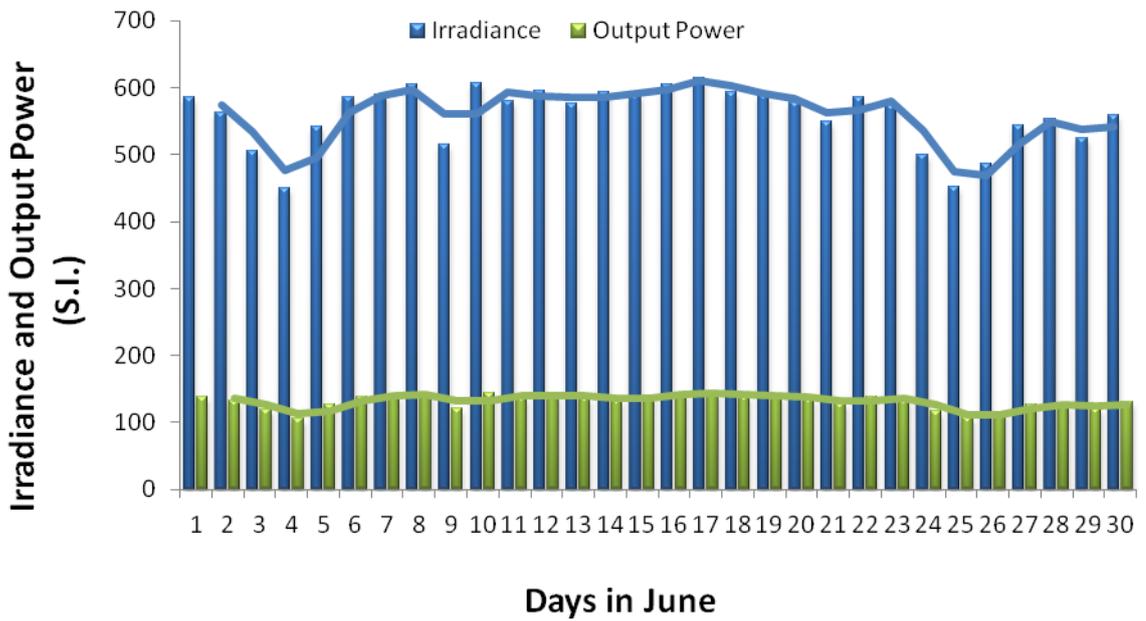


Fig. 24. Irradiancia y Potencia en el mes de Junio

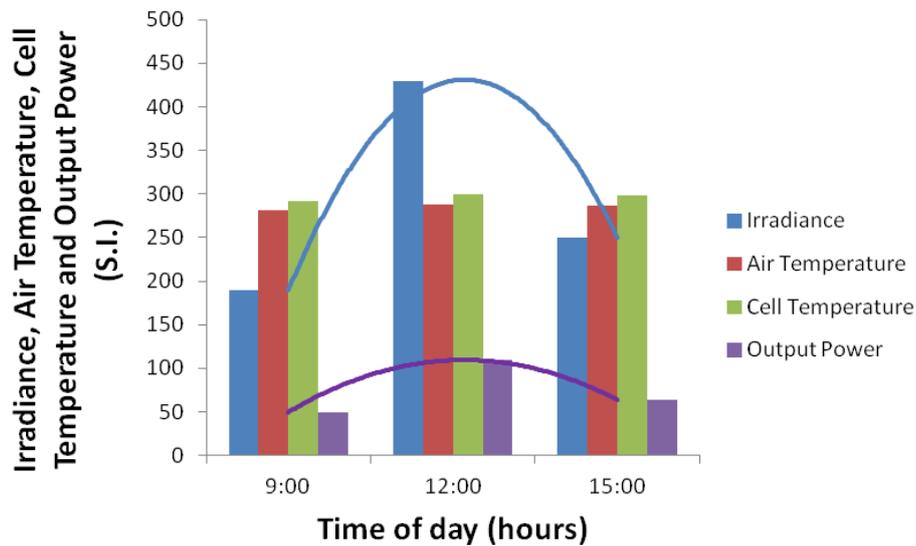


Fig. 25. Diversos parámetros a lo largo de las horas solares de un día arbitrario del mes de Enero

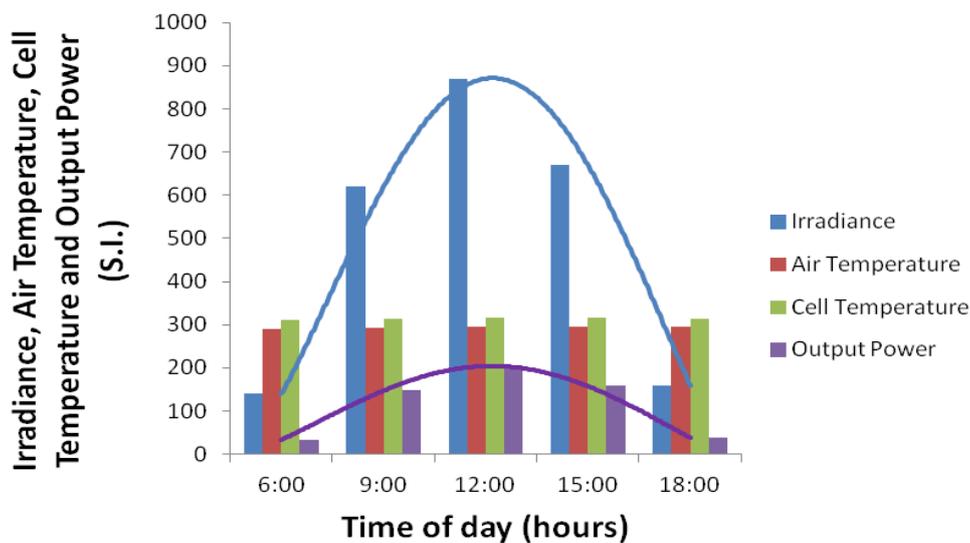


Fig. 26. Diversos parámetros a lo largo de las horas solares de un día arbitrario del mes de Junio

Por otra parte, los gráficos mostrados desde [Fig-23] a [Fig.26] corresponden al año 2000. En ellos se observa muy claramente y, como era de esperar, que las características climáticas son más favorables y estables en los meses de verano que en los de invierno.

Así que, tomando 102.39 W según datos en [Tabla 4] y conociendo la superficie del módulo evaluado $1.65 \times 0.991 \text{ m}^2$ podríamos calcular la superficie de panel solar que necesitaríamos para suplir los 3000 W de potencia base que se fijaron anteriormente



para permitir operar un dispositivo submarino robotizado mediante la energía solar proveniente de la plataforma, tal y como se dijo en el capítulo anterior.

Para ello, serían necesarios 18 módulos de 255 Wp, lo que a su vez se traduce en una superficie fotovoltaica requerida de 57.49 m² (asumiendo un +20% de margen de potencia).

Finalmente, la plataforma flotante podría quedar en un principio con las dimensiones de 14 × 5 m (eslora × manga). Teniendo esto en cuenta, en un capítulo posterior, se mostrará el diseño conceptual de la plataforma mediante software especializado.

Abajo se muestra la configuración del montaje de los paneles solares:

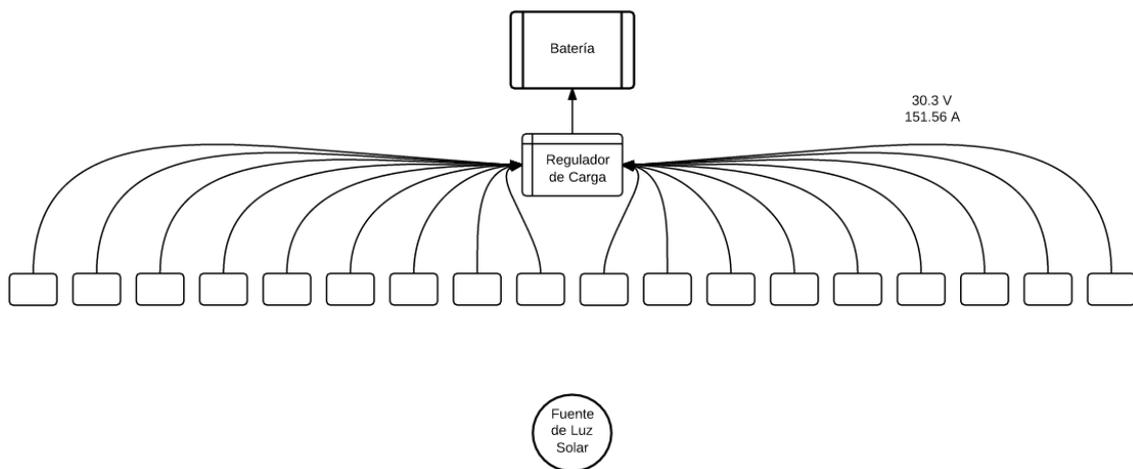


Fig. 27. Diagrama eléctrico base de los paneles solares, regulador y batería

Donde se aprecia una configuración en paralelo. El regulador de carga regularía la diferencia de tensión y/o amperaje entrante al sistema de baterías que funciona a 12 V.



