

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Procedimiento de elaboración de ensayos para
termistores para aplicaciones de vuelo espacial

Autor: José García Cervera

Tutores: Fernando Muñoz Chavero y Francisco Javier Aparicio Rebollo

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de Telecomunicación

Procedimiento de elaboración de ensayos para termistores para aplicaciones de vuelo espacial

Autor:

José García Cervera

Tutores:

Fernando Muñoz Chavero

Profesor titular

Francisco Javier Aparicio Rebollo

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Grado: Procedimiento de elaboración de ensayos para termistores para aplicaciones de vuelo espacial

Autor: José García Cervera

Tutores: Fernando Muñoz Chavero
Francisco Javier Aparicio Rebollo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis amigos y compañeros

Agradecimientos

Con estas palabras termina una etapa de mi vida, y llegados a este punto, finalizado el proyecto con el que culmina mi grado en ingeniería de las telecomunicaciones, tan solo tengo palabras de agradecimiento a tantas y tantas personas que me han ayudado a crecer a lo largo de estos años de mi vida. A pesar de que no soy muy dado a la redacción de contenidos “literarios-emocionales”, en este breve espacio tan personal del que dispongo me gustaría expresar todo mi agradecimiento, aunque no me gustaría dejar a nadie en el tintero, pero me temo que es inevitable, ya que de mencionar a todos a los que ahora tengo en mente, este epígrafe tendría tal magnitud que dejaría pequeño el resto del documento.

Ante todo, es de obligado cumplimiento agradecer a mis padres, ya no solo por estos años de mi vida como estudiante universitario, por su apoyo o por su dedicación. A mis padres, a los que tanto les debo, que tanto me han dado sin esperar nada a cambio. A mi padre que siempre, o al menos desde que tengo uso de razón, ha sido un ejemplo a seguir. A mi madre a la que no solo tengo que agradecer todo lo que ha hecho por mí, casi tendría que pedirle perdón por saber soportarme en esas épocas de agobio universitario.

Sería delito olvidar agradecer todos estos años de cariño, de comidas cada martes y cada jueves, y la sabiduría de diablo viejo en cada consejo que mi abuela Trinidad me ha dado y por fortuna me sigue dando. Mi abuela, la que sin entender de telecomunicaciones me ha escuchado durante horas hablar de electrónica, redes y sistemas. Y mi abuela Julia, que allá donde esté en estos momentos, estoy seguro de que sentirá el orgullo de ver a su nieto convertirse en ingeniero, como su padre.

Quisiera dedicar también a mis amigos, los que han estado en todo momento a mi lado, los que llegaron y se fueron y a los que han vuelto. A todos quiero agradecer que sin ellos no sería quien he llegado a ser. También a mis compañeros de clase y los compañeros que he tenido en este breve periodo de prácticas en Alter, ya que sin el buen ambiente y la motivación que me ha aportado trabajar rodeado de personas que realmente aman su trabajo este proyecto sería una mera formalidad hecha para terminar el grado.

Por último, y no por ello menos importante, quiero agradecer a Fernando Muñoz, mi tutor para este proyecto, esa oportunidad, que me brindó en su día, que me permitía realizar este proyecto en Alter, en donde me he encontrado como en casa. Y agradecer en especial a Francisco Aparicio, mi tutor en la empresa, el cual ha tenido que lidiar de manera encomiable con mi inexperiencia. Al que debo reconocer que sin su ayuda y dedicación jamás habría conseguido llevar a cabo un proyecto tan ambicioso como este.

De repente, me he visto en el final del grado, con todo acabado, a punto de realizar la inscripción al máster. Hace una eternidad, entraba en la Escuela por primera vez con una extraña mezcla entre ilusión y miedo, y quien dice *eternidad*, dice que fue *ayer*. Con estas palabras termina una etapa de mi vida, y sólo puedo decir: Muchas gracias.

José García Cervera

Resumen

El objetivo principal del presente proyecto es establecer una nota técnica que describa el sistema que se usa para ensayos de termistores para aplicaciones de vuelo espacial, así como una descripción detallada de los protocolos que deben ser seguidos para la correcta utilización del sistema y sus componentes. Además, se han implementado mejoras al sistema con objeto de reducir la duración de un ensayo. Con el fin de implementar dichas mejoras ha sido necesario llevar a cabo una caracterización minuciosa del sistema y sus componentes, así como un cálculo de la incertidumbre total del sistema, a fin de cuantizar el error que se comete al realizar la medida de la resistencia de los termistores. De esta forma, es posible comparar el sistema que se usa actualmente con las propuestas de mejoras sobras las que se han realizado ensayos de caracterización.

El sistema fue diseñado para cumplir la normativa GSFC-S-311-P-827 A para termistores NTC para aplicaciones de vuelo espacial de la NASA, junto con la MIL-PRF-32192 del Departamento de Defensa de Estados Unidos. No obstante, el *set-up* descrito es de aplicación a más componentes EEE debido a su versatilidad.

Abstract

The main purpose of this project is to establish an operative instruction which describes the system that is used for testing thermistor for space flights, apart from a detailed description of protocols that must be followed to give a proper use of the system and its components. Furthermore, improvements of the system have been made to reduce tests duration. In order that make those improvements, a detailed characterization of the system and its components has been needed, apart from a calculation of the uncertainty of the entire system in order to quantize the error made at resistance measure of thermistors. As a result, it is possible to compare the actual system to improvement proposals, to which characterization tests have been made.

This system was originally designed to fulfill GSFC-S-311-P-827 A regulation for NTC thermistors for space flights of NASA, in conjunction with MIL-PRF-32192 regulation of US Department of Defense. However, this system can be used for other EEE part tests due to its adaptability.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xix
Índice de Figuras	xxi
Documentos de referencia	xxv
<i>Documentación aplicable</i>	<i>xxv</i>
<i>Documentación de referencia</i>	<i>xxv</i>
Prefacio	xxvii
<i>Motivación</i>	<i>xxvii</i>
<i>Alcance del proyecto</i>	<i>xxvii</i>
<i>Estructura de la memoria</i>	<i>xxvii</i>
Glosario	xxix
1. Introducción y Objetivos	1
1.1. <i>Termistores y dispositivos RTD</i>	<i>1</i>
1.2. <i>Método Kelvin de medida</i>	<i>2</i>
1.3. <i>Norma GSFC-S-311-P-827 A</i>	<i>3</i>
1.3.1. <i>Ensayo Zero-Power Resistance</i>	<i>3</i>
1.3.2. <i>Impacto térmico</i>	<i>3</i>
1.3.3. <i>Característica térmica de la resistencia</i>	<i>4</i>
1.4. <i>Cálculo de incertidumbre</i>	<i>4</i>
2. Descripción general del Set-up	7
2.1. <i>Requisitos del sistema</i>	<i>8</i>
2.2. <i>Condiciones de ensayo</i>	<i>8</i>
2.3. <i>Secuencia de ensayo</i>	<i>8</i>
3. Elementos Constructivos	9
3.1. <i>Cámara ambiental</i>	<i>10</i>
3.2. <i>Sistema de soporte y conexión</i>	<i>12</i>
3.2.1. <i>Chasis</i>	<i>12</i>
3.2.2. <i>Tarjetas de circuitos impresos</i>	<i>13</i>

3.2.3.	Cintas de conexión internas	14
3.2.4.	Sondas de temperatura	15
3.3.	<i>Unidad de análisis</i>	16
3.3.1.	Módulo 34922 A.....	17
3.3.2.	Conexión con la unidad de análisis	18
3.4.	<i>Centro de control y registro</i>	19
3.4.1.	Control y registro de la cámara ambiental	19
3.4.2.	Control y registro de la unidad de análisis.....	20
4.	Ensamblado del sistema	23
4.1.	<i>Ensamblado de los componentes</i>	23
4.2.	<i>Conexión con el exterior de la cámara ambiental</i>	24
4.3.	<i>Introducción de las sondas de temperatura</i>	25
4.4.	<i>Acondicionamiento del encapsulado</i>	26
4.4.1.	Parte inferior del aislante	26
4.4.2.	Parte superior del aislante.....	27
4.4.3.	Posición de las cintas de cable plano	28
4.5.	<i>Introducción del sistema en la cámara ambiental</i>	29
4.6.	<i>Conexión eléctrica con la unidad de análisis</i>	31
5.	Análisis de incertidumbre	33
5.1.	<i>Análisis de incertidumbre de las sondas</i>	34
5.1.1.	Incertidumbre de calibración de las sondas.....	35
5.1.2.	Deriva de la calibración de las sondas	35
5.1.3.	Indicador de temperatura	36
5.1.4.	Homogeneidad	38
5.1.5.	Estabilidad del sistema.....	38
5.1.6.	Incertidumbre combinada	38
5.2.	<i>Incertidumbre asociada a la medida de la resistencia</i>	39
5.2.1.	Incertidumbre de calibración del medidos de resistencia	39
5.2.2.	Resolución del indicador	40
5.2.3.	Reproducibilidad a corto plazo.....	40
5.2.4.	Estabilidad.....	41
5.2.5.	Incertidumbre combinada del equipo de caracterización eléctrica	44
5.3.	<i>Incertidumbre combinada de las medidas de resistencia en termistores</i>	44
6.	Caracterización del sistema	46
6.1.	<i>Tiempo de estabilización</i>	46
6.2.	<i>Estabilidad del sistema</i>	48
6.3.	<i>Uniformidad de temperatura</i>	49
6.3.1.	Estudio del gradiente de temperatura a 0 °C.....	50
6.3.2.	Estudio del gradiente de temperatura a 120 °C	50
6.3.3.	Conclusiones sobre el estudio del gradiente.....	51
6.4.	<i>Resultados</i>	51
7.	Mejoras al sistema	52
7.1.	<i>Modelos anteriores</i>	52
7.2.	<i>Revestimiento de aluminio</i>	53
7.2.1.	Tiempo de estabilización	53
7.2.2.	Estabilidad térmica.....	55
7.2.3.	Uniformidad de temperatura en el interior del chasis	56
7.2.4.	Conclusiones del prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de aluminio	57
7.3.	<i>Chasis de aluminio</i>	57
7.3.1.	Tiempo de estabilización	59
7.3.2.	Estabilidad térmica.....	64
7.3.3.	Uniformidad de temperatura en el interior del chasis de aluminio	65

7.3.4. Resultados de la propuesta de mejora	66
7.4. Otras mejoras al sistema.....	67
8. Líneas futuras y conclusiones.....	69
8.1. Líneas futuras.....	69
8.2. Conclusiones.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites del valor de la resistencia	4
Tabla 2: Componentes con sus respectivos rangos de temperatura que forman el set-up	10
Tabla 3: Rango resistivo para 0 °C de las sondas de temperatura	16
Tabla 4: Deriva temporal de las sondas entre calibraciones	36
Tabla 5: Incertidumbre (a $T \sim 0.01$ °C) asociada de la resolución calibración del indicador.	37
Tabla 6: Incertidumbre asociada a la estabilidad.	38
Tabla 7: Cálculo de incertidumbre combinada expandida para la sonda LE1228.000	39
Tabla 8: Incertidumbre combinada expandida de las sondas empeladas	39
Tabla 9: Incertidumbre combinada del sistema de caracterización eléctrica.	44
Tabla 10: Incertidumbre combinada del sistema	45
Tabla 11: Tiempos de estabilización	47
Tabla 12: Estudio de estabilidad de temperatura en el interior del chasis.	49
Tabla 13: Mayores diferencias de temperatura en el interior del sistema	51
Tabla 14: Comparación entre tiempos de estabilización para los recubrimientos de poliuretano y aluminio usando el criterio ± 0.02 °C	55
Tabla 15: Estudio de estabilidad de temperatura en el interior del chasis. Prototipo 1, chasis de policarbonato con revestimiento de aluminio.	56
Tabla 16: Comparación del gradiente entre el sistema con recubrimiento de poliuretano y el de recubrimiento de aluminio	57
Tabla 17: Comparación del tiempo de estabilización para el criterio de ± 0.02 °C	61
Tabla 18: Comparación del tiempo de estabilización para el criterio de ± 0.05 °C	61
Tabla 19: Tiempos de estabilización de la temperatura en el interior del chasis de metal despreciando la anomalía	62
Tabla 20: Estudio de estabilidad de temperatura en el interior del chasis. Prototipo 2, chasis de aluminio.	65
Tabla 21: Estudio comparativo de uniformidad de los tres sistemas analizados.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de bloques general del set-up	7
Figura 2: Cámara climática VC7018 de Vötsch	11
Figura 3: Sistema de soporte y conexión de los termistores con las tres sondas incorporadas (a la izquierda de la imagen)	12
Figura 4: Dimensiones del chasis	13
Figura 5: Amortiguación de las fluctuaciones de temperatura de la cámara por el material aislante	13
Figura 6: Módulo de tarjeta de conexión PCB	14
Figura 7: cintas de conexión con el exterior de la cámara ambiental	15
Figura 8: Sonda de temperatura LE1170.000	16
Figura 9: Sonda de temperatura LE1228.000	16
Figura 10: Sistema de adquisición de datos 34980 A	17
Figura 11: Módulo 34922 A.	18
Figura 12: Conexión al módulo 34922A con tarjeta de adaptación.	18
Figura 13: Cintas de cable plano para el exterior de la cámara ambiental	19
Figura 14: Ventana principal del software SIMPATI.	20
Figura 15: Editor gráfico de programa, donde la gráfica roja corresponde al punto de consigna de la temperatura, la azul al de la humedad, y la verde al de la velocidad del ventilador	20
Figura 16: Configuración de canales de BenchLink Data Logger para un ensayo con resistencias medidas a 4 hilos a distintas intensidades.	21
Figura 17: Chasis del sistema de soporte y conexión con las tarjetas y componentes ya ensamblados	24
Figura 18: Conectando las cintas de cable plano a las tarjetas de conexión	25
Figura 19: Conexión de todas las cintas de cable plano al sistema de soporte y conexión	25
Figura 20: Esquema de posición de las sondas en el sistema de soporte y conexión	25
Figura 21: Sondas de temperatura en el sistema de conexión y soporte	26
Figura 22: Sistema de soporte y conexión sobre la base y recubrimiento lateral	27
Figura 23: Recubrimiento lateral del sistema de soporte y conexión	27
Figura 24: Chasis embebido en el material aislante	28
Figura 25: Vista lateral del chasis embebido en el material aislante	28
Figura 26: Correcta colocación de las cintas de cable plano	29
Figura 27: Sistema de soporte y conexión en la cámara climática orientado correctamente	30
Figura 28: Cintas de cable plano de la parte posterior pasando por el pasamuros	30
Figura 29: Cámara climática cerrada	31
Figura 30: Correcta colocación de los cables por el pasamuros y pasamuros cerrado	31

Figura 31: Reproducibilidad de la resistencia	41
Figura 32: Resistencias de 1 K Ω medidas con diferentes intensidades de polarización	42
Figura 33: Valor de la resistencia de 1 K Ω medida a 10 μ A, a 0 $^{\circ}$ C	42
Figura 34: Histograma de valores para la resistencia de 1K Ω medida a 10 μ A a 0 $^{\circ}$ C	43
Figura 35: Histograma de valores de la resistencia de 1 K Ω medida a 100 μ A	43
Figura 36: Valores de resistencia de un termistor P1K0.0805.4P.B.S	44
Figura 37: Histograma de valores del termistor P1K0.0805.4P.B.S	44
Figura 38: Tiempo de estabilización de la sonda LE1170.000.	47
Figura 39: Tiempo de estabilización de la sonda LE1228.000.	47
Figura 40: Tiempo de estabilización de la sonda LE1229.000.	48
Figura 41: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1170.000.	48
Figura 42: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1228.000.	49
Figura 43: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1229.000.	49
Figura 44: Estudio del gradiente a 0 $^{\circ}$ C	50
Figura 45: Estudio del gradiente a 120 $^{\circ}$ C	50
Figura 46: Criterio de estabilización registrado por la sonda LE1170.000 con el criterio de ± 0.02 $^{\circ}$ C	54
Figura 47: Criterio de estabilización registrado por la sonda LE1228.000 con el criterio ± 0.02 $^{\circ}$ C	54
Figura 48: Criterio de estabilización registrado por la sonda LE11229.000 con el criterio ± 0.02 $^{\circ}$ C	54
Figura 49: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1170.000. Prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de papel de aluminio.	55
Figura 50: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1228.000. Prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de papel de aluminio.	56
Figura 51: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1229.000. Prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de papel de aluminio.	56
Figura 52: Gradiente de la cámara con revestimiento de aluminio	57
Figura 53: Chasis de aluminio	58
Figura 54: Taladrados del lateral del chasis de aluminio	59
Figura 55: Gráfica temporal del registro de la sonda LE1228.000 con el criterio de estabilización de ± 0.02 $^{\circ}$ C	60
Figura 56: Gráfica temporal del registro de la sonda LE1170.000 con el criterio de estabilización de ± 0.02 $^{\circ}$ C	60
Figura 57: Gráfica temporal del registro de la sonda LE1229.000 con el criterio de estabilización de ± 0.02 $^{\circ}$ C	60
Figura 58: Grafica comparativa de las lecturas que ha efectuado la sonda LE1170.000 en los sistemas propuestos	62
Figura 59: Detalle de la comparativa de los registros de la sonda LE1170.000	63
Figura 60: Detalle de los registros de la sonda LE1228.000	63
Figura 61: Detalle de los registros de la sonda LE1229.000	64
Figura 62: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1170.000. Prototipo 2 chasis de aluminio.	64
Figura 63: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1228.000. Prototipo 2 chasis de aluminio.	65

Figura 64: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1229.000. Prototipo 2 chasis de aluminio.	65
Figura 65: Gradiente de temeperatura en el interior del chasis de aluminio	66

Documentos de referencia

Para la realización del presente documento, así como el sistema que ha sido realizado en ALTER TECHNOLOGY para la caracterización eléctrica de termistores, se han seguido las siguientes normativas y documentaciones:

Documentación aplicable

- GSFC S-311-P-827 A: Test specification for Thermistor (Thermally Sensitive Resistor), Chip, Negative Temperature Coefficient or Positive Temperature Coefficient. Rev. A, Julio 2009.
- MIL-PFR-32192. Resistors, Chip, Thermal (Thermistor), General Specification for. Issue 1, febrero 2012.
- MIL-STD-202. Test Method Standard, Electronic and Electrical.
- IST P 1K0.0805.4P.B.S Data Sheet (DPTSMD_E2.2.2)
- Guía GUM: Estimación de incertidumbre
- EA4/02 M: 2013: Evaluación de incertidumbre de medidas en las calibraciones

Documentación de referencia

- ISR Platinum Temperature Sensors Application Note (ATP_E2.1.5)
- EIT – 90 : Échelle internationale de température de 1990
- NIST: Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results
- Fluke 5615: Platinum Resistance Thermometer User's Guide

Motivación

El presente documento describe el set-up y los protocolos utilizados en ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD con objeto de caracterizar eléctricamente dispositivos termistores para aplicaciones de vuelo espacial.

