

Análisis operacional y Económico de Sistema de Propulsión Eléctrico para Embarcaciones Menores

Hans Ekdahl¹ y Marcos Salas²

¹ Estudiante de Ingeniería Naval, hansek Dahl1@gmail.com

² Profesor Instituto de Ciencias Navales
Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

RESUMEN

El presente trabajo consiste en una descripción y análisis del sistema de propulsión en base a energía eléctrica utilizado en embarcaciones menores, tanto desde el punto de vista operacional, considerando las ventajas y limitaciones que implica su utilización, como desde el punto de vista económico, indicando los valores referenciales de la implementación de este sistema de propulsión, así como el costo de su operación, tanto utilizando energía eléctrica desde la red fija urbana, como por medio de la generación en base a paneles fotovoltaicos. Igualmente se realiza una comparación con el sistema de propulsión diesel con el objeto de tener una referencia en los costos tanto de implementación como de operación de ambos sistemas de propulsión.

SUMMARY

This paper consists of a description and analysis of propulsion system based on electricity used in small boats, from an operational standpoint, considering the advantages and limitations to its use, and from the economic point of view, indicating reference values of the implementation of this propulsion system, and the cost of its operation, using electricity from the urban fixed network, and through generation based on photovoltaic panels. Also a comparison is made with an equivalent diesel propulsion system in order to compare the costs of implementation and operation of both propulsion systems.

INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico de propulsión de buques fue durante mucho tiempo utilizado submarinos y en la actualidad en grandes buques de pasajeros, principalmente por las ventajas que presenta desde el punto de vista estratégico como de confort. Sin embargo el uso de este sistema de propulsión en este tipo de buques requiere de grandes potencias y por lo tanto grandes cantidades de energía, la cual debe necesariamente generarse a bordo, tanto mediante los tradicionales generadores diesel, como por modernos sistemas AIP.

La utilización de este sistema de propulsión en embarcaciones menores ha tenido su mayor auge en los últimos años, como alternativa a la tradicionalmente utilizada basada en motores de combustión interna. En virtud del tamaño y características de las embarcaciones menores, éstas no pueden utilizar los sistemas de generación de electricidad mencionados anteriormente, por lo cual se basan en dos principios para obtener una determinada autonomía: transportar energía desde tierra almacenada en baterías o generar energía eléctrica a bordo mediante la tecnología de paneles fotovoltaicos.

En el presente trabajo se analizarán tanto las ventajas que ofrece este sistema de propulsión de embarcaciones menores, desde diversos aspectos, así como las limitaciones que impone su uso a la embarcación.

Finalmente se realizará un análisis desde el punto de vista económico del sistema, indicando sus costos referenciales y comparando estos valores con un sistema de propulsión tradicional basado en motores de combustión interna.

1.-Descripción del sistema de propulsión eléctrico en embarcaciones menores.

El sistema de propulsión eléctrico para embarcaciones menores se basa principalmente en la utilización de un motor eléctrico para producir el giro del eje y por ende de la hélice que propulsará a la embarcación. Sin embargo este sistema

está constituido por más elementos que solamente el motor, dado que es necesario transportar a bordo la energía que será necesaria para su funcionamiento durante un periodo determinado.

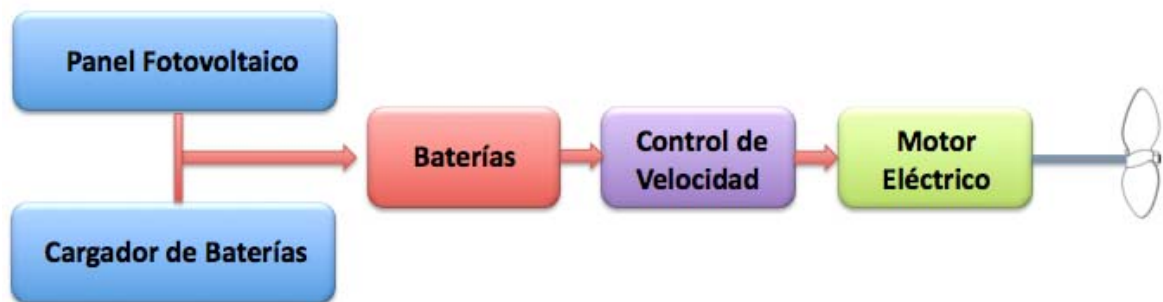
La energía eléctrica se transporta a bordo mediante baterías, las que almacenan electricidad en forma de corriente continua, por lo cual, en caso de utilizar un motor de corriente alterna será necesaria la utilización de un inversor de corriente continua a corriente alterna. Muchos de estos dispositivos integran el convertidor de corriente con el variador de frecuencia, es decir permite el control de velocidad y sentido de giro del motor, con un mando a distancia para su operación. En los motores de corriente continua este dispositivo no es necesario y solo se requiere un variador de tensión para el control de velocidad.

El sistema de gobierno depende en gran parte del tamaño de la embarcación y del diseño del sistema de propulsión, pudiendo utilizarse un sistema de timón o bien un sistema de propulsión orientable para otorgar gobierno y maniobrabilidad a la embarcación. Por lo general y con la finalidad de simplificar y unificar el sistema propulsivo y de gobierno en la embarcación se adopta la propulsión orientable, utilizando un accionamiento mecánico o hidráulico para rotar la base del motor eléctrico y así la orientación de la hélice, direccionando su empuje. En motores eléctricos de mayor potencia es posible encontrar accionamientos eléctricos acoplados al motor, los que permiten el giro del motor incluso en 360° por medio de un sistema de engranajes y cremallera. En el caso de motores eléctricos montados con línea de eje se utiliza timón, accionado normalmente mediante un sencillo sistema hidráulico o bien mecánico, dependiendo el tamaño y diseño de la embarcación. Incluso es posible la utilización de motores fuera de borda, los cuales integran tanto la propulsión como el gobierno de la nave.

