



## MAGTRONIC

### Una nueva Generación en la Tecnología de la Propulsión Naval.

*MAGTRONIC es la denominación del motor propulsor de nuestros nuevos Submarinos Scorpène, un motor de una nueva generación que provoca un vuelco histórico en la tecnología de la propulsión de submarinos.*

Carlos Blamey Ponce\*

#### - **Introducción.**

La propulsión de submarinos convencionales ha sido tradicionalmente por medio de motores eléctricos alimentados por baterías, las cuales constituyen el medio más apropiado para la acumulación de energía eléctrica bajo la forma de corriente continua. Este tipo de propulsión, cuya naturaleza no se diferencia mayormente de aquella de nuestros primeros submarinos de la Clase "H" que datan de 1917, se ha mantenido vigente hasta hoy, fundamentalmente porque es altamente conocida y confiable, aunque cuente con la desventaja de una alta demanda de mantenimiento.

En este sentido, la alternativa lógica la constituía la corriente alterna; sin embargo, no existía el desarrollo apropiado de la tecnología como para pretender su reemplazo, sin dejar de ver que la fuente de almacenamiento de energía seguía siendo la batería.

#### - **Tecnología Desarrollada.**

La gran diferencia entre un motor de corriente continua y el motor de imanes, es la forma cómo se obtiene el campo magnético que permite el movimiento del rotor. En el caso del primero, la generación del campo magnético se logra por medio de la inducción de corriente en el rotor, lo anterior, necesariamente implica

que éste sea bobinado y contenga los correspondientes dispositivos de transmisión de la electricidad, que tradicionalmente han sido carbones. En el motor de imanes, en cambio, no hay circulación de corriente por el rotor, puesto que el campo magnético es generado por imanes de gran potencia dispuestos convenientemente en toda su periferia.

Es fácil de suponer que una de las consideraciones más significativas en el diseño de un submarino es la optimización en el empleo del espacio y la adecuada distribución de pesos. En este sentido, la concepción de un motor propulsor de bajo peso, pequeño volumen y alta potencia cobra vital importancia; la solución encontrada fue el desarrollo de un motor sincrónico (de corriente alterna) que mediante el empleo de imanes de excepcionales capacidades, desarrollados en la década de los 80, permitió obtener ventajas importantes para efectos del diseño de un motor de propulsión de submarinos, los cuales pueden resumirse en los que a continuación se indican:

- Reducción en un 30% de la relación peso/volumen del motor.
- Producto de su mayor diámetro respecto de los motores de corriente continua, para una misma potencia mecánica, es capaz de desarrollar un mayor torque en el eje, o bien, desarrollar el mismo torque a menos velo-

\* Capitán de Fragata. ING.N.EL.SM.

cidad. Lo anterior, conceptualmente significa que este motor permitirá al submarino alcanzar velocidades más altas sin cavitación.

- Se suman a esto, las ventajas del bajo mantenimiento demandado por el motor de corriente alterna, fundamentalmente por la inexistencia de carbones y partes rozantes en su interior.

Sin embargo, la compatibilidad entre un banco de baterías, que almacena corriente continua, y el motor, que opera con corriente alterna, está dada por la electrónica de potencia. Esta tecnología, utilizada en múltiples actividades industriales, permite convertir la corriente continua en corriente alterna y optimizar el control de los dispositivos convertidores por medio de la utilización de herramientas computacionales de última generación.

Este motor, que en su concepción opera a una velocidad única, explota la tecnología de la electrónica de potencia y permite que, por medio de la modificación de la corriente alterna generada, pueda operar en un amplio rango de velocidades (Modulación del Ancho de Pulso - PWM).

Por medio de la electrónica de potencia se ha logrado, igualmente, optimizar los parámetros de operación del motor; un gran número de polos que permite la disminución de la potencia por fase; la operación a una alta frecuencia, disminuyendo el ruido y el nivel de vibraciones y, la generación de una señal de forma trapezoidal, que disminuye las pérdidas, resultando más eficiente que la tradicional señal sinusoidal.

