

## MATERIALES COMPUESTOS – SU APLICACIÓN A GENERADORES HIDROELÉCTRICOS

**T. PUJAL\***

**IMPSA**

**Argentina**

**G. MÁS**

**IMPSA**

**Argentina**

**Resumen** - En los generadores hidroeléctricos es usual utilizar materiales compuestos por sus propiedades dieléctricas. Sin embargo, en los últimos años la aplicación de estos materiales se ha extendido aún más, debido a las ventajas que ofrecen en relación a los materiales clásicos. Estos materiales se denominan “compuestos” por estar formados por la combinación de dos ó más materiales físicamente distintos, obteniéndose un producto final de propiedades totalmente diferentes a los elementos que lo componen.

Una característica distintiva de los materiales compuestos es que presentan propiedades mecánicas muy diferentes en distintas direcciones, por lo tanto se denominan materiales anisótropos, sin embargo esta propiedad es también la fuente de una de las ventajas sobresalientes de los compuestos. Permitir introducir rigidez y resistencia donde realmente se requiere. A diferencia de los materiales homogéneos tradicionales como por ejemplo el acero o el aluminio, los materiales compuestos tienen la particularidad de poder ser “diseñados” específicamente para cada aplicación.

Dentro del campo de las máquinas eléctricas presentan dos características que hacen que su aplicación resulte todavía más atractiva: Su elevada rigidez dieléctrica y la de poseer además propiedades amagnéticas.

Estas dos propiedades permiten diseñar componentes tales como las guías de aire del generador, con grandes ventajas respecto del acero, ya que pueden operar cerca de elementos bajo tensión o bajo la influencia de campos magnéticos importantes como los generados en el rotor de la máquina, sin originar pérdidas por histéresis y corrientes parásitas. Además por su facilidad de moldeo permite obtener formas aerodinámicas, muy difíciles de conseguir con otros materiales

**Palabras Clave:** Materiales compuestos, Generadores Hidroeléctricos, Materiales, autoextinguibilidad.

### 1 - INTRODUCCION

El presente artículo pretende mostrar como es posible renovar materiales clásicos utilizados en generadores hidroeléctricos, por otros de mejores prestaciones y con precios similares ó en algunos casos menores. Las aplicaciones tradicionales de los materiales compuestos en la fabricación de generadores eléctricos, están orientadas generalmente a funciones esencialmente de aislantes eléctricos, basados principalmente en combinaciones de resina epoxi con tejidos de vidrio y mica. A estas aplicaciones se suman otras, que permiten aprovechar más virtudes de los materiales compuestos, como son su bajo peso y elevadas propiedades mecánicas, propiedades dieléctricas y amagnéticas. A continuación se describen básicamente las fortalezas de los materiales compuestos que posibilitan su aplicación en máquinas eléctricas.

## 2 – PRINCIPALES PROPIEDADES PARA SU APLICACIÓN EN GENERADORES

### 2.1 - Resistencia Específica:

La Tabla I. [3] permite apreciar las propiedades mecánicas de materiales clásicos como el acero y el aluminio, y materiales compuestos de altas prestaciones mecánicas. Los elevados valores de la resistencia específica ( $\sigma_u / \delta$ ), es decir, resistencia por unidad de peso de los compuestos es precisamente una de sus principales virtudes. En los componentes para generadores el peso no resulta tan crítico como por ejemplo para la industria aeronáutica, no obstante poder conseguir piezas de menor peso simplifica notablemente las tareas de montaje y mantenimiento del equipo.

TABLA I.