Con estos elementos se completa el sistema eléctrico de propulsión para embarcaciones menores, sin embargo en algunos casos existe la opción de generar energía eléctrica a bordo por medio de paneles fotovoltaicos, lo cuales

son dispuestos en algún sector expuesto a la radiación solar con la finalidad de generar energía eléctrica y cargar las baterías. Las embarcaciones que no cuentan con paneles fotovoltaicos pueden cargar sus baterías desde la red eléctrica urbana, por medio de un cargador. Es posible contar con ambos sistemas de carga de las baterías de acuerdo a las necesidades y disponibilidad de energía.

El siguiente diagrama muestra esquemáticamente los elementos que conforman un sistema de propulsión eléctrico a bordo de una embarcación menor.



2.- Ventajas del sistema eléctrico de propulsión de embarcaciones menores.

Al analizar las características de la propulsión eléctrica en naves menores es necesario realizar una comparación con otro tipo de propulsión con el fin de evidenciar los aspectos en que este sistema propulsivo puede ofrecer ventajas, o bien donde se hacen visibles sus limitaciones.

Como factor de comparación se ha tomado la propulsión por medio de motor a combustión interna, ya que este es el tipo de propulsión utilizada en prácticamente la totalidad de naves menores, ya sea por medio del sistema diesel o por medio de motores que funcionan con bencina, tanto internos como fuera de borda, en el caso de algunos yates o embarcaciones muy pequeñas.

Una de las características principales de los motores a combustión interna son su baja eficiencia o rendimiento, es decir la relación entre la energía aportada por medio del combustible y la energía que entrega el motor a su salida, es decir en el acoplamiento del eje. Los motores diesel tienen rendimientos que varían entre el 35% al 40%, es decir luego del ciclo entregan como energía utilizable menos de la mitad de la energía que le fue suministrada para su funcionamiento. Este fenómeno se debe principalmente a las pérdidas de energía en forma de calor por efecto del rozamiento de las partes móviles dentro del motor. Es por esto que los motores diesel requieren de circuitos de refrigeración, dado que los niveles de calor en su interior son tan elevados que pueden dañar las piezas que lo componen.

Dentro de las grandes ventajas de los motores eléctricos son su elevado rendimiento, es decir su capacidad de transformar gran parte de la energía que se le suministra para funcionar, en energía utilizable a su salida. Los motores eléctricos tienen una cantidad de piezas móviles notoriamente inferior a los motores de combustión interna, de hecho a grandes rasgos la única pieza móvil de un motor eléctrico es el rotor, cuya rotación ocurre, en los motores de inducción, sin requerir contacto entre el rotor y el estator, por lo tanto, sin existencia de roce.

Las únicas pérdidas que se producen dentro de un motor eléctrico corresponden a la energía disipada en forma de calor que genera la circulación eléctrica por los conductores, en el campo magnético y una pequeña parte que también tiene forma de energía calórica y que se produce en los descansos del rotor. Es por este motivo que los motores eléctricos logran eficiencias muy elevadas, las que tienen valores entre 85% y 95%.

Este aspecto es de gran importancia para las embarcaciones que utilizan motores eléctricos como maquinaria principal, dado que en general tienen una capacidad de almacenamiento de energía limitada de acuerdo al tipo y cantidad de baterías que utilice, y que normalmente no es muy elevada, lo que otorga una

autonomía menor que los motores de combustión interna; por esto es de vital importancia un motor que aproveche lo más eficientemente posible dicha energía.

En los motores de combustión interna, los gases de escape constituyen los residuos propios de la quema del combustible al interior de los cilindros, proceso base para el funcionamiento de éste, ya que la expansión de los gases genera la fuerza que actúa sobre la cabeza del pistón para lograr su movimiento descendente. Luego de ser utilizados, éstos gases son expulsados a la atmósfera, generando diversos grados de contaminación.

Sin duda una de las grandes ventajas de los motores eléctricos está constituida por el hecho de que su principio de funcionamiento no se basa en la combustión, por lo que no existen residuos de ningún tipo ni descargas a la atmósfera. Este es un factor que cada día toma más importancia, sobre todo en áreas navegables protegidas desde el punto de vista ambiental. Para embarcaciones menores cuyo perfil de misión considera navegaciones en aguas interiores protegidas, un sistema de propulsión eléctrico asegura la ausencia de emisiones de cualquier tipo tanto a la atmósfera y al agua. Este aspecto se relaciona también con los niveles de ruido emitidos, ya que el motor eléctrico, por su principio de funcionamiento, genera niveles de ruido notoriamente menores que su par de combustión interna, lo cual adquiere gran relevancia especialmente para embarcaciones menores utilizadas para transporte de pasajeros o simplemente de recreación.

La diferencia en el principio de funcionamiento de ambos tipos de motores implica también que sus piezas y componentes son diferentes. Así, mientras el motor de combustión interna tiene además de sus partes principales, sistemas anexos como el de alimentación, lubricación y enfriamiento, el motor eléctrico carece de estos sistemas, lo que permite que sus dimensiones sean notoriamente menores. Dependiendo de los modelos que se comparen pueden existir diferencias de rangos del 200% en algunas de las dimensiones de los motores, además de una gran diferencia en el peso de motor, lo cual cobra vital importancia para las embarcaciones menores, donde se debe optimizar al máximo

el peso, para obtener el menor desplazamiento posible. Las imágenes siguientes muestran un ejemplo particular de diferencia de dimensiones:



Kräutler SDK 15 AC



Volvo Penta D1 – 20

	Kräutler 15,0 AC	Volvo Penta D1-20	% Diferencia
Largo (eslora)	258 mm	765 mm	196%
Ancho (manga)	258 mm	471 mm	83%
Alto (puntal)	502 mm	534 mm	6%
Peso	91 kg	144 kg	58%

Esta notoria diferencia implica que será posible un mejor aprovechamiento de los espacios a bordo, factor vital para una embarcación menor.