Asociada al gran número de fases, está la alta redundancia del sistema, tanto a nivel de equipos como de componentes, aumentando la confiabilidad del motor propulsor y de la electrónica asociada a la conversión de la energía. El trabajo independiente de una fase con respecto a las siguientes, pro-

ducto de la generación de la corriente de excitación en forma individual y al exterior del motor, permite la falla de hasta el 77% de los inversores en cada cubículo convertidor, sin perder la rotación del eje.

### - **La Tecnología del Magnetismo Permanente.**

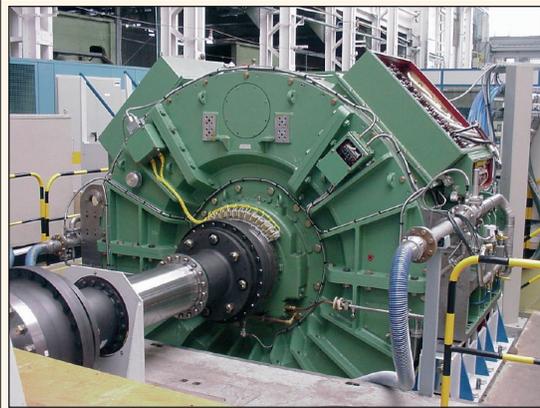
En la actualidad existe una gran cantidad de materiales con la característica de poseer magnetismo permanente. Son materiales que retienen el magnetismo después de haber sido expuestos a un campo magnético intenso.

Si a un material desmagnetizado que posea la capacidad de retener el magnetismo se le aplica un campo magnético externo (H), se tiene que el material puede de alguna manera memorizar la información obtenida durante el proceso de magnetización inicial y trabajar desarrollando una inducción (B) que tiene siempre una misma orientación.

En general, los materiales de magnetismo permanente tienen bastante estabilidad en su zona de trabajo; sin embargo, cuando el material es sometido a altas temperaturas, el flujo del imán decae y se reduce su rendimiento, situación irreversible e incluso más grave aún, frente a temperaturas más altas se puede llevar a la desmagnetización irreversible del imán.

### • **Alnicos.**

Consisten en una aleación de Hierro, Níquel, Cobre, Óxido de Aluminio y Cobalto. Tienen por característica una alta densidad de flujo remanente y buen rendimiento a altas temperaturas. Como están constituidos de elementos metálicos son buenos conductores eléctricos y al mismo tiempo sensibles a la corrosión. La principal desventaja de los Alnico radica en su baja resistencia a la influencia de un campo magnético externo, que lo expone a ser desmagnetizado.



Motor del SS "O'Higgins" en el Banco de Pruebas de Jeumont S.A.

*Estos imanes permanentes pueden ser agrupados de la siguiente forma:*

**Ferritas:**

*Este material es producido por un proceso metalúrgico de pulverización de la composición de Óxido de Hierro y Carbonato de Bario o Estroncio, muy pesado y quebradizo. Son muy resistentes a la influencia de campos magnéticos extremos; sin embargo, tienen un bajo valor de magnetismo remanente (cantidad de magnetismo que el imán puede producir por sí mismo).*

- **Tierras Raras.**

Estos elementos no son tierras ni tampoco tan raros como su nombre pudiera sugerir y se los denomina así por la apariencia terrosa de sus óxidos pues originalmente se pensaba que ellos eran los elementos metálicos mismos. Los imanes permanentes de Tierras Raras, están constituidos por un grupo de 17 elementos químicos denominados Lantánidos, que incluye a aquellos con números atómicos del 58 al 71 del Sistema Periódico de Unidades. Son metales blandos, muy buenos conductores de la electricidad.

- **Samarium – Cobalto.**

La primera generación de estas nuevas aleaciones, basada en la composición de SmCo<sub>5</sub>, obtenida en la década de los 60, comenzó a ser explotada comercialmente en los años 70, y hoy, se presenta como un material con una gran estabilidad magnética, con una curva de magnetización lineal y una fuerte resistencia a la desmagnetización. Con el transcurso del tiempo, los ensayos han permitido desarrollar el Sm<sub>2</sub>Co<sub>17</sub> e incrementar su capacidad energética en un factor de 6 con respecto al material original.