Material	Densidad	Módulo de Elasticidad E GPa	Tensión de Rotura Gpa	Tensión de Fluencia GPa	Relación Módulo-Peso	Relación Resistencia-Peso
SAE 1010	7.87	207	365	303	2.68	4.72
AISI 4340	7.87	207	1722	1515	2.68	22.3
AL6061 - T6 (aluminio aleado)	2.7	68.9	310	275	2.6	11.7
AL 7178-T6 (Aluminio aleado)	2.7	68.9	606	537	2.6	22.9
Ti-6Al-4V aleación de titanio	4.43	110	1171	1068	2.53	26.9
17-7 PH acero inoxidable	7.87	196	1619	1515	2.54	21.0
INCO 718 aleación de níquel	8.2	207	1399	1247	2.57	17.4
Fibra de carbono (alta resistencia y resina epoxy (unidireccional))	1.55	137.8	1550	---	9.06	101.9
Fibra de carbono (alto E) y resina epoxy (unidireccional)	1.63	215	1240	---	13.44	77.5
Fibra de vidrio E y resina epoxy (unidireccional)	1.85	39.3	965	---	2.16	53.2
Kevlar 49 y resina epoxy (unidireccional)	1.38	75.8	1378	---	5.60	101.8
Fibra de boro 6061 - aluminio	2.38	45.5	579	---	9.54	48.1
Fibra de carbono - epoxy quasi-isotrópico	1.55	45.5	579	---	2.99	38

### 2.2 - Propiedades dieléctricas:

Dentro de las aplicaciones en máquinas eléctricas son de vital importancia las propiedades dieléctricas de un material. La Fig.1 representa la distancia dieléctrica mínima entre partes aisladas en tensión y guías de aire metálicas y de plástico reforzado.

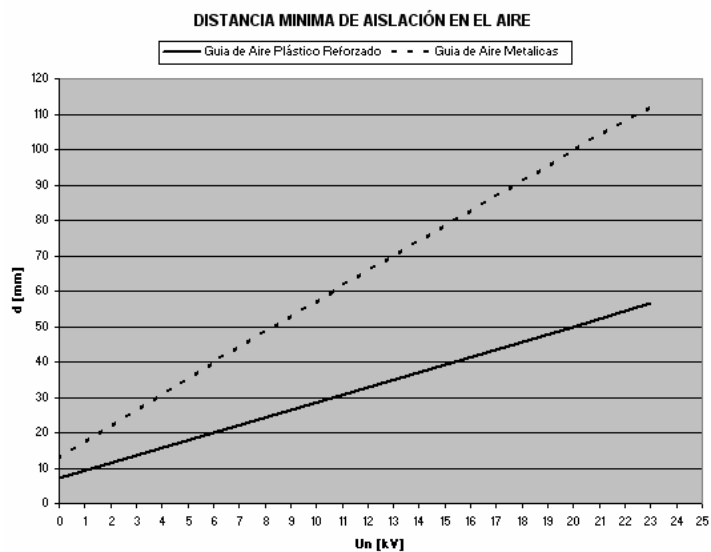


Fig.1

La figura permite concluir la menor distancia a la que pueden colocarse las piezas de material compuesto, respecto de las partes bajo tensión. Con lo cual es posible lograr una disminución y mejor aprovechamiento del espacio interior del generador. Por ejemplo para una tensión de aproximadamente 13 kV, la distancia mínima para guías de aire metálicas es de 70 mm., mientras que para material compuesto sería de 35 mm.

### 2.3 - Propiedades magnéticas:

Los generadores hidroeléctricos son máquinas eléctricas rotantes de polos salientes, los cuales originan un campo magnético rotacional de considerable valor. Este campo produce en todo material ferromagnético pérdidas de dos tipos: Pérdidas por histéresis y Pérdidas por corrientes parásitas.

Es posible estimar las pérdidas totales que se producirían por ejemplo en una guía de aire de acero al carbono, mediante la siguiente fórmula [1]:

$$Q = \frac{K_0 \cdot \pi \cdot \left( D_i + \frac{\tau}{4} \right) \cdot F_a^2}{\left( \frac{\tau \cdot Y}{4} \right)^{\frac{2}{3}}} [W]$$

Dónde:

$K_0$  – Coeficiente experimental. Su valor para acero magnético es  $9,5 \times 10^{-7}$ .

$D_i$  – Diámetro interior del núcleo estatórico

$T$  – Paso polar.

$F_a$  – Corriente equivalente.

$Y$  – Distancia desde el centro de gravedad de las corrientes y la superficie externa de las cubiertas.

Para una aplicación particular de un generador de 360 MW y diámetro interior  $D_i$ , igual a 9750 mm, las pérdidas estimadas para las guías de aire superior e inferior son de aproximadamente 100 kW. Utilizando materiales compuestos estas pérdidas no se producirían debido a su carácter totalmente amagnético. Por otra parte en el caso de utilizar acero al carbono, además de las pérdidas mencionadas se originan calentamientos excesivos, pudiendo llegar a deteriorarlas considerablemente.