Hidrogenerador

Se escogerá un hidrogenerador de la casa *Watt&Sea* de las siguientes características [40]:

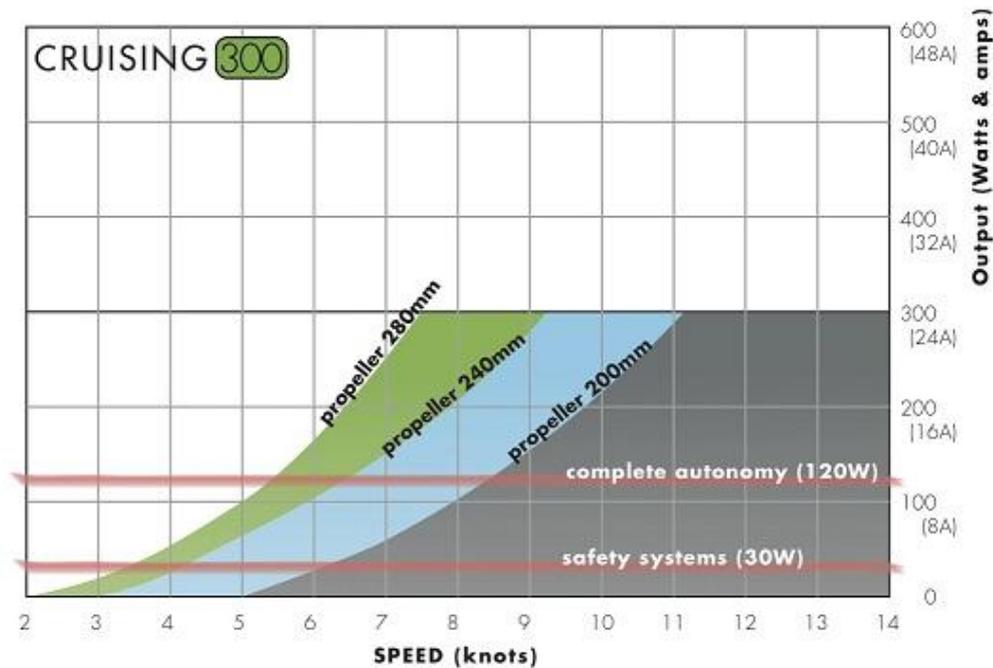


Fig. 28. Curvas potencia – velocidad de modelos de hidrogeneradores [41]

- Salida nominal de 300 W - 24 A en 12 Vcc. Alternador magnético permanente sin escobillas fabricado por Leroy Somer - (sin desgaste, mejor salida y ligero).
- Ideal para navegación de Crucero - El rango de velocidad de uso es de 2-10 nudos. La velocidad máxima de uso de 20 nudos. La longitud de la pala es de 610 mm y longitud total con el soporte de 920 mm.
- El peso del hidrogenerador es de 6.3 kg y el convertidor 1.5 kg.
- La hélice es de 3 palas y 280 mm. Existen unas hélices opcionales de 240 mm y 280 mm
- Longitud del cable: 2 m.
- El precio de este modelo concreto sería de unos \$3840.

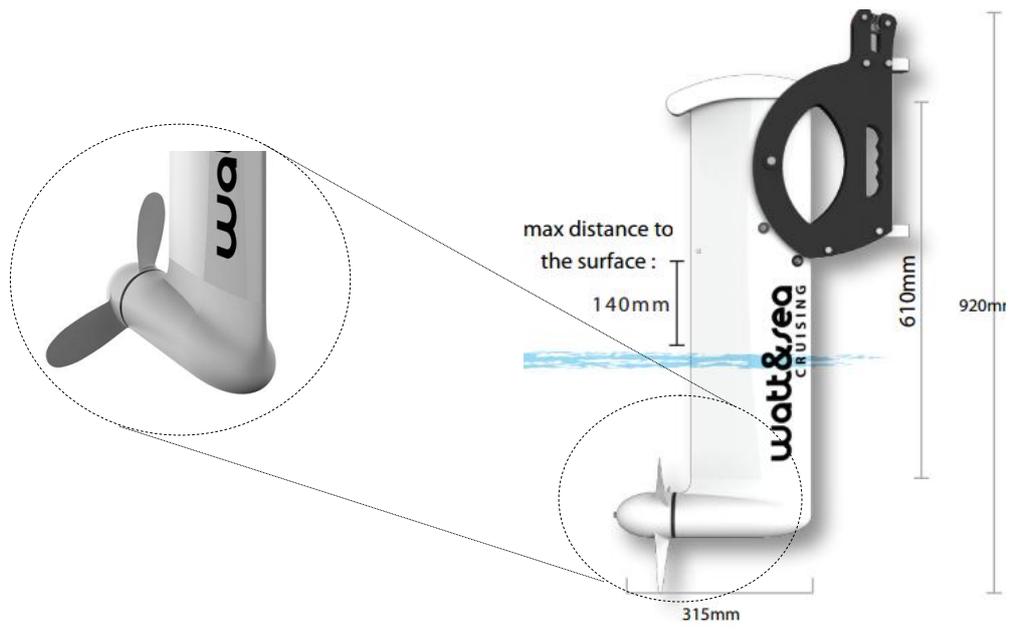


Fig. 29. Hidrogenerador escogido para la plataforma, con detalle de la hélice [41]



5.2.2 Batería principal y batería de reserva.

La batería es un elemento crucial en el sistema. Habrá una batería principal que será la que siempre estará operando como elemento central del sistema y del ciclo renovable de energía.

A modo de comodín de emergencia, tendremos una segunda batería de reserva de iguales capacidades. La utilidad de la misma se pondrá de manifiesto cuando la potencia de origen renovable sea insuficiente, o bien no se tenga capacidad para aportar energía gracias al hidrógeno almacenado.

TAB MOTION
de Placa Plana es una batería de semitracción abierta con placas positivas empastadas.

Baterías de semitracción TAB MOTION de Placa Plana. Este tipo de baterías están diseñadas para sistemas solares, sistemas de bombeo y riego, instalaciones fotovoltaicas y eólicas de baja potencia, barcos, sillas de ruedas, máquinas de limpieza, caravanas y autocaravanas, sistemas de alarma, UPS, etc. ...

VENTAJAS:

- + Excelente resistencia a las vibraciones,
- + Alta Capacidad de descarga,
- + De alto rendimiento en difíciles condiciones de trabajo,
- + Económicas y fiables ...

APLICACIONES:

- + Sillas de ruedas
- + Aplicaciones para camiones,
- + Caravanas y autocaravanas,
- + Carretillas,
- + Barcos,
- + Máquinas de limpieza,
- + Sistemas solares ...

CARGA:

- + TAB Motion batteries se puede recargar con 50 Hz o cargador HF.
- El perfil de carga es Wa; WoWa, IUa; Acc WUa.
- Según la norma DIN 41773 y 41774.



TAB MOTION DE PLACA PLANA Número de ciclos: 300 (IEC / EN 60254-1 / 25 °C)

TIPO de Batería	VOLTAGE (V)	LxWxH (mm)	PESO (kg)	C5 (Ah)	C100 (Ah)
50P	12	242x175x190	17,0	50	70
60P	12	278x175x190	19,5	60	80
85P	12	353x175x190	25,0	85	115
80P	12	312x175x212	23,9	80	115
105P	12	344x172x212/234	29,9	105	125
110P	12	344x172x262/284	37,2	110	155
110P MAC	12	509x175x182/208	35,8	110	150
150P	12	512x223x194/220	44,6	150	190
190P	12	518x273x214/240	61,3	190	245

Fig. 30. Batería de la casa TAB [42]

La batería auxiliar escogida corresponde al último modelo (190P), de mayor capacidad. El modelo tiene una autonomía de 1 hora a 190 A, es decir, es capaz de dar, teniendo en cuenta que $P = V \cdot I$, una potencia de salida de 2280 W durante 1 hora.

La segunda de ellas será del modelo 60P, esto es, 720 Wh, y ocupará el puesto de batería principal a bordo, con lo cual dado el caso llegarían a proporcionar 3000 W durante 1 hora, que resulta ser justamente la potencia base fijada del proyecto, y permitiría al buque incluso navegar de noche durante más de una hora.

La capacidad es sumada porque se está suponiendo ambas baterías instaladas en paralelo. En esta situación el voltaje permanecería constante y contaría con la ventaja de que en caso de que una de las baterías quedase inutilizada la otra puede continuar usándose, es decir, dado el improbable caso, porque se debe recordar que también existe



hidrógeno como forma de energía a bordo, la batería de reserva podría ejercer de sustituto en caso de estropearse la principal.