Los imanes de Samarium Cobalto se producen por un proceso metalúrgico de pulverización durante el cual el imán está

permanentemente sometido a un campo magnético con una orientación fija. El resultado es un material pesado y muy frágil, con una alta densidad de flujo, una alta intensidad de campo magnético, alta resistencia a la corrosión y gran estabilidad frente a altas temperaturas.

Como contrapartida está la necesidad de un manejo cuidadoso producto de su fragilidad, su alto costo de producción, tanto por el requerimiento de una alta fuerza de magnetización como por su naturaleza de material estratégico, por lo que normalmente existen restricciones en el proceso de adquisición.

- **Neodimio – Hierro – Boro.**

Durante los últimos años se ha logrado el desarrollo de la segunda generación de imanes de tierras raras basados en el Neodimio, un material de bajo costo, y el Hierro. Esta nueva generación de imanes fue anunciada recién en 1983 y presenta la gran ventaja que el Nd es un elemento mucho más abundante que el Sm. Los imanes de NdFeB que hoy se producen, presentan mejores propiedades magnéticas que aquellos de SmCo pero permiten un rango de trabajo sólo a bajas temperaturas, además de ser sensibles a la corrosión.

Por el hecho de encontrarse en pleno desarrollo, estos imanes son los que presentan una mejor potencialidad de mejorar sus capacidades y de proyectarse.

• **Criterio de Selección para el Dimensionamiento de los Imanes.**

La construcción de un motor eléctrico de propulsión de una gran potencia volumétrica como lo es el motor "MAGTRONIC" requiere de imanes permanentes de especiales capacidades y una gran energía específica. Es por esta razón que para determinar cuál es el tipo de imán que cumple con los requerimientos exigidos, fue necesario fijar exigentes criterios de selección:

- Alto campo coercitivo: Este valor refleja la resistencia del motor a la desmagnetización bajo la influencia de un campo magnético externo durante una sobrecarga o un cortocircuito.
- Alta inducción remanente: Este parámetro es especialmente importante en el caso de un motor sincrónico en estructuras sin concentración de flujo, donde el tamaño de los imanes es menor que el del diseño de un motor sincrónico convencional.
- Estabilidad térmica: El criterio de selección cobra especial importancia en este punto, puesto que la temperatura generada por la simple operación o sobrecarga del motor debe causar la mínima variación de los parámetros magnéticos del mismo.
- Temperatura máxima de funcionamiento: La temperatura frente a la cual, sin perder por completo sus propiedades, los imanes sufren pérdidas de imantación irreversibles.

Según el criterio definido, la selección fue efectuada como sigue:

- No era conveniente la instalación de imanes de tipo ALNICO debido a un débil campo coercitivo y, por ende, su fácil desmagnetización.
- Debido a su bajo nivel de inducción remanente era inconveniente el uso de imanes de FERRITA, los cuales sí constituirían una alternativa viable en

la estructura de motores con concentración de flujo, aunque en este caso su tamaño sería también mayor que el de imanes de SmCo y NdFeB.

- Conforme a las consideraciones anteriores, los imanes de Tierras Raras, SmCo y NdFeB, eran los únicos que reunían las condiciones requeridas para ser instalados y obtener un motor de una fuerte potencia volumétrica.

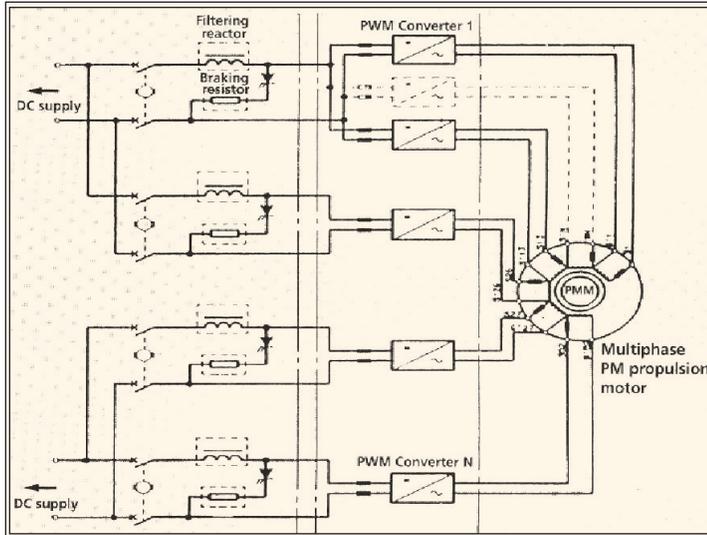
Finalmente, tras analizar las distintas cualidades de imanes de Tierras Raras, se llegó a determinar que la temperatura máxima de funcionamiento se volvía un parámetro esencial, por lo que fue necesario establecer un criterio de estabilidad térmica para la selección final.

