



Ing. Andrés Giuliani

Director Área Termomecánica, Grupo G.I.M.A., U.T.N. F.R.S.F.

Agustín Schneider

Integrante Grupo G.I.M.A., U.T.N. F.R.S.F.

Ing. Pablo Fabián Del Rosso

Integrante Grupo G.I.M.A., U.T.N. F.R.S.F.

Álvaro Cagliero

Integrante Grupo G.I.M.A., U.T.N. F.R.S.F.

DISEÑO Y FABRICACION DE CATAMARAN SOLAR

Introducción

El termino catamarán, refiere a una embarcación formada por dos cascos vinculados entre sí, mediante un puente de unión. Este tipo de embarcación tiene la ventaja de ser mucho más estable que el caso de las embarcaciones monocasco. Esta estabilidad supone un aspecto significativo de la seguridad de los pasajeros.

En este proyecto se lleva adelante la fabricación de una embarcación prototipo con una capacidad de hasta 8 pasajeros, e impulsada por motores eléctricos alimentados por un banco de baterías que reponen su carga mediante la energía que genera la superficie conforma-

da por celdas fotovoltaicas. De esta manera se puede decir que utiliza energía limpia y renovable para poder movilizar dicha embarcación.

Embarcación

Al igual que todo catamarán, éste se constituye de dos cascos fabricados individualmente y posteriormente unidos mediante una estructura de fijación, formando el piso de la embarcación. Por encima de ésta superficie, se monta la estructura que soporta el techo. Ambos cascos y sus elementos estructurales se construyen con materiales compuestos.

La favorable relación peso/resis-

encia-estructural hacen de los materiales compuestos una alternativa cada vez más atractiva cuando se requiere un casco de bajo peso y capaz de soportar cargas rigurosas del medio acuático. Aun cuando las aplicaciones de materiales compuestos a estructuras navales son crecientes, no significa que se cuente con un conocimiento acabado de las propiedades y comportamiento de dichos materiales. Típicamente deben obtenerse las propiedades mecánicas por medio de la experimentación y teniendo en cuenta factores variables tales como contenido de resina en el laminado, orientación de las fibras de refuerzo, material y densidad del material núcleo usado en el sándwich.

Es por todo esto, que la fabricación de los cascos y la vinculación de los mismos mediante su respectivo puente, se lleva adelante en un astillero de la ciudad, que cuente con las condiciones técnicas y legales como para poder desarrollar el mismo, y cumpliendo con las normas y cálculos de escantillonado y resistencia de materiales vigentes, dadas por la Prefectura Naval Argentina.

Resistencia mecánica

La forma más efectiva de corroborar la resistencia mecánica de un elemento es mediante la aplicación de un análisis MEF (Método de Elementos Finitos).

Un aspecto clave en el análisis mediante MEF de una embarcación construida de materiales compuestos es la determinación de las propiedades mecánicas del material. En general las propiedades mecánicas de los materiales compuestos no están disponibles en la literatura técnica.

En efecto, los materiales constituyentes, básicamente resina y fibra de vidrio, pueden combinarse en una infinidad de maneras diferentes, no solo es variable la relación resina/vidrio, conocida como el contenido de vidrio, sino también la orientación de las fibras puede disponerse a voluntad según la dirección de las cargas principales.

Existen algunos métodos teóricos disponibles para estimar las pro-

propiedades mecánicas de los materiales compuestos, sin embargo estos métodos no son confiables para determinar las propiedades de compuestos que incluyan varias capas de laminados con diversas orientaciones de las fibras. Usualmente los métodos teóricos asumen una o más de las siguientes restricciones:

- El laminado es delgado.
- La distribución de la deformación es lineal en el espesor del material.
- La deformación en el sentido perpendicular a la línea media es despreciable.
- Deformaciones de corte fuera del plano son nulas.