Se estudió la potencia en la batería auxiliar en dos casos diferentes de funcionamiento del sistema. El primero correspondiente a un día arbitrario de Enero y el segundo a uno de Junio, como se hizo con el modelo fotovoltaico, ambos correspondientes al año 2000.

Las curvas obtenidas de la potencia en la batería auxiliar en función del tiempo se muestran a continuación:

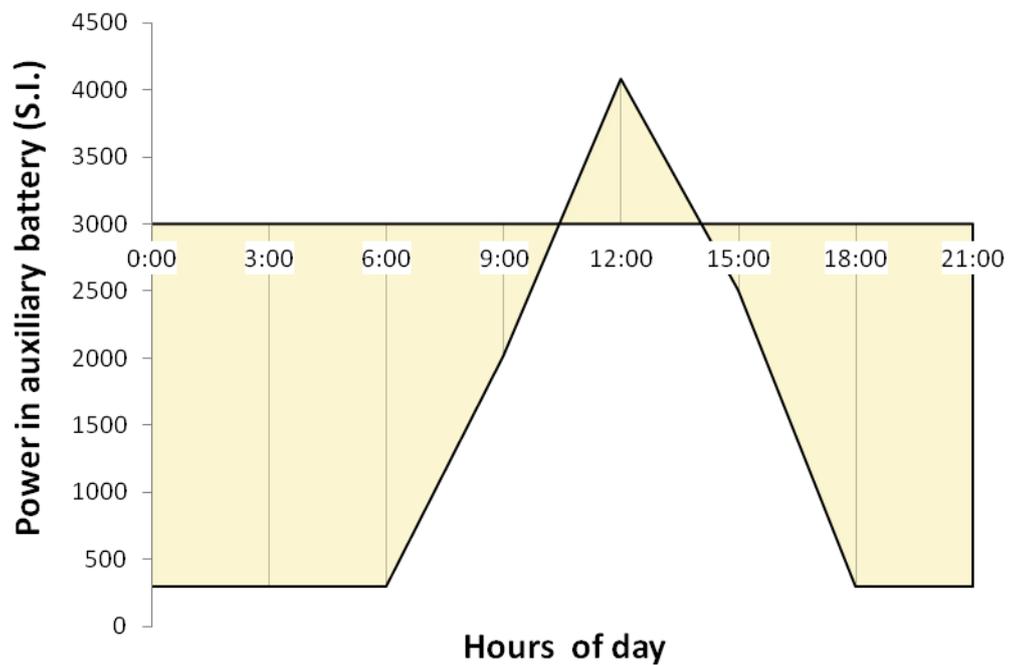


Fig. 31. Potencia en función de la hora del día en un día arbitrario del mes de Enero

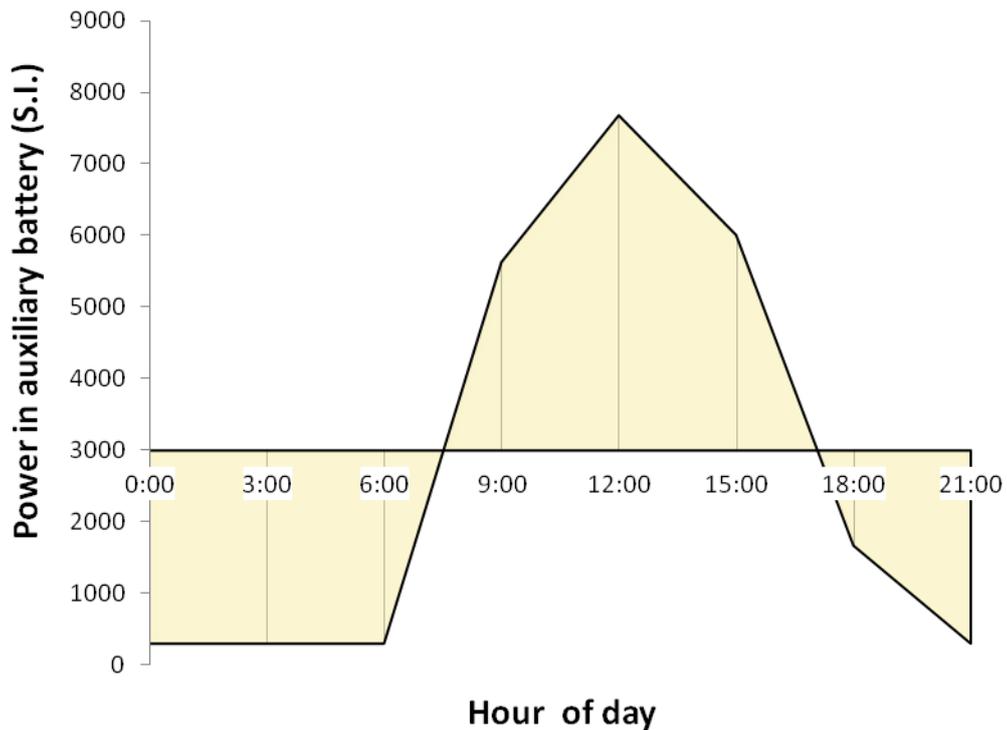


Fig. 32. Potencia en función de la hora del día en un día arbitrario del mes de Junio

Por otro lado, es oportuno disponer de dos reguladores de carga situados entre los paneles solares y el sistema de baterías. Se escogerán del siguiente modelo, cada uno contando con la mitad del número total de paneles solares, para repartir la energía convenientemente y poder regular la potencia total que los paneles proporcionan. De esta forma, cada regulador podría acoger una corriente de 75.78 A a 30.3 V, es decir, una potencia de 2296.13 W, la cual está dentro de las especificaciones del fabricante.



Fig. 33. Regulador solar ChargeMaster SCM-60 MPPT-MB de MASTERVOLT [43]



El regulador fotovoltaico es el encargado de controlar el estado de carga de la batería, permitiendo así tener controlada las sobrecargas de la batería o las descargas. La finalidad del regulador es proporcionar mayor durabilidad a la batería evitando hacerle descargas no adecuadas o sobre tensiones. El regulador de carga mide la temperatura de la batería y ajusta el proceso de carga en función de dicha temperatura, lo cual permite una carga segura y rápida. Por lo tanto, la batería se mantiene siempre en buen estado.

Las características del regulador escogido son adecuadas para el proyecto que se está tratando y quedan resumidas a continuación:

- Excelente eficiencia para cargar más rápidamente las baterías.
- Cargan hasta un 30% más rápido que la tecnología PWM.
- Diseñado para paneles económicos de 60 celdas.
- Capacidad para configuraciones de paneles solares de entre 600 y 3600 Wp.
- Detección automática de tensión (12/24/48 V).
- Carga flexible.
- Sensor de temperatura de las baterías para prolongar su vida útil.
- Compatibles con todo tipo de baterías.
- No necesita relé de seguridad para baterías de Ión de Litio.
- Supervisión y control mediante MasterBus.
- Pantalla amplia y brillante.
- Funcionamiento seguro y muy silencioso.
- Carcasa resistente, apta para ambientes húmedos (IP23).



5.2.3 Pila de combustible

De forma inversa a la función que realiza el electrolizador, tenemos la pila de combustible que, tal y como se detalló anteriormente, es capaz de generar potencia eléctrica a partir del suministro de hidrógeno.

El proceso electroquímico que se va a modelar es de relativamente alta eficiencia y mínimo impacto ambiental. En efecto, dado que la obtención de energía en las pilas de combustible está exenta de cualquier proceso térmico o mecánico intermedio, estos dispositivos alcanzan eficiencias mayores que las máquinas térmicas, las cuales están limitadas por la eficiencia del Ciclo de Carnot. La eficiencia energética de una pila de combustible está generalmente entre 40-60%, o puede llegar hasta un 85% en cogeneración si se captura el calor residual para su uso. Por otra parte, dado que el proceso no implica la combustión de los reactivos, las emisiones contaminantes son mínimas.

Es importante establecer las diferencias fundamentales entre las pilas convencionales y las pilas de combustible. Las baterías convencionales son dispositivos de almacenamiento de energía, es decir, el combustible está en su interior y producen energía hasta que éste se consume. Sin embargo, en la pila de combustible los reactivos se suministran como un flujo continuo desde el exterior, lo que permite generar energía de forma ininterrumpida.

En principio, aunque las pilas de combustible podrían procesar una amplia variedad de reductores y oxidantes; cualquier sustancia que se pueda oxidar en una reacción química y que se pueda suministrar de forma continua (como un fluido) al ánodo de una pila de combustible, puede ser un reductor y del mismo modo, el oxidante podría ser cualquier fluido que se pueda reducir (a una velocidad adecuada) en la reacción química que tiene lugar en el cátodo.