• **Criterio de Estabilidad Térmica.**

Asumiendo que el motor sufre un aumento de temperatura de X °C respecto de la temperatura de referencia para establecimiento de parámetros de los imanes, que es de 20°C, la variación de la magnetización de los distintos materiales de Tierras Raras analizada es la indicada a continuación:

Material	Disminución de % Magnetización X = 40 °C	Disminución de % Magnetización X = 80 °C
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	1.4	2.8
SmCo <sub>5</sub>	2	4
NdFeB	6	12

Verificando el valor de la Temperatura de Curie de los materiales en análisis (temperatura frente a la cual desaparecen por completo las propiedades magnéticas de los imanes), es doblemente menos confiable la utilización de los imanes de NdFeB, conduciendo a que la temperatura de funcionamiento del motor sea un parámetro mucho más restrictivo, si se los compara directamente con los de SmCo.



Cada IVT está compuesto por un puente eléctrico en H mediante Transistores IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) refrigerados por agua. En los IVT, un switching (acción de abrir y cerrar la puerta de conducción de corriente del IGBT) de una frecuencia relativamente alta permite bajas fluctuaciones de la corriente y un control rápido y preciso. Esta frecuencia de "switcheo" puede ser ajustada para permitir la optimización, tanto de la huella acústica del motor, como también su eficiencia.

Por ende, en atención a que el motor de un submarino requiere de una máxima fiabilidad, el criterio condujo a la selección de los imanes de Sm2Co17, tanto por razones de estabilidad térmica como por la oposición que presentan para ser desmagnetizados parcialmente durante el funcionamiento a regímenes de carga extremos y frente a las peores condiciones de funcionamiento de regímenes degradados.

#### - **La Electrónica de Potencial.**

La Electrónica de Potencia permite convertir la Corriente Continua de la batería en la Corriente Alterna que trabaja en cada una de las fases del motor.

De acuerdo al diseño de este tipo de motor, cada fase individual es controlada independientemente por su propio inversor (IVT), donde cada IVT desarrolla dos funciones principales:

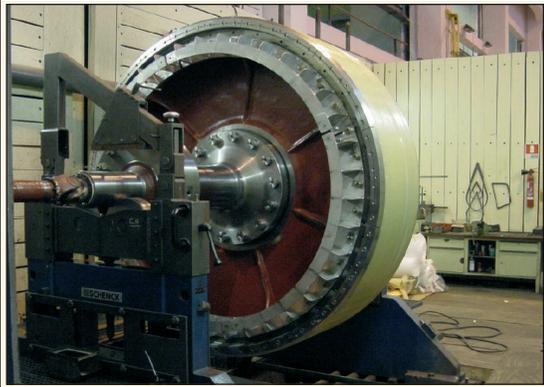
- Efectuar el "chopeo" (modelar la señal en función de cortes sucesivos) de la señal DC de modo de adaptarla a la FEM del motor.
- Controlar la magnitud y la forma de la corriente de fase por medio del principio de Modulación del Ancho de Pulso PWM.



En este motor multifases, como se indicó anteriormente, cada una de ellas opera en forma independiente. Esto quiere decir, que una unidad de control maneja el "timing" de cada IVT y le ordena, en función de la posición del rotor, cuando conducir, y, como si fuera un "motor diesel" (sólo con fines descriptivos y sin ánimo de provocar una discusión conceptual entre mecánicos y electricistas), el campo magnético del rotor tiende a orientarse hacia la fase que acaba de trabajar llevando a cabo la rotación del eje.