Condiciones que en general no se aplican a estructuras navales, esto indica que el método más confiable para obtener las propiedades mecánicas es la experimentación con probetas fabricadas del mismo modo como se construiría una parte de la embarcación.

Es por eso que para corroborar la resistencia mecánica de los cascos, determinadas previamente por cálculos teóricos, se fabricaron probetas durante el proceso de laminado, que luego se sometieron a ensayos mecánicos en los laboratorios de la UTNFRSF, comprobando que la resistencia de las mismas, estaban dentro de los límites establecidos.

Calculo de potencia del bote

La potencia efectiva de la moto-

rización lo expresa la siguiente fórmula:

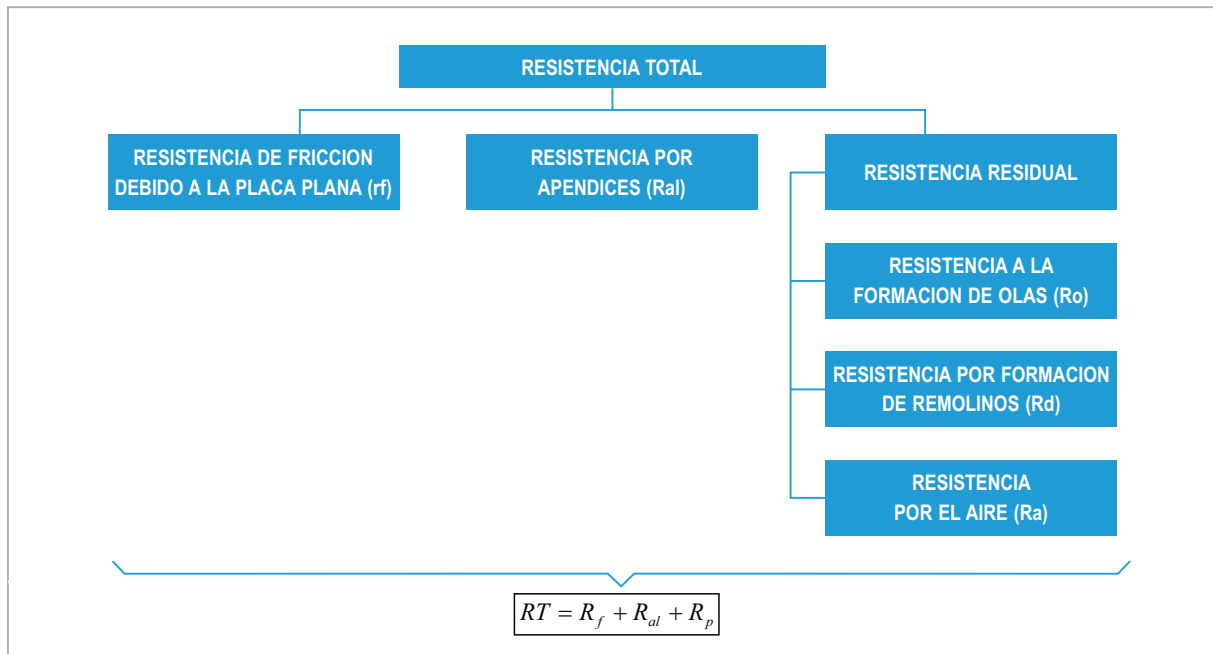
$$EHPO(PE) = \frac{RT \cdot v}{323}$$

Dónde:
 EHPO(PE): Caballos fuerza efectivos necesarios para vencer la resistencia del bote y marchar a una velocidad v.
 RT: Resistencia total [Kg]
 v: velocidad [m/s]



Para el cálculo de la potencia del bote, necesitaremos considerar las resistencias al avance y las cargas en juego, según se ha diseñado el paseo.

La Resistencia total del bote, se compone de la resistencia total del bote “desnudo” y la resistencia de los apéndices.