Las propiedades de la pila escogida se recogen a continuación [43]:

Model program

Fuel cell	S-50	S-750	S-1500	S-3000	S-3000 Telecom
Nominal power	50 W	750 W	1500 W	3000 W	3000 W
Current	0-5 A	0-80 A	0-80 A	0-80 A	0-80 A
Voltage output (raw)	12-18 VDC ¹	11-18 VDC ¹	22-36 VDC ¹	43-72 VDC ¹	-57 to -43 VDC ¹
Dimensions (mm)	471x178x413 (19" width, 4 U height)		471x178x513 (19" width, 4 U height)		
Weight (kg)	12	13	14	16	16
Operating time 12-pack ²	100 days	10 days	5 days	60 h	60 h

¹ Raw output voltage span can be specified to a smaller range in software to be compatible with any suitable battery or sensitive equipment

² At nominal power, 12-pack of standard cylinders, pressure 200 bar (e.g. AGA item no. 1541)

Fuel (hydrogen)	4-pack	12-pack	24-pack
Energy	40 kWh	120 kWh	240 kWh
Energy @ 48 VDC	800 Ah	2400 Ah	4800 Ah

Performance

Efficiency (at nominal power)	40 %
Efficiency (at 40 % load)	48 %
FC Start-up time ³ (>0 °C)	5-35 s
FC Start-up time ³ (<0 °C)	1 min - 15 min
Transient behaviour 20%-100% load	< 0,1 s
Power to load at black-out	Seamless with battery

³ Actual start-up time depends on conditions and application. Contact Cellkraft for more information.



Tabla 5 y Fig. 34. Especificaciones de la pila de combustible (1).

**Technical data**

Fuel	
Quality	Industrial grade hydrogen
Supply pressure	2-8 bar(g)
Connection	6 mm or ¼" Swagelok®
Exhaust	
Composition	Humid air
Temperature	Typical 30-50 °C
Operating conditions	
Ambient temperature in use	-33 till +45 °C
Ambient temperature in storage	-40 till +60 °C
Ambient humidity in use	Non condensing
Ambient humidity in storage	Non condensing
Electrical interface	
Power	Screw terminals (16 mm ²)
RS 232	9 pin female D-sub connector (wiring defined in manual)
Conformance	
General	CE-certification (EMC 89/336/EEC, LVD 93/68/EEC)
Power supply interface*	ETSI EN 300 132-2
Environment*	ETSI EN 300 019-1-3

*S-3000 Telecom

Tabla 6. Especificaciones de la pila de combustible (2).

El modelo escogido es el S-750 (750 W).

Como se ha dicho, el consumo de hidrógeno de la pila es función de la potencia que podemos obtener de la misma. Además, según el fabricante la eficiencia global es relativamente estable en un valor del 43% entre el 20% y el 100% de la carga nominal basada en el PCI del hidrógeno. Sabiendo todo esto, se puede calcular la potencia generada en función del flujo de hidrógeno generado por el electrolizador.

El PCI del hidrógeno es 120 KJ/g y 1 L de hidrógeno equivale aproximadamente en términos de energía a 10.8 KJ.

Como la eficiencia proporcionada por el fabricante es del 43%, la energía obtenida de 1 L de hidrógeno es:

$$0.43 \cdot 10.8 \text{ kJ} = 4.64 \text{ KJ}$$

O lo que es lo mismo, dividiendo por la unidad de tiempo:

$$1 \text{ LPS de hidrógeno o } 60 \text{ LPM equivalen a } 4.64 \text{ kW}$$



5.2.4 Sistema de almacenamiento del hidrógeno

Los hidruros metálicos son muy atractivos para el almacenamiento de hidrógeno porque son seguros y tienen unas buenas características de almacenamiento. Actualmente muchos de los hidruros metálicos disponibles comercialmente son hidruros metálicos de tierras raras, con capacidades de almacenamiento de hidrógeno de entorno al 1,4% en peso, lo que hace que estos materiales sean más eficientes en volumen que el almacenamiento de hidrógeno como gas comprimido o como hidrógeno líquido.

La idea es que el sistema de almacenamiento donde se almacena el hidrógeno esté parcial o totalmente cargado.

Para jugar con los LPM de hidrógeno y con la potencia generada puede instalarse una boquilla de sección regulable que disminuya o aumente la presión y por tanto el caudal de hidrógeno que sale del sistema de almacenamiento hacia la pila en función de la demanda de potencia.

Sin embargo el sistema de almacenamiento debe tener unas dimensiones finitas y limitadas por el espacio que ocupa el mismo.



En *ariema* [44] cuentan con botellas para hidrógeno como se muestra a continuación donde se observa la presión de descarga es óptima para ajustarse a la de entrada de la pila de combustible y poder regular así el caudal de salida de la botella o de entrada a la pila:

Hbond 5000 / 7000

✓ **Depósitos de gran capacidad.** LabTech también puede construir depósitos a medida.

Características de los depósitos

Material del recipiente:	aleación EN-AA-6063			
Intercambiador de calor interno:	cobre			
Válvula de seguridad:	25 bar			
Temperatura de carga:	25 °C			
Diámetro:	169 mm			

	Hbond 5000L	Hbond 5000H	Hbond 7000L	Hbond 7000H
Capacidad de hidrógeno:	5000 NL	5000 NL	7000 NL	7000 NL
Longitud:	1,10 m	1,10 m	1,65 m	1,65 m
Peso total:	76 kg	76 kg	98 kg	98 kg
Peso de aleación:	34 kg	34 kg	46 kg	46 kg
Presión de carga:	15 bar(g)	5 bar(g)	15 bar(g)	5 bar(g)
Presión de descarga:	2 a 10 bar(g)	2 a 5 bar(g)	2 a 10 bar(g)	2 a 5 bar(g)
Temperatura de descarga:	10-30 °C	65-75 °C	10-30 °C	65-75 °C

Fig. 35. Especificaciones de la botella



Primero se calcularán los moles contenidos en 5000 NL teniendo en cuenta que los litros normales vienen dados en condiciones denominadas normales, esto es, 1 atm y 273.15 K. Por tanto, tomando estas condiciones el volumen es 5000 L y según la Ley de los gases ideales se cumple que

$$PV = nRT$$

Donde P es la presión a la que está sometido el gas en cuestión, V el volumen que ocupa, n el número de moles del mismo, R la constante universal de los gases ideales y T la temperatura a la que se encuentra.

Sustituyendo y despejando queda:

$$1 \cdot 5000 = n \cdot 0.08205746 \cdot 273.15 \rightarrow$$
$$n = \frac{5000}{0.08205746 \cdot 273.15} = 221.7 \text{ moles}$$

Por tanto también podríamos decir que la capacidad de la botella es de 221.7 moles de hidrógeno.

Volumen de una botella evaluado en condiciones de carga

Ahora bien, como dichos moles no varían, pero sí el volumen que ocupan siempre y cuando cambien la presión o la temperatura, podemos hallar el volumen real que ocuparían en las condiciones de entrada o carga:

$$P = 15 \text{ bar} = 14.80385 \text{ atm}$$

$$T = 298.15 \text{ K}$$

$$14,80385 \cdot V = 221.7 \cdot 0.08205746 \cdot 298.15 \rightarrow$$
$$V = \frac{221.7 \cdot 0.08205746 \cdot 298.15}{14.80385} = 366.39 \text{ L}$$

Es lógico pues, ya que al aumentar la presión y la temperatura, el gas se comprime ocupando menos volumen.

Este valor también es la capacidad de la botella pero referida a gas a 15 bar de presión y temperatura de 298.15 K (aire de carga proveniente del compresor).

Tiempo de descarga teniendo condiciones mínimas de irradiancia y ambas baterías agotadas

Sería interesante saber el tiempo de descarga de las botellas del modelo. Por lo que se procede a su cálculo. Para ello se simulará un caso de ejemplo, que será teniendo condiciones mínimas de irradiancia y ambas baterías agotadas.

Fijaremos la potencia a obtener por parte de botellas en el 50% de la potencia total fijada como base, esto es, el 50% de 3000 W, es decir, 1500 W.



Ya sabemos que cada botella llena contendría 366.39 L de hidrógeno en condiciones de carga (15 barg y 218.15 K). Pero las condiciones de descarga serán 2 barg y 25 °C para que la pila de combustible pueda operar efectivamente.

En estas condiciones podríamos decir que el volumen que ocuparía todo el gas contenido en una botella en condiciones de descarga sería:

$$1.97385 \cdot V = 221.7 \cdot 0.08205746 \cdot 298.15 \rightarrow$$
$$V = \frac{221.7 \cdot 0.08205746 \cdot 298.15}{1.97385} = 2747.92 \text{ L}$$

También podría calcularse sabiendo que la relación de expansión es 15/2, por tanto, y sabiendo que $PV = \text{cte}$, multiplicando por dicho factor obtendríamos el volumen final en condiciones de descarga.