#### - **El Motor de los SS Scorpene.**

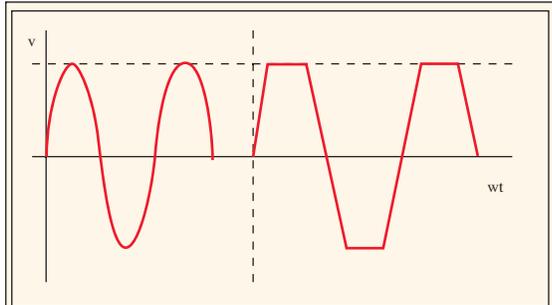
Conocidos ya los conceptos generales que permiten comprender tanto el diseño como la integración de la electrónica de potencia en el control de un motor sincrónico de imanes permanentes, pasemos a una descripción del motor Magtronic en sí.



El motor MAGTRONIC, corresponde al diseño de un rotor cilíndrico, sin piezas polares. En máquinas sin piezas polares el campo magnético de los imanes es radial y perpendicular al entrehierro. En esta estructura, particularmente simple, los imanes son instalados directamente en el entrehierro sobre la superficie del rotor. En este caso, el soporte mecánico de los imanes es asegurado por material no magnético (Aluminio) y un anillo de soporte de Fibra de Vidrio. Esta decisión corresponde fundamentalmente a razones de tipo constructivo dada la simplicidad del diseño y producto que otras alternativas implicaban además mayor complejidad para el mecanizado del rotor, un aumento en el tamaño de los imanes y obviamente del peso de la estructura.

• **Estructura del Motor Magtronic.**

Este diseño genera además una FEM de forma trapezoidal, en lugar de la tradicionalmente conocida senoidal. Esta FEM trapezoidal tiene ventajas significativas que es conveniente señalar:

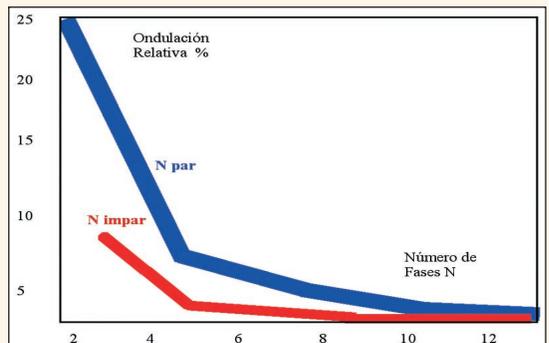


Una FEM sinusoidal tiene una tensión efectiva de  $\sqrt{1/2}$  del valor de la tensión peak.

Una FEM trapezoidal tiene una tensión efectiva de  $\sqrt{7/9}$  el valor de la tensión peak.

Un diseño multifase tiene las siguientes características:

- **Reducción del Torque Pulsatorio:**
  - Una alta frecuencia de chopeo, asociada a un gran número de fases optimiza el control de la forma de onda de la corriente (trapezoidal), reflejando exactamente la forma de la FEM lo que produce un torque con pulsaciones aminoradas respecto de una señal de corriente sinusoidal.
  - La reducción de las armónicas espaciales produce igualmente el fenómeno de reducción del torque pulsatorio. Esto queda reflejado en el diagrama presentado donde se observa que en un diseño de 13 fases el torque pulsatorio es prácticamente nulo.
- **Redundancia de fases:**
  - Un alto número de fase permite disminuir la potencia eléctrica individual (por fase).
  - Incremento en la disponibilidad al ser capaz de operar con un número reducido de fases.



Evolución de la ondulación del torque en función del número de fases.



Estator del Motor del SS "Carrera".

Lo anterior implica que, por el simple hecho de contar con una FEM de forma trapezoidal, el motor admite un 38% más de tensión efectiva y, por ende, un 38% más de potencia activa ( $\cos \phi = 0$ ).

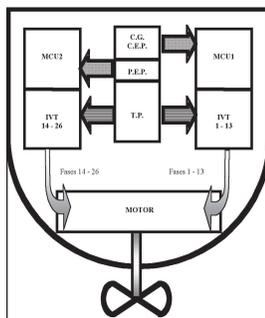
El estator, está constituido por un ensamble de chapas magnéticas y por las bobinas que son alimentadas de corriente por los inversores DC/AC, una carcasa, los descansos soporte del motor y un sistema de enfriamiento por agua.