Este proyecto se basa en el diseño de un sistema que permita monitorizar y controlar de manera remota una placa, haciendo uso de las prestaciones de un sistema de adquisición de datos para la medida y almacenamiento de información sobre la respuesta de dispositivos termistores bajo condiciones ambientales controladas. De esta forma se está generando una metodología que permite la adaptación del set-up descrito en este documento para futuros ensayos con otro tipo de dispositivos.

Para este trabajo se ha usado un lote de 100 termistores P 1K0.0805.4P.B.S del fabricante Innovative Sensor Technology (IST), unos dispositivos comerciales que, a priori, no se especifica que dichos componentes sean aptos para aplicaciones de vuelo espacial. Con objeto de comprobar si los termistores de IST pueden usarse en las aplicaciones requeridas por el cliente se han seguido los ensayos que especifica la norma GSFC-S-311-P-827 A de la NASA.

La realización de estos ensayos ha requerido una caracterización de los sistemas utilizados para llevar a cabo los ensayos especificados por la norma anteriormente mencionada.

Alcance del proyecto

El proyecto presente se centra en la caracterización del set-up utilizado para los ensayos y en el ensayo de *Zero-Power Resistance*, el cual se especifica en la GSFC-S-311-P-827 A, párrafo 3.5, en la MIL-PFR-32192 y en el Data Sheet de los componentes.

Debido a la poca disponibilidad del equipamiento necesario para realizar los ensayos, así como una avería en la cámara climática que retrasó los ensayos programados, no ha sido posible realizar tantas pruebas de caracterización como en un principio estaban programadas.

Estructura de la memoria

La memoria del documento organiza en tres bloques constructivos:

El primer bloque está organizado de una manera inductiva, se ha empezado con una descripción general del sistema completo, su funcionamiento y principales funciones. El siguiente apartado describe y caracteriza los diferentes elementos constructivos que conforman el sistema completo.

El segundo bloque está formado por los apartados posteriores, que describen el ensamblado y programación del sistema para la correcta adquisición de datos de medidas eléctricas los componentes electrónicos, así como un último apartado que describe la propagación de errores y el cálculo de incertidumbre del sistema.

Los dos últimos apartados conforman el tercer bloque de líneas futuras del set-up. En este bloque se describen los ensayos que define la norma GSFC-S-311-P-827 A que pueden ser implementados con este sistema, así como una adaptación del sistema para otros tipos de componentes EEE.

De esta forma, la memoria queda organizada de la siguiente forma:

- **Bloque 1: Caracterización del set-up**
 - **Capítulo 1:** Introducción y objetivos
 - **Capítulo 2:** Descripción general del set-up
 - **Capítulo 3:** Elementos constructivos
- **Bloque 2: Ensamblado y caracterización del sistema**
 - **Capítulo 4:** Ensamblado del sistema
 - **Capítulo 5:** Análisis de incertidumbre
 - **Capítulo 6:** Caracterización del sistema
- **Bloque 3: Líneas futuras**
 - **Capítulo 7:** Mejoras al sistema
 - **Capítulo 8:** Líneas futuras y conclusiones

Glosario

- **DUT:** Device under test (dispositivo que está bajo ensayo)
- **ATN:** Alter Technology Tüv Nord
- **EEE:** Eléctricos, electrónicos y electromecánicos
- **NASA:** National Aeronautics and Space Administration
- **ESA:** European Space Agency
- **NTC:** Negative Temperature Coefficient
- **PTC:** Positive Temperature Coefficient
- **RTD:** Resistance Temperature Detector
- **CEM:** Centro Español de Metrología
- **h.r.:** Humedad relativa
- **PCB:** Printed Circuit Board
- **GUM:** Guide to the expression of Uncertainty in Measurement
- **RTD:** Resistance Temperature Detector
- **INTA:** Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

“Necesitamos personas que puedan soñar cosas que jamás han existido”

- John F. Kennedy -

EL presente trabajo trata de la descripción del set-up para la caracterización eléctrica, así como los protocolos que han sido seguidos por parte de ALTER TECHNOLOGY TÜV NORD para llevarlo a cabo y una caracterización detallada del sistema que se ha utilizado en el desarrollo del presente proyecto, lo cual incluye ensayos realizados a los diferentes equipos que componen el sistema con objeto de su caracterización, y un análisis de propagación de errores a fin de determinar la incertidumbre del sistema.

El principal objetivo que se intenta alcanzar con este proyecto es establecer un set-up y unos protocolos para caracterizar la aptitud de termistores y otro tipo de componentes EEE comerciales para su uso en aplicaciones de vuelo espacial. Con este propósito, existen normativas internacionales de organismos como la ESA para aplicaciones de vuelo espacial europeas, o la NASA, en el caso de Norteamérica. En dichas normas se especifican los ensayos y criterios de aceptación para los componentes que se utilicen para aplicaciones de vuelo espacial.

Ya que este trabajo se centra en la caracterización de termistores, las dos normas que regulan su uso en aplicaciones de vuelo espacial son la ESA/SCC General Specification No. 4006, y la GSFC-S-311-P-827 A. Esta última será la que tenga aplicación en este documento.

1.1. Termistores y dispositivos RTD

Los dispositivos termistores se definen como sensores de temperatura por resistencia, es decir, su impedancia varía con respecto a la temperatura. Estos dispositivos están hechos de un material semiconductor, generalmente un óxido de semiconductor como el óxido de níquel, óxido ferroso o el óxido de cobalto.

Se pueden clasificar en dos categorías: termistores **NTC**, y termistores **PTC**.

La principal característica de los termistores NTC es que la resistividad del dispositivo es inversamente proporcional a la temperatura. Este efecto se debe a un aumento de la concentración de portadores en el material semiconductor proporcional a la temperatura, lo que propicia una disminución de la resistencia ante aumentos de temperatura.

En el caso de los termistores PTC, la resistencia es proporcional a la temperatura, por lo que el coeficiente de temperatura es positivo. Los termistores PTC son fabricados con un material semiconductor con un dopado muy intenso, por lo que, en cierto rango de temperatura, el semiconductor adquiere propiedades metálicas, propiciando que la resistencia del dispositivo varíe proporcional a la temperatura.

Sin embargo, estos dispositivos tienen un comportamiento poco lineal. La ecuación que mejor ajusta la característica de los termistores es una exponencial. Esto ocasiona que, ante cambios leves de temperatura, la resistencia del dispositivo varíe bruscamente.

Los RTD, al igual que los termistores, son dispositivos cuya resistencia varía de forma proporcional a la temperatura, no obstante, tienen un comportamiento mucho más lineal que los termistores.

$$R(T) = R_0 [1 + AT + BT^2 + CT^3(T - 100)]$$

Ecuación 1: Ecuación de Callendar-Van Dusen para temperaturas negativas

$$R(T) = R_0 [1 + AT + BT^2]$$

Ecuación 2: Ecuación de Callendar-Van Dusen para temperaturas positivas

Estas ecuaciones se conocen como las ecuaciones de Callendar-Van Dusen y corresponden a las especificadas por la EIT-90 para la conversión de temperatura a resistencia.

La ecuación que mejor ajusta el comportamiento de un RTD [Ecuación 1 y Ecuación 2] parte de una resistencia R_0 para una temperatura de referencia, que dependiendo del fabricante suele ser $0\text{ }^\circ\text{C}$ o $25\text{ }^\circ\text{C}$. Los coeficientes A, B y C dependen del material. Los coeficientes A y B pueden no ser iguales para temperaturas positivas y temperaturas negativas.

El sistema descrito en el presente documento cuenta con tres sondas de temperatura RTD, dos son del modelo 5622-32, y otra más precisa del modelo 5615-6, ambas del fabricante Fluke. Ambas sondas tienen una resistencia nominal a $0\text{ }^\circ\text{C}$ de $100\ \Omega$. Están fabricadas de platino. Su rango de operabilidad está comprendido entre $-200\text{ }^\circ\text{C}$ y $350\text{ }^\circ\text{C}$, en el caso del modelo 5622-32, y entre $-200\text{ }^\circ\text{C}$ y $300\text{ }^\circ\text{C}$ para el modelo 5615-6. Estas sondas son enviadas anualmente al CEM, donde son calibradas para obtener una conversión de resistencia a temperatura más precisa. (Ver apartado 0).

Este sistema ha sido concebido para el uso de termistores de modelo P 1K0.0805.4P.B.S, que son termistores de montaje superficial del tipo 0805, con una cubierta de oro con un rango de operabilidad de temperatura de -50 a $250\text{ }^\circ\text{C}$. Su resistencia a $0\text{ }^\circ\text{C}$ es de $1\ \text{K}\Omega$. No obstante, este set-up puede ser de aplicación para otro tipo de termistores, así como dispositivos EEE.

1.2. Método Kelvin de medida

A la hora de hacer la medición de la resistencia de un componente, un ohmímetro aplica un voltaje conocido al DUT y hace la medida de la intensidad que circula en el circuito. Finalmente, mediante la ley de Ohm, se calcula el valor de la resistencia. No obstante, la resistencia que mide el instrumento no es solo la del componente. El valor que el ohmímetro muestra es la suma de la resistencia del DUT, la resistencia de los cables y los contactos metálicos- Esta situación no representa un problema para resistencias grandes (del orden de $1\ \text{K}\Omega$), puesto que la resistividad de los cables es una contribución relativamente pequeña (del orden de la resistencia de los cables). No obstante, en el cálculo de resistencias pequeñas, o resistencias variables como es el caso de los termistores o dispositivos RTD, la resistencia de los cables puede representar un error significativo en la medida, haciendo que esta pierda exactitud.

Con objeto de solventar esta situación las medidas de resistencias pequeñas o variables se hacen a cuatro hilos, o método Kelvin, el cual basa su funcionamiento en una fuente de corriente continua, de amperaje conocido, alimentando el componente a medir, y en paralelo al DUT se conecta un voltímetro.

Normalmente, los voltímetros tienen una resistencia interna suficientemente grande (del orden de $10\ \text{M}\Omega$) como para que la corriente en bornas de este instrumento sea prácticamente nula. A pesar de que los cables que conectan el DUT con el voltímetro también tienen una pequeña resistencia, al circular una corriente tan pequeña por ellos, la caída de tensión resultante es despreciable. De esta manera, se consigue aumentar la exactitud de la medida permitiendo medir resistencias pequeñas o las variaciones de las resistencias cuyo valor dependa de un parámetro, como en el caso de los termistores.

En el sistema descrito en el presente documento, al haber sido concebido para la caracterización de termistores, usa el método Kelvin para aumentar la exactitud de la medida, ya que, aunque el valor nominal a $0\text{ }^\circ\text{C}$ de los termistores P 1K0.0805.4P.B.S sea de $1\ \text{K}\Omega$ (ver epígrafe 3.3), el error en la medida introducido por la resistencia

de los cables provoca que las variaciones de su resistividad con la temperatura no sean suficientemente exactos.

1.3. Norma GSFC-S-311-P-827 A

La norma GSFC-S-311-P-827 A es una norma de la NASA perteneciente al conjunto de normas GSFC-S-311 de estándares para el uso de componentes EEE en aplicaciones de vuelo espacial. En concreto, la serie S-311-P-827 A especifica los estándares para termistores. La GSFC-S-311-P-827 A tiene múltiples referencias a la norma del Departamento de Defensa de Estados Unidos, la MIL-PFR-32192, que amplía el contenido de la norma de la NASA.

La versión inicial de esta norma fue publicada en marzo de 2008 y revisada en julio de 2009. En ella se describen los ensayos necesarios que un termistor debe superar para ser incluido en los programas espaciales de la NASA.

La mayoría de los ensayos especificados en la norma GSFC-S-311-P-827 referencian a la MIL-PFR-32192, donde se describen con mayor detalle.

Aunque la GSFC-S-311-P-827 contiene un gran número de ensayos para la caracterización y admisión de termistores en programas espaciales, los ensayos que pueden ser de aplicación al sistema descrito en este proyecto son:

- Zero-Power Resistance
- Impacto térmico
- Característica térmica de la resistencia

1.3.1. Ensayo Zero-Power Resistance

En esta subsección se introduce el concepto del ensayo *Zero-Power Resistance* por su especial interés en este proyecto. Este ensayo viene descrito en la norma GSFC-S-311-P-827 A párrafos 3.5 y 4.5.3 y en la MIL-PFR-32192 párrafos 1.2.4 y 4.8.2. En él se describe el proceso de caracterización de la resistividad de un termistor a una determinada temperatura.

Todo componente electrónico, al inyectarle una corriente eléctrica sufre unas pérdidas, en las cuales la energía cinética de los electrones se transforma en energía térmica, provocando que el dispositivo se caliente. Se conoce como efecto Joule, y en termistores es un problema grave.

En el caso de que a un termistor le fuera inyectada una corriente lo suficientemente elevada, por el efecto Joule, la temperatura de su encapsulado comenzaría a aumentar hasta cierto punto, de forma que cuando se mida la resistencia del termistor, este indique una medida de temperatura superior a la que se pretende medir dado a que estaría midiendo la temperatura del propio encapsulado. En la literatura este efecto se puede encontrar denominado como *autocalentamiento*.

Con objeto de evitar el efecto de autocalentamiento al caracterizar termistores, la NASA, en su norma anteriormente mencionada, define las condiciones bajo las cuales se debe medir la resistencia nominal de dichos componentes.

La norma GSFC-S-311-P-827 A define el ensayo como la monitorización del valor de la resistencia del termistor a una temperatura de 25 °C con una estabilidad temporal de ± 0.01 °C, aplicándole una corriente de polarización de 10 μ A.

1.3.2. Impacto térmico

Este ensayo está regulado por la norma GSFC S-311-P-827A, párrafo 3.6 y párrafo 4.5.4 y la MIL-STD-202, método 107, se realizará para todas las muestras.

En este ensayo se busca determinar el comportamiento resistivo de los termistores a temperaturas extremas, para ello se requiere un controlador de temperatura lo suficientemente preciso. Este ensayo consta de 25 ciclos, los cuales están compuestos por los siguientes pasos:

- Someter el DUT a - 55 °C durante al menos 15 minutos.
- Someter el DUT a 125 °C durante al menos 15 minutos.