Por otro lado, del modelado de la pila de combustible conocemos que 60 LPM de hidrógeno generan una potencia de 4640 W.

Como necesitamos sólo 1500 W, esto es, aproximadamente unas tres veces menos, necesitaremos también tres veces menos caudal de descarga de hidrógeno, unos 19.98 LPM para ser exactos. Tomando los 2747.92 como el volumen de hidrógeno a nuestra disposición en las mencionadas condiciones, estamos en facultad de hallar el tiempo que podríamos estar suministrando un flujo continuo de gas, o lo que es lo mismo, el tiempo de descarga de una botella como:

$$t_d = \frac{2747.92 \text{ L}}{19.98 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}} = 137.53 \text{ min} = 2.29 \text{ h}$$



5.2.5 Propulsor eléctrico

El propulsor es el elemento encargado de generar el empuje suficiente para vencer la resistencia al avance de la plataforma y que esta pueda navegar.

Su posición puede ser encajada por debajo del cuerpo central de la plataforma, tal y como se muestra en la siguiente tabla junto a sus especificaciones [45].

Tipo	Potencia absorbida	Potencia entregada	Voltaje	Intensidad	Rendimiento total	Peso	Desplazamiento	
							Velero	Barco a Motor
SDK 2,0 AC	2,5 kW	2,0 kW	24 V	104 A	80 %	42 kg	2,0 t	-
SDK 3,0 AC	3,6 kW	3,0 kW	36 V	100 A	83 %	42 kg	3,0 t	-
SDK 4,0 AC	4,7 kW	4,0 kW	48 V	99 A	84 %	42 kg	4,0 t	-
SDK 2,5 AC	3,1 kW	2,5 kW	24 V	130 A	80 %	45 kg	2,5 t	1,0 t
SDK 3,5 AC	4,1 kW	3,5 kW	36 V	115 A	85 %	45 kg	3,5 t	1,4 t
SDK 4,3 AC	5,0 kW	4,3 kW	48 V	104 A	85 %	45 kg	4,3 t	1,7 t
SDK 5,0 AC	5,9 kW	5,0 kW	48 V	123 A	85 %	45 kg	5,0 t	2,0 t
SDK 6,0 AC	7,1 kW	6,0 kW	48 V	148 A	85 %	68 kg	6,0 t	2,4 t
SDKH 8,0 AC	9,4 kW	8,0 kW	48 V	196 A	85 %	80 kg	8,0 t	3,2 t
SDKH 10,0 AC	11,8 kW	10,0 kW	96 V	123 A	85 %	80 kg	10,0 t	4,0 t
SDKH 15,0 AC	17,1 kW	15,0 kW	96 V	178 A	88 %	91 kg	15,0 t	6,0 t
SDKH 20,0 AC	22,8 kW	20,0 kW	96 V	237 A	88 %	101 kg	20,0 t	8,0 t
SDKH 25,0 AC	28,4 kW	25,0 kW	96 V	296 A	88 %	101 kg	25,0 t	10,0 t

Tabla 7. Catálogo escogido de propulsores eléctricos

Se propone escoger el modelo de 3,1 kW de potencia, por ajustarse más a la potencia base prefijada de proyecto.

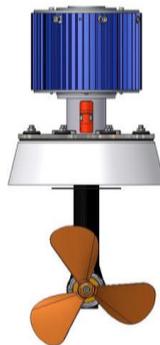


Fig. 36. Propulsor escogido en 3D



5.2.6 Electrolizador (en tierra)

Tal y como se explicó en el capítulo anterior, un electrolizador no es más que un dispositivo que a fin de cuentas permite la generación de hidrógeno a partir de un suministro eléctrico de entrada.

El electrolizador irá pues generando hidrógeno y comprimiéndolo en botellas, esto podría hacerse directamente en función de la presión de salida del electrolizador y la de carga de las botellas o bien mediante el paso intermedio por un compresor.

La idea que se sugiere es la de tener un equipo de producción de hidrógeno on-shore, que se encargue de llenar rápidamente las botellas vacías que traerán las embarcaciones que integren el modelo híbrido de almacenamiento de energía aquí expuesto. Así



5.3 Diagrama conceptual

El diagrama de flujos del ciclo renovable presentado en el proyecto es el siguiente, como también se muestra en el artículo científico [46].

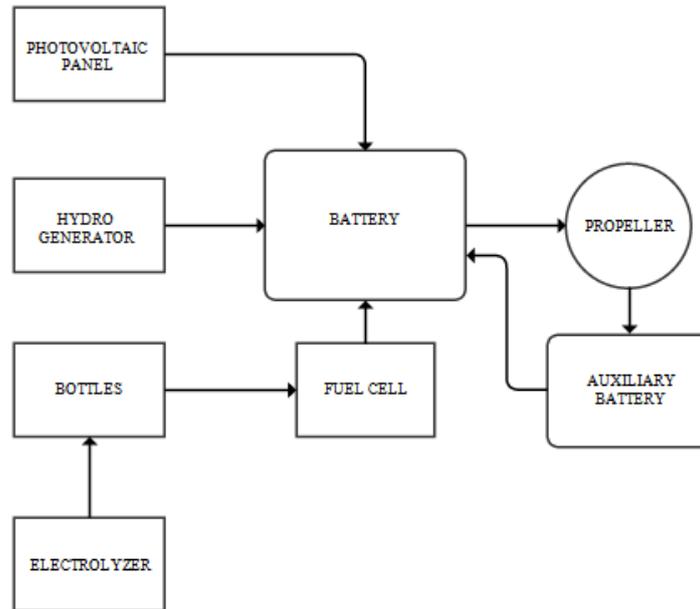


Fig. 37. Diagrama de flujos del sistema

En él, se aprecia a la batería como elemento principal en el cual confluyen los distintos flujos de energía de origen renovable gracias a los distintos elementos del sistema y desde el cual se extrae la energía para la propulsión y/o para dar soporte a un determinado dispositivo.

La potencia entregada, en caso de exceso de la misma tras su paso por el propulsor y/o elemento consumidor, es redireccionada a la batería auxiliar, cargándola o manteniéndola a plena carga y, por tanto, también manteniendo siempre cargada la principal.

En caso de que la potencia obtenida por los elementos renovables del sistema no sea suficiente para abastecer completamente al propulsor y/o elemento consumidor, este defecto será suplido inicialmente por la batería principal que de forma inmediata será recargada por la auxiliar, de forma que realmente es la auxiliar la que se descarga mientras que la principal se mantiene, de nuevo, a plena carga.



CAPÍTULO 6

SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL MODELO



6 Simulación computacional del modelo

6.1 Diseño 3D con el Software Rhinoceros 5.0

Rhinoceros es un potente y versátil programa informático modelador en 3D muy usado en Ingeniería Naval. En él se procedió al modelado de la plataforma solar flotante robotizada partiendo de la idea de un trimarán.

Un trimarán es un barco multicasco que consta de un casco principal (vaka) y dos flotadores más pequeños (amas) atados al lado del casco principal con puntales laterales (akas). Este tipo de barco es principalmente utilizado para la recreación y carreras de vela.

Posee menor resistencia al avance debido a que un buque de este tipo flota gracias a tres cascos diferentes pero que poseen una elevadísima relación eslora/manga y por tanto es capaz de alcanzar velocidades más elevadas. Además el tri-casco es idóneo para el mejor reparto estructural del peso de los paneles solares sobre la cubierta de la plataforma, descansando dicho peso sobre el casco principal o central, dónde también irían ubicadas las botellas y baterías.

Para realizar la simulación computacional del modelo en las diferentes plataformas usadas se han tenido que tener en cuenta varios cálculos, como lo son, por ejemplo, la estimación del desplazamiento del buque, la cual ha sido posible por medio de *Rhinoceros* y sumatorio de pesos y tomó un valor de aproximadamente 1700 kg.

Las dimensiones finales máximas en metros quedaron en 14.15 de eslora, 5.90 de manga y 1.60 de puntal.