Presenta, al igual que el diseño tradicional de los motores de corriente continua para propulsión de submarinos, redundancia en su estructura. Los primeros, consisten de un motor de doble armadura, en cambio éste constituye un diseño de doble estator, al ser alimentado por 26 fases en dos grupos de 13 fases idénticas, fase las unas con las otras, gracias a la individualidad de los IVT y a la independencia del control. Con el objeto de mantener controlada la temperatura del motor, las bobinas del estator son enfriadas mediante un circuito de agua tratada, que resulta más eficiente en la transferencia de calor y que permite un funcionamiento más silencioso que el enfriamiento por aire.

#### • **Funcionamiento Global del Sistema de Propulsión:**

El Sistema de Propulsión es redundante en cuanto al control y en cuanto a sus componentes, teniendo además la opción de operar en distintas configuraciones cruzadas.

El Sistema de Propulsión de los Submarinos Scorpène está compuesto, entre otros elementos, de dos cubículos convertidores, situados a ambas bandas del submarino. Éstos se encuentran a



del tablero de propulsión (TP) y delante del motor propulsor, montados rígidamente sobre una plataforma aislada del casco del submarino por medio de montajes elásticos.

Los cubículos convertidores contienen los IVT correspondientes a una banda además de una unidad de control (MCU). Esta MCU, es independiente de los 13 IVT de la banda correspondiente, encontrándose asociada al modo de control (normal o respaldo – ambos remotos). La propulsión es controlada en modo normal desde la consola de energía de propulsión (C.E.P.) o la consola de gobierno (C.G.) y en modo respaldo desde el panel de energía de propulsión (P.E.P.), todos estos equipos ubicados en el departamento central.



Vista de un Cubículo Convertidor.

En el departamento de electricidad, los IVT son alimentados de corriente continua por el tablero de propulsión. Éstos, convierten la corriente continua en alterna y alimentan cada una de las fases a la cual están asociados conforme las órdenes del sistema de control.

El sistema de propulsión está igualmente diseñado para ser operado en modo local, es decir, un tercer modo de control, directamente operando sobre el panel de control local ubicado en los cubículos convertidores. Este modo de funcionamiento implica sólo la estación de control del motor, sin afectar su funcionamiento interno.

En caso de operación normal, cuando en razón del andar no se requiere de la máxima potencia, o bien en caso

de operación degradada, el sistema de propulsión está diseñado para operar con un solo convertidor, e incluso con un número reducido de IVT. Esto, se vuelve doblemente interesante frente a la intercambiabilidad de todos los componentes internos de los Cubículos Convertidores.

#### - **Determinación de la Eficiencia del Motor.**

De acuerdo con las especificaciones técnicas para el equipamiento eléctrico de propulsión, la eficiencia debe ser determinada por el método de pérdidas independientes, que es el método comúnmente utilizado para la presentación de pruebas de eficiencia y recomendado por la norma internacional IEC 34.

Las pérdidas inherentes a un motor eléctrico de magnetismo permanente sin carbones son:

- Pérdidas del Cobre, que se conoce por medio de la medición de la resistencia de fase.
- Pérdidas del Hierro, que se conoce por medio de mediciones.
- Pérdidas Mecánicas, que se conoce por medio de mediciones.
- Pérdidas por Corrientes de Fuga, que están dadas por la IEC 34 y conforme a un estándar son del 0,5% de la potencia.

Este método es ampliamente utilizado puesto que con sólo dos mediciones (resistencia y pérdidas con el motor sin carga) se puede calcular la eficiencia en todos los puntos (a distintas potencias y velocidades) sin tener que probar el motor en cada punto específico. Al calcular la eficiencia del motor por si solo se obtuvo un rendimiento superior al 96%.