A pesar de que en la norma se especifica que la primera parte del ciclo se debe hacer a - 55 °C, el fabricante IST especifica en el Data Sheet que el rango operativo de los termistores P 1K0.0805.4P.B.S no admite temperaturas tan bajas, por lo que esta parte se realiza a - 50 °C.

El criterio de aceptación es que ningún termistor muestre signo de daño mecánico.

1.3.3. Característica térmica de la resistencia

Este ensayo está regulado por la norma GSFC S-311-P-827A, párrafo 3.7 y párrafo 4.5.5 además de la MIL-PFR-32192, párrafo 3.17 y párrafo 4.8.12, se realizará sobre todas las muestras.

En este ensayo se trazará la curva que caracteriza la resistividad del termistor frente a la temperatura. Se espera que dicha curva, obtenida por cada uno de los componentes se ajuste a la que proporciona el fabricante en el Data Sheet.

Para llevar a cabo este ensayo es necesario que los dispositivos sean estables a las temperaturas de ambiente que se recomiendan en la Tabla II de la GSFC-S-311-P-827 A. Todas las temperaturas se consiguen en un medio controlado con una tolerancia de ± 0.05 °C. Después de un tiempo de estabilización de la temperatura de diez veces la constante de tiempo de la resistencia, dada por la curva de la característica térmica, se realizará una medida zero-power resistance.

El criterio de aceptación de este ensayo es que el valor de la impedancia esté dentro de unos límites de aceptación para cada temperatura de acuerdo con la siguiente tabla:

TEMPERATURA	LÍMITE MÍNIMO	LÍMITE MÁXIMO
-50°C	795.03Ω	811.09 Ω
-40°C	834.28 Ω	851.13 Ω
0°C	990.00 Ω	1010.00 Ω
25°C	1086.37 Ω	1108.32 Ω
70°C	1258.04 Ω	1283.46 Ω
100°C	1371.20 Ω	1398.91 Ω
125°C	1464.72 Ω	1494.31 Ω

Tabla 1: Límites del valor de la resistencia

1.4. Cálculo de incertidumbre

Al hacer una medida siempre se comete cierto error inevitablemente. Ya sea por falta de precisión en el instrumento de medida o factores ambientales que puedan afectar al mesurado, no se puede medir una magnitud de manera exacta. A este error se le denomina incertidumbre.

La incertidumbre refleja el grado de desconocimiento que se tiene acerca del verdadero valor del mesurado. De esta forma, es un factor que indica cuantitativamente la calidad de la medida. De esta manera, se puede clasificar la incertidumbre en dos tipos, según la fuente de esta: incertidumbre **tipo A** e incertidumbre de **tipo B**.

La incertidumbre de tipo A es la debida al ruido, por lo que la evaluación de este tipo de incertidumbre se realiza mediante el cálculo estadístico de la lectura repetida de la medida, cuando las condiciones del sistema no varían de una lectura a otra. Es decir, los valores de las lecturas varían de una medida a otra por variaciones aleatorias

de las magnitudes que influyen o debido a efectos aleatorios.

La incertidumbre de tipo B depende intrínsecamente del instrumento de medida, por lo que su estimación se realiza mediante decisión científica, haciendo uso de técnicas diferentes al análisis estadístico de repetición. La decisión acerca de la estimación de este tipo de incertidumbre se realiza mediante resultados de medidas anteriores, el conocimiento general del comportamiento o la experiencia, especificaciones del fabricante, certificados de calibración y la incertidumbre asignada a valores de referencia.

Con objeto de realizar una mejor caracterización del sistema descrito en el presente documento, se ha realizado un estudio detallado de las fuentes de error que introducen un factor de incertidumbre y cómo esta afecta en la medida de las características eléctricas en los componentes. (Ver Capítulo 5)

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SET-UP

“De una pequeña chispa puede prender una llama”

- Dante Alighieri -

EN este capítulo se va a hacer una descripción de los elementos que componen el sistema usado para la caracterización de los termistores y su aptitud para aplicaciones de vuelo espacial, que, como se ha visto en el capítulo 1, ha sido realizado siguiendo las directrices establecidas por la NASA y el Departamento de Defensa de Estados Unidos en la GSFC-S-311-P-827 A y la MIL-PFR-32192.

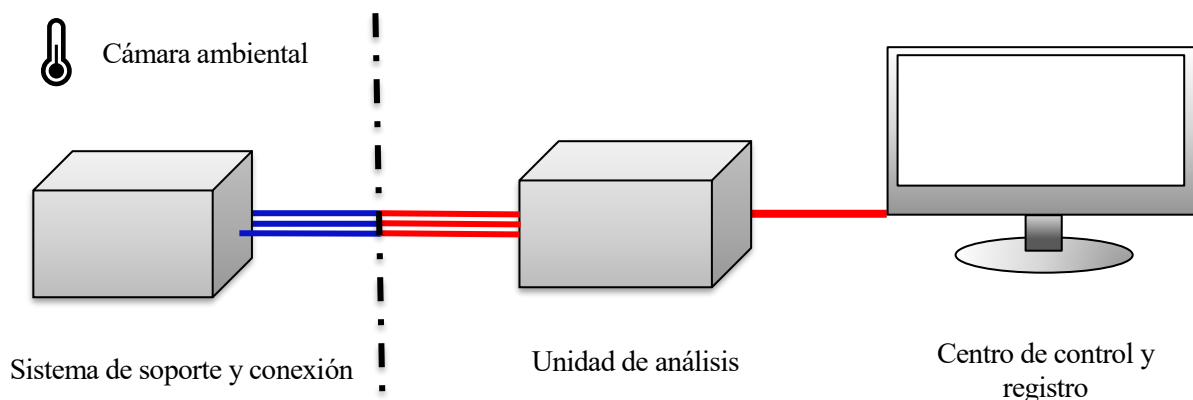


Figura 1: Diagrama de bloques general del set-up

Los dispositivos se encuentran dentro del sistema de soporte y conexión, que a su vez se encuentra dentro de la cámara ambiental. Este primer sistema tiene como misión servir de soporte para todos los dispositivos y una conexión eléctrica con el exterior de la cámara ambiental para su posterior caracterización.

La cámara ambiental se usa para mantener condiciones ambientales controladas durante los ensayos. A pesar de que el sistema de control ambiental es capaz de controlar temperatura y humedad, en este documento la única condición de interés es la temperatura.

La caracterización de estos componentes se lleva a cabo en la unidad de análisis, que es la encargada de realizar la medida de la resistencia de los dispositivos, esto implica que este sistema lleva a cabo la inyección de una intensidad de polarización a cada dispositivo, configurable desde el centro de control y registro, y realizar la medida.

Las medidas obtenidas por la unidad de análisis son enviadas al centro de control y registro, donde esos datos son almacenados para su posterior tratado. Además, el centro de control y registro es el encargado de establecer la temperatura de consigna que la cámara ambiental tratará de seguir.

De esta manera, para llevar a cabo en ensayo *Zero-Power Resistance* (ver apartado 1.3.1), los termistores son introducidos en el sistema de soporte y conexión, y este, a su vez, se introduce dentro de la cámara ambiental, la

cual se configura desde el centro de control y registro a 25 °C. Una vez la temperatura de la cámara es estable, la unidad de análisis, configurada para inyectar una corriente de polarización de 10 μ A, procede a extraer valores de la resistencia y enviarlos al centro de control y registro, donde serán analizados para su posterior análisis.

2.1. Requisitos del sistema

El sistema en el cual se realizan los ensayos debe cumplir los siguientes requisitos mínimos para poder llevar a cabo con éxito los ensayos de caracterización de componentes:

- **Rango de temperatura:** - 55 a 125 °C
- **Homogeneidad térmica:** ± 0.05 °C
- **Precisión del aparato de medidas:** superior a ± 0.05 %
- **Capacidad de medición de resistencia a 4 hilos**

2.2. Condiciones de ensayo

Los ensayos sobre termistores para los que este sistema ha sido concebido están reguladas por las normas MIL-PFR-32192, GSFC S-311-P-827A y principalmente por la especificación particular del componente bajo estudio. Estas normas pueden establecer diferentes temperaturas de referencia y tolerancias de ensayo, no obstante, todas ellas coinciden en los siguientes aspectos. En estos ensayos se analiza el valor de la resistencia a una temperatura de referencia específica bajo condiciones de inyección de corriente que no induzcan un apreciable auto-calentamiento y por lo tanto puedan distorsionar las condiciones de ensayo. Estos análisis se realizan bajo condiciones normales de trabajo o tras haber sometido los dispositivos a diversas condiciones de estrés ambiental.

Los dispositivos analizados hasta la fecha en el presente sistema son termistores bajo el estándar IEC751 con una resistencia nominal de 1k Ω , y las condiciones y requisitos de ensayo son:

- Como temperatura de referencia para el análisis de termistores se emplea $T = 0$ °C.
- Uniformidad de temperatura ± 0.05 °C
- Corriente de análisis 10 μ A
- La norma MIL-PFR-32192 establece que la precisión del sistema eléctrico empleado para caracterizar la resistencia del DUT ha de ser igual o mejor a ± 0.05 %. Siendo el tiempo de respuesta del dispositivo de medida compatible con la respuesta ante variaciones de temperatura del termistor, es decir, que la medida del instrumento de medida sea más rápida que la medida que proporciona el termistor.

2.3. Secuencia de ensayo

1. Se ensambla el sistema y se introduce en la cámara ambiental tal y como se describe en el epígrafe 4.
2. Se configura el registro de datos.
3. Se espera hasta que la temperatura en el interior del chasis se estabilice. Como criterio de estabilización se espera que las fluctuaciones de temperatura registradas por cada una de las sondas sean inferiores a ± 0.02 °C en un periodo de una hora.
4. Se comprueba que las lecturas proporcionadas por las sondas se corresponden con la temperatura de ensayo dentro del rango ± 0.02 °C.
5. Si no fuese el caso se modifica la temperatura de consigna de la cámara siguiendo las instrucciones del manual de programación de la cámara ambiental y se regresa al punto 3.

Una vez se alcanzan las condiciones de análisis se caracteriza el primer conjunto de termistores. Tras esta operación se realizan las conexiones necesarias para caracterizar los termistores instalados en el resto de tarjetas y así sucesivamente

3. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

“Sólo podemos ver poco del futuro, pero lo suficiente para darnos cuenta de que hay mucho que hacer”

- Alan Turing -

EN este capítulo se realiza una descripción completa y detallada de los elementos constructivos que conforman el sistema de caracterización de termistores para aplicaciones de vuelo espacial. De esta manera, como se veía en el capítulo 2, el sistema cuenta con cuatro subsistemas descritos a continuación. Este capítulo también incluye el conjunto de componentes utilizados, enumerados en la Tabla 2.

- **Cámara ambiental:** Regula la temperatura y la humedad a las que se someten los componentes durante los ensayos.
- **Sistema de soporte y conexión:** Soporte en el que se alojan y conecta los DUT. Este subsistema incluye un conjunto de sondas de temperatura para monitorizar la temperatura en las proximidades de los componentes.
- **Unidad de adquisición de datos:** Subsistema dedicado a la adquisición de las características eléctricas de cada dispositivo y la respuesta eléctrica de las sondas de temperatura.
- **Centro de control y registro:** Unidad de control del Cámara ambiental y de la unidad de adquisición de datos y que registra la información proporcionada por ambos subsistemas.

En la siguiente Tabla 2 se enumeran los diferentes componentes involucrados de en cada uno de estos subsistemas. En la presente tabla se incluye información relevante para su identificación, ya que durante todo el documento se hará referencia a ciertos componentes con la referencia interna de ATN. También se incluye el rango operativo de temperatura de todos los componentes que son usados dentro de la cámara ambiental.

Con la información recopilada en la Tabla 2, se ha determinado el rango operativo de temperatura del sistema completo, el cual está comprendido entre -55 °C y 125 °C.

La función de cada uno de los subsistemas enumerados en la Tabla 2 y el ensamblado de estos para formar el set-up se describen en detalle en posteriores secciones de este capítulo.

Bloque	Componente	Referencia fabricante	Referencia ATN	T ^a mínima	T ^a máxima
<i>Cámara ambiental</i>	Cámara climática Vötsch	VC7018	LE0215.000	- 70° C	180 °C
<i>Encapsulado de soporte y conexión</i>	Caja de conexiones Bopla	62241000 serie Euromas II	No aplica	No aplica	135 °C
	4 tarjetas de conexión	No aplica	ATN-PCB-EM-445_v1	- 90 °C	140 °C
	8 zócalos de 3M	232-1287-00-602	No aplica	- 55 °C	150 °C
	16 conectores D-sub IDC macho de ITT Cannon	DBSF-1A5N-A191-K87	No aplica	- 55 °C	125 °C
	20 conectores D-sub IDC hembra de ITT Cannon	DBSF-25S-A197	No aplica	- 55 °C	125 °C
	16 conectores D-sub IDC macho de ITT Cannon	DBSF-25P-K87	No aplica	- 55 °C	125 °C
	16 cintas de 3M	3601/25-100	No aplica	- 55 °C	200 °C
	Sonda de Fluke	5622-32	LE1170.000	- 200 °C	300 °C
	2 sondas de Fluke	5615-6	LE1228.000 LE1229.000	- 200 °C	350 °C
<i>Unidad de análisis</i>	Unidad de adquisición de datos de HP	34980 A	LE1325.000	No aplica	No aplica
	Módulo de adquisición	34922 A	No aplica	No aplica	No aplica
	Tarjeta de adaptación	ATN_PCB-ADP-029	No aplica	No aplica	No aplica
	4 cintas de 3M	3365/25-100	No aplica	No aplica	No aplica
<i>Centro de control y registro</i>	Software Agilent Benchlink Data Logger 3.	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
	Software SIMPATI	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
	Adaptador GPIB a USB	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica

Tabla 2: Componentes con sus respectivos rangos de temperatura que forman el set-up

3.1. Cámara ambiental

Como se especificaba en la Sección 1.1, los termistores son componentes fabricados de un material semiconductor cuya resistividad varía de manera proporcional a la temperatura, y debido a su comportamiento exponencial, pequeños cambios en la temperatura exterior provocan grandes cambios en su resistencia. Es por eso por lo que se requiere un sistema que mantenga la temperatura controlada de una manera lo más estable posible, minimizando el gradiente térmico en su interior.

Se busca que la temperatura se mantenga en un margen de ± 0.05 °C entre dos puntos distintos de la cámara y a lo largo del tiempo, para un punto de consigna de la cámara constante.

Por otra parte, con objeto de llevar a cabo la realización de los ensayos especificados por la GSFC-S-311-P-827 A es necesario disponer de un sistema capaz de alcanzar temperaturas extremas comprendidas entre -55 °C y 125 °C (ver apartado 1.3).

Por las razones expuestas anteriormente se ha optado por el uso de la cámara climática VC7018 de Vötsch, cuyas características principales, de acuerdo con la información proporcionada por el fabricante son:

- **Rango operativo de temperatura:** Comprendido entre - 70 °C y 180 °C.
- **Homogeneidad espacial y estabilidad de la temperatura:** Gradiente de temperatura de ± 0.1 °C, estabilidad temporal de ± 0.3 °C.
- **Control de la humedad relativa:** Comprendido entre el 10 % y el 90 % h.r.
- **Volumen:** 90 litros.

Dadas estas características, se puede observar que la cámara de Vötsch cumple las especificaciones de temperatura requeridas para los ensayos de la NASA. No obstante, tanto la estabilidad temporal, así como el gradiente de temperatura deberían ser mucho mejores.

Por esa razón se ha estudiado un sistema que permita homogeneizar la temperatura en el interior del sistema de soporte y conexión, reduciendo así el volumen de espacio a controlar, además de mantener las posibles fluctuaciones de temperatura dentro del margen de ± 0.05 °C (ver apartado 6.2).



Figura 2: Cámara climática VC7018 de Vötsch

3.2. Sistema de soporte y conexión

Como se muestra en el esquema general (ver Figura 2), dentro de la cámara climática se ubica el sistema de conexiones que aloja los DUT. Este sistema también bien sirve de soporte para las sondas que monitorizan la temperatura en las proximidades de los componentes.

Éste es un soporte que ha sido configurado para ser capaz de homogeneizar la temperatura de su interior, ya que, por las razones expuestas en la Subsección 3.1, la cámara ambiental no cumple las especificaciones de homogeneidad térmica ni estabilidad temporal de la temperatura. Por lo que este sistema ha sido diseñado de forma que entre dos puntos del espacio interior del encapsulado tan solo exista una diferencia de ± 0.05 °C.