El primer paso es identificar las resistencias del bote y componerlas según vemos arriba. El cálculo de RT, surge de calcular previamente las distintas resistencias que se presentan a la hora de desplazar el bote en un fluido. Entre ellas vemos que se mencionan:

- Resistencia a la fricción:

$$R_f = K_f \cdot S_m \cdot v^{1.825}$$

Kf: coeficiente de fricción de Froude
Sm: Superficie mojada [m²]
v: velocidad [m/s]

Representa el 80% de la resistencia a baja velocidad, que sería en el caso que estamos trabajando. Y según Reynolds es aproximadamente igual a $k_f=0,35$.

- Resistencia por efecto de los apéndices y estado de limpieza del casco *Ral*:

Según Bonilla estos efectos, pueden llegar hasta el 20% de *Rf*, pero se puede hacer un cálculo más detallado del mismo. Nosotros supondremos que es el 10% *Rf*.

- Resistencia por olas o por formación de olas al entrar en contacto con el casco:

$$R_o = \frac{k_o \cdot (\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot v^4)}{L}$$

Ko: coeficiente de bloque k_b =volumen de la carena/volumen del prisma rectangular

- Resistencia directa o por formación de remolinos:

Debido a la energía arrojada por remolinos desarrollados por el casco y los apéndices

$$R_d = 8\% R_f$$

- Resistencia por el aire:

$$R_a = k_a \cdot S_p \cdot (v + v_a \cdot \cos \alpha)$$

ka: coeficiente que depende de la forma aerodinámica y su valor se encuentra entre 0.025 y 0.05.

Sp: sumatoria de las áreas de la obra muerta y superestructura.

va: velocidad del viento

cos α: ángulo que forma el viento con el plano diametral del buque, usamos el ángulo de Kelvin que va a ser igual a 0.

La resistencia se compone de una parte Aérea (obra muerta y superestructuras) y, como vemos arriba, de una obra “activa” sumergida en el agua. Se deberá intentar que la obra bajo el agua tenga la forma más hidrodinámica posible, es decir que presente la menor resistencia posible.

Una vez calculado las compo-

nentes de la resistencia, su suma nos da lo que se denomina como “resistencia al remolque”, identificada con la letra Rt.

Según el diseño desarrollado en conjunto con el Astillero Poseidon, los datos finales de nuestra embarcación son los siguientes:

Eslora L: 6000 [mm]

Eslora de Flotación L_f: 5540 [mm]

Manga M: 2970 [mm]

Manga un casco: 600 [mm]

Puntal: 900 [mm]

Calado Nominal C: 470 [mm]

Velocidad crucero v: 2,77 [m/s] = 10[km/h]

Velocidad del viento estimada promedio va: 2,77 [m/s]

Angulo de incidencia del viento promedio : 0°

Peso casco: 400 [kg] (Peso de Rosca: como entrega el astillero)

Peso Equipamiento: 500 [kg]

Peso pasajeros: 640 [kg]

Desplazamiento total D: 1540 [kg]

Coefficiente de fricción de Froude kf: 0,3

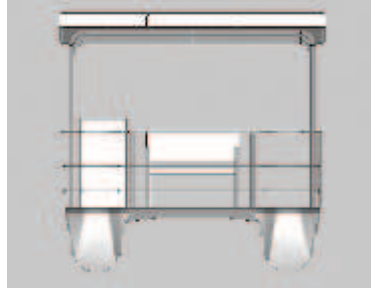
Superficie mojada S_m (para un casco): 5,99 [m²]

Desplazamiento (para un casco): 770 [kg]

Sumatoria de las áreas de la obra muerta y superestructura S_p: 1,5 [m²]

Con estos datos, el resultado del calculo es el siguiente:

$$\text{EHPO} = 9,72 \text{ CV} = 7,24 \text{ [kW]}$$



Casco

Cada uno de los cascos será fabricado íntegramente en PRFV (Plástico Reforzado en Fibra de Vidrio), sin el agregado de refuerzos de otro material que requiera mantenimiento por posible deterioro del mismo. Estos serán perfectamente estanco, y al mismo tiempo están divididos en compartimentos de 660 [mm] de largo generados por mamparos hasta 300 [mm] por sobre la línea nominal de flotación, quedando cada casco conformado por 9 cámaras independientes con un volumen boyante total de 2,2 [m³] en cada uno.