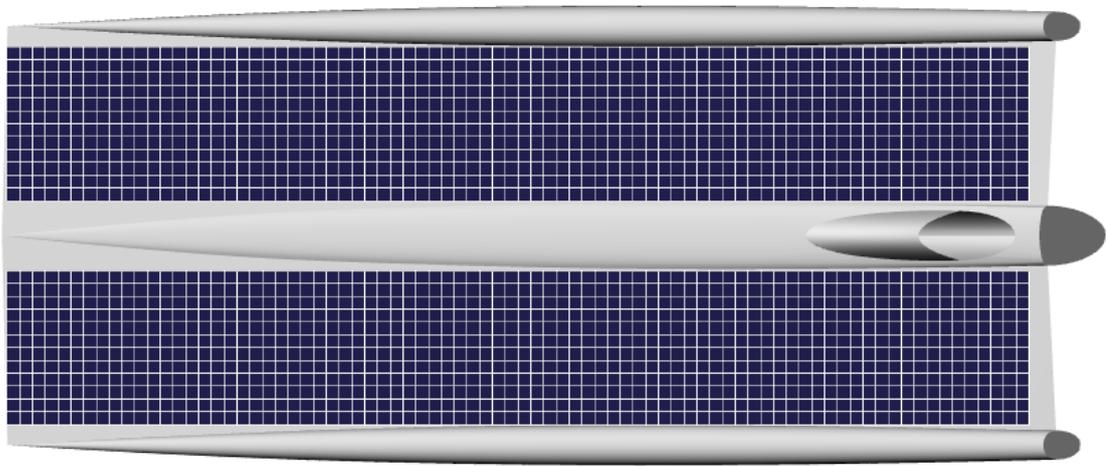


Fig. 38. Diseño del dispositivo. Vista superior.

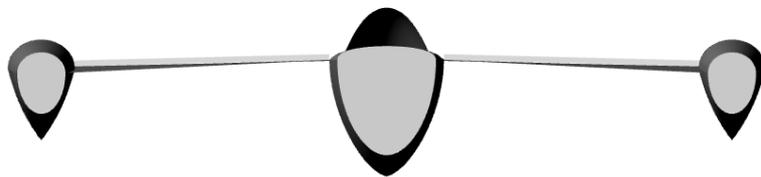


Fig. 39. Diseño del dispositivo. Vista desde popa.



Fig. 40. Diseño del dispositivo. Vista desde babor.

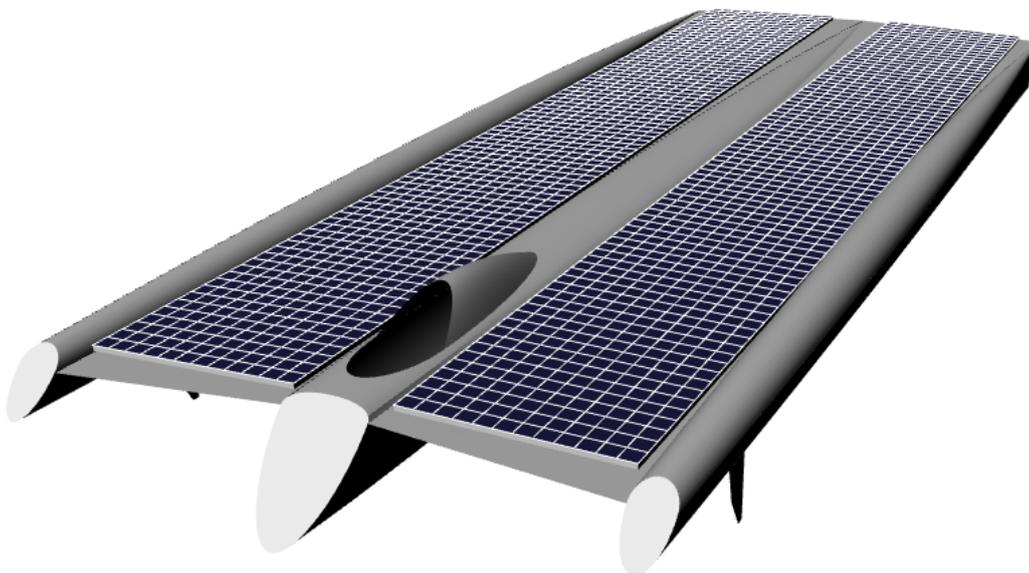


Fig. 41. Diseño del dispositivo. Vista en perspectiva 1.

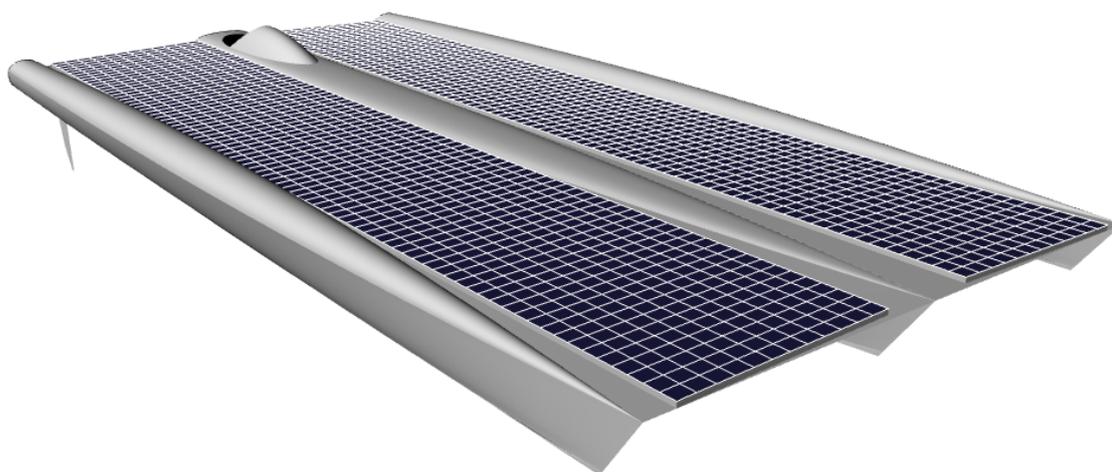


Fig. 42. Diseño del dispositivo. Vista en perspectiva 2.



6.2 Emplazamiento de los elementos a bordo

Para dar una idea del emplazamiento de los elementos del sistema a bordo de la plataforma, se hizo un par de cortes al casco principal y se obtuvo una sección de dimensiones constantes de 3.60 m de eslora, 0.90 m de manga y 1.20 m de puntal. Posteriormente se diseñaron los elementos con sus respectivas formas a escala y se situaron.

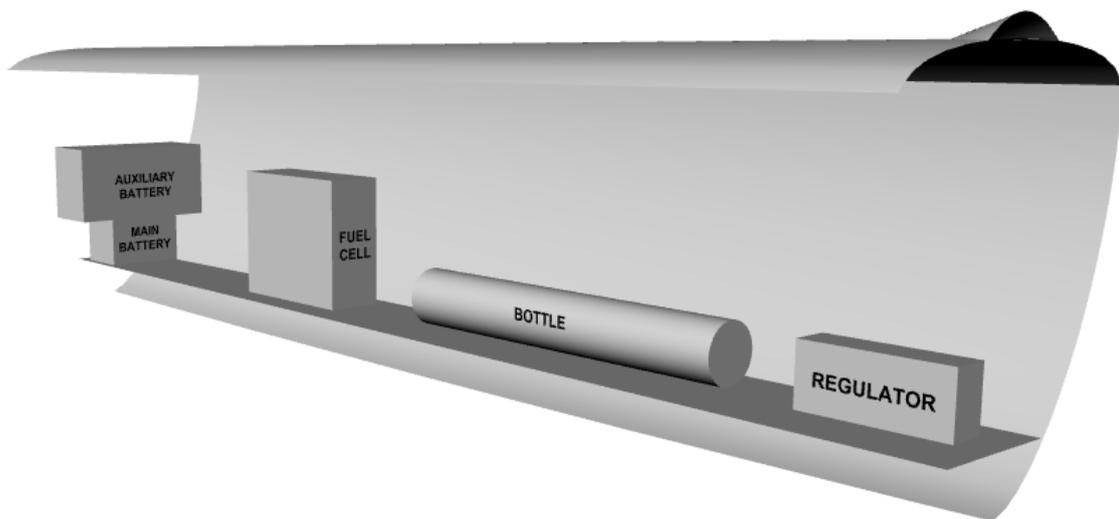


Fig. 43. Sección del casco con los elementos montados

La figura superior muestra la disposición de los elementos en perspectiva (hacia derecha popa y hacia izquierda la proa). Por otro lado, el espacio donde van ubicados los elementos es el mínimo necesario para que un operario agachado pueda acceder al interior del casco en caso de urgencia para alguna reparación o revisión.

