



Escuela Superior de Ingenieros  
Universidad de Sevilla



**Medidas del coeficiente de expansión térmica (CTE)  
lineal de un tubo de fibra de carbono reforzado con  
plástico con CTE teórico cero mediante un prototipo  
de dilatómetro óptico con resolución nanométrica.**

Autor: Jorge Cordero Machado  
Tutor: Prof. Dr. Jorge Chávez Orzáez

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería de Telecomunicación

Sevilla, Septiembre 2008



Proyecto llevado a cabo en  
EADS-Astrium GmbH Satellites  
Friedrichshafen, Alemania



en colaboración con la  
University of Applied Sciences Konstanz, Alemania  
(Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung; HTWG)



Supervisores: Dr. Dennis Weise (Astrium)  
Prof. Dr. Claus Braxmaier (HTWG)

*“Anstatt einer geraden Linie zu folgen, ändert ein Betrunkener  
seine Richtung in unvorhersehbaren Wendungen.”*

G. Gamow, “Matter, Earth and Sky”

## Prefacio

Para la realización de instrumentos ópticos espaciales, como por ejemplo telescopios, es esencial el uso de materiales estructurales sumamente estables y a su vez ligeros. En términos del correcto funcionamiento óptico de un telescopio las tolerancias en la distancia absoluta entre el espejo primario y secundario deben mantenerse desde su integración en tierra hasta su operación en órbita. Más aún, en la banda de medida debe asegurarse una cierta estabilidad de la estructura del telescopio. Las exigencias en cuanto a la estabilidad termomecánica de los telescopios para la Misión LISA (Laser Interferometer Space Antenna) son desafiantes desde el punto de vista del material usado en su construcción ya que la separación entre espejos debe ofrecer una estabilidad de picómetros. Existen muy pocos materiales capaces de ofrecer esta estabilidad termomecánica. La fibra de carbono reforzada con plástico (Carbon-Fiber Reinforced Plastic (CFRP)) y el Zerodur™, son dos materiales muy estables desde el punto de vista termomecánico, pero el primero ofrece además una robustez y una rigidez muy altas, junto a una gran ligereza. La estabilidad termomecánica en la ciencia de los materiales se caracteriza por una propiedad de los mismos, el coeficiente de expansión térmica (CTE).

El objetivo de este proyecto ha sido el llevar a cabo medidas del coeficiente de expansión térmica (variación en longitud en respuesta a un cambio de temperatura en el entorno) de un tubo de fibra de carbono reforzado específicamente concebido para cumplir los requisitos de la Misión LISA. Se espera que este tubo tenga un CTE “cero” en la dirección axial cumpliendo así con los requisitos de la Misión LISA en lo que se refiere a la estabilidad termomecánica de la estructura del telescopio.

El aparato de medida usado ha sido un dilatómetro óptico basado en un interferómetro heterodino sumamente simétrico, y donde tanto el subsistema de sujeción del material de prueba como el de control de temperatura del mismo fueron desarrollados previamente de manera específica para la medición de materiales en forma tubular. Tanto el aparato de medida como los resultados del CTE obtenidos para dicho tubo se describen en este proyecto. Junto con estas medidas, otras para la caracterización del sistema se han llevado a cabo junto con alguna mejora y modificación del mismo.

# Índice general

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	VI
Agradecimientos	VII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. La Misión LISA . . . . .	1
1.2. Ondas gravitacionales: sus fuentes . . . . .	1
1.3. Detectores de ondas gravitacionales: LISA . . . . .	2
1.4. El telescopio de LISA . . . . .	2
<b>2. Material del telescopio</b>	<b>6</b>
2.1. Fibra de carbono reforzado de plástico . . . . .	6
2.1.1. Composición del CFRP . . . . .	6
2.1.2. Características . . . . .	6
2.2. El coeficiente de expansión térmica . . . . .	7
2.3. El lay-up de un tubo de CFRP . . . . .	7
<b>3. Dilatometría óptica</b>	<b>10</b>
3.1. Dilatometría óptica . . . . .	10
3.1.1. Interferometría . . . . .	10
3.1.2. Dilatómetros ópticos . . . . .	11

<b>4. Aparato de medida</b>	<b>14</b>
4.1. Subsistema óptico . . . . .	14
4.1.1. Fuera de la cámara de vacío . . . . .	14
4.1.2. Dentro de la cámara de vacío . . . . .	15
4.2. Subsistema de procesamiento de señales . . . . .	15
4.3. Subsistema del DUT . . . . .	17
4.3.1. Soportes de los espejos . . . . .	17
4.3.2. Soporte del tubo de prueba . . . . .	17
4.4. Subsistema de calentamiento . . . . .	18
4.4.1. Modo de funcionamiento . . . . .	18
<b>5. Caracterización del sistema</b>	<b>26</b>
5.1. Análisis del interferómetro . . . . .	26
5.2. Análisis del sistema . . . . .	26
5.3. Medidas dinámicas de inclinación . . . . .	27
5.4. Efecto indeseado de la inclinación . . . . .	27
<b>6. Medidas del CTE</b>	<b>32</b>
6.1. Preparación del tubo . . . . .	32
6.2. Medidas del CTE . . . . .	32
6.2.1. Medida experimental de $L$ . . . . .	33
6.2.2. Medida de la temperatura del DUT: $\Delta T$ . . . . .	33
6.2.3. Medida de la variación de la longitud: $\Delta L$ . . . . .	34
6.3. Evaluación de los datos . . . . .	34
6.3.1. Método de evaluación . . . . .	34
6.3.2. Fitting de la curva . . . . .	35
6.4. Resultados . . . . .	36
<b>7. Resumen, discusión y perspectivas de futuro</b>	<b>43</b>
<b>Publicaciones</b>	<b>46</b>