Esta independencia entre cámaras, le da la posibilidad de que en caso de deterioro de la embarcación por algún incidente con otro objeto, solo estará inundando la cámara afectada, mientras que las restantes mantendrán la flotabilidad de la embarcación.

La terminación externa de los mismos será de gelcoat brillante que actuara como separador del molde de conformado, cuyo color se elige según el diseño previo.

La vinculación de los cascos genera la superficie del catamarán, logrando un espacio útil de 18 [m²]. Esto se realiza mediante 11 puentes previamente matrizados en PRFV, quedando forrados en su parte inferior con una lámina de plástico y en la superior con fenólico marino de 12 mm de espesor plastificado y pintado con gelcoat.

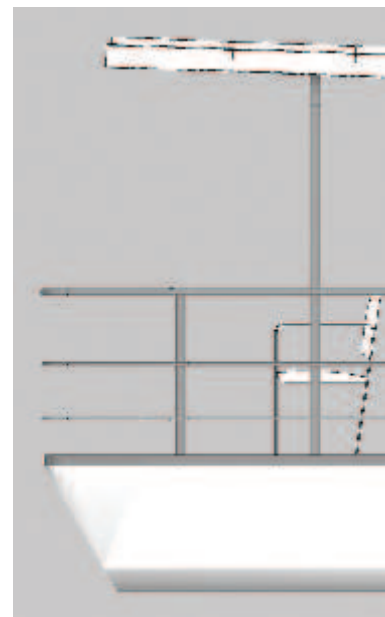
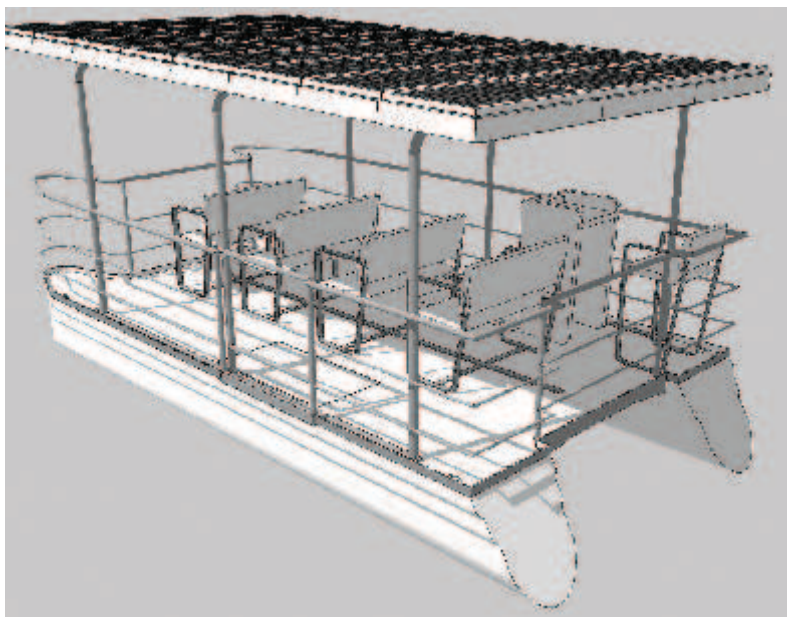
Antes de colocar el piso, se generará una vinculación de acometidas entre cascos y a su vez entre compartimentos, como para poder realizar los diferentes conexiones de los sistemas eléctricos y mecánicos.

La estructura principal será el sostén de la superficie de paneles fotovoltaicos.