Otro aspecto que diferencia a ambos sistemas de propulsión es el torque o par motor. En motores de combustión interna por lo general el torque aumenta en proporción directa con el número de revoluciones a las que gira el eje, hasta llegar a un nivel donde se mantiene relativamente constante; normalmente este nivel se alcanza a potencias cercanas al 30% ó 40% de la potencia máxima del motor, logrando llegar al torque máximo a valores de entre el 70% y 80% de su potencia máxima. Para el caso de los motores eléctricos, una de sus características es que logran alcanzar el valor máximo de torque prácticamente de manera instantánea al momento del encendido, manteniendo un torque máximo constante virtualmente en todo su rango de revoluciones.

Sin duda uno de los aspectos que comparativamente ofrece mayor ventaja a los motores eléctricos en relación a los motores de combustión interna es la prácticamente nula mantención preventiva a la que deben ser sometidos a lo largo

de su vida útil, especialmente los motores de corriente alterna de inducción. En este sentido, los motores de combustión interna deben ser sometidos a mantenciones preventivas periódicas, además de estar sujetos permanentemente a potenciales daños de piezas por fallas de lubricación, enfriamiento, corrosión, etc. lo cual incide directamente en los costos de operación del motor.

3.- Limitaciones del sistema eléctrico de propulsión de embarcaciones menores.

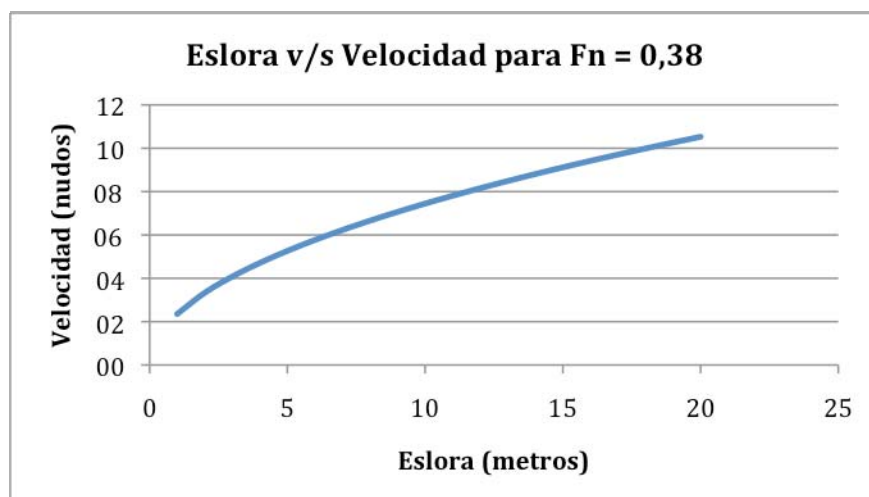
Una de las grandes limitaciones de los sistemas de propulsión eléctricos en naves menores, es que su potencia y velocidad son considerablemente menores a las que podrían alcanzar mediante un sistema de propulsión convencional basado en un motor de combustión interna. Lo anterior no se debe a que no existan motores eléctricos que logren dichas potencias, sino a que el conjunto de componentes del sistema lo hacen poco práctico. De esta forma, la limitación se encuentra en la capacidad de almacenar energía a bordo y la necesidad de contar con una autonomía aceptable de acuerdo al perfil de misión. En este sentido, un motor eléctrico de gran potencia, que sea capaz de alcanzar altas velocidades tendrá un alto consumo de energía, por lo cual se deberá contar a bordo con una gran cantidad de baterías, aumentando entre otras cosas el desplazamiento liviano y disminuyendo el espacio disponible a bordo. Éstas baterías serían capaces de alimentar el motor durante un tiempo muy limitado, esto sin considerar la cantidad de tiempo que requerirán las baterías para ser recargadas.

En relación a la autonomía, comparativamente la capacidad de almacenamiento de energía de las baterías es sustantivamente menor a la cantidad de energía requerida por un motor de combustión interna y almacenada en un estanque de combustible. En otras palabras, un motor de combustión interna permite una cantidad de horas de funcionamiento del motor mucho mayor a la de un motor eléctrico cuya energía necesaria para funcionar se almacena en baterías. En general los sistemas propulsivos eléctricos en embarcaciones menores se configuran para obtener autonomías de aproximadamente entre 4 y 7 horas a máxima potencia del motor. En este aspecto incide también el tipo de

baterías que se utilice. Las baterías de gel permiten mayor profundidad de descarga que las baterías AGM, y ambas tienen un mejor desempeño en este sentido que las tradicionales de Plomo – Ácido, aunque todas cuentan con características distintas. Las baterías de Litio – Ion permiten profundidades de descarga de entre un 80% y 100% sin disminuir los ciclos de vida útil, aunque su valor es considerablemente mayor.

El diseño de las formas del casco tiene influencia directa en la resistencia al avance generada por éste y por ende, en el consumo energético del motor expresado en amperes hora. Un mismo motor instalado en casco distintos tiene una curva de consumo eléctrico diferente, por lo cual un diseño estudiado del casco permitirá una menor necesidad de almacenamiento de energía, o bien una mayor autonomía de la embarcación.