El sistema que se describe en esta subsección ha sido concebido para el análisis por etapas de 100 termistores P 1K0.0805.4P.B.S. No obstante, el carácter modular del sistema y la flexibilidad de su diseño permite una adaptación rápida a otra clase de componentes EEE.

El sistema está compuesto por los siguientes componentes, los cuales serán descritos en apartados posteriores:

- Chasis.
- Tarjetas de circuitos impresos (PCB).
- Cintas de conexión.
- Sondas de temperatura.



Figura 3: Sistema de soporte y conexión de los termistores con las tres sondas incorporadas (a la izquierda de la imagen)

3.2.1. Chasis

Con el fin de tener un sistema que proporcione un buen soporte a los distintos componentes que conforman el sistema de soporte y conexión, se ha optado por el uso de un chasis de la serie Euromas II del fabricante Bopla. Este chasis ha sido fabricado de policarbonato, soportando temperaturas de hasta 135 °C. Además, cuenta con la protección IP65 según la norma EIC 60529.

Este sistema ha sido modificado de forma que las tres sondas de temperatura puedan ser inyectadas y de soporte a los puertos de comunicación, los cuales son los encargados de proporcionar una comunicación fiable entre los

componentes y la unidad de análisis, tal como se muestra en la Figura 3: Sistema de soporte y conexión de los termistores con las tres sondas incorporadas (a la izquierda de la imagen)

En una etapa final de ensamblado el chasis se recubre con un aislante térmico tal y como se muestra en el Figura 24, puesto que este recubrimiento ayudará a mantener una temperatura más homogénea y estable en el interior del chasis, amortiguando las oscilaciones de la cámara ambiental.

Como se muestra en la Figura 5, la temperatura de la cámara tiene una oscilación notable de aproximadamente 0.2 °C, mientras que las lecturas de temperatura registradas por la sonda de temperatura, la cual está en el interior del chasis, que se encuentra embebido en el material aislante, se mantiene mucho más estable, aunque tiene un offset del orden de 1 °C.

En la Figura 4: Dimensiones del chasis se muestran las dimensiones que tiene el chasis elegido, según los datos proporcionados por el fabricante, Bopla.

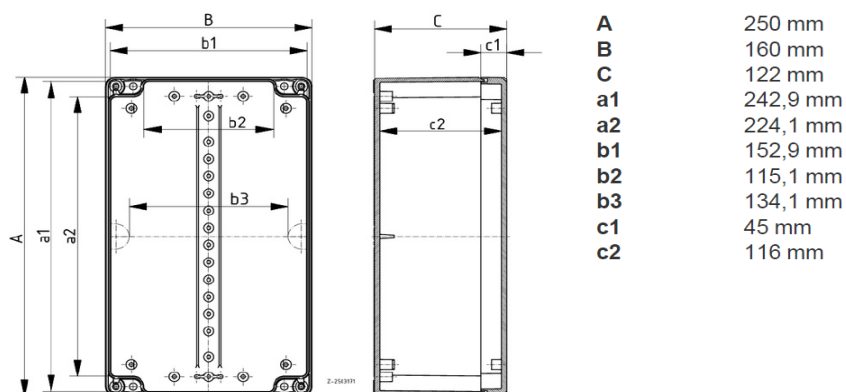


Figura 4: Dimensiones del chasis

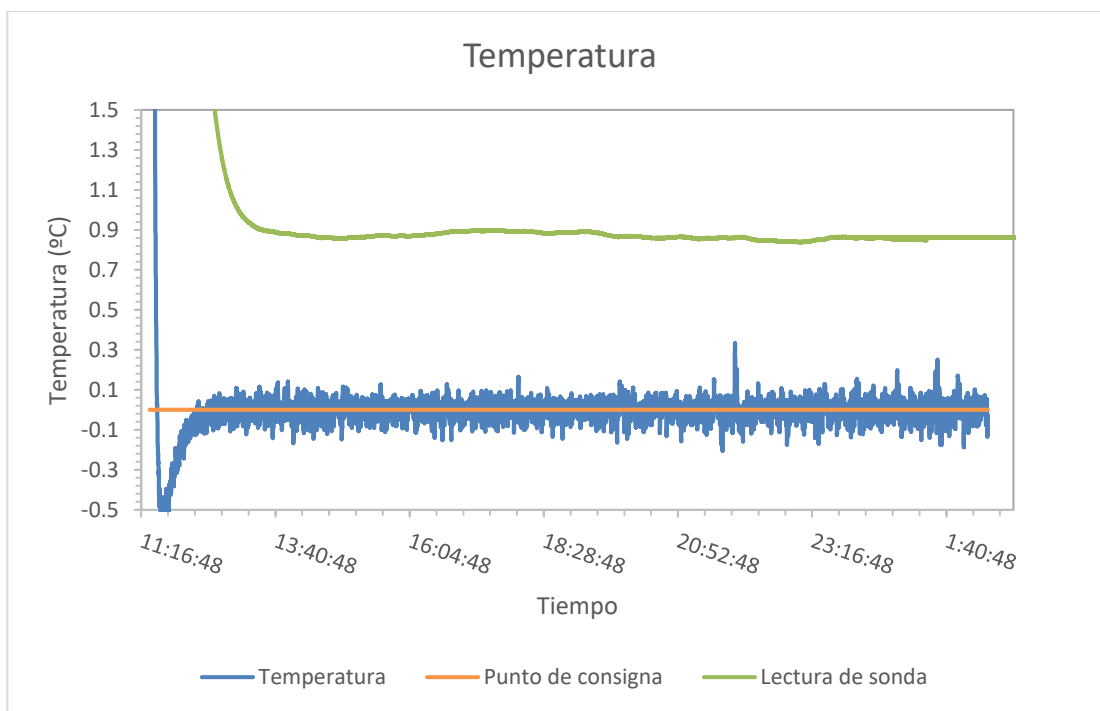


Figura 5: Amortiguación de las fluctuaciones de temperatura de la cámara por el material aislante

3.2.2. Tarjetas de circuitos impresos

Con objeto de servir de soporte a los termistores y proporcionar el adecuado conexionado eléctrico con la unidad de análisis, para la inyección de la intensidad de polarización y medida de su resistencia, este sistema cuenta con cuatro tarjetas PCB que están debidamente acondicionadas para la inserción de los DUT. Estas tarjetas han sido diseñadas y fabricadas en ATN (ref. interna: ATN-PCB-EM-445_v1).

Las tarjetas cuentan con dos zócalos de fuerza de inserción zero del fabricante 3M (ref. 232-1287-00-602), los cuales son capaces de soportar temperaturas desde $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, rango suficiente para soportar los ensayos especificados por la NASA. Cada tarjeta es capaz de dar soporte y conectar hasta 25 DUT, 16 en el zócalo de la izquierda y 9 en el de la derecha (ver Figura 6).

Cada tarjeta cuenta con 4 conectores D-sub del fabricante ITT Cannon (ref. DB-2P-1A5N-A191-K87), responsables de realizar la comunicación con la unidad de análisis de los 25 termistores simultáneamente. Estos conectores, al igual que los zócalos de 3M, tienen un rango de temperatura apto para los ensayos que se van a realizar con este sistema, soportando temperaturas desde $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Debido a la falta de espacio en la placa y con el fin de lograr tener los cuatro conectores con la misma orientación, se han soldado dos en la cara superior y los otros dos en la cara inferior de la tarjeta.

Aunque cada zócalo es capaz de comunicar eléctricamente 16 termistores, el zócalo de la derecha ha sido concebido tan solo para dar conexión eléctrica a 9 termistores. Esta situación se debe a la falta de espacio en la tarjeta y falta de pines en los conectores para dicha comunicación. Cada conector cuenta con 25 pines, 100 en total para el módulo de la tarjeta, y cada DUT requiere cuatro hilos para su correcta medición.

En la superficie de la tarjeta están serigrafiados los identificadores de los termistores o componentes que se conecten a la unidad de análisis. De esta manera se puede identificar cada componente de manera individual. Cada tarjeta, además, es identificada con una letra del abecedario, *A*, *B*, *C* o *D*, de tal manera que facilitan la tarea de identificar y localizar componentes.



Figura 6: Módulo de tarjeta de conexión PCB

3.2.3. Cintas de conexión internas

El sistema de encapsulado y conexión se conecta mediante cintas de cable plano a la unidad de análisis, sin embargo, por razones económicas, se usan dos cintas de conexión distintas para interior y el exterior de la cámara. Las que se describen en este apartado son las cintas que conectan el sistema de encapsulado y conexión con el exterior de la cámara ambiental, siendo estos más resistentes que las cintas usadas fuera de la cámara.

El sistema cuenta con 16 cintas de cable plano de 25 vías del fabricante 3M (ref. 3601/25-100), de 1.5 metros de largo por 31.75 mm de ancho. La principal razón de usar estas cintas de conexión en el interior de la cámara climática es su mayor rango de operación, ya que estos cables pueden soportar temperaturas desde $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las cintas cuentan con conectores D-sub macho (ref. DBSF-25P-K87), para la conexión con el exterior de la cámara ambiental, y hembra (ref. DBSF-25S-A197), para la conexión con el sistema de soporte y conexión. Estos conectores son del fabricante ITT Cannon, su rango de funcionamiento está comprendido entre $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Las cintas llevan identificadores en ambas terminaciones con una letra que identifica la tarjeta de conexión y un número identificando el conector (ver Figura 3). Este identificador facilita el reconocimiento de componentes mal conectados o defectuosos y su posición exacta en los zócalos.



Figura 7: cintas de conexión con el exterior de la cámara ambiental

3.2.4. Sondas de temperatura

Con objeto de monitorizar de manera precisa la temperatura en el interior del chasis se usan un conjunto de tres sondas de temperatura tipo RTD de platino de una resistencia nominal de $100\ \Omega$ a $0\ ^\circ\text{C}$, ya que, como se expone en la sección 1.1, los sensores RTD tienen mayor linealidad que los termistores y por lo tanto su medida de temperatura es más precisa.

Estas sondas, así como su distribución en el interior del chasis tienen como objetivo el análisis del gradiente en el interior del sistema de soporte y conexión a partir de lecturas de temperatura fiables en las proximidades de los DUT. De esta manera es posible determinar si la distribución de temperatura se mantiene dentro de los márgenes de tolerancia establecidos en el ensayo.

Para una mayor fiabilidad de la lectura de las sondas, estas son calibradas anualmente por el CEM, de acuerdo con la norma EIT-90. Por lo tanto, la conversión de resistencia a temperatura se realiza mediante hojas de calibración proporcionadas por el CEM, que aportan una mayor precisión a las conversiones, ya que, como se ve en epígrafes posteriores, las sondas tienen derivas temporales a largo plazo.

Las sondas empleadas son dos sensores PT100 5622-32 de Fluke (refs. internas LE1228.000 y LE1229.000) con una incertidumbre de $\pm 0.02\ ^\circ\text{C}$ según la última calibración realizada por el CEM. Ambas sondas tienen un tiempo de respuesta ante cambios de temperatura de 10 s (ensayo realizado por el fabricante en las condiciones especificadas en la norma ASTM E644) y han sido calibradas en el rango de operatividad de temperatura comprendido entre $-200\ ^\circ\text{C}$ y $350\ ^\circ\text{C}$. En el interior del chasis estas sondas se sitúan en los laterales tal y como se ilustra en la Figura 20 (ver Subsección 4.3).

Una tercera sonda de mayor precisión, situada en el centro del chasis, de modelo 5615-6 del fabricante Fluke (ref. interna LE1170.000) monitoriza la temperatura en el centro del chasis. De acuerdo con la última calibración realizada en el CEM las lecturas de este sistema presentan una tolerancia de $\pm 0.01\ ^\circ\text{C}$ a $0\ ^\circ\text{C}$ y $\pm 0.02\ ^\circ\text{C}$ a temperaturas extremas $-200\ ^\circ\text{C}$ y $480\ ^\circ\text{C}$. El tiempo de respuesta de esta sonda es de temperatura de 9 s, y su rango de calibración está comprendido entre $-200\ ^\circ\text{C}$ y $300\ ^\circ\text{C}$.

Al igual que las medidas realizadas a los termistores, las que se realizan a las sondas siguen el método Kelvin, o medida a 4 hilos (ver sección 1.2) para eliminar toda componente espuria asociada a la resistividad de los cables.

A modo de referencia, la Tabla 3 muestra las lecturas de resistencia para cada una de las sondas aquí descritas en el caso de un ensayo a $0\ ^\circ\text{C}$ con una tolerancia de $\pm 0.05\ ^\circ\text{C}$. Los valores de esta tabla han sido calculados a partir de la última calibración (hecha por el CEM) vigente en la fecha de redacción del presente documento por lo que solo sirven como guía y han de adaptarse teniendo en cuenta la última calibración del sistema.

Para el ensayo a 0 °C, las ecuaciones proporcionadas por el CEM siguiendo la norma EIT-90, el rango de aceptación de las sondas debe estar conforme a la siguiente tabla:

Rango resistivo	LE1170.000	LE1228.000	LE1229.000
- 0.05 °C	99.98177Ω	99.9773 Ω	99.9753 Ω
+ 0.05 °C	100.01364Ω	99.99687 Ω	99.99487 Ω

Tabla 3: Rango resistivo para 0 °C de las sondas de temperatura



Figura 8: Sonda de temperatura LE1170.000



Figura 9: Sonda de temperatura LE1228.000

3.3. Unidad de análisis

Como se ha visto en el apartado 3.2.2, este set-up ha sido concebido para la caracterización de hasta 100 termistores, además de las tres sondas que monitorizan la temperatura en el interior del chasis. En total son 103 elementos cuya resistencia se quiere medir, como es lógico, medir tantos componentes uno a uno es inviable, por eso se requiere de una unidad específica que sea capaz de hacer el máximo número de medidas en el menor tiempo posible.

Con objeto de satisfacer la necesidad expuesta en el párrafo anterior, la medida de resistencia de los termistores y las sondas de temperatura se hacen mediante el equipo 34980 A del fabricante HP. Entre las principales

características que tiene esta unidad de análisis está la capacidad de medir tanto la resistencia de termistores o RTD, como el voltaje de termopares. Además, tiene un carácter modular que le aporta gran versatilidad, ya que dispone de ocho slots para la conexión de módulos de medidas, además de disponer de un puerto GPIB que permite el control de sus características y el envío de datos de medición, mediante un adaptador GPIB a USB, a un ordenador.

Para la caracterización de los termistores P 1K0.0805.4P.B.S se ha usado un módulo 34922 A, el cual se describe en apartados posteriores. A pesar de que la unidad de análisis, así como su módulo de medida, hayan sido concebido para un tipo concreto de termistores, estos sistemas son de aplicación a otro tipo de componentes EEE.

Esta unidad de análisis de datos tiene un alto rendimiento a la hora de hacer las medidas. Se usa como sistema de adquisición, así como sistema de conmutación y registro de datos. Esta unidad realiza las medidas de manera secuencial, pudiendo medir las magnitudes de un gran número de componentes en pocos segundos. Cuenta con la posibilidad de configurar los distintos canales de sus módulos de manera independiente, así como especificar funciones y unidades de medida, límites de alarma y escalado de la señal y añadir un offset de manera individual en cada canal.

El modelo 34980A es capaz de hacer medida de resistencia configurable a dos o cuatro hilos (ver Subsección 1.2), así como tensión y corriente de señales continuas y alternas, en el caso de una señal alterna puede hacer mediciones de frecuencia y periodo. Se puede también medir la temperatura mediante la conversión del valor de resistencia de termistores y RTD, o la conversión de tensión a temperatura en caso de los termopares.



Figura 10: Sistema de adquisición de datos 34980 A

3.3.1. Módulo 34922 A

Como se describía anteriormente, la unidad 34980 A es un sistema modular, es decir, requiere al menos un módulo para realizar la adquisición de datos. El fabricante dispone en su catálogo de varios módulos para esta unidad de análisis, no obstante, se ha optado por uno de propósito general, ya que sus prestaciones cumplen los requisitos para realizar las medidas.

El módulo de propósito general de adquisición de datos 34922 A, del fabricante HP, es usado como multiplexor para el escaneo de los componentes conectados a éste. Cuenta con 70 canales para realizar las medidas, con la opción de poder realizarlas a dos o cuatro hilos. Es capaz de hacer lecturas de hasta 100 canales por segundo, además dispone de una unión de referencia para realizar las lecturas de temperaturas de termopares. Dispone de una capacidad de conmutar hasta 300 voltios.

Con un módulo 34922 A se puede medir la resistencia de los 25 termistores de una tarjeta de circuito impreso (ver Subsección 3.2.2). No obstante, y al disponer tan solo de un módulo 34922 A, la conmutación entre las diferentes tarjetas del set-up se realiza manualmente.

Este sistema fue originariamente concebido para ser utilizado con la unidad de análisis 34970 A del fabricante HP, la cual no dispone de las prestaciones que ofrece la unidad 34980 A. El módulo que se usaba con la anterior unidad de análisis, el 34901 A, tan sólo disponía de 20 canales, haciendo imposible las medidas a 4 hilos. Al

cambiar el equipamiento fue necesario el uso de una tarjeta de adaptación (ref. ATN_PCB-ADP-029) como la que se muestra en la Figura 12, la cual muestra el conexionado de las cintas de conexión que se explican en el epígrafe posterior. Además de las cintas de cable plano, en su dorso, la tarjeta de adaptación dispone de tres terminales roscados para la conexión con las tres sondas de temperatura.



Figura 11: Módulo 34922 A.

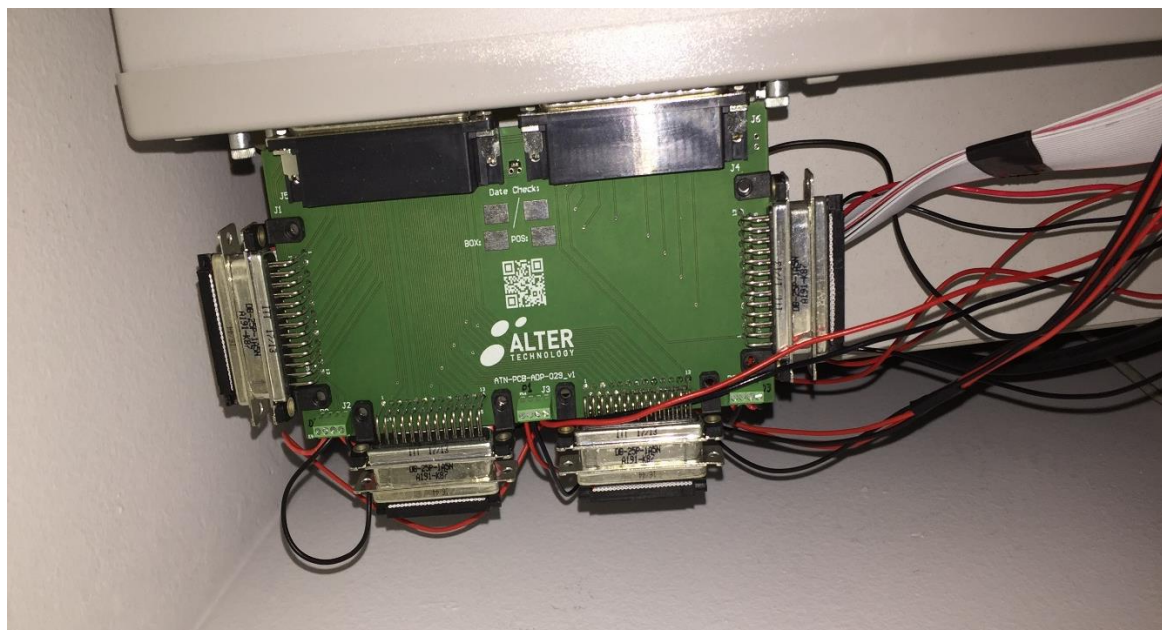


Figura 12: Conexionado al módulo 34922A con tarjeta de adaptación.

3.3.2. Conexión con la unidad de análisis

La comunicación entre las cintas de cable plano que conectan los DUT con el exterior de la cámara ambiental (ver Subsección 3.2.3) se hace mediante unas cintas de cable plano distintas a las mencionadas anteriormente. Tanto a estas cintas, como a sus conectores, no se les va a exigir que soporten temperaturas extremas ni es necesario que sean resistentes ante cambios de temperatura puesto que toda su operación se realiza en el exterior de la cámara climática.

Con el fin de realizar esta comunicación se utilizan cuatro cintas de cable plano no apantallado de 25 vías. Estas cintas tienen un grosor de 35.75 mm. Cada cinta cuenta en sus extremos con conectores D-sub hembra para realizar la conexión con las cintas descritas en la Subsección 3.2.3 y la conexión con la tarjeta de adaptación, tal y como se muestra en la Figura 12.

Estas cintas están formadas por dos conectores D-Sub IDC hembra cada una del modelo DBSF-25S-A197 del fabricante ITT Cannon. Los conectores disponen de un rango de funcionamiento de - 55 °C a 125 °C. Los cables usados para las cintas son del modelo 3365/25-100, del fabricante 3M, cuyo rango de temperatura está comprendido entre - 20 °C y 105 °C. Al estar fuera de la cámara climática, no tienen por qué ser resistentes a temperaturas extremas.

Como se veía en la Subsección 3.2.3, cada cinta lleva en sus extremos marcadores que las numeran, de esta manera pueden ser conectados a las cintas que salen del interior de la cámara ambiental de forma que los identificadores coincidan en su número, de esta manera, a la hora de realizar la medida se puede identificar fácilmente cada componente.

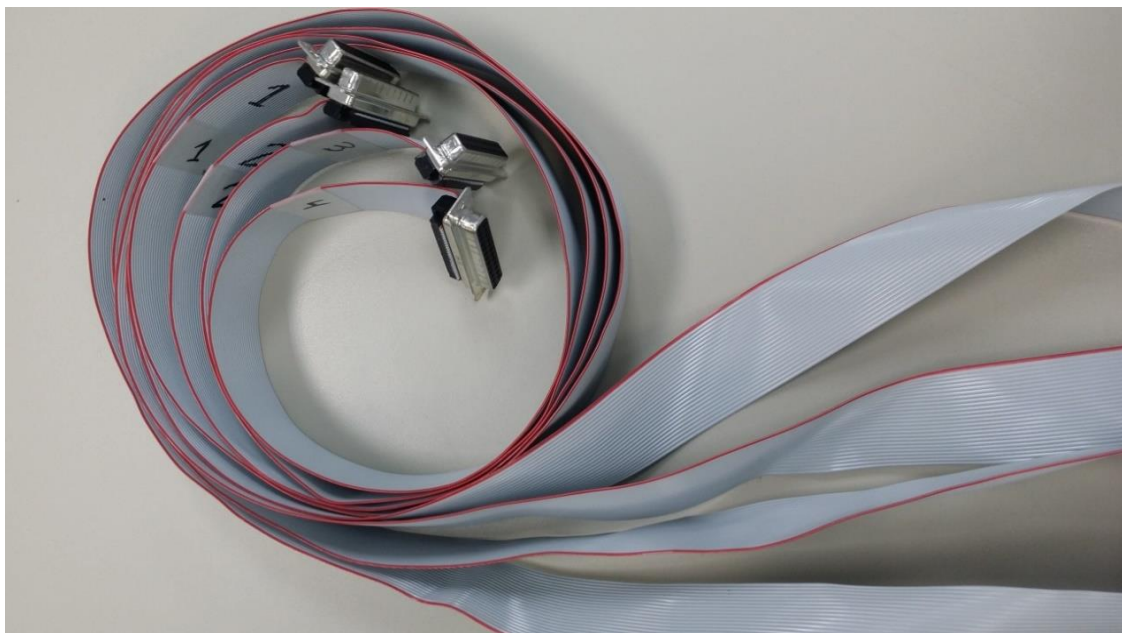


Figura 13: Cintas de cable plano para el exterior de la cámara ambiental

3.4. Centro de control y registro

A pesar de que tanto la cámara climática VC7018, como la unidad de análisis 34980 A ofrecen interfaces de usuario desde las cuales poder gestionar sus funciones, estas son poco intuitivas. Como resultado, se pierde tiempo programando el comportamiento de estos sistemas. No obstante, tanto la cámara ambiental como la unidad de análisis disponen de software de control y registro de datos para un ordenador mucho más intuitivo, que además ofrece la posibilidad de registrar los programas creados, de forma que se pueden precargar para futuros ensayos.

3.4.1. Control y registro de la cámara ambiental

El control de la cámara, así como el registro de los datos del sensor de temperatura, el punto de consigna y otros datos poco relevantes para el sistema que se está bajo ensayo, se realizan mediante el software SIMPATI.

Este software ha sido concebido para controlar varias cámaras climáticas simultáneamente. Además, ofrece un editor gráfico del programa de la cámara, donde el usuario puede modificar el punto de consigna de temperatura y realizar una gráfica donde el eje de abscisas representa el tiempo (normalmente en horas), y el eje de ordenadas el valor de la temperatura (Ver Figura 15). Además del punto de consigna de temperatura, el editor gráfico de programa, para la cámara climática VC7018, permite programar, de manera similar la temperatura, la humedad y la velocidad a la que gira el ventilador del interior de la cámara.

El software registra en un archivo binario la lectura del sensor interno de la cámara ambiental durante todo el proceso de funcionamiento de esta, además de llevar un registro del punto de consigna que ha sido programado en el editor de programa. El archivo generado sólo es legible mediante el software SIMPATI, aunque cuenta con la posibilidad de exportación a un archivo de valores separados por comas que puede ser importado por aplicaciones de hojas de cálculo como Microsoft Excel. El archivo es de gran utilidad a la hora de la representación gráfica de las medidas de termistores y las sondas de temperatura.

El software SIMPATI requiere que el ordenador donde sea instalado tenga al menos 4 GB de RAM y 1 GB de disco duro. Es compatible con un procesador Intel Pentium o posterior y requiere un sistema operativo de Microsoft Windows XP o posterior.

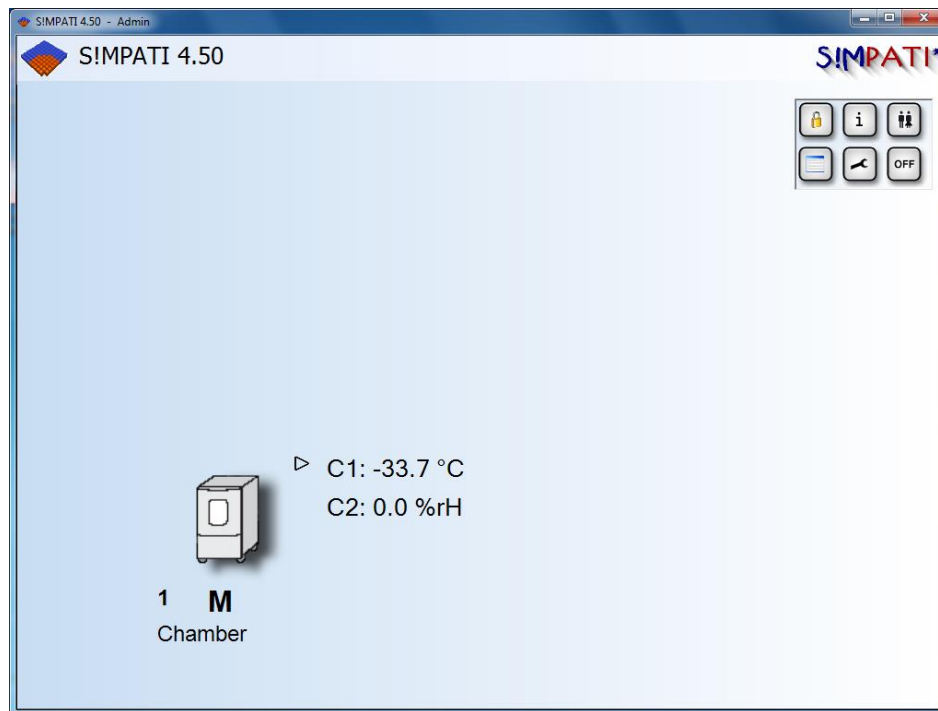


Figura 14: Ventana principal del software SIMPATI.

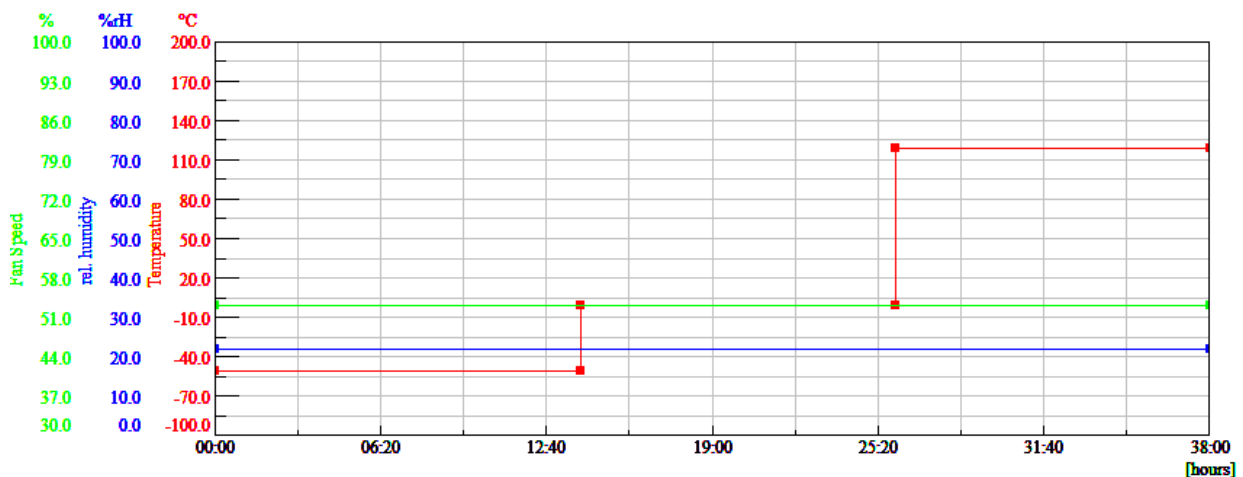


Figura 15: Editor gráfico de programa, donde la gráfica roja corresponde al punto de consigna de la temperatura, la azul al de la humedad, y la verde al de la velocidad del ventilador

3.4.2. Control y registro de la unidad de análisis

El control y el registro de las medidas realizadas por la unidad de análisis del 34980 A se realiza con el software *34980A BenchLink Data Logger*.

El módulo 34922 A cuenta con 70 canales que pueden ser configurados de manera independiente (ver 3.3.1), el software es capaz de gestionar estos canales, pudiendo realizar medidas de tensión o resistencia ajustando la intensidad aplicada para la medida, característica que es útil para el ensayo de *Zero-Power Resistance* (ver 1.3.1). Además, es capaz de guardar la configuración de los canales para precargas en posteriores ensayos.

Este software guarda en un archivo de datos separados por comas, que puede ser leído y procesado por aplicaciones de hoja de cálculo como Microsoft Excel, al igual que hace el software de la cámara ambiental, SIMPATI, con la salvedad que BenchLink Data Logger guarda sus registros directamente en el archivo separado por comas.

Una de las características más importantes de este software es la capacidad de regular la intensidad de polarización que circula por el DUT. Como especifica la GSFC-S-311-P-827 en el ensayo *Zero-Power*

Resistance (ver Apartado 1.3.1), la resistencia de los termistores se debe medir a 25 °C a una intensidad de 10 μ A. Sin embargo, configurar el sistema para que inyecte la corriente de polarización deseada no es intuitivo en este software. Al igual que cualquier ohmímetro, BenchLink Data Logger dispone de rangos de resistencias para realizar las medidas configurables de manera automática o manual. Cada rango está asociado a una corriente de polarización, por lo que configurando correctamente el rango de resistencia se obtiene la intensidad de polarización deseada. Por lo que no es de extrañar observar que los termistores, con resistencia nominal de 1 K Ω a 0 °C, según el fabricante, sean medidos con un rango de resistencia de 100 K Ω , ya que esta opción corresponde a una corriente de 10 μ A especificada por la norma.

Al hacer uso de la tarjeta de adaptación ATN_PCB-ADP-029, los escaneos de los canales que realiza la unidad de análisis no se realizan por el orden numérico indicado en la serigrafía de las tarjetas de conexión, en el interior del chasis del sistema de soporte y conexión. Con el fin de poder identificar a los DUT se hace uso de las etiquetas que permite poner el software a los diferentes canales.

Channels	Enable Channel		Measurement		
	Scan	Name	Function	Range/Ref	Res
34980A					
└─ 1. Instr1					
└─ 34922A					
└─ 1001	<input checked="" type="checkbox"/>	T03 10K	Four-Wire Ohms	100 K	5.5
└─ 1002	<input checked="" type="checkbox"/>	T07 4K7	Four-Wire Ohms	100 K	5.5
└─ 1003	<input checked="" type="checkbox"/>	T10 1K	Four-Wire Ohms	100 K	5.5
└─ 1004	<input checked="" type="checkbox"/>	T14 4K7	Four-Wire Ohms	10 K	5.5
└─ 1005	<input type="checkbox"/>	T18 10K	Four-Wire Ohms	1 K	5.5
└─ 1006	<input checked="" type="checkbox"/>	T01 1K	Four-Wire Ohms	1 K	5.5
└─ 1007	<input checked="" type="checkbox"/>	T05 10K	Four-Wire Ohms	10 K	5.5
└─ 1008	<input checked="" type="checkbox"/>	T09 1K	Four-Wire Ohms	10 K	5.5
└─ 1009	<input type="checkbox"/>	T12 4K7	Four-Wire Ohms	1 K	5.5
└─ 1010	<input checked="" type="checkbox"/>	T16 470	Four-Wire Ohms	100 K	5.5
└─ 1011	<input type="checkbox"/>	T04 10K	Four-Wire Ohms	1 K	5.5
└─ 1012	<input checked="" type="checkbox"/>	T08 4K7	Four-Wire Ohms	10 K	5.5
└─ 1013	<input type="checkbox"/>	T23	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1014	<input checked="" type="checkbox"/>	T15 470	Four-Wire Ohms	10 K	5.5
└─ 1015	<input type="checkbox"/>	LE1229	Four-Wire Ohms	Auto	6.5
└─ 1016	<input checked="" type="checkbox"/>	T02 00HM	Four-Wire Ohms	100 K	5.5
└─ 1017	<input checked="" type="checkbox"/>	T06 4K7	Four-Wire Ohms	1 M	5.5
└─ 1018	<input type="checkbox"/>		Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1019	<input type="checkbox"/>	T13	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1020	<input checked="" type="checkbox"/>	T17 100	Four-Wire Ohms	100 K	5.5
└─ 1021	<input type="checkbox"/>	T20	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1022	<input type="checkbox"/>	T21	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1023	<input type="checkbox"/>		Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1024	<input type="checkbox"/>	T25 10K	Four-Wire Ohms	1 K	5.5
└─ 1025	<input type="checkbox"/>		Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1026	<input type="checkbox"/>	T19	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1027	<input type="checkbox"/>	T22	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1028	<input type="checkbox"/>	T24	Four-Wire Ohms	Auto	5.5
└─ 1029	<input checked="" type="checkbox"/>	LE1170	Four-Wire Ohms	Auto	6.5
└─ 1030	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5
└─ 1031	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5
└─ 1032	<input type="checkbox"/>	LE1228	Four-Wire Ohms	Auto	6.5
└─ 1033	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5
└─ 1034	<input checked="" type="checkbox"/>	T11 1K	Four-Wire Ohms	10M	5.5
└─ 1035	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5

Figura 16: Configuración de canales de BenchLink Data Logger para un ensayo con resistencias medidas a 4 hilos a distintas intensidades.

4. ENSAMBLADO DEL SISTEMA

*“Haz las cosas lo más simple que puedas, pero
no te limites a lo simple”*

- Albert Einstein -

EN este capítulo se detallan los pasos que deben ser seguidos para el correcto ensamblado del sistema para la realización de los ensayos especificados por las normas GSFC-S-311-P-827 y MIL-PFR-32192 para termistores para aplicaciones de vuelo espacial. Con objeto de ensamblar el set-up se hace uso de los sistemas y componentes descritos en el Capítulo 3.

A pesar de que el sistema ha sido concebido para la caracterización de termistores, es de aplicación a otros componentes EEE cuya caracterización requiera condiciones controladas de temperatura y la monitorización de la resistividad de los mismos.

4.1. Ensamblado de los componentes

En un primer paso se ensamblan los componentes EEE para su caracterización dentro de los zócalos que están soldados a las tarjetas de conexión, tomando las pertinentes medidas de seguridad contra la descarga electrostática. Estas medidas son de gran importancia, ya que una descarga en el componente puede provocar anomalías en su funcionamiento, es por eso por lo que al ensamblar los componentes se han usado dedos de plástico, batas y zuecos antiestáticos. Además, el encargado de ensamblar los termistores (o componentes EEE) debe estar conectado en todo momento a tierra mediante una muñequera y un cordón antiestático y una base presente en todas las mesas de los laboratorios de ATN que garantizan que no haya posibilidad de descarga electrostática sobre los componentes.

Cuando todos los componentes estén bien sujetos en los zócalos, se atornillan las tarjetas al chasis. Es recomendable atornillar en primer lugar las placas de la parte inferior, de esta manera es más sencillo y reduce la posibilidad de contacto con los componentes, lo cual puede ocasionar una mala conexión o una descarga electrostática, en caso de no estar conectado pertinentemente a tierra.

En el ensayo con los 100 termistores P 1K0.0805.4P.B.S, teniendo en cuenta que cada tarjeta de conexión tiene capacidad de conectar eléctricamente con la estación de análisis hasta 25 componentes (ver Subsección 3.2.2), y cada zócalo tiene capacidad de alojar hasta 16 componentes, en un zócalo se conectan los 16 componentes mientras que el segundo zócalo solo se carga con 9 dispositivos.

Es importante, antes de proseguir con el ensamblado del sistema, realizar una comprobación preliminar de los componentes para asegurar que todos los componentes están bien conectados a los zócalos y tienen conexión con la unidad de análisis, aprovechando que en este punto el chasis del sistema está abierto. Con este fin, se conectan las tarjetas de conexión a la unidad de análisis mediante las cintas de conexión descritas en el Subapartado 3.3.2. Haciendo uso del software BenchLink Data Logger se realiza el escaneo preliminar. Mientras se está escaneando, se muestra una tabla por canales con el valor del último escaneo, valor mínimo y valor máximo medido, entre otros datos que en este punto no son de interés. Haciendo una breve inspección visual se puede apreciar con facilidad si hay algún componente que no esté bien conectado.

Si alguno no tuviera comunicación con la unidad de análisis el software mostraría un mensaje de error en la celda que correspondiente.



Figura 17: Chasis del sistema de soporte y conexión con las tarjetas y componentes ya ensamblados

4.2. Conexión con el exterior de la cámara ambiental

En este apartado se describe la correcta comunicación de las cintas de cable plano del interior de la cámara climática, descritas en la Subsección 3.2.3, a las tarjetas de conexión. Con el fin de garantizar un correcto conexionado entre los conectores D-sub se debe ejercer una pequeña presión en la parte posterior de la tarjeta que se va a conectar.

Es recomendable realizar el conexionado de las cintas de conexión de la parte inferior del sistema. Es decir, se recomienda hacer la conexión de las tarjetas B y D primero.

También es recomendable, para un primer uso del set-up, comprobar manualmente la presión que deber ser ejercida sobre las tarjetas de conexión sin ensamblar los DUT en los zócalos. Esta técnica es útil a la hora del montaje del sistema, ya que reduce el riesgo de contacto con los componentes, reduciendo, de esta manera el riesgo de descarga electrostática, como se muestra en la Figura 18: Conectando las cintas de cable plano a las tarjetas de conexión.

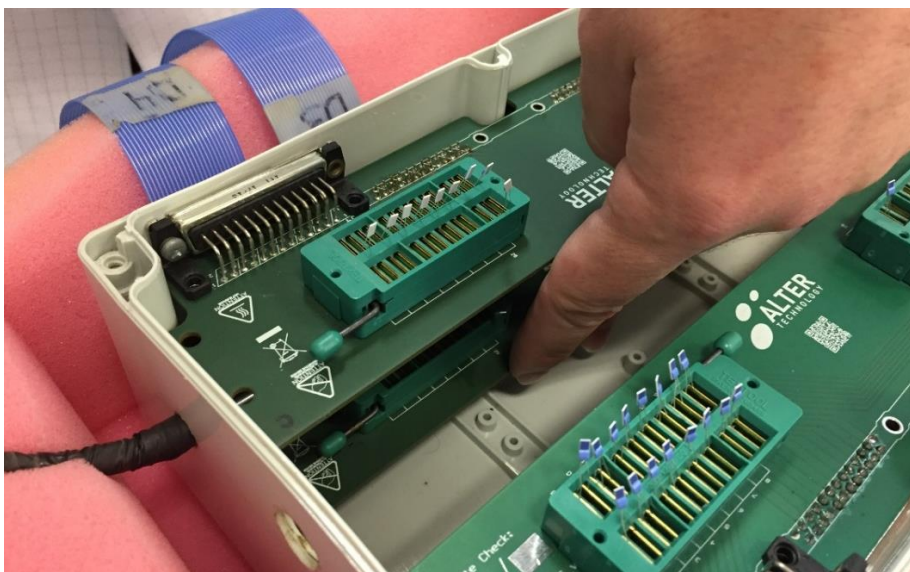


Figura 18: Conectando las cintas de cable plano a las tarjetas de conexión

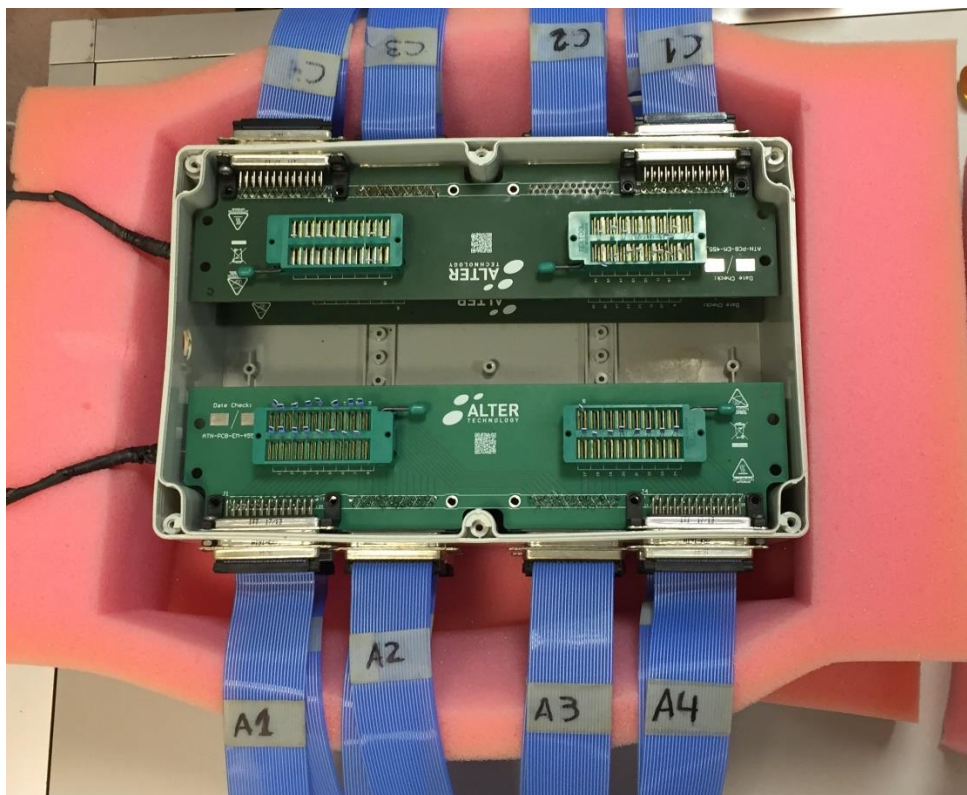


Figura 19: Conexión de todas las cintas de cable plano al sistema de soporte y conexión

4.3. Introducción de las sondas de temperatura

Tras hacer la conexión de las cintas de cable plano a las tarjetas, se realiza la introducción de las sondas de temperatura en el chasis. Aunque es recomendable realizar este paso tras el conexionado de las cintas, no es crucial para las sondas laterales, que pueden ser introducidas en cualquier momento, siempre tras el atornillado de las tarjetas de conexión en el chasis. De esta manera, en la Figura 18 y en la Figura 19 aparecen ya introducidas las sondas de temperatura LE1228.000 y LE1229.000.

Sin embargo, la sonda LE1170.000 debe ser introducida después de realizar el conexionado de las cintas de cable plano, ya que, como muestra la Figura 18, introducir la mano para ejercer presión sobre la tarjeta de conexión resulta mucho más fácil sin la sonda central.

El esquema de colocación de las sondas se muestra en Figura 20, establecido por convenio interno. De forma que las sondas laterales corresponden a la LE1228.000 y la LE1229.000, siendo la LE1228.000 la que, cuando el sistema se meta dentro de la cámara climática, esté más cerca de la compuerta.

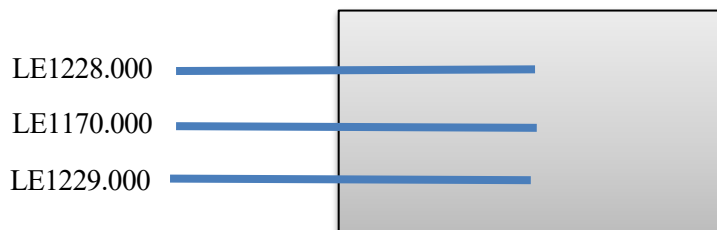


Figura 20: Esquema de posición de las sondas en el sistema de soporte y conexión

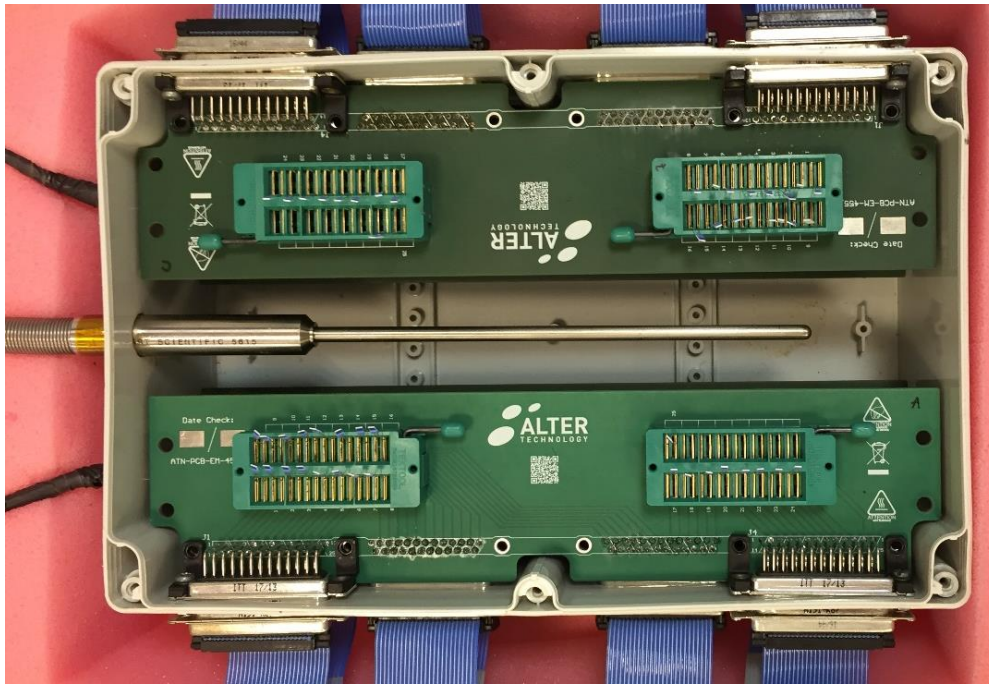


Figura 21: Sondas de temperatura en el sistema de conexión y soporte

4.4. Acondicionamiento del encapsulado

En este epígrafe se detalla el acondicionamiento necesario para que sistema de soporte y conexión cumpla con las especificaciones de estabilidad de la GSFC-S-311-P-827 A antes de ser introducido en la cámara ambiental.

En el ensayo *Zero-Power Resistance* se especifica que la temperatura a la cual deben ser medidos los DUT debe ser de 25 °C con una estabilidad temporal de ± 0.05 °C (ver Subsección 1.3.1). Sin embargo, la cámara ambiental no es capaz de mantener una temperatura constante con una tolerancia como la que especifica la norma, ya que la tolerancia de la cámara es de ± 0.3 °C (ver Sección 3.1).

Con objeto de cumplir la especificación de la norma se envuelve el chasis de un material aislante térmico, de manera que ralentiza la transmisión de temperatura desde la cámara al interior del chasis. Esta ralentización consigue que la temperatura en el interior del chasis sea prácticamente inmune a las fluctuaciones de la temperatura de la cámara ambiental.

Otra propiedad que mejora el aislante térmico es que es capaz de minimizar el gradiente de temperatura en el interior del chasis. La cámara VC7018 tiene un gradiente espacial de ± 0.1 °C en todo su volumen. El material usado, gracias a su propiedad aislante, consigue que la temperatura en el interior del chasis permanezca lo más homogénea posible en todos los puntos de su volumen.

A pesar de que la norma especifica que la temperatura debe ser 25 °C durante la medida del *Zero-Power Resistance*, en el ensayo de los termistores P 1K0.0805.4.P.B.S se ha usado un punto de consigna de 0 °C, ya que es la temperatura para la cual el fabricante proporciona la resistencia nominal de los termistores. No obstante, el criterio de estabilidad temporal y espacial se mantienen, por lo que se usa el recubrimiento de material aislante para el ensayo de termistores a 0 °C.

4.4.1. Parte inferior del aislante

El recubrimiento de material aislante consta de cuatro partes, una base, dos revestimientos laterales, uno mayor que otro, y una parte superior.

El primer paso es depositar el sistema de soporte y conexión sobre la base y recubrimiento lateral mayor de material aislante, con el chasis completamente cerrado y atornillado, como se muestra en la Figura 22.



Figura 22: Sistema de soporte y conexión sobre la base y recubrimiento lateral

4.4.2. Parte superior del aislante

Con el sistema de soporte y conexión sobre el material aislante, se procede a ajustar el recubrimiento lateral de menor tamaño, intentando que el chasis quede completamente embebido en el revestimiento, dejando espacio para las cintas de conexión.

El siguiente paso es colocar la parte superior del material aislante, como se muestra en la Figura 23.



Figura 23: Recubrimiento lateral del sistema de soporte y conexión



Figura 24: Chasis embebido en el material aislante



Figura 25: Vista lateral del chasis embebido en el material aislante

4.4.3. Posición de las cintas de cable plano

Con el fin de facilitar el paso de las cintas de cable plano por el pasamuros, las cintas correspondientes a la tarjeta A y la tarjeta B deben pasar por encima del material como se muestra en la Figura 26. De esta forma, resultará más fácil meter el sistema en la cámara ambiental si todas las cintas de cable plano están por un solo lado. Por otra parte, esto facilita su paso por el pasamuros.



Figura 26: Correcta colocación de las cintas de cable plano

4.5. Introducción del sistema en la cámara ambiental

A continuación, se describe el protocolo a seguir para introducir el sistema dentro de la cámara climática, una vez ha sido revestido con el material aislante.

Antes de proceder a la introducción del sistema en la cámara se debería pasar los cables de las sondas por el pasamuros, de esta manera será mucho más sencillo maniobrar con el sistema. Al introducir el sistema de soporte y conexión en la cámara se sugiere que esté orientado de tal forma que los cables de las sondas recorran la mínima distancia dentro de la cámara climática, como se muestra en la Figura 27 (el pasamuros se encuentra a la parte inferior derecha de la figura).

Es recomendable pasar primero por el pasamuros los cables que provienen de la parte posterior de la cámara, como se muestra en la Figura 28. También se recomienda apartar los cables a los extremos del pasamuros para poder cerrarlo debidamente, como muestra la figura Figura 30.



Figura 27: Sistema de soporte y conexión en la cámara climática orientado correctamente



Figura 28: Cintas de cable plano de la parte posterior pasando por el pasamuros

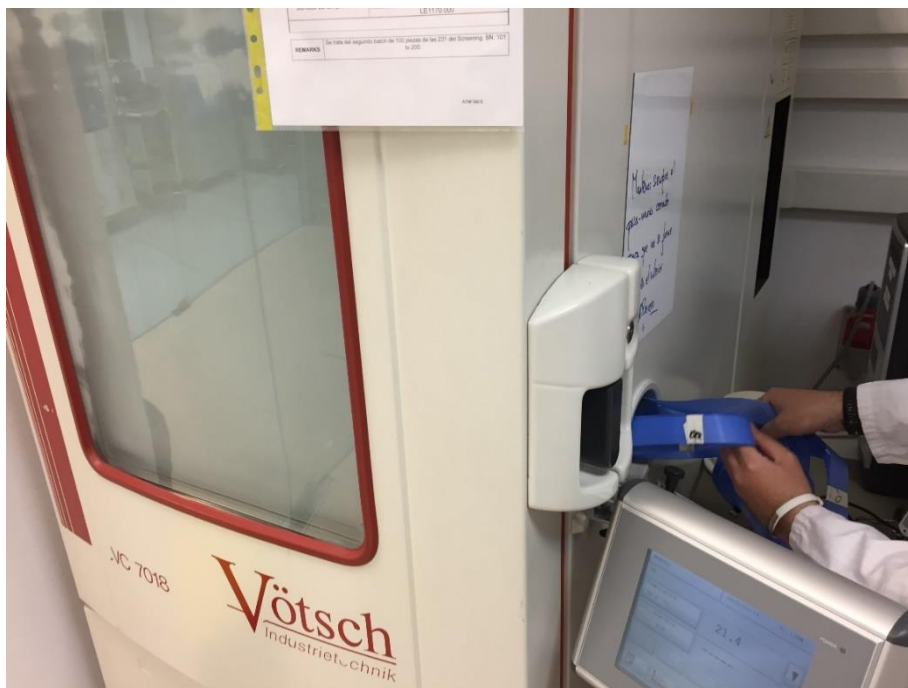


Figura 29: Cámara climática cerrada



Figura 30: Correcta colocación de los cables por el pasamuros y pasamuros cerrado

4.6. Conexión eléctrica con la unidad de análisis

Finalmente, se hace el conexionado entre las cintas de cable plano azules, del interior de la cámara ambiental, con las cintas que conectan directamente con la unidad de análisis. Para la realización de este conexionado se ha de tomar la precaución de conectar cada cinta de cable plano de la cámara con su correspondiente cinta de cable plano de la unidad de análisis.

Como se explica en la Subsección 3.2.3 y en la Subsección 3.3.2, cada cinta tiene un identificador, las del interior de la cámara están identificadas por una letra que va desde la A hasta la D que identifica la tarjeta de conexión,

y un número que va desde el 1 hasta el 4, que identifica el puerto. No obstante, la conexión con la unidad de análisis se realiza mediante cuatro cintas, identificadas por un número de 1 al 4. Estas cintas son insuficientes para hacer la medida de los cien componentes que puede soportar este sistema.

Este problema se soluciona haciendo una conmutación manual entre las cintas. Es decir, una vez que la temperatura de la cámara está estable a 25 °C (o a 0 °C para los termistores P 1K0.0805.4P.B.S), se hace la medida de los 25 termistores de la tarjeta A durante el tiempo que se estime oportuno, y transcurrido ese tiempo se conmuta a la tarjeta B (normalmente un ensayo a temperatura constante abarca desde un par de horas hasta quince horas). Este procedimiento se repite para las otras dos tarjetas.

Se recomienda realizar un escaneo de los valores de la resistencia de los termistores una vez está establecido todo el sistema, antes de cerrar la cámara climática. De esta manera se puede comprobar si hay conexión eléctrica con todos los DUT, por si se diera el caso de que un componente se hubiera desconectado mientras se ensamblaba el sistema.

Si este segundo escaneo preliminar no detectara ninguna anomalía, se podría proceder con el ensayo. En caso contrario, se debería solucionar el problema de la conexión del componente.

5. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

La vida es y siempre seguirá siendo una ecuación imposible de resolver, pero tiene ciertos factores que conocemos

- Nikola Tesla -

ESTE capítulo está dedicado al estudio de los componentes del sistema. Se busca, de esta manera realizar un estudio de las tolerancias del sistema y cómo afectan las incertidumbres de temperatura y resistencia a la medida final, con objeto de cuantificar el error que se está cometiendo en la lectura de la resistencia de los termistores. En otras palabras, se busca cuantificar la calidad de las medidas realizadas por el sistema cuando se hace uso de los componentes descritos en el Capítulo 3.

A lo largo de este epígrafe se evalúan aquellos aspectos que tiene un efecto crítico sobre la incertidumbre de las medidas de resistencia descritas en el epígrafe anterior

Como hemos visto en estos ensayos se caracteriza la resistencia de termistores en condiciones controladas de temperatura, siendo 0 °C la principal temperatura de referencia. En este caso al tratarse de un sensor resistivo de temperatura, las fuentes de incertidumbre de asociadas a esta medida pueden agruparse en:

- Incertidumbre asociada a la medida de resistencia (σ_R).
- Incertidumbre asociada a la temperatura ambiental a la que se realiza la medida de resistencia (σ_T)

De acuerdo con la guía GUM para la estimación de incertidumbre, la incertidumbre combinada se determina mediante la media cuadrática de las incertidumbres típicas asociadas a las fuentes de error anteriormente descritas (Ecuación 3).

$$u_C = \sqrt{\sum_i u_i^2}$$

Ecuación 3: Incertidumbre total del sistema

No obstante, mientras que la incertidumbre del equipamiento con el que se caracteriza la resistencia contribuye de manera directa a la incertidumbre de la medida, las condiciones ambientales como es la temperatura influyen de manera indirecta sobre la incertidumbre. Así, para determinar la influencia de la temperatura en la incertidumbre hemos de emplear la ecuación de propagación de errores. En este caso particular se emplea la Ecuación 4, donde u_T (°C) es la incertidumbre asociada a la temperatura ambiental y u_R (Ω) es su propagación hacia la medida de resistencia.

$$u_y^2 = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_{x_i}^2 \quad (a)$$

$$u_T(\Omega) = \left. \frac{\partial R}{\partial T} \right|_{T=T_0} u_T(^{\circ}\text{C}) \quad (b)$$

Ecuación 4: Propagación de errores. (a) Expresión general y (b) para un termómetro resistivo

Esta metodología de propagación de errores es solo válida para relaciones lineales por lo que de manera previa hay que linealizar la relación a evaluar mediante su desarrollo en serie de Taylor hasta el término de primer orden. De forma general en los sensores de temperatura resistivos, como son los termistores, la relación resistencia temperatura puede aproximarse a la ecuación de Callendar-Van Dusen (Ecuación 1 y Ecuación 2). Donde R_0 es el valor de la resistencia nominal de la sonda a 0°C , idealmente 100Ω , a , b y c son coeficientes dependientes del material y T es la temperatura del sistema. Además, en los sensores bajo el estándar IEC751, como es el DUT modelo P1K0.0805.4P.B.S, es aceptado linealizar la relación resistencia temperatura con un coeficiente lineal de $\alpha = 3.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

De esta forma, combinado las tres últimas expresiones se obtiene la incertidumbre combinada del sistema determinada por la Ecuación 5, mientras que en el caso de medidas a 0°C se aproxima a la Ecuación 6:

$$u = \sqrt{u_R^2 + R^2(a + 2bT + 4cT^3 - 200cT^2)^2 u_T^2 (^{\circ}\text{C})}$$

Ecuación 5: Incertidumbre de los termistores

$$u = \sqrt{u_R^2 + (R \alpha)^2 u_T^2 (^{\circ}\text{C})}$$

Ecuación 6: Incertidumbre de la medida de resistencia en termistores a 0°C .

En estas expresiones u_R es la incertidumbre típica de una medida de resistencia en un sistema que no se ve afectado por las variaciones de temperatura, es decir, la incertidumbre del equipamiento electrónico empleado para caracterizar la resistencia, y u_T es la incertidumbre de las condiciones de temperatura del termistor durante la medida. Cabe destacar aquí que de forma general para los valores típicos de los coeficientes a , b y c la aproximación empleada en la Ecuación 6 para la expresión de la incertidumbre es válida en un amplio rango varias decenas de grados Celsius y no exclusivamente a 0°C .

5.1. Análisis de incertidumbre de las sondas

La incertidumbre de las sondas de temperatura determina la capacidad para asegurar el cumplimiento de las condiciones de ensayo descritas en el epígrafe anterior. Además, como se discute en el epígrafe anterior esta magnitud afecta de manera crítica a incertidumbre de los valores de resistencia resultantes de los ensayos realizados sobre los DUT. Las principales fuentes de incertidumbre identificadas para las lecturas de temperatura son los que se detallan a continuación

- Incertidumbre del patrón de comparación empleado para la calibración.
- Estabilidad de la sonda.
- Histéresis.
- Auto-calentamiento de la sonda.
- El error de interpolación
- Deriva a largo plazo.
- Resolución del registrador de temperatura.
- Incertidumbre del registrador de temperatura

5.1.1. Incertidumbre de calibración de las sondas

La calibración de las sondas la realiza un laboratorio especializado (sonda LE1228 y LE1229 en el CEM y la sonda LE1170 en el INTA) quien también evalúa su incertidumbre correspondiente al momento de la medida, considerando entre otros factores el error que se comete debido a los instrumentos usados en la calibración de dichas sondas, la estabilidad o repetitividad de los valores registrados por la sonda, además de cuantizar la variación que sufren las lecturas ante un mismo valor de temperatura cuando este se alcanza desde distintos puntos, es decir, la histéresis de la medida. También se considera el error cometido por el autocalentamiento de la sonda además del error de interpolación de la recta de ajuste utilizada. No obstante, no se contemplan las posibles derivas temporales de la lectura de las sondas, por ese motivo se ha realizado un estudio de las derivas temporales de las sondas de temperatura (ver Subsección 5.1.2).

Para las tres sondas aquí empleadas la incertidumbre expandida que proporciona el laboratorio de calibración es de $U_{T-CAL} = 0.03$ °C, considerando el factor de cobertura de una distribución normal ($k = 2$).

5.1.2. Deriva de la calibración de las sondas

Como se ha especificado en el epígrafe anterior, cada cierto tiempo las sondas de temperatura son enviadas un laboratorio especializado, donde son calibradas. Con el paso del tiempo la medida del valor de resistencia de las sondas se aleja del valor que deberían tener para una determinada temperatura, por eso se realizan calibraciones anuales a las sondas laterales (LE1228.000 y LE1229.000) y bianuales a la sonda central (LE1170.000).

Con objeto de evaluar de la variabilidad a largo plazo de la exactitud de las sondas, se ha de comparar las correcciones obtenidas por dos calibraciones consecutivas programadas dentro el plan de calibraciones establecido para este instrumento. Las sondas de temperatura empleadas son del tipo PT100 en el que la temperatura se calcula de manera indirecta a partir de la resistencia registrada. Así, para evaluar la deriva a largo plazo se comparan las temperaturas obtenidas a partir de un mismo valor de resistencia, pero aplicando los coeficientes de cálculo proporcionados por dos calibraciones periódicas consecutivas. Puesto que la mayor parte de los ensayos se realizan a 0 °C, en este cálculo se emplea una resistencia de referencia próxima a la correspondiente a la del punto triple del agua (0.01 °C) que es un punto fijo de calibración.

5.1.2.1. Deriva temporal de la sonda LE1170.000

De acuerdo con las especificaciones del fabricante La sonda LE1170.000 presenta una gran estabilidad por lo que se calibra cada dos años. Así, esta sonda adquirida en 2015 fue calibrada en 2017 y no le corresponde una segunda calibración hasta el año 2019. En consecuencia, el cálculo de la deriva de esta sonda se realiza mediante la comparación de la calibración vigente, realizada en el INTA con la información proporcionada por el fabricante la cual es mucho más imprecisa que la generada por el laboratorio de calibración. De esta manera, se toma la lectura de resistencia proporcionada por el INTA para el punto triple del agua, 99.9997 Ω , y se introduce en la función de referencia indicada por el fabricante, obteniéndose una temperatura de - 0.0077 °C, valor que se corresponde con a una deriva $U_{T-deriva} = 0.018$ °C.

5.1.2.2. Deriva temporal de las sondas LE1228.000 y LE1229.000

En estos instrumentos el cálculo si ha podido realizarse mediante la comparación de dos informes de un laboratorio de calibración externo (calibraciones realizadas en el CEM en los años 2017 y 2018) los cuales, a diferencia del fabricante de la sonda LE1170.000, incluyen correcciones de desviación sobre la función de referencia la sonda PT-100. Según la última calibración, los valores de resistencia correspondientes al punto triple del agua son: 99.987 Ω y 99.988 Ω para las sondas LE1228.000 y LE1229.000 respectivamente. Introduciendo estos valores en las curvas de calibración inferidas del informe de calibración anterior se obtienen valores temperaturas de - 0.0002 °C (LE1228.000) y 0.0074 °C (LE1229.000), los cuales se corresponden con derivas de $U_{T-deriva} = 0.010$ °C y $U_{T-deriva} = 0.0026$ °C para las sondas LE1228.000 y LE1229.000 respectivamente.

5.1.2.3. Conclusiones sobre la deriva temporal de las sondas

En la Tabla 4 se incluye la deriva temporal que experimentan las tres sondas. Estos valores son aceptables ya que cumplen el requisito generalmente establecido por el cual la incertidumbre asociada a la deriva temporal ha

de ser inferior a la incertidumbre de calibración. No obstante, queda demostrado que este es fuente de error a tener en cuenta ya que es del mismo orden que la incertidumbre de calibración. De estos resultados se infiere que la sonda que aparentemente presenta una mayor deriva entre calibraciones es la sonda LE1170.000. A este respecto es importante tener en cuenta que este resultado se obtiene considerando la calibración proporcionada por el fabricante, quien solo aplica la función de referencia de sondas PT100 sin considerar desviaciones adicionales. Por lo tanto, lo elevado de este valor puede deberse a una calibración inicial de fábrica que es no lo suficiente precisa. Por todo esto es recomendable no actuar en función a este resultado el cual debe de corroborarse con la siguiente calibración programada para 2019. Si se confirmase este a la elevada deriva temporal se recomienda aumentar la frecuencia de calibración a una periodicidad anual.

SONDA	DERIVA ENTRE CALIBRACIONES ($U_{T-deriva}$)
LE1170.000	0.018
LE1228.000	0.010
LE1229.000	0.0025

Tabla 4: Deriva temporal de las sondas entre calibraciones

5.1.3. Indicador de temperatura

Como se indica en apartados anteriores las lecturas proporcionadas por las sondas PT100 son registrado por la unidad de análisis LE1325.000 estas lecturas registradas en unidades de resistencia son transformadas en unidades de temperatura de acuerdo con las ecuaciones proporcionadas por la IET90.

La calibración del multímetro de registro (LE1325.000) se ha realizado en conformidad con la guía GUM por el fabricante (Keysight) en 2017, quien certifica una incertidumbre de calibración $U_{cal-ind} = 0.003 \Omega$ ($k = 02$) para la escala de 100Ω , (resistencia nominal de la sonda PT100 a 0°C) en medidas a 4 hilos. La propagación de esta incertidumbre en el registro de este señor resistivo requiere analizar en detalle la función de conversión a escala de temperatura. De acuerdo con la norma ITS-90, en el rango de temperatura de trabajo las funciones de referencia a usar toman la forma incluida en la Ecuación 7, donde los valores de los coeficientes B_i y D_i son los tabulados en la ITS-90. En estas expresiones la fórmula empleada para el cálculo de la desviación $W_r - W$ es distinta según el laboratorio que calibró el instrumento. El parámetro $R(273.16)$ es la resistencia registrada por la sonda durante su calibración a la temperatura del punto triple del agua y a y b son parámetros de calibración calculados a partir de las lecturas registradas a otras temperaturas de referencia.

$$T_{90}/273.16 = B_0 + \sum_i^{15} B_i \left[\frac{W_r^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \quad \text{Funcion de refencia } 13.8033 \text{ K} \leq T \leq 273.16 \text{ K}$$

$$\frac{T_{90}}{K} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r - 2.64}{1.64} \right]^i \quad \text{Funcion de refencia } 273.15 \text{ K} \leq T \leq 1234.93 \text{ K}$$

$$W - W_r = a(W - 1) + b(W - 1)^2 \quad \text{Función de desviación sondas LE1228.000 y LE1229.000}$$

$$W - W_r = a(W - 1) + b(W - 1)\ln(W) \quad \text{Función de desviación sonda LE1770.000 } T \leq 273.16 \text{ K}$$

$$W - W_r = a(W - 1) + b(W - 1)^2 + c(W - 1)^3 \quad \text{Funcion de desviación sonda LE1770.000 } T \geq 273.15 \text{ K}$$

$$W = \frac{R}{R(273.16)}$$

Ecuación 7: Funciones de referencia y desviación para un termómetro resistivo de platino según la ITS-90

De acuerdo con la ley de propagación de incertidumbre es necesario linealizar este sistema de ecuaciones mediante el desarrollo en serie de Taylor de la expresión combinada final, para lo cual este conjunto de ecuaciones se deriva con respecto a la resistencia (Ecuación 4 a). De esta forma se obtienen las siguientes expresiones (Ecuación 8) para la incertidumbre asociada al indicador en el caso de las sondas LE1288.000 y LE1229.000.

$$u_{cal-ind}(^{\circ}\text{C}) = 273.16 \left[\sum_{i=1}^{15} B_i \times i \times \left(\frac{W_r^{1/6} - 0.65}{0.35} \right)^{i-1} \right] \times \frac{1}{6} \times \frac{W_r^{-5/6}}{0.35} \\ \times \frac{1 - a - 2b(W - 1)}{R(273.16)} u_{cal-ind}(\Omega)$$

$$13.8033 \text{ K} \leq T \leq 273.16 \text{ K}$$

$$u(^{\circ}\text{C}) = \left[\sum_{i=1}^9 D_i \times i \times \left(\frac{W_r - 2.64}{1.64} \right)^{i-1} \right] \times \frac{1}{1.64} \times \frac{1 - a - 2b(W - 1)}{R(273.16)} u_{cal-ind}(\Omega)$$

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 1234.93 \text{ K}$$

Ecuación 8: Expresión general de la incertidumbre asociada al indicador para las sondas LE1228.000 y LE1229.000

El caso de temperaturas próximas a 0.01 °C, incluyendo la temperatura de referencia 0 °C, se puede aproximar a $W \approx 1$ de tal forma que $W_r \approx W$ para las tres sondas, lo que simplifica la expresión de la incertidumbre de a las incluidas en la Ecuación 9.

$$u_{cal-ind}(^{\circ}\text{C}) = 273.16 \left[\sum_{i=1}^{15} B_i \times i \right] \times \frac{1}{6} \times \frac{1}{0.35} \times \frac{1 - a}{R(273.16)} u_{cal-ind}(\Omega)$$

$$13.8033 \text{ K} \leq T \leq 273.16 \text{ K}$$

$$u_{cal-ind}(^{\circ}\text{C}) = \left[\sum_{i=1}^9 (-1)^{i-1} \times D_i \times i \right] \times \frac{1}{1.64} \times \frac{1 - a}{R(273.16)} u_{cal-ind}(\Omega)$$

$$273.15 \text{ K} \leq T \leq 1234.93 \text{ K}$$

Ecuación 9: Expresión simplificada ($T \sim 0.01$ °C) de la incertidumbre asociada al indicador para las sondas LE1228.000, LE1229.000 y LE1770.000

Teniendo en cuenta los coeficientes de ajuste incluidos en su último informe de calibración las contribuciones de esta fuente a la incertidumbre de cada una de las sondas son los que se incluyen en la Tabla 5 junto con la incertidumbre asociada a la resolución del indicador.

Al igual que la incertidumbre calibración del registrador es necesario evaluar su resolución. En este caso la resolución del registrador es de $1 \times 10^{-4} \Omega$, esto implica un error máximo de redondeo o incertidumbre por resolución del indicador de $U_{res-ind} = 5 \times 10^{-5} \Omega$. Siguiendo un procedimiento similar al que se acaba de describir y empleando ecuaciones equivalentes a las incluidas en Ecuación 9 se calcula la propagación de esta incertidumbre hacia la medida de temperatura. Así, para la temperatura de referencia de 0 °C se obtienen los valores de $U_{res-ind}$ (°C) reunidos en la Tabla 5.

	LE1770.000	LE1228.000	LE1229.000
$U_{CAL-IND}$ (°C)	7.5×10^{-3}	7.6×10^{-3}	7.6×10^{-3}
$U_{RES-IND}$ (°C)	3.8×10^{-4}	3.8×10^{-4}	3.8×10^{-4}

Tabla 5: Incertidumbre (a $T \sim 0.01$ °C) asociada de la resolución calibración del indicador.

5.1.4. Homogeneidad

Dadas las reducidas dimensiones del chasis la temperatura en su interior se caracteriza empleando únicamente tres sondas de temperatura. En el interior de este sistema, la homogeneidad de la temperatura se evalúa a partir de la semidiferencia entre los valores máximo y mínimo de las medias registrados por el conjunto de sondas. En los ensayos aquí descritos se exige que las temperaturas de todas las zonas se encuentran dentro del rango de ± 0.02 °C ($U_{\text{uniformidad}} = 0.02$ °C) con respecto a la temperatura de consigna. La selección de este rango tiene por fin asegurar que la incertidumbre combinada de temperatura sea inferior ± 0.05 °C que es la exactitud exigida por la norma MIL-PFR-32192.

5.1.5. Estabilidad del sistema

La metodología para evaluar la estabilidad del sistema una vez este alcanza el régimen estacionario se discute en detalle en el Capítulo 6 “Caracterización del sistema” junto con el tiempo de estabilización y el criterio empleado para establecer el cuándo las lecturas de temperatura alcanzan el régimen estacionario. En dicho epígrafe se observa cómo una vez en el régimen estacionario la lectura de temperatura se puede modelar a una distribución gaussiana cuya varianza determina la incertidumbre típica asociada a esta fuente de incertidumbre. Tal y como se indica en dicho epígrafe para cada una de las sondas la desviación típica obtenida en un ensayo tipo a 0 °C son las incluidas en la Tabla 6.

<i>SONDA</i>	<i>INCERTIDUMBRE EXPENDIDA (K=2)</i>
<i>LE1170.000</i>	0.0088 °C
<i>LE1228.000</i>	0.0095 °C
<i>LE1229.000</i>	0.010 °C

Tabla 6: Incertidumbre asociada a la estabilidad.

5.1.6. Incertidumbre combinada

De acuerdo con la guía GUM para la estimación de incertidumbre, la incertidumbre combinada se determina mediante la media cuadrática de las incertidumbres típicas asociadas a las fuentes de error anteriormente descritas (ver Ecuación 5). En esta expresión las incertidumbres típicas individuales u_i se obtiene a partir de las incertidumbres expandidas U_i calculadas en los epígrafes anteriores y considerando el correspondiente factor de cobertura k_i ($U_i = k_i \times u_i$). Es factor de cobertura varía según el tipo de distribución de probabilidad. Así en el caso de la una distribución normal (p.ej. la correspondiente a la incertidumbre proporcionada por en el informe de calibración) el factor de confianza empleado es $k = 2$ mientras que en el caso de la deriva a largo plazo o de la incertidumbre de redondeo asociada a la resolución del indicador se corresponden con una distribución rectangular ($k = \sqrt{3}$). En la Tabla 7 se muestra el cálculo de incertidumbre combinada para este sistema en lo que a la temperatura se refiere. En este cálculo se ha tomado los valores de deriva de la sonda LE1228 ya que el valor de la sonda LE1170 no se considera lo suficientemente fiable. No obstante, en la Tabla 8 reúne las incertidumbres combinadas expandidas considerando los valores de deriva de las tres sondas PT100 aquí descritas.

FUENTE DE INCERTIDUMBRE	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA	TIPO DE DISTRIBUCIÓN (FACTOR DE CONFIANZA)
<i>Certificado de calibración (apartado 5.1.1)</i>	0.03	Normal ($k = 2$)
<i>Deriva (apartado 5.1.2)</i>	0.010	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)
<i>Calibración del indicador (apartado 5.1.3)</i>	7.6×10^{-3}	Normal ($k = 2$)
<i>Resolución del indicador (apartado 5.1.3)</i>	3.8×10^{-4}	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)
<i>Estabilidad (apartado 5.1.5)</i>	8.8×10^{-3}	Normal ($k = 2$)
<i>Uniformidad (apartado 5.1.4)</i>	0.02	Rectangular ($k = \sqrt{3}$)
<i>Incertidumbre típica combinada</i>		0.021
<i>Incertidumbre combinada expandida ($k = 2$)</i>		0.042

Tabla 7: Cálculo de incertidumbre combinada expandida para la sonda LE1228.000

SONDA PT100 INCERTIDUMBRE COMBINADA EXPANDIDA

LE1170.000	0.044
LE1228.000	0.042
LE1229.000	0.040

Tabla 8: Incertidumbre combinada expandida de las sondas empeladas

En esta última tabla se observa que asumiendo la deriva temporal de la sonda LE1770, la cual es anormalmente alta, bajo los requisitos de homogeneidad establecidos en el epígrafe anterior la incertidumbre combinada es levemente superior al nivel establecido de $0.05 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.2. Incertidumbre asociada a la medida de la resistencia

En este epígrafe se analiza la incertidumbre asociada a las lecturas de medidas eléctricas del sistema, es decir, se hace un estudio de la calidad de la medida.

5.2.1. Incertidumbre de calibración del medidos de resistencia

Según el certificado de calibración de la unidad de análisis LE1325.000 la incertidumbre de las medidas registradas en por este sistema para una resistencia nominal de $1 \text{ k}\Omega$ es de $\pm 0.014 \text{ }\Omega$. Esta incertidumbre es la estimada cuando la unidad de análisis está configurada en modo $1 \text{ k}\Omega$, el cual emplea una corriente de análisis de 1 mA . Sin embargo, en los ensayos que se realizan sobre termistores la corriente de sondeo se limita a $10 \text{ }\mu\text{A}$, tal y como establece la norma GSFC S-311-P-827A con objeto de eliminar el auto-calentamiento del dispositivo. Como veremos a lo largo del presente epígrafe esto reduce significativamente la resolución de la medida y por lo tanto aumenta su incertidumbre

El presente epígrafe trata de estimar la incertidumbre de la medida de resistencia en termistores eliminado la componente asociada a la temperatura. Con este fin se ha llevado a cabo un ensayo empleado las mismas

condiciones y equipamiento descritos para los ensayos con termistores, pero analizando resistencias convencionales cuya respuesta es mucho menos sensible a la temperatura ambiental. Puesto que el equipamiento empleado es el mismo que en el ensayo con termistores (cableado, chasis, zócalos etc.) y se realiza en la misma ubicación, mediante estas medidas no solo se analiza la estabilidad de estación de análisis, sino que se evalúa de forma global la estabilidad de la señal de resistencia.

En este test se analizan resistencias de distinto valor nominal aplicando diferentes corrientes de polarización. Entre estos, este ensayo es de especial interés la resistencia de 1 k Ω medida con una intensidad de polarización de 10 μ A, ya que estos valores son:

- i) la resistencia nominal de los termistores nuestro sistema modelo P1K0.0805.4P.B.S.
- ii) la corriente de polarización indicada en la norma GSFC-S-311-P-827 A.

Este estudio se centra en el análisis de estabilidad de la media o ruido electrónico y la reproducibilidad a medio plazo. Debido a la falta de tiempo de medida para realizar otros ensayos, no se contemplan más factores en las estimaciones de la incertidumbre. Además, se están despreciando las variaciones de temperaturas en los intervalos de tiempo donde se analizan los registros de medida de la resistencia, así como errores relacionados con acoplamiento electromagnético y diafonía en los cables de medida.

5.2.2. Resolución del indicador

Bajo las condiciones aquí descritas, es decir cuando la corriente de sondeo se configura en $I = 10 \mu$ A la resolución del indicador es de 0.082 Ω para valores de resistencia de 1 k Ω . Así la incertidumbre expandida asociada es de $U_{R-res} = 0.042 \Omega$ (la mitad de la resolución) y se corresponde con una distribución rectangular ($k = \sqrt{3}$).

5.2.3. Reproducibilidad a corto plazo

La reproducibilidad de las medidas de resistencias se ha evaluado comparando dos lecturas de una misma resistencia (nominal de 1 k Ω) realizadas con 3 días de diferencia. El periodo tiempo evaluado es superior o del mismo orden de magnitud que el transcurre entre diferentes verificaciones realizadas sobre un mismo termistor antes y después de que este sea sometido a diferentes ensayos ambientales (véase por ejemplo ensayos indicados a lo largo de la cláusula 3 de la norma MIL-PRF-32192). En particular los ensayos fueron realizados el 30 de abril y posteriormente el 2 de mayo de 2018, en ambos casos a una temperatura de 0 °C. La lectura de abril, en el régimen de estado estacionario, tiene un valor medio de **995.88 Ω** , mientras que la lectura realizada en mayo tiene un valor medio de **995.95 Ω** . Es decir, entre ambas lecturas se hay una desviación de **0.07 Ω** . Este es un valor más elevado que lo esperado, un comportamiento que podría atribuirse a baja corriente de polarización y a los consecuentes elevados valores de ruido. Además, es importante destacar aquí la baja representatividad estadística de este análisis, por lo que no puede considerarse un ensayo tipo A segundo establecido en la guía GUM. Por otro lado, en este ensayo no se ha empleado un patrón con una deriva temporal conocida, con lo que tampoco no puede encuadrarse dentro del ensayos tipo B. Ambos factores comprometen la fiabilidad de este valor, no obstante, este ensayo proporciona una estimación aproximada de la reproducibilidad de las medidas realizadas en un periodo de tiempo similar.