Estará conformada por perfiles de acero inoxidable AISI 304, vinculado por puntos de anclaje preestablecidos en el diseño del piso del bote.

Para el timón, se va a utilizar un sistema de cables y poleas para comandar desde el atril de timonel los movimientos del catamarán.

En el otro extremo, estarán ubicadas las palas de acero inoxidable AISI 304 en una posición posterior a las hélices impulsoras de la embarcación.



Descripción sistema eléctrico de potencia y control

El catamarán solar estará compuesto por un sistema de motores eléctricos de propulsión, los cuales se alimentaran de un banco de baterías cuya reposición de carga eléctrica se realizara mediante la energía generada en paneles fotovoltaicos.

Motores y controladores

El sistema contara con dos motores tipo BLDC de alta potencia, de 5 kW – 48 Vcc – 3500 rpm y un régimen transitorio de 7 kW.

Debido a que estos motores estarán montados en un compartimento estanco dentro de cada uno de los cascos, se instalará para cada uno de ellos un sistema de refrigeración por agua, manteniendo de esta manera la vida útil de los mismos. Aprovechando que estamos trabajando con una embarcación, el fluido refrigerante que se va a utilizar, será la propia agua de río del canal por donde navegue este catamarán.

La embarcación constara con un sistema de control de potencia y velocidad electrónico, con control de corriente, tensión y torque del tipo VEC300-48 con una corriente nominal de 120 A y una máxima transitoria de 300 A.

Los controladores incluyen sistemas de protecciones eléctricas por sobre corriente, sobretensión, subtensión, alta temperatura de bobinado, desconexión de comandos, todo señalizado mediante secuencia de led que le permitirá al timonel estar alertado de cualquier desperfecto que pueda ocurrir con el sistema durante la navegación.

Asimismo va a disponer de puertos de conexión que permitirán configurar parámetros para adaptarlos a las condiciones de navegación que se presenten según el movimiento acuífero, como así también poder tener una adquisición de datos que permitan a los técnicos analizar el comportamiento del sistema y solucionar cuestiones que tengan que ver con el mantenimiento eléctrico.

Tanto los motores como los controladores son de alta eficiencia su-

perando en ambos casos el 90 %. El tablero de mando contará con aceleradores individuales para cada motor del tipo Joystick Throttle Set, permitiendo colaborar con el sistema de comandos convencional de timones, dando esto mayor maniobrabilidad. También le dará la posibilidad al timonel de realizar movimientos de reversa, muy útiles en el momento de amarre de la embarcación.

Banco de baterías y carga

El sistema de almacenamiento de energía estará compuesto por un banco de baterías de aproximadamente 200 kg, el cual estará distribuido en los compartimentos de los cascos, manteniendo la estabilidad deseada en este tipo de embarcaciones.

Las baterías del banco son del tipo T-605 de 6 Vcc, 210 Ah ciclo profundo, marca Trojan y se conectarán en grupos de cuatro unidades en serie, y a su vez ambos grupos conectados en paralelo, entregando de esta manera la intensidad de corriente y consumo necesario para impulsar los motores.