Si bien el uso de propulsión eléctrica limita a la embarcación a alcanzar velocidades relativamente bajas en comparación a una propulsión con motor de combustión interna, las velocidades que es posible alcanzar corresponden en general al límite de navegación de desplazamiento para embarcaciones menores, alcanzando valores de Número de Froude (F_n) cercanos a $F_n = 0,4$ ($V/\sqrt{L} = 1,3$). Dada la alta necesidad de potencia requerida para superar la zona de pre planeo por el aumento de resistencia al avance que se produce a esos valores de F_n , se asume en general que una embarcación con propulsión eléctrica no pretende alcanzar estas velocidades. En el siguiente gráfico se muestran las velocidades correspondientes a las esloras para $F_n = 0,38$.



La generación de energía a bordo por medio de paneles fotovoltaicos, además de hacer uso de energía limpia y renovable, reduciendo prácticamente a cero los costos de operación, permite un aumento de la autonomía de la nave, dado que a medida que el motor utiliza energía almacenada en las baterías, los paneles mantienen la generación eléctrica, aunque a tasas de producción menores a la de consumo del motor, por lo cual se puede observar un aumento de entre un 30% a un 40% en la autonomía, en condiciones ideales para el funcionamiento de los paneles.

Los paneles fotovoltaicos logran una generación energética óptima cuando se encuentran con la orientación e inclinación adecuada para recibir la radiación solar de manera perpendicular a su superficie. Lograr estas condiciones a bordo de una embarcación es complicado y poco práctico por lo escaso de los espacios disponibles y dado que por concepto la embarcación se encontrará en constante movimiento durante su navegación. Por estos motivos los paneles se suelen instalar a bordo en superficies horizontales y de manera fija, reduciendo en parte la eficiencia en la generación energética. El cálculo del área necesaria de paneles dependerá de la energía requerida por el sistema, la radiación solar local y la potencia de cada panel. A continuación se muestra una tabla con los niveles de radiación promedio de los últimos 22 años por mes en distintas ciudades de Sudamérica:

Ciudad	Latitud	Longitud	Promedio de Radiación Solar sobre Área Horizontal (KW-h/m ² /día)											
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Valdivia	39° 48' 30" S	73° 14' 30" W	7,68	6,73	5,08	3,37	2,15	1,69	1,98	2,82	4,18	5,68	6,83	7,62
Valparaíso	33° 02' 27" S	71° 36' 31" W	7,84	6,69	5,53	4,25	2,9	2,46	2,73	3,6	5,01	6,36	7,5	8,08
Buenos Aires	34° 26' 00" S	58° 36' 00" W	7,05	6,09	4,94	3,64	2,75	2,22	2,46	3,32	4,54	5,35	6,44	6,97
Bariloche	41° 01' 00" S	72° 24' 00" W	6,37	5,81	4,26	2,75	1,75	1,33	1,56	2,24	3,37	4,62	5,65	6,33
Rio de Janeiro	22° 54' 00" S	43° 13' 59" W	5,21	5,41	4,76	4,3	3,66	3,65	3,66	4,32	4,18	4,74	4,97	5,01
Brasilia	15° 45' 00" S	47° 57' 00" W	5,37	5,6	5,2	5,32	5,09	5,04	5,23	5,74	5,84	5,52	5,17	4,94
Puno	15° 50' 15" S	70° 01' 18" W	5,84	5,84	5,66	5,65	5,63	5,39	5,57	5,94	6,49	6,84	7,01	6,5
Callao	12° 04' 00" S	77° 12' 00" W	7,24	7,32	7,14	6,35	4,94	3,4	3,1	3,49	4,34	5,34	6,09	6,83
Barranquilla	10° 59' 16" N	74° 47' 20" W	3,58	3,83	3,81	4,03	4,09	4,03	4,25	4,55	4,62	4,61	4,32	3,96
Montevideo	34° 54' 21" S	55° 07' 16" W	6,88	5,76	4,82	3,51	2,68	2,15	2,36	3,14	4,26	5,21	6,29	6,88
La Libertad	02° 13' 05" S	80° 19' 20" W	5,94	5,73	6,07	6,17	5,74	4,93	4,36	4,51	5,08	5,09	5,68	5,94

Fuente: Atmospheric Science Data Center, NASA.

La disposición de los paneles a bordo requerirá de superficies necesariamente expuestas a la radiación y que además tengan la forma adecuada para la instalación de paneles, limitando de cierta forma el uso de

espacios a bordo. Los multicascos resultan muy adecuados para la disposición de paneles, dado su gran área de cubierta, o la posibilidad de integrar los paneles como parte del diseño de la nave, atenúan el impacto de los paneles sobre la utilización del espacio a bordo.

En virtud de que un menor desplazamiento implica una menor resistencia al avance, factor de mucha importancia en el diseño de una embarcación con propulsión eléctrica dado que su mayor limitante será la autonomía, es necesario optimizar al máximo el peso de la embarcación. Por esta razón el material de construcción del casco, así como el estudio hidrodinámico de sus formas cobra una gran importancia. Dentro de los materiales de construcción de naves menores, lo más utilizados son la madera, el aluminio y los materiales compuestos; entre estos el que ofrece mejor relación de peso estructural y resistencia corresponde a los materiales compuestos, lo cual no descarta su uso con cascos contruidos en otros materiales, por lo que resulta el material más adecuado de construcción del casco para una nave que utilizará propulsión eléctrica. Al optimizar el desplazamiento liviano de la embarcación se permitirá una menor necesidad de potencia para una velocidad determinada, o bien, una mayor disponibilidad para baterías, lo cual permitirá el aumento de la autonomía de la embarcación.

