

“DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN PROTOTIPO DE RADOMO PARA LOS SUBMARINOS DE LA ARMADA DEL ECUADOR”

Raúl Fernando Cáceres Avalos¹, ~~José Pacheco~~²[Cecilia Paredes](#)²

¹Egresado de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

²Directora de Tesis, ~~Ingeniero~~²[Ingeniera Mecánica](#), Escuela Superior Politécnica del Litoral

~~-1993, Doctorado EEUU, Rutgers-State University of New Jersey 2000, Profesora de la ESPOL desde el 2018-~~

Con formato: Numeración y viñetas

RESUMEN

Se inicia el desarrollo del presente trabajo con la introducción básica sobre la constitución y datos técnicos del submarino clase “Shyri” de la Armada del Ecuador, el radar de navegación que este utiliza y los radomos en general. Posteriormente se revisan en el segundo capítulo los fundamentos y consideraciones sobre aspectos que influyen en el diseño del mismo.

En el tercer capítulo se realiza el análisis estático mediante el método de elementos finitos, describiendo el ciclo de modelado y presentando los resultados obtenidos.

En el cuarto capítulo se procede a detallar paso a paso la completa fabricación del prototipo de radomo teniendo en cuenta las capacidades y limitaciones tecnológicas existentes en el País.

En el capítulo cinco se presentan los ensayos y pruebas realizadas al prototipo, con lo que se determinan las prestaciones y características del radomo fabricado.

Finalmente en el capítulo seis se emiten las conclusiones y recomendaciones del estudio, el mismo será una referencia para continuar experimentando en este campo y abandonar la dependencia tecnológica del exterior.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los equipos que poseen los submarinos de la Armada del Ecuador se encuentra el radar de navegación, que le sirve para posicionarse geográficamente cerca de las costas así como también para detectar contactos sobre la superficie del agua. Originalmente este equipo de radar era el denominado “Calypso”, cuya antena se encontraba localizada en uno de los mástiles de manera permanente ya que sus características permitían al submarino sumergirse sin necesidad de desmontarla.

Con el transcurrir del tiempo el radar de navegación "Calypso" cumplió su período de vida útil y fue reemplazado por un radar de navegación marca "Furuno" modelo 1721 Mark-2, la antena de este radar actualmente debe ser montada y desmontada continuamente en el mástil para poder efectuar navegación en superficie e inmersión respectivamente ya que no dispone de la protección adecuada. Esta situación disminuye considerablemente la seguridad de la unidad submarina y su utilización estratégica en el campo militar. Por lo tanto, se requiere dotar a la antena de este radar de una protección que permita su instalación permanente aislándola del ambiente salino, de posibles impactos y del agua tanto sobre la superficie marina como bajo la misma, esta protección se denomina "Radomo".

CONTENIDO

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SUBMARINO CLASE "SHYRI" DE LA ARMADA DEL ECUADOR

El Submarino Clase "Shyri":

Dentro de la organización de la Armada está definido como un órgano operativo cuya tarea es la de destruir, neutralizar, dividir y desgastar la amenaza enemiga, así como también proteger, negar e interdicar las líneas de comunicaciones marítimas propias; por lo que deben mantener un alto grado de alistamiento para el cumplimiento de las operaciones navales.

En forma general los submarinos modernos poseen ciertas características comunes que tienen gran incidencia en su empleo táctico, estas características son : maniobrabilidad, ocultamiento, movilidad y autonomía en la mar. Entre las acciones en que pueden emplearse tenemos: operaciones contra buques de superficie, operaciones contra submarinos, operaciones de minado, reconocimiento, desembarco de personal, búsqueda y rescate, guiado de aeronaves, apoyo de operaciones anfibias e incursiones de sabotaje.

El radar de Navegación Furuno 1721 Mark-2:

Dentro de los equipos que posee el submarino se encuentra el radar de navegación, que le sirve para posicionarse geográficamente cerca de las costas así como también para detectar contactos sobre la superficie del agua. El radar se encuentra conformado por la consola y la antena respectiva. Originalmente el submarino estaba dotado con el equipo de radar denominado "Calypso". La antena de este radar se encontraba localizada en uno de los mástiles rebatibles del submarino de manera permanente ya que sus características permitían al submarino sumergirse sin necesidad de desmontarla. Con el transcurrir del tiempo el radar de navegación "Calypso" cumplió su periodo de vida útil y fue reemplazado por un radar de navegación marca "Furuno" modelo 1721 MARK-2.