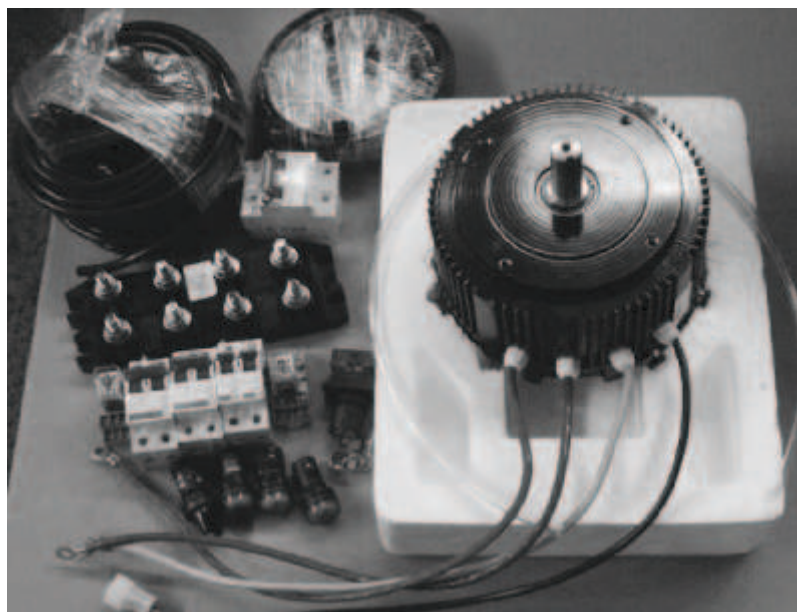
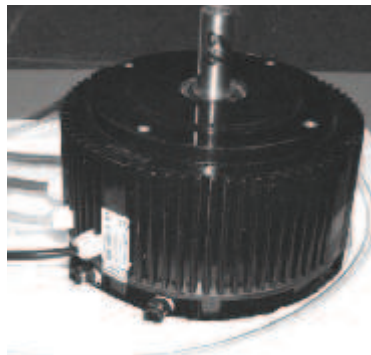
El sistema de recarga de energía del banco de baterías estará dado principalmente por la energía generada en la superficie de celdas fotovoltaicas ubicadas horizontalmente en la parte superior del catamarán.

Debido a que las condiciones climáticas o el uso intensivo de la embarcación puede llegar a no permitir una recarga efectiva del banco de baterías, también el sistema va a estar preparado para conectar el banco a la red eléctrica urbana, o bien a un equipo portátil de generación eléctrica, de manera de poder completar la carga de las baterías.

Paneles solares

Como condición principal del proyecto, se estableció que la energía utilizada para el movimiento del catamarán sea proveniente de un medio renovable como lo es la energía solar.

Para ello es que destinamos una superficie de celdas fotovoltaicas generadoras de energía a partir de la



radiación solar. Las mismas son del tipo policristalinos KS90T - 24 V con una eficiencia comprobada de 14% y generación de 150 Wpico/m².

Estas celdas estarán conectadas en serie alcanzando una tensión máxima de 120 Vcc y una potencia máxima de 2500 W. Vale aclarar que estos valores dependen de las condiciones climáticas reinantes ya que se ven afectador por factores como: temperatura ambiente, ángulo de incidencia de rayos solares, estación del año y nubosidad.

El sistema en su conjunto le brindara al catamarán la posibilidad de navegar utilizando la energía solar que tome durante la recarga sus baterías en su estadía en amarras como así también en su navegación.

Conjuntamente con los paneles y como intermediario con el banco de baterías se utilizaran dos cargadores reguladores con seguidor de punto de máxima potencia del tipo MPPT-45, Vout: 48 Vcc, Vin: 150 Vcc y 2400 W nominales, con un rendimiento del 99% los cuales aumentan la eficiencia del sistema de recarga en un 3%.

El sistema aplica un algoritmo de seguimiento de carga para extraer máxima potencia del panel fotovoltaico. Hace un barrido extremadamente rápido de toda la curva I-V para determinar la ubicación del pico de potencia. También ofrece hasta 200 días de registro de datos, para poder evaluar la incidencia solar que se presentan en la zona de navegación. ●



REFERENCIAS

- [1] Régimen técnico del buque - Prefectura Naval Argentina
- [2] García, J.; Luco, R.; Salas, M.; López, M.; and Oñate, E. (2002), "An Advanced finite element method for fluid-dynamic analysis of America's Cup boat". Auckland, New Zealand 2002.
- [3] Sahoo P. K., Browne N. and Salas M. (2004, september), "Experimental and CFD Study of Wave Resistance of High-Speed Round Bilge Catamaran Hull Forms". Proceedings of 4th International Conference on High Performance Marine Vehicles, Rome, Italy