En general las limitaciones que implica el uso de propulsión eléctrica en embarcaciones menores, restringen el perfil de misión para el cual su uso resulta conveniente. De acuerdo a esto al momento de proyectar una nave con este tipo de propulsión se deberá tener en cuenta aspectos relativos a su perfil de misión tales como:

- Su uso no resulta recomendable para naves que requieran velocidades muy elevadas, superiores al rango de navegación de desplazamiento, es decir Números de Froude máximos de entre 0,38 a 0,4.
- Dado que es necesario reducir al máximo el desplazamiento de la nave, el uso de propulsión eléctrica no es el más adecuado para embarcaciones

que transporten carga, dado que requerirán potencias muy elevadas, lo que implica una gran cantidad de baterías para obtener una autonomía aceptable.

- En relación también con el desplazamiento, idealmente el casco de la embarcación debe ser construido con materiales livianos, tales como materiales compuestos; por consideraciones de costo, el más utilizado es el plástico reforzado con fibra de vidrio aunque otros materiales como el carbono o kevlar pueden ayudar a reducir aún más el peso del casco.
- En el diseño de la embarcación se deben considerar superficies planas expuestas a la intemperie para la instalación de paneles fotovoltaicos. Los multicascos ofrecen ventaja en este sentido.
- El área de operación de la embarcación se debe tener también en cuenta, dado que a distintas latitudes los niveles de radiación solar son distintos. Por otra parte también influye el factor meteorológico, por cuanto los días nublados disminuyen la capacidad de los paneles solares de generar energía eléctrica. En el caso de las naves que carguen sus baterías por medio de una conexión a la red eléctrica este factor no es influyente.
- En general el sistema propulsivo eléctrico permite una autonomía de una determinada cantidad de horas, de acuerdo a la potencia del motor, por lo que su uso es adecuado en naves que realicen navegaciones cercanas a puerto, no permitiendo travesías demasiado largas.
- La resistencia a la propulsión se ve aumentada por efecto de las olas y el viento, por lo que el motor deberá utilizar más potencia para vencer este aumento de resistencia en condiciones de operación reales, por lo que si se piensa en optimizar el uso de la energía almacenada se debe considerar también su utilización en aguas protegidas, idealmente con muy poco oleaje y viento. Las condiciones ideales las ofrecen lagos, ríos o bahías protegidas.

4.- Costos de Implementación.

Un factor importante al momento de decidir la utilización de un sistema de propulsión eléctrico a bordo de una embarcación menor lo constituye su precio, principalmente el costo de implementación, el que constituye un porcentaje importante del valor total de la nave, especialmente en el caso de una embarcación menor.

Es necesario hacer una estimación de costos para cada proyecto en particular, dado que la forma del casco, perfil de misión, presupuesto disponible y una serie de otros factores influirán en las decisiones respecto al tipo, marca, modelo de los elementos que constituyen un sistema eléctrico de propulsión. Sin embargo, es posible determinar ciertos parámetros con el fin de tener una idea global de los costos referenciales de mercado para la implementación de un sistema eléctrico de propulsión en una embarcación menor.

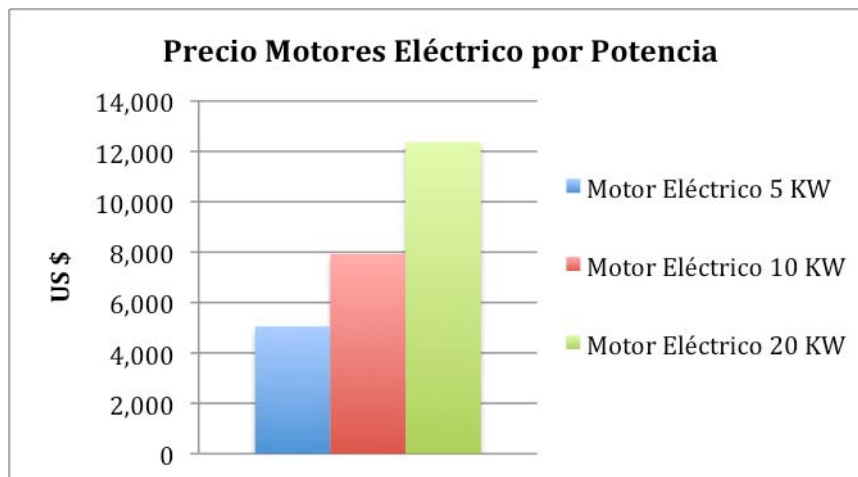
En virtud de que existe una gran gama de proveedores tanto de motores eléctricos, como de baterías y paneles fotovoltaicos, se especificarán ciertos parámetros para analizar sus precios. En primer lugar se seleccionarán tres potencias de motores adecuadas para su uso en embarcaciones menores, las que corresponden a motores de potencias referenciales de 5, 10 y 20 KW. Estos valores abarcan un amplio rango de las potencias normalmente utilizadas para propulsar este tipo de embarcaciones. En relación a las marcas, se escogió tres marcas para cada potencia, entendiendo que existen distintas características de calidad y garantía, entre otras. Finalmente se obtuvo un valor medio referencial por cada una de las potencias seleccionadas.

De igual forma se establecieron parámetros para conocer los precios de mercado de las baterías. En este caso se escogieron baterías del tipo AGM de 6V y capacidad cercana a los 300 Ah.

Para los paneles fotovoltaicos se escogieron paneles monocristalinos de 200 W de potencia referencial.