La antena del radar de navegación "Furuno" actualmente debe ser montada y desmontada continuamente en el mástil para poder efectuar navegación en superficie y en inmersión respectivamente ya que no dispone de la protección adecuada. Esta situación disminuye considerablemente la seguridad de la unidad submarina así como también su utilización estratégica en el campo militar, por lo tanto se requiere la instalación de una antena de radar permanente que se encuentre protegida del ambiente salino, de posibles impactos y aislada del agua tanto sobre la superficie marina como bajo la misma.

Radomo:

Un radomo es un alojamiento protector dieléctrico para antenas. Su función es la de aislar la antena de condiciones medioambientales adversas a las que pueda estar expuesta en estaciones terrenas, buques, aeronaves y en aplicaciones aeroespaciales. [Los radomos son aplicables en la protección de antenas de radar y equipos de comunicaciones de unidades submarinas, por lo cual se convierte en la solución viable al problema existente.](#)

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL RADOMO

Consideraciones Generales:

Dado que muchas antenas se encuentran protegidas por radomos, los efectos producidos por estos en la radiación de una antena son de gran importancia, especialmente en el alto rendimiento requerido en los sistemas actuales. Deben observarse las siguientes consideraciones: Eléctricas, Medioambientales y Materiales. ~~El capítulo dos comprende los parámetros de diseño del radomo, aquí se establecen inicialmente las consideraciones eléctricas, medioambientales y de materiales que hay que tomar en cuenta, al igual que los requerimientos de operación del radomo en base al rol que cumplen los submarinos, sus datos técnicos y las características del radar de navegación. Con estos fundamentos se determina el tamaño y forma del radomo, se procede a la selección de los posibles materiales constituyentes y el proceso de fabricación. Igualmente se determinan las cargas que soporta y el tipo de unión del con su base.~~

·

Requerimientos:

Los requerimientos establecidos para el radomo son los siguientes:

1. Soportar una presión de hasta 200 metros de profundidad en inmersión con una velocidad máxima de 15 nudos.
2. Material radiotransparente para :
 - Banda X (9410 ± 30 MHz)
 - Potencia pico 2 Kw.
3. Rango de operación en temperaturas de -20° C hasta 5070° C.
4. Completamente hermético.
5. Dimensiones particulares : Diámetro mínimo interior 43 cm. y altura cilíndrica mínima 30 cm.
6. El color del radomo debe ser similar al área de trabajo para enmascaramiento.

Determinación del tamaño y forma del radomo:

De acuerdo a las características de la antena del radar de navegación a proteger con el radomo se determina la siguiente configuración: está constituido por una base cilíndrica de 32 centímetros de altura y 43 cm. de diámetro interior, sobre la cual va ubicado un cascarón semiesférico de 21.5 cm. de radio interior. Estas dos secciones forman un solo cuerpo.

Selección de los materiales constituyentes:

Los radomos principalmente se fabrican de materiales cerámicos y de materiales compuestos. Los primeros son utilizados cuando se requiere de alta resistencia a la temperatura como por ejemplo en la industria aeronáutica y espacial, por tal motivo quedan descartados dentro del presente estudio.

Los materiales compuestos son aquellos que están formados por dos o más componentes de tal manera que las propiedades del material final sean superiores a las de sus componentes. Estos materiales presentan en su forma más simple dos elementos principales: fibra y matriz, además de éstos existen otros como cargas y aditivos que proporcionan características peculiares tanto en la fabricación como en la aplicación.

En la selección de elementos constituyentes del material compuesto para el radomo se observan los siguientes puntos:

1. Las propiedades mecánicas del elemento a fabricar son función del porcentaje de refuerzo y de la orientación de las fibras.
 - La resistencia final será directamente proporcional a la cantidad de fibra.
 - La orientación de las fibras influye de manera decisiva en las características de la pieza.
2. Las propiedades térmicas, químicas y eléctricas están determinadas por el tipo y formulación de la resina.
3. La elección de los materiales más los imperativos inherentes al proyecto y a la producción determinan el procedimiento de fabricación.
4. La obtención de una óptima relación calidad/costo exige un buen estudio de base sobre materias primas y procedimientos de transformación.