# Índice de figuras

1.1. Efecto de las ondas gravitacionales . . . . .	4
1.2. Fuentes de ondas gravitacionales . . . . .	4
1.3. Detección interferométrica de ondas gravitacionales . . . . .	4
1.4. Constelación de satélites de LISA . . . . .	5
1.5. LISA: brazo del interferómetro . . . . .	5
1.6. LISA: prototipo de telescopio . . . . .	5
2.1. Lay-up de pliegues de un tubo de CFRP . . . . .	8
2.2. Estructura del cristal de grafito . . . . .	9
2.3. Tubos de CFRP y Zerodur™ . . . . .	9
3.1. Interferómetro de Michelson . . . . .	12
3.2. IPatrón de interferencias . . . . .	12
3.3. Configuración de dilatómetros ópticos . . . . .	13
4.1. Método de medida . . . . .	19
4.2. Diagrama de bloques del sistema de medida . . . . .	19
4.3. Subsistema óptico fuera de la cámara . . . . .	20
4.4. Subsistema óptico dentro de la cámara . . . . .	20
4.5. Configuración del interferómetro. . . . .	21
4.6. Differential wavefront sensing . . . . .	21
4.7. Generación de frecuencias . . . . .	22
4.8. Circuito de los fotodiodos . . . . .	22

4.9. FPGA – medidor de fase digital . . . . .	22
4.10. Soportes de los espejos . . . . .	23
4.11. Soportes: diseño isostático . . . . .	23
4.12. Soporte del DUT . . . . .	23
4.13. Subsistema de calentamiento . . . . .	24
4.14. Sistema de control de temperatura . . . . .	24
4.15. Dilatómetro óptico . . . . .	25
4.16. Esquema del sistema de medida . . . . .	25
5.1. Curva de ruido del interferómetro . . . . .	28
5.2. Medida del ruido en la medida de translación . . . . .	28
5.3. Medida del ruido en la medida de ángulo . . . . .	29
5.4. Inclinación manual de los espejos . . . . .	29
5.5. Medida de la inclinación arriba-abajo . . . . .	30
5.6. Medida de la inclinación izquierda-derecha . . . . .	30
5.7. Efecto de la inclinación en una medida de desplazamiento . . . . .	31
5.8. Translación inducida por inclinación del soporte . . . . .	31
6.1. Gradiente de temperatura radial . . . . .	37
6.2. Efecto del índice de refracción en la translación . . . . .	37
6.3. Medidas con rango de temperatura pequeño . . . . .	38
6.4. Medidas con rango de temperatura grande . . . . .	38
6.5. Translación y temperatura medidas: segmentación . . . . .	39
6.6. Ciclo de histéresis $\Delta L$ vs $\Delta T$ . . . . .	39
6.7. PSD: translación y temperatura . . . . .	40
6.8. Ajuste por mínimos cuadrados . . . . .	40
6.9. Resultados del CTE: gráfico . . . . .	42

# Índice de tablas

2.1. Propiedades de materiales muy estables . . . . .	7
6.1. Cálculo del CTE por segmentación periódica . . . . .	36
6.2. Resumen de las medidas del CTE . . . . .	41

# Agradecimientos

Quiero agradecer a el Dr. Claus Braxmaier, un profesor excelente y una grandísima persona por darme la oportunidad de tomar parte en el trabajo de investigación realizado para la Misión LISA en EADS-Astrium Friedrichshafen y la de volver de nuevo al Lago Constanza, mi segunda casa y un lugar que nunca olvidaré en mi vida.

Me gustaría agradecer asimismo al Dr. Dennis Weise, mi tutor en la empresa por haber sido siempre tan atento conmigo. Quiero también felicitarle por el trato que tiene con los estudiantes y por haber creado una atmósfera tan agradable entre estudiantes y profesionales en EADS-Astrium.

Muchísimas gracias a Martin Gohlke y Thilo Schuldt, dos grandes personas, por el tiempo que habéis empleado en resolver mis dudas y ayudarme desinteresadamente. Gracias Thilo por tu última lectura del proyecto.

De nuevo gracias a Martin Gohlke, y a Thomas Heinrich: sin vuestro trabajo previo desarrollando el instrumento usado en este trabajo nunca podría haber realizado el mío.

A todos en EADS-Astrium, siempre estaréis en mi recuerdo, fue una gran experiencia para mí trabajar junto a vosotros: Ulrich Johann, Peter Gath, Stefano Lucarelli, Hans-Reiner Schulte, los estudiantes Martin(s), Sebastian, Robert, Philip, Noah, Michael, Alex, Armin, Francesca . . . y por supuesto a Frau Kastner siempre sonriente y dispuesta a ayudarme.

A los amigos que dejo en Alemania y que son más de los que nunca pude esperar, vosotros habéis sido parte de mi vida durante estos dos últimos años inolvidables

para mí, gracias por haber estado ahí, nunca os olvidaré.

Quiero también agradecer a mi tutor Dr. Jorge Chávez, quién no dudó en estar al cargo de mi proyecto a pesar de la distancia.

Dedico este trabajo estos años de estudio a mis padres, gracias por vuestro apoyo.

Este trabajo está financiado por el Centro Aeroespacial Alemán (Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR) dentro del programa “LISA Performance Engineering” (número de contrato de DLR: 500Q0701).