Consultando a diversos proveedores en el mercado se establecieron los siguiente precios promedio de cada uno de los componentes de un sistema de propulsión eléctrico:

Potencia (KW)	Valor Promedio (US\$)
5	5.053
10	7.932
20	12.374

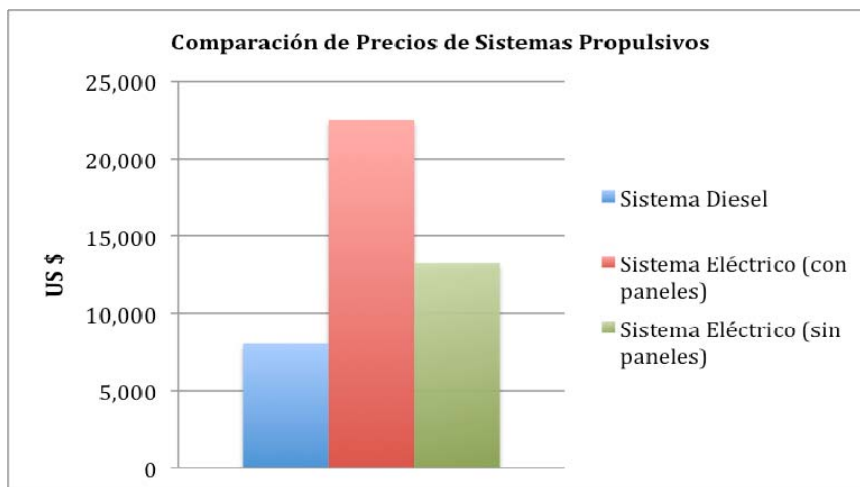


Basándose en un sistema de propulsión para un motor de 10 KW de potencia, se muestran a continuación los precios referenciales de mercados para los elementos que componen el sistema, considerando tanto la carga de baterías por medio de paneles fotovoltaicos, así como desde la red eléctrica por medio de un cargador de baterías. El número de paneles y baterías fue calculado para obtener una autonomía dentro del promedio, dado que cada proyecto en particular requiere de la realización de un análisis para determinar estos aspectos.

Ítem	Cantidad	Precio Unitario (US\$)	Precio Total (US\$)
Motor Eléctrico	1	7.932	7.932
Panel Fotovoltaico	10	925	9.250
Baterías	4	970	3.880
Cargador de Baterías	1	1429	1.429
Valor Total =			22.491

Cabe hacer presente que para un sistema que sea diseñado para ser cargado solamente desde la red eléctrica fija no se contemplará la adquisición de paneles fotovoltaicos.

Fue escogido un sistema basado en un motor de 10 KW con el fin de compararlo con un sistema de potencia similar basado en un motor diesel de 10,3 KW (BHP), con sistema de propulsión orientable saildrive. En base a los valores de distintos proveedores de motores diesel de las características indicadas se obtuvo un valor de mercado promedio de US\$ 8.070. De esta forma es posible realizar la comparación de los precios de adquisición del sistema de propulsión para un caso particular de potencia.



5.- Costos de Operación.

Si bien existe diferencia en los costos de implementación entre un sistema propulsivo diesel y uno eléctrico, la gran ventaja de este último desde el punto de vista económico se encuentra en los costos de operación, especialmente referido al sistema eléctrico que utiliza radiación solar para la carga de las baterías, ya que los costos se reducen prácticamente a cero, si se considera la falta de mantenimiento de los motores y la utilización de un tipo de energía gratuita y renovable como la luz solar.

En el caso de cargar las baterías mediante la red eléctrica por medio de un cargador se debe considerar el costo del Kilowatt-Hora que varía de acuerdo al proveedor local de energía eléctrica.

En la siguiente tabla se muestra el valor de la energía eléctrica en distintas ciudades de Chile, tomando como base el servicio domiciliario BT-1 y sistemas de transmisión aérea, actualizados al 01 de julio de 2011.

Ciudad	Empresa Proveedora	Precio	Unidad
Valdivia	Saesa	0,26	US\$/KWh
Puerto Montt	Saesa	0,28	US\$/KWh
Lago Ranco	Saesa	0,32	US\$/KWh
Viña del Mar	Conafe	0,25	US\$/KWh
Valparaíso	Conafe	0,25	US\$/KWh
La Serena	Conafe	0,29	US\$/KWh
Antofagasta	Elecda	0,22	US\$/KWh
Iquique	Eliqsa	0,24	US\$/KWh

De esta forma es posible calcular el costo de la hora de navegación de una embarcación. Como es sabido este cálculo variará de acuerdo a cada embarcación, y cada motor, ya que las formas del casco influirán en el consumo eléctrico del motor, lo cual varia la potencia eléctrica que con que se debe alimentar por hora de navegación. De igual forma influirá la velocidad a la que se navegue, por cuanto el motor consume una cantidad de energía distinta a diferentes niveles de carga.

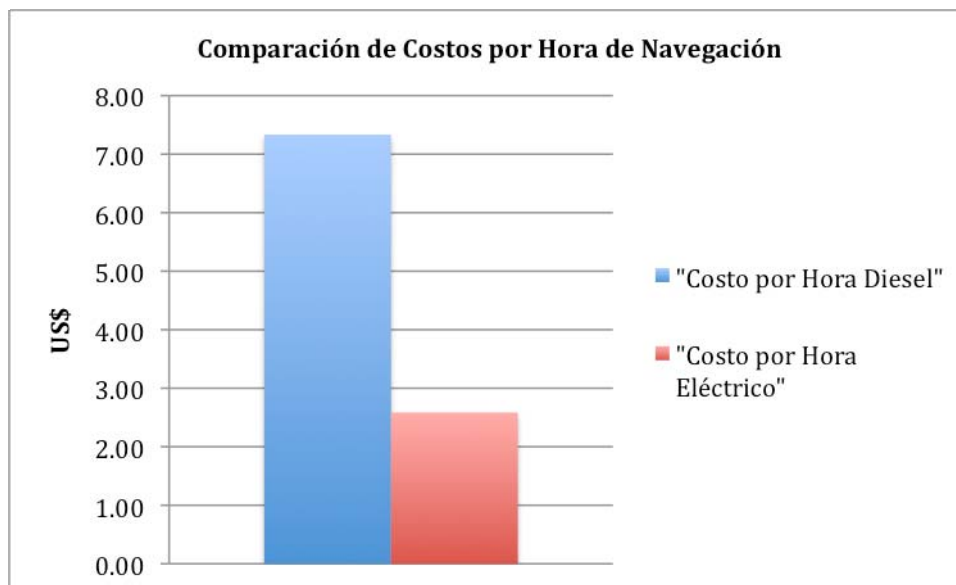
El cálculo de costo por hora de navegación es independiente para cada embarcación y cada motor en particular. Sin embargo, como se indicó anteriormente se realizó la comparación para dos motores, uno eléctrico y uno diesel en un casco específico, basado en sus curvas de consumo eléctrico y de combustible respectivamente. En el caso del motor diesel, el costo por hora de navegación es el siguiente:

Motor	Diesel	10,3 KW
Precio por Lt	1,32	US\$
Consumo por Hora	3,70	lt
Costo F.O. Por Hora	4,87	US\$
Lubricante por Hora	0,43	US\$
Mantención por Hora	2,04	US\$
Costo Hora de Navegación	7,33	US\$

Por otra parte, se estimó el costo por hora de navegación de un motor eléctrico de potencia similar, con sistema de carga de baterías desde la red eléctrica, por medio de un cargador de 80 amperes para baterías AGM (50% de profundidad de descarga) con un 80% de eficiencia. Para el ejemplo se utilizó el costo de la energía eléctrica en la ciudad de Valdivia .

Motor	Eléctrico	10 KW
Cargador	80	Amp
Voltaje Cargador	12	V
Potencia Cargador	0,96	KW
Eficiencia	80	%
Capacidad Baterías	330	Ah
Profundidad de Descarga	50	%
Capacidad Disponible	165	Ah
Cantidad	4	
Horas de Carga	10,31	hrs.
Costo Energía	0,26	\$/KWh
Costo Hora de Navegación	2,59	US\$

En el siguiente gráfico se puede visualizar la comparación entre el costo de operación de ambos sistemas de propulsión. El sistema eléctrico con baterías cargadas por medio de paneles fotovoltaicos no se incluye dado que su costo de operación es nulo al utilizarse como único medio de carga.

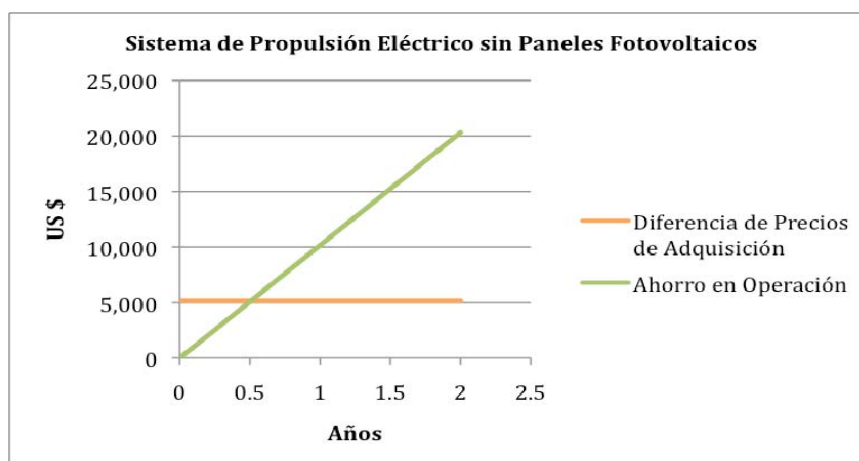


Para sistemas mixtos de carga de baterías en propulsión eléctrica el costo por hora de navegación será un valor intermedio de acuerdo al nivel de uso de cada sistema de carga.

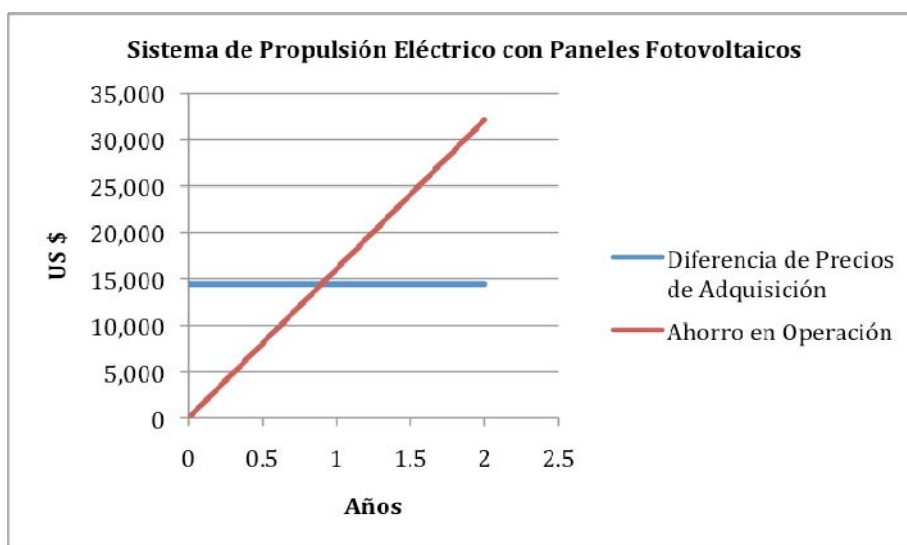
De esta forma, y tomando en cuenta la diferencia en los costos de adquisición de ambos sistemas, donde el sistema eléctrico con paneles fotovoltaicos llegaba a costar prácticamente el triple del sistema diesel, es posible hacer una proyección del ahorro en cuanto a costos de operación del sistema eléctrico tanto cargado con paneles como desde la red, respecto al costo de operación del sistema diesel.