De los tipos de fibras existentes se han escogido el Kevlar 49 y el 149, y de las fibras de vidrio el tipo E y S en forma comercial de tejido. En cuanto a las resinas, se ha escogido la poliéster 46.000 U.V., que posee alta resistencia al agua salina y a los rayos ultravioleta.

Determinación del Proceso de Fabricación.

De acuerdo a la forma de fibra seleccionada los procesos mediante los cuales se puede fabricar el radomo son: Bolsa de vacío, alta presión, autoclave y moldeo por contacto a mano. Tomando en cuenta el tamaño y forma del radomo, el número de unidades a fabricar, necesidades de acabado, características del proceso de preparación de la resina, moldeo y curado, se determina que el proceso de fabricación es el moldeo por contacto a mano.

Determinación de las Cargas que Soporta el Radomo.

Con formato: Numeración y viñetas

Las cargas que soporta el radomo son externas y están aplicadas en la superficie del mismo. Se han considerado dos cargas :

1. La presión hidrostática ejercida a un máximo de 400 metros de profundidad, la misma tiene un valor de 41 Kgf/cm².
 2. La presión ejercida sobre la cara frontal del radomo producida por una velocidad de navegación máxima de 30 nudos, cuyo valor es de 1.49 Kgf/cm².
- En estas cargas está incluido un factor de seguridad de 2.

Con formato: Numeración y viñetas

Determinación del Tipo de Unión Entre el Radomo y su Base.

Debido que la estructura del radomo está conformada por resina termoestable, la opción del tipo de unión entre el radomo y su base está en el método mecánico y en el de unión por adhesivos. Cada técnica origina una junta con diferencias significativas tanto en la elaboración como en la función que cumplen; cada una posee ventajas como limitaciones. El tipo de unión elegida para sujetar el radomo a su base es la mecánica, la misma se ve influenciada por los siguientes parámetros: geometría, dirección de las cargas, tipo de carga, ajuste del tornillo, par de apriete, tipo de fibra y resina y laminado

ANÁLISIS COMPUTARIZADO DEL PROTOTIPO DE RADOMO

El modelado adecuado y las especificaciones del análisis a realizar son cruciales para el éxito de cualquier análisis. La solución numérica usando análisis por elementos finitos requiere de una información completa del modelo considerado, por lo que debe contener los datos necesarios para cada paso de la simulación numérica. El radomo ha sido modelado y analizado por este método, utilizando el programa COSMOS/M. En el tercer capítulo se realiza el análisis del radomo mediante el método de elementos finitos describiendo el ciclo de modelado, el tipo de análisis que se realiza y el procedimiento seguido. Se presentan los resultados obtenidos con las diferentes combinaciones de materiales que pueden conformar el radomo y en base a esto se elige el más recomendable.

El programa utilizado es "Cosmos/M" cuyo y su ciclo de modelado se cumple en los siguientes pasos:

1. Crear la geometría.
2. Aplicar mallas a la geometría escogiendo el tipo apropiado de elementos.
3. Aplicar las restricciones correspondientes.
4. Definir las cargas en el modelo.
5. Definir el material y las propiedades de la diferentes secciones.
6. Someter el modelo de elementos finitos completo al análisis.
7. Interpretación y análisis de resultados.

Resultados obtenidos:

Después de realizar el análisis de los resultados obtenidos se determina que el prototipo de radomo se puede fabricar de la siguiente combinación de materiales.

- S-Glass / Poliéster. (15 Capas)
- Kevlar 49 / Poliéster. (10 Capas)

De estas combinaciones se realiza un análisis más detallado y minucioso, lo cual lleva a concluir que el radomo debe ser fabricado de Kevlar 49 y resina poliéster.

PROCESO DE FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE RADOMO

Moldeo por contacto a mano:

El moldeo por contacto a mano es de relativa sencillez, no requiere de mano de obra excesivamente especializada ni de inversiones elevadas, por tales motivos resulta el más económico y uno de los más utilizados. Entre sus inconvenientes podemos notar la producción lenta, mayor necesidad de mano de obra y calidad final sometida a la experiencia y sensibilidad del operario.

Fabricación del prototipo de radomo:

Antes de fabricar el prototipo de radomo se construyeron probetas para determinar la manera en que se debía realizar el estratificado, así como también para identificar problemas que se pudieran presentar durante el proceso. En las probetas se pudo observar que no existía una adecuada adherencia entre las capas de kevlar, para solucionar el inconveniente entre cada una de estas se colocó una capa de fibra de vidrio 380 en forma de fieltro o mat dando excelentes resultados.