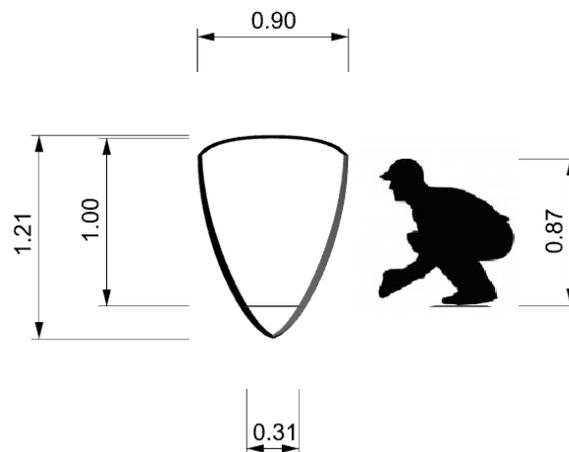


Fig. 44. Sección vista transversal acotada en metros



6.3 Aproximación de la resistencia al avance con el Software Delftship

Lo primero que ha de decirse es que los cálculos de resistencia aquí presentados son aproximativos, pero sirven para hacernos una idea de la hidrodinámica del conjunto. Se mostrarán dos curvas, una correspondiente al casco principal (aka) y, posteriormente, otra correspondiente a un ama. Por lo que la resistencia total sería la obtenida de sumar la del aka más la del ama multiplicada por dos para una cierta velocidad.



Fig. 45. Análisis de curvatura del aka

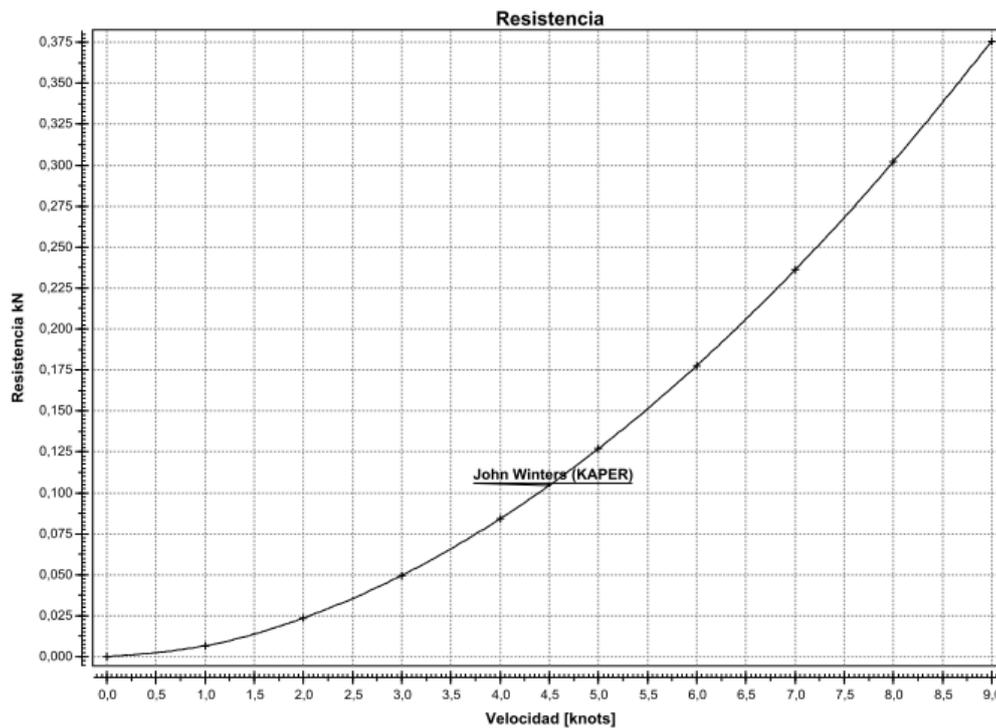


Fig. 46. Curva Resistencia – Velocidad del aka



Delftship usa dos metodologías diferentes para el cálculo de la resistencia, la de John Winters, muy precisa para formas orientadas a un kayak, y la que trae por defecto el programa. Tanto en la del aka como la del ama, ambas metodologías ofrecen resultados coincidentes, esto es debido a que para estudiar la resistencia al avance global del trimarán se subdividió el estudio en los dos tipos de “cascos” diferentes que lo componen, que son piezas sencillas, alargadas y con forma de kayak.

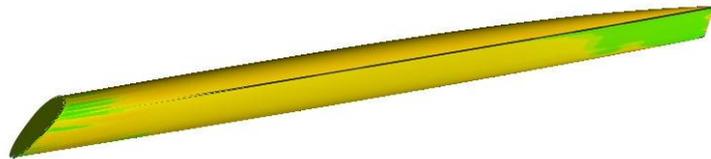


Fig. 47. Análisis de curvatura del ama

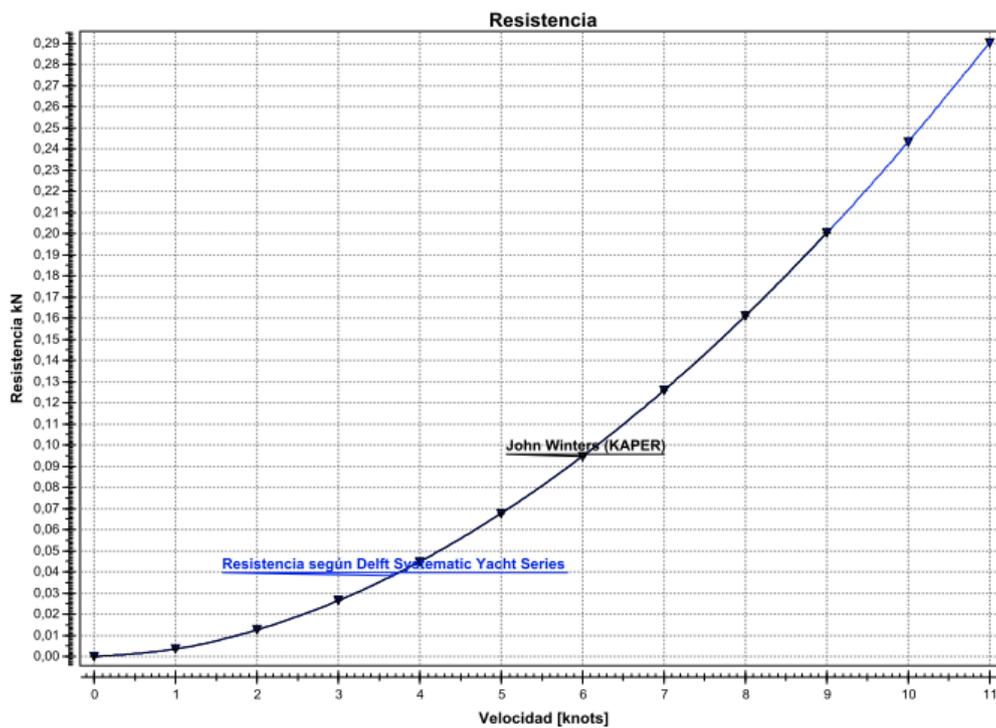


Fig. 48. Curva Resistencia – Velocidad del ama

Tomando como velocidad de crucero, como en capítulos anteriores, unos 7,5 nudos, la resistencia total sería:

$$R_T = 0.27 + 0.145 \cdot 2 = 0.56 \text{ kN}$$

Y, por tanto, la potencia efectiva obtendría un valor de:

$$\text{EHP} = 0.56 \cdot 7.5 \cdot 0.51445 = 2.16 \text{ kW}$$



Valor dentro de los 3000 W de potencia base de proyecto. Como se puede observar, el diseño de la plataforma tiene muy buenas características hidrodinámicas y con dicha potencia hace capaz al sistema de auto-propulsarse a una velocidad de 10 nudos.



CAPÍTULO 7

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN



7 Resultados experimentales y discusión

Tras haber estudiado las condiciones climatológicas a lo largo del tiempo y tras el establecimiento de una potencia base, se pudieron aproximar las curvas de funcionamiento de la batería y ver los intervalos de tiempo en el que el sistema podría funcionar sin más ayuda que el módulo fotovoltaico, así como los intervalos en los que otras fuentes de energía renovables tienen que dar apoyo.

Los resultados se obtuvieron para la localidad de Cartagena, considerando la irradiancia en intervalos de tres horas para cada día promediado para cada mes del año durante 20 años. Así se obtuvo un valor de 109.19 W para un módulo fotovoltaico estándar, lo que equivalió a 53,96 m² de superficie fotovoltaica necesaria con el fin de suplir los 3 kW de potencia de proyecto y mediante la aplicación de un margen de potencia del +20%.

Se utilizaron módulos comerciales policristalinos que rondaban una eficiencia del 20%, no obstante, cabe decir que podrían haberse usado módulos DSSC, pero su eficiencia de momento es algo más pequeña. Asimismo, pudieron haberse usado módulos fotovoltaicos de mayor eficiencia, ya que se conocen empresas que comercializan los mismos con eficiencias de hasta el 40%. Sin embargo, esto además de ser menos económico, resulta ser más incómodo, puesto que la mayoría de estas empresas no están en España, sino en países lejanos como EEUU o China.

La botella de hidrógeno escogida en este modelo tiene una capacidad de 5.000 NL y presión de carga de 15 bar. Se concluyó que una sola botella podría generar 1.500 W durante 2,36 horas antes de descargarse completamente. Sin embargo, en proyectos futuros, se podrían utilizar botellas capaces de soportar mayor presión, como 300 bar, lo cual podría resultar en mayores cantidades de energía almacenada por unidad de volumen.



CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES



8 Conclusiones

En este trabajo se presenta un modelo de sistema híbrido con energías renovables para propulsión eléctrica en embarcaciones aplicado a una plataforma flotante robotizada con el fin de establecer el paso hacia un modelo libre de emisiones a la atmósfera.

Se verificó, como era natural, que las características climáticas estudiadas en la localización geográfica particular de Cartagena mostraron ser más propicias y estables en verano que en invierno.

Por último, aunque el almacenamiento de alta presión pueda ser peligroso, cabe mencionar la idea del sistema por control remoto aquí propuesto, en un buque sin tripulación, minimizando a cero el peligro al que la vida humana estaría expuesta ante cualquier incidente.



CAPÍTULO 9

BIBLIOGRAFÍA



9 Bibliografía

1. “Energía solar” “Corriente de oscuridad” “Remote Operated Vehicle” “Chasis” “Electroimán” “Irradiancia” “Pila de combustible” “Célula fotovoltaica multiunión” <http://www.wikipedia.com>
2. “El avance de la energía solar en España” <http://www.energiasrenovables.es/>
3. “Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica” <http://www.atersa.com/>
4. Qi-Li, Rongcai Xie and Jian Shang, “Effect of precursor ratio on synthesis and optical absorption of TiON”, J.Am. Ceram. Soc. 90, 1045-1050 (2007)
5. Alex T. Kuvarega, Rui W. M. Krause and Bhekie B. Mamba, “Nitrogen/Palladium-Codoped TiO₂ for Efficient Visible Light Photocatalytic Dye Degradation”; The Journal of Physical Chemistry, 115, 22110-22120 (2011)
6. A. Slav, “Optical characterization of TiO₂-Ge nanocomposite films obtained by reactive magnetron sputtering”, Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 6, 910-915
7. Michael Grätzel; “Dye-sensitized solar cells”, Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry reviews, 4, 145-153 (2003)
8. Wilmer E. Cumbicus Jiménez; “Síntesis y caracterización de nanopartículas esféricas monodispersas de TiO₂ (anatasa) dopadas con Se(IV) para aplicaciones de actividad fotocatalítica en el espectro visible”, Trabajo Fin de Master, Energías renovables, Cartagena (2013); Director: Salvador Ángel Gómez Lopera
9. H.Chang, T.L. Chen, K.D. Huang, S.H. Chien, K.C. Hung; “Fabrication of highly efficient flexible dye-sensitized solar cells”, Journal of Alloys and Compounds, 504, 435-438 (2010)
10. Yeji Lee, Misook Kang; “The optical properties of nanoporous structured titanium dioxide and the photovoltaic efficiency on DSSC”, Materials Chemistry and Physics, 122, 284-289 (2010)
11. Hari M. Upadhyaya, S.Senthilarasu, Min-Hung Hsu, D. Kishore Kumar, “Recent progress and status of dye-sensitized solar cell DSSC technology with state-of-the-art conversion efficiencies”; Solar Energy Materials & Solar cells, 119, 291-299
12. Tsai-Te Wang, P. Raghunath, Yun-Fang Lu, Yu-Chang Liu, Chwei-Huawn Chiou, M.C. Lin; “Observation of significant enhancement in the efficiency of



- a DSSC by InN nanoparticles over TiO₂-nanoparticle films*”, Chemical Physics Letters, 510, 126-130 (2011)
13. J. El Ghoul, N. Bouguila, S.A. Gómez Lopera, L. El Mir; “*Structural and optical properties of nanoparticles (V, Al) co-doped ZnO synthesized by sol-gel processes*”, Superlattices and Microstructures, 64, 451-459 (2013)
 14. J. EL Ghoul, K. omri, S.A. Gómez Lopera, L. El Mir; “*Sol-gel synthesis, structural and luminescence properties of MT-doped SiO₂/Zn₂SiO₄ nanocomposites*”; Optical Materials, 36, 1034-1039 (2014)
 15. L. El Mir, A. Amlouka, E. Elaloudi, M. Saadoun, A.C. Pierre; “*Preparation and optical characterization of transparent microporous TiO₂ xerogel monoliths*”; Material Science and Engineering, 146, 69-73 (2008)
 16. Juan Manuel Mariñoso Pascual (2014), “*Síntesis y caracterización de nanopartículas elipsoidales monodispersas de dióxido de titanio sin dopar y dopadas con praseodimio para aplicaciones fotovoltaicas y fotocatalítica*”, Trabajo Fin de Máster, Energías Renovables, Cartagena. Director: Salvador A. Gómez Lopera
 17. “*Barco solar SOLEMAR*” <http://www.seacleaner.com/>
 18. Álex Fernández Muerza, 13 de mayo de 2012. Siete barcos que funcionan con energía solar
 19. “*Plataforma*” <http://lema.rae.es>
 20. “*La primera plataforma flotante del mundo alimenta un submarino y es adaptable a múltiples usos*” <http://www.bajoelagua.com>
 21. “*La planta solar flotante más grande del mundo en Japón*” <http://www.inmoley.com>
 22. “*Kyocera, Century Tokyo Leasing, Ciel et Terre Announce Construction of the World’s Largest Floating Solar Power Plant*” <http://global.kyocera.com>
 23. “*Patente para la orientación de una placa solar fotovoltaica instalada en una boya marina*” <http://www.cartainnova.es/>; (Miércoles, 07 de Mayo 2014)
 24. Fernández Andrés, José Carlos; Golpe Sónora, Cintia María; López Riquelme, Juan Antonio y Torres Sánchez, Roque); “*SISTEMA Y MÉTODO PARA LA ORIENTACIÓN DE UNA PLACA SOLAR FOTOVOLTAICA INSTALADA EN UNA BOYA MARINA*” (documento PDF de SOLICITUD DE PATENTE publicada en 18.10.2013, de número de publicación “ES 2 426 013 A1”)
 25. Osinaldo M. Casas Valdés; “*Señalización marítima solar*” <http://www.cubasolar.cu>



26. “Boya con luces alimentadas con energía solar estacionada en puerto”
http://www.fotosdigitalesgratis.com/galeriafotos/11195/boya_con_luces_alimentadas_con_energia_solar_estacionada_en_puerto
27. “Nuevo diseño de Boya Sustentable” <http://www.hormigasolar.com/nuevo-diseno-de-boya-sustentable/>
28. María Climent; “El primer faro marítimo hecho con fibra de vidrio y carbono”
<http://www.elmundo.es/>
29. Engel R, Basualto A. Quemar combustibles para producir energía trae graves problemas, el hidrógeno brinda otra posibilidad. Cubasolar 2000-2015
30. Alfonsín V, Suarez A, Cancela A, Sanchez A, Maceiras R. Modelization of hybrid systems with hydrogen and renewable energy oriented to electric propulsion in sailboats. Int. J Hydrogen Energy 2014;39:11763-73
31. Hadj Arab A, Chenlo F, Benganem M. Loss-of-load probability of photovoltaic water pumping systems. SolEnergy 2004;76:713-23
32. Rosell JI, Ibáñez M. Modelling power output in photovoltaic modules for outdoor operating conditions. Energy Convers Manag 2006;47:2424-30
33. “¿Qué es una pila de combustible?” <http://www.cnh2.es>
34. Anayantzin Hernández Ramírez. Maestría en Ciencia y Tecnología Química. Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila. “Las celdas de combustible de óxidos sólidos (SOFC) como fuentes de energía renovable.” CIENCIACIERTA No.26 abril - julio 2011.
<http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx>
35. Calculo instalación fotovoltaica aislada de la red (off-grid) part 3 (campo fotovoltaico: radiación solar. Calculo horas sol pico);
<http://calculationsolar.com/blog/>
36. NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center. Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0)
37. Cartagena, Spain [10 January, 2000] - Weather Records By Hour (Weatherbase)
38. Ross RG. Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 1980:1126-1132
39. VISEL PLACAS. “Módulos Solares Policristalinos”. Technical data sheet



40. “Hidrogenadores ¿para cruceros?”
<http://www.navegar.com/hidrogenadores-para-cruceros/>
41. Watt&Sea. Catálogo en PDF, Noviembre 2013
42. Tab Motion. Baterías Solares. Catálogo en PDF
43. MASTERVOLT. SCM60 MPPT-MB. <http://www.mastervolt.es/>
44. Cellkraft. Fuel Cell S-series. Technical data sheet. Apr -11 ver: Eng. S.28
45. Contenedores de almacenamiento de hidrógeno basados en hidruros metálicos de tipo LaNi₅. Ariema Energía y Medioambiente SL
46. Krätler Elektromaschinen. Sail - Drive Eléctrico. Technical data sheet