Para esta simulación se consideró una operación diaria de 6 horas durante todo el año de la embarcación, lo cual puede ser el caso por ejemplo de una embarcación menor dedicada al transporte de pasajeros, lo cual también coincide con la autonomía aproximada de un sistema de este tipo.

En primer lugar se muestra la gráfica que indica el ahorro de operación del sistema cargado desde la red. La línea horizontal muestra el valor de la diferencia en la inversión inicial de ambos sistemas, mientras que la línea creciente muestra el ahorro en operación en el tiempo. Así, como se muestra en el gráfico, el menor costo de operación y la menor diferencia en la inversión inicial, dado que no se considera el costo de los paneles, permite que la recuperación de la diferencia de inversión se realice aproximadamente en 6 meses.



De igual forma, el sistema eléctrico de propulsión cargado con paneles fotovoltaicos, al tener costo de operación igual a 0, la diferencia en costos de operación equivale al costo por hora de navegación del sistema diesel. Por otra parte la diferencia en las inversiones iniciales es mayor que en el caso anterior, por cuanto la implementación del sistema requiere la compra de los paneles fotovoltaicos. Así, como muestra la gráfica, el ahorro en costos por hora de navegación, bajo el mismo régimen, es decir 6 horas de navegación diarias, permite recuperar la diferencia de inversión en aproximadamente 1 año.



Por lo que se aprecia en las gráficas, desde un punto de vista exclusivamente económico, una embarcación que navegue propulsada con un motor eléctrico y cuyas baterías se carguen desde la red eléctrica, es decir, que no considere paneles fotovoltaicos en su diseño, permite una menor inversión, con una menor diferencia en la implementación del sistema propulsor en relación a un motor diesel, y una recuperación más rápida de esa diferencia en la inversión inicial, aún cuando en su operación se deba pagar el costo por carga de energía eléctrica. Esto ocurre principalmente por el alto costo de los paneles fotovoltaicos en el mercado. Sin embargo, fuera de este plazo la operación con energía generada en paneles fotovoltaicos permitirá que los costos operacionales se reduzcan a cero, mientras se tengan las condiciones apropiadas para la utilización de los paneles.

Como se indicó anteriormente este ejemplo corresponde a un caso particular, por lo que los valores variarán de acuerdo a las marcas, modelos y potencias de los motores, tipo y marca de paneles y baterías, además del costo del combustible diesel y tarifa eléctrica de acuerdo a la zona de operación de la embarcación. También influyen las formas del casco y las condiciones de operación como se indicó anteriormente. Sin embargo el ejemplo resulta ilustrativo de las diferencias entre los sistemas propulsivos desde un punto de vista económico.

CONCLUSIONES

Un sistema de propulsión eléctrico para naves menores se compone de un motor eléctrico de la potencia necesaria de acuerdo a la resistencia al avance que genere el casco y de la necesidad de velocidad de la embarcación, con el correspondiente dispositivo electrónico que permita el control de velocidad y sentido de giro de la hélice, además de un conjunto de baterías para el almacenamiento de la energía eléctrica. Para la carga de baterías se puede utilizar energía solar por medio de paneles fotovoltaicos, o bien energía eléctrica desde la red fija por medio de un cargador de baterías.

El sistema de propulsión eléctrico tiene una serie de aspectos positivos que lo hacen muy atractivo, tanto del punto de vista técnico, ambiental y económico como alternativa de propulsión para naves menores; sin embargo implica a la vez una serie de restricciones a la embarcación, por lo cual su uso se ve acotado a embarcaciones cuyo perfil de misión permita que no requieran una velocidad por sobre el límite de navegación de desplazamiento, su casco sea construido con materiales livianos, idealmente materiales compuestos, no transporte grandes cargas con el fin de optimizar su desplazamiento y cuya navegación no contemple una gran cantidad de horas de autonomía idealmente en aguas interiores o condiciones de mar muy favorables.

Desde el punto de vista económico, el sistema de propulsión eléctrico tiene un valor considerablemente mayor al sistema de propulsión diesel, para potencias similares. Si el sistema de propulsión eléctrico no contempla generación de energía con paneles fotovoltaicos, el costo se reduce bastante, aunque sigue siendo superior a un sistema diesel convencional.

El mayor costo de implementación del sistema eléctrico se ve compensado por el mínimo costo operacional que implica este tipo de propulsión, llegando incluso a ser nulo si se opera con paneles fotovoltaicos, siempre que se cuente con las condiciones adecuadas para su funcionamiento. Es posible absorber la diferencia de costos de implementación respecto a un sistema diesel en un plazo mediano, dependiendo del nivel de uso que se le de a la embarcación, luego de lo cual se contará con un sistema moderno, limpio, de fácil operación y sustantivamente económico para propulsión de embarcaciones menores.

BIBLIOGRAFÍA

- Michael Liwschitz, Clyde Whipple, “Alternating Current Machines”. Editorial Continental, 1971.
- Díaz, Barbón, Gómez – Alexandier, “Variación de la velocidad de los motores eléctricos”. Universidad de Oviedo, 2002.
- Méndez, Cuervo, “Energía Solar Fotovoltaica”. Editorial FC, 2º Edición, 2006.
- Pigazo, Moreno, “Sistemas Electrónicos de Potencia en el Buque”. Universidad de Cantabria, 2006.
- Nelson Pérez, “Elementos de Resistencia y Propulsión”. Universidad Austral de Chile, 2010.
- Kräutler Elektromaschinen. (www.kraeutler.at)
- Astillero Alwoplast (www.alwoplast.com)
- UNAM, “Notas de Termodinámica”. Universidad Autónoma de México. (www.cie.unam.mx).
- Atmospheric Science Data Center. (www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/).
- Electric Boat Association. (www.electric-boat-association.org.uk).