La fabricación del prototipo de radomo se realizó utilizando un molde exterior y uno interior con la finalidad de obtener un buen acabado superficial y también para ejercer presión sobre las diversas capas de fibras de tal manera que exista un buen apilamiento de las fibras y evitar la presencia de deslaminaciones y burbujas en el cuerpo del radomo.

El prototipo se fabricó en escala 1:2.5, para esto se construyó primero un modelo en madera del cual se obtuvo el molde exterior, posteriormente se redujeron las dimensiones del modelo para usarlo como molde interior.

A continuación se describen cada uno de los pasos que se cumplieron en la construcción del prototipo:

~~En el cuarto capítulo se procede a detallar paso a paso la completa fabricación del prototipo de radomo teniendo en cuenta las capacidades y limitaciones tecnológicas existentes en el País. La fabricación se realiza por el método de moldeo por contacto a mano mediante el siguiente procedimiento:~~

1. Elaboración del molde exterior e interior
2. Preparación del refuerzo.
3. Aplicación del recubrimiento.
4. Preparación de la resina.
5. Realización del estratificado.
6. Curado.
7. Desmoldeo.
8. Desbarbado de la pieza y acabado final.

ENSAYOS Y PRUEBAS REALIZADAS

Los ensayos y pruebas sobre el material acabado son de suma importancia ya que los defectos e imperfecciones en materiales compuestos son producidos fortuitamente tanto en la fabricación como durante la vida de servicio. Dentro de los defectos más comunes que podemos encontrar: afloramiento de fibras, agrietamiento en estrella, arrugamiento, cuarteado, erosión, estrías, lixiviación, mala adherencia de resina al gel-coat, manchas, ojos de pez, picadura, vejigas.

En el desarrollo del presente proyecto se han practicado ensayos no destructivos y destructivos, los que se detallan a continuación en los siguientes puntos.

Ensayo de Tensión.

El objetivo de este método es determinar la resistencia a la rotura por tracción en plásticos reforzados y no reforzados mediante el uso de probetas, bajo condiciones definidas en base a la norma ASTM-D 638M-93.

Inspección Visual.

Esta prueba se realizó en el prototipo de radomo ya fabricado, la inspección visual es un método simple, económico y subjetivo, muy sensible a cierto tipo de defectos. Con esta técnica en materiales compuestos translúcidos, es decir no pigmentados, la inspección puede mostrar presencia de porosidad, humectación deficiente, delaminaciones e inclusiones. Siendo el material del radomo no translúcido, el daño superficial resulta ser la única inspección visual posible, la cual no dio indicios de defecto alguno tanto en la cara interior como en la cara exterior.

Radiografía.

En esta técnica los rayos "X" son absorbidos al pasar a través de un material de acuerdo al número atómico de los elementos. En materiales compuestos la dificultad radica en la obtención de placas con contraste suficiente, es por esto que se deben utilizar voltajes, intensidades, tiempos de exposición y distancias entre probeta y generador adecuadas para obtener detalles finos de la estructura interna. Este método a más de detectar defectos tales como vacíos, porosidad y cuerpos extraños nos muestra la distribución de fibra, calidad del tejido y la calidad del laminado.

Las placas tomadas no mostraron defectos y se pudo comprobar que la laminación fue la adecuada. En la figura inferior se aprecia el equipo listo para tomar las placas radiográficas.

Prueba de transmisión-recepción.

Se realizó en los laboratorios de la Dirección de Electrónica de la Armada, esta prueba consiste en colocar en la parte interior del radomo un sensor de radar a fin de determinar las pérdidas ocasionadas en las ondas electromagnéticas por la pared del radomo. En la prueba se pudo determinar que las pérdidas están dentro de los rangos permisibles, esto es, son menores al 20%.

Prueba de Presión Externa.

Esta prueba consiste en determinar la deformación real sufrida por el prototipo cuando este es sometido hasta una presión máxima de 40 kgf/cm². Para la realización de la misma se construyó una pequeña cámara en la que se colocó el radomo sujetado en su base.

Ultrasonido.

Esta prueba se fundamenta en la utilización de ondas acústicas, las cuales son generadas por un material piezoeléctrico o transductor de comportamiento reversible y frecuencia fija que convierte los impulsos eléctricos en energía mecánica en forma de vibraciones. Las ondas viajan a través del material a inspeccionar y cualquier cambio en las propiedades acústicas de este afecta a la onda acústica que lo atraviesa.