### 2.4 - Procedimientos de Fabricación [3]:

Otra ventaja que presentan los materiales compuestos es la de tener una amplia variedad de procedimientos de fabricación, dependiendo la elección del mismo, de una serie de factores a tener en cuenta para cada caso en particular, como por ejemplo: solicitudes mecánicas, tolerancias geométricas, terminación superficial, cantidad de piezas a fabricar, pudiendo adoptarse el procedimiento de fabricación más apropiado para cada aplicación. Es decir que los materiales compuestos nos ofrecen la posibilidad de “diseñar el material” y además seleccionar el método de fabricación más adecuado para cada caso. Estas dos virtudes ofrecen al diseñador un abanico muy amplio de alternativas, permitiendo obtener la mejor solución técnico-económica. Los distintos métodos de producción de los materiales compuestos actualmente en uso, dentro del gran número de variantes que se pueden presentar para adaptarlos mejor a las necesidades específicas de una determinada producción, pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Formación a mano por contacto (Hand lay up),
- Formación con bolsa de vacío (Vacuum bagging),
- Por inyección de resina en molde cerrado (RTM, VARTM),
- Con matrices metálicas en caliente (SMC),
- Formación por enrollamiento (Filament Winding),
- Formación por impregnación y tirado (Pultrusión).

## 3 – EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN EN GENERADORES

### 3.1 - Guías de aire

El material compuesto empleado en la fabricación de las guías de aire es plástico reforzado con fibra de vidrio, utilizándose como refuerzo fibra tipo “mat” de 450 gr/m<sup>2</sup> y resina poliéster derivada del ácido cloréndico (Ácido HET). Una característica fundamental que deben poseer todos los materiales utilizados en la fabricación del generador es que tengan propiedades de autoextinguibilidad. Por tal motivo se utilizan las resinas derivadas del ácido HET ya que la propiedad de retardación del fuego es una característica inherente a este tipo de resinas, que contienen cloro no como aditivo, sino como parte de la estructura química de la resina. El cloro combinado químicamente brinda propiedades permanentes de retardación del fuego, que no son afectadas por envejecimiento, lixiviación química y no existe degradación de las características físicas de la resina. Es posible también obtener propiedades retardantes de la llama a partir de resina poliéster común con el agregado de productos químicos halogenados, pero en este caso no es posible garantizar las propiedades de autoextinguibilidad en forma permanente.

El grado de autoextinguibilidad exigido para estos componentes está determinado bajo la Norma UL 94 V0, la cual establece que una vez retirado el foco de fuego, la probeta se debe apagar en menos de 10 segundos. Para lograr estos exigentes requisitos de autoextinguibilidad se requiere el agregado de catalizadores como el trióxido de antimonio. El manejo de estas cargas, como así también el humo producto de la combustión son poco amigables para las personas y para el medio ambiente. Actualmente, se están desarrollando otros productos químicos libres de halógenos y menos nocivos.

El aire de ventilación es necesario direccionarlo hacia las zonas de mayor temperatura como son las partes extremas del bobinado estático. Este guiado del aire debe ofrecer la menor resistencia aerodinámica posible. Recientes estudios realizados mediante el programa “CFX” de Ansys, permitieron optimizar el diseño de las guías de aire de los generadores del proyecto Bakún, lográndose reducir las pérdidas de ventilación en esta zona en aproximadamente el 15% respecto del diseño clásico. La simplicidad del moldeo permite obtener formas complejas con mayor facilidad que con otros materiales. La Fig.3 y Fig.4 permiten apreciar el diseño en Cad de las guías de aire inferior y superior respectivamente, ubicadas dentro del recinto del generador, mientras que las Fig.5 y 6 muestran el flujo producido por el aire de ventilación al pasar por la zona comprendida entre las guías de aire y las partes extremas del bobinado estático.

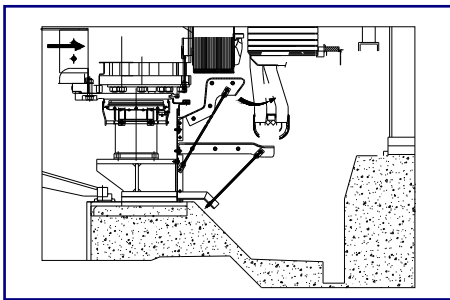


Fig.3

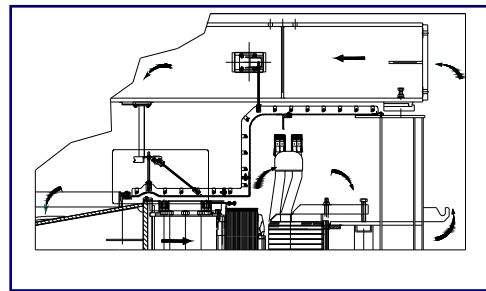


Fig.4

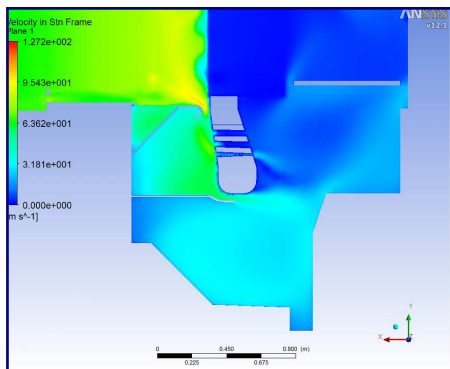


Fig.5

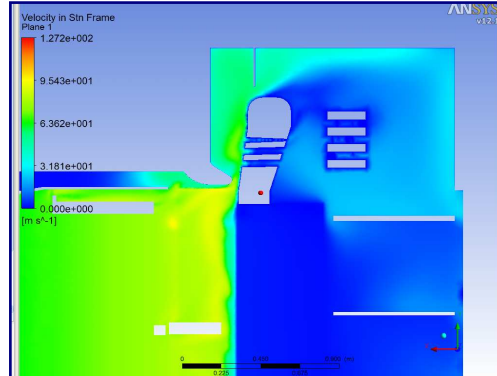


Fig.6

La elevada rigidez dieléctrica y las características amagnéticas del plástico reforzado, permiten disminuir notablemente las distancias entre la guía de aire y las partes que se encuentran bajo tensión eléctrica. Esto facilita el contacto del aire frío con las partes del generador que deben ser enfriadas. La Fig.7 muestra el montaje en blanco de la guía superior del generador del Proyecto Bakún, la cual tiene una dimensión máxima de 11.5 metros.



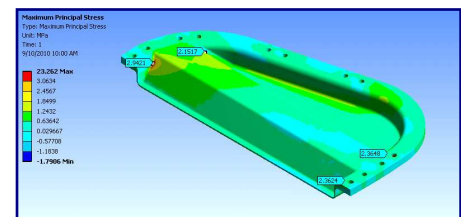
**Fig.7**

*Foto gentileza ITP Argentina*

### 3.2 – Tapas de ventilación

En los generadores de ventilación radial, es decir donde el aire ingresa por la parte superior de la estrella del rotor y es dirigido radialmente hacia los componentes activos, muchas veces resulta necesario poder regular el caudal de este aire de ventilación, con el objeto de optimizar el rendimiento de la máquina.

Para la fabricación de este componente también hemos utilizado el material compuesto, haciendo uso de dos de sus principales ventajas: Bajo peso y alta resistencia mecánica. En este caso por tratarse de un componente rotante es necesario considerar en el diseño y selección del material, además de las propiedades de autoextinguibilidad los requerimientos mecánicos originados por la fuerza centrífuga del rotor.



**Fig.8**

A los efectos de garantizar las propiedades de autoextinguibilidad también se utiliza en este caso una resina poliéster del tipo clorada. Para el refuerzo se utiliza, si la sollicitación mecánica es elevada, un sistema combinado compuesto por dos unidireccionales (0° y 90°) superpuestos y luego cosidos a un “mat”, con el cual se consiguen laminados con mayor porcentaje de fibra, con las mejoras que ello trae aparejado: Menor peso, mayor resistencia mecánica y menor consumo de resina. Para casos de menor sollicitación mecánica es posible utilizar solamente un refuerzo tipo “mat” de 450 gr/m<sup>2</sup>.

Previo a la selección del material se realiza un modelo de elementos finitos, mediante el programa Ansys, con el objeto de conocer el nivel de sollicitación mecánica de la pieza y realizar una adecuada selección del tipo de material. La pieza se verifica con el máximo esfuerzo posible sobre la misma, el cual se origina cuando el generador gira a la máxima velocidad de embalamiento de la turbina. Dicha velocidad es un estado de carga accidental de la máquina que puede estar comprendida entre 2 á 3 veces la velocidad sincrónica nominal, la Fig.8 muestra el estado tensional al que se encuentra sometida la tapa de ventilación del generador de Macagua, a velocidad de embalamiento.

### 3.4 – Trampas de aceite del cojinete

Los cojinetes de los generadores presentan un sistema para extracción de los vapores de aceite, formado por sectores circulares ubicados alrededor de cada cojinete, que conforman una cámara que contiene a dichos vapores y a la cual se conecta un sistema de vacío para su extracción fuera del recinto del generador, ver Fig.9. Para la fabricación de estas piezas se ha empleado un procedimiento denominado SMC (Sheet Moulding Compound). Esta aplicación, una vez más, se basa en la excelente relación peso-resistencia, es decir resistencia específica que presentan los materiales compuestos. El bajo peso resultante de las piezas facilita las tareas de montaje y mantenimiento de las trampas en el cojinete del generador o turbina.

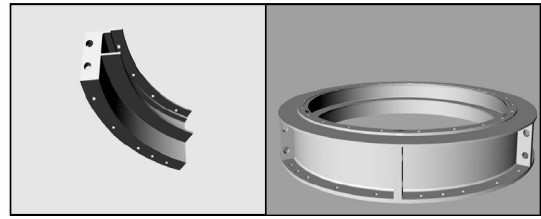


Fig.9

El moldeo de piezas por el sistema SMC se realiza por compresión entre el molde y contra molde en caliente, de una cantidad adecuada de material compuesto colocada dentro del molde, al cual se le aplica una presión relativamente alta y a su vez con el agregado de calor se logra la fluidez del material obteniendo así la forma requerida de la pieza. El rol de la temperatura en este proceso es el de suministrarle fluidez a la resina y permitir las óptimas condiciones de curado, en cambio el rol de la presión es la de proveer el conformado de la pieza. Luego del curado, se retira la presión hidráulica aplicada y la pieza es removida del molde. El tiempo de ciclo del proceso de fabricación es de aproximadamente 1 a 4 minutos. Obteniéndose piezas de excelente terminación superficial y tolerancias dimensionales.

## 4 - CONCLUSIONES

Podemos concluir que ha llegado el momento de optimizar lo ya construido. Como consecuencia de la crisis energética y de la economía en general, es que las aplicaciones de los materiales y equipos se van a llevar al límite de sus posibilidades. El desarrollo vertiginoso de los materiales compuestos se ha visto impulsado por la imperiosa necesidad de la industria aeronáutica de mejorar la relación peso / consumo de combustible de la aeronaves. Este desarrollo ha permitido extender la aplicación de los materiales compuestos a otras industrias, como por ejemplo la generación eléctrica ya sea hidroeléctrica ó eólica. Por otra parte la evolución con tendencia a la baja del precio de las materias primas en el caso de los materiales compuestos, en comparación a los materiales tradicionales, consolida la viabilidad económica de su aplicación. Sirva como ejemplo el hecho que la demanda prevista de fibra de carbono pasará de 50,000 toneladas en el año 2010 a 100,000 toneladas en el año 2020 [2], haciendo que en el futuro se acentúe aún más la utilización de materiales compuestos en máquinas eléctricas.

## Referencias

- [1] Danilevich – Kashrskiy, “Cálculo de Pérdidas Adicionales en Máquinas Eléctricas”, (Ed.1963)
- [2] High-Performance Composites Magazine, Design and Manufacturing Solutions for Industry, March 2008.
- [3] Luis Manuel Martínez, “Curso Introducción a los Materiales Compuestos”, Mendoza, Abril 2010