Sin embargo, para el motor MAGTRONIC deben integrarse las pérdidas de los cubículos convertidores, de modo de determinar la eficiencia global del sistema (Motor + Cubículos Convertidores). Estas pérdidas pueden ser evaluadas e integradas por medio de cálculo o bien por métodos calorimétricos (como efectivamente fue hecho).

#### • **Determinación de la Eficiencia por Medición de la Potencia Real.**

Para la medición de la eficiencia real debe tenerse en consideración que la eficiencia global del Sistema de Propulsión está determinada por:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de salida en el eje}}{(\text{P DC CC1} + \text{P DC CC2} + \text{Poder Auxiliar})}$$

Este método, efectuado durante las pruebas de fábrica, determina la eficiencia real del equipamiento sin tener que efectuar cálculos, pero, presenta la desventaja de tener que efectuar la prueba para cada potencia especificada, sin la posibilidad de extrapolar tal como lo permite el método anteriormente indicado.

El promedio de las mediciones de la potencia de salida se obtiene midiendo la tensión DC en la entrada de los cubículos convertidores y los 115 volts de consumo global. La medición de la potencia en el eje es obtenida utilizando un torquímetro y un tacómetro, medida es igualmente confirmada por la potencia de salida del alternador empleado como carga.

De esta forma, la eficiencia global medida (motor + convertidores + poder auxiliar de control) resulta superior al 93%.

Si consideramos que un motor de CC de una potencia similar tiene una eficiencia cercana al 92%, sin considerar las pérdidas a nivel de los tableros de control, podemos decir que el rendimiento superior al 96% presentado, hace a este motor más eficiente que los motores de corriente continua empleados tradicionalmente en la propulsión de submarinos.

#### - **Una Nueva Generación.**

El motor de los submarinos Scorpène, marca una nueva era en la propulsión naval, tanto a nivel nacional como mundial. Es el primero en su generación, después de más de 20 años de estudios y ensayos.

Esta tecnología, es actualmente aplicada no sólo en la propulsión de

submarinos, sino también en el campo industrial, como es la generación de energía eléctrica por medio de generadores eólicos, un medio propuesto por algunos de los países más industrializados de Europa para el reemplazo progresivo de la generación nuclear de energía eléctrica. Otras aplicaciones navales, aún no implementadas, son la segunda generación del motor POD, un motor de propulsión "encapsulado" de 20 MW para buques de superficie.

Ineludiblemente, nos vemos obligados a sacar ciertas conclusiones:

- El motor Magtronic representa una innovación en la tecnología de la propulsión naval producto de la integración de la electrónica, no sólo en el control, sino en la generación de la potencia eléctrica requerida para la propulsión del submarino.
- El desarrollo alcanzado en la tecnología de los imanes permanentes, permite contar con motores de alta potencia, disponibles para aplicaciones tanto navales como industriales.
- El criterio empleado en el diseño de un motor multifases, brinda una serie de beneficios, como la reducción del torque pulsatorio y la disminución de la potencia eléctrica en cada fase.
- La electrónica de potencia, por su parte, permite una alta redundancia a nivel de los componentes del motor, además de la posibilidad de operar en múltiples configuraciones en caso de operación degradada. Esta redundancia es lograda además, gracias a la intercambiabilidad de los componentes de los cubículos convertidores.
- Nos encontramos frente a tecnología de punta y su arribo genera nuevas exigencias de tipo técnico y profesional. Tanto los operadores como los mantenedores de esta planta deberán dominar modernas técnicas de control, tanto electrónico como computacional. Esto, implicará la revisión de los programas de estudio del personal electricista.
- Es necesario tener presente que la electrónica evoluciona a gran velocidad y que, particularmente en este ámbito, los aspectos logísticos cobran una máxima importancia. Si bien la vida útil del motor ha sido garantizada por 35 años, su electrónica de potencia y de control, debe ir evolucionando conforme a los avances tecnológicos.

\* \* \*

## BIBLIOGRAFÍA

1. *Manual del Motor Propulsor del SS Scorpène* preparado por el autor del artículo.
2. *Documentación Técnica Provista por Jeumont Electric*, fabricante del motor.
3. Felipe Calvo Álvarez, "Motor de Imanes Permanentes como Propulsor Naval" *Revista de Marina* N°3/1999.