La prueba se llevó a cabo en los laboratorios de los Astilleros Navales Ecuatorianos, utilizando el equipo PS-710-B, con un sensor para ondas verticales de 0.25 pulgadas de diámetro. Se inspeccionó toda la superficie del radomo, no se detectaron defectos.

~~En el capítulo cinco se hace una descripción de los defectos comunes que se pueden encontrar o producir en la fabricación del prototipo de radomo, además se presentan los ensayos y pruebas realizadas al, con lo que se determinan las prestaciones y características del radomo fabricado. Las pruebas realizadas fueron:~~

- ~~•Inspección visual.~~
- ~~•Ultrasonido.~~
- ~~•Radiografía.~~
- ~~•Impacto.~~
- ~~•Tensión.~~
- ~~•Resistencia a la presión externa.~~
- ~~•—~~

~~Finalmente en el capítulo seis se emiten las conclusiones y recomendaciones del estudio, el mismo será una referencia para continuar experimentando en este campo y abandonar la dependencia tecnológica del exterior.~~

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba de transmisión-recepción, se determina que la selección de los materiales para fabricar el radomo fue adecuada.

El proceso de moldeo de contacto a mano utilizado en la fabricación del radomo se realizó correctamente lo cual quedó demostrado en las radiografías tomadas y en la prueba de ultrasonido.

La configuración del sello entre el radomo y su base funcionó de manera eficiente al no permitir filtración alguna durante las pruebas de presión externa realizadas.

Por sus características y prestaciones el radomo fabricado constituye la solución eficiente al problema del que adolecen las unidades submarinas de la Armada permitiendo así que recuperen su nivel de seguridad para operar y su utilización adecuada en el campo militar.

El trabajo realizado en permite ir abandonando la dependencia tecnológica exterior en este campo, además origina un ahorro económico considerable.

REFERENCIAS

1. Schwartz Mel M., Composite Materials Handbook (Mcgraw-Hill, 1992), pp.45-320.
2. American Bureau Of Shipping And Affiliated Companies Rules For Building And Classing Underwater Vehicles, Systems And Hyperbaric Facilities (Abs, 1990), pp.31-53.
3. IAAaaa Education Series, Composite Materials For Aircraft Structures (1985), pp.60-210.
4. Norton Robert L., Machine Design (Prentice Hall, 1998), pp.101-460.
5. Miravete Antonio, Materiales Compuestos (Antonio Miravete, 2000), pp.215-785.
6. Foreman Cindy, Advanced Composites (Jeppesen Sanderson Training Products, 1995), pp.17-63.
7. Schweitzer Philip, Corrosion Engineering Handbook (Schweitzer Philip, 1996), pp.362-380.
8. Lee S., Jamnejad V., Analysis Of Antenna Radomes By Ray Techniques (University Of Illinois, 1980), pp.526-534.
9. Harvey John F., Theory And Design of Modern Pressure Vessels (Second Edition, Van Nostrand Reinhold Ltd., 1974), pp.154-217.
10. Ugural Ansel C., Stresses In Plates And Shells (Second Edition, Mcgraw-Hill, 1999), pp.358-362.
11. Jones Robert M., Mechanics Of Composite Materials (Scripta Graphica, 1975), pp.143-158.
12. Gybson Ronald F., Principles Of Composite Material Mechanics (Mcgraw-Hill, 1994), pp.46-87
13. Dailey G. And Mallalieu R. C., Structural And Electrical Performance Considerations In The Design Of Multiband Radomes (Defense Technical Information Center Of U.S. Department Of Defense, 1982), pp.12-37.
14. Green Robert E. Jr., Origins Of Imperfections In Composite Materials (Defense Technical Information Center Of U.S. Department Of Defense, 1995), pp.58-117.
15. Furuno Electric Co. Ltd., Marine Radar Model 1721 Mark-2 Operator's Manual (1997), pp.5-14.

Con formato: Numeración y viñetas

Con formato: Numeración y viñetas

16. Escuadrón De Submarinos De La Armada Del Ecuador, Manual De Organización De La Unidad Submarina Clase "Shyri", (2000), pp.5-46.

Vto. Bno.

Dra. Cecilia Paredes Verduga
Directora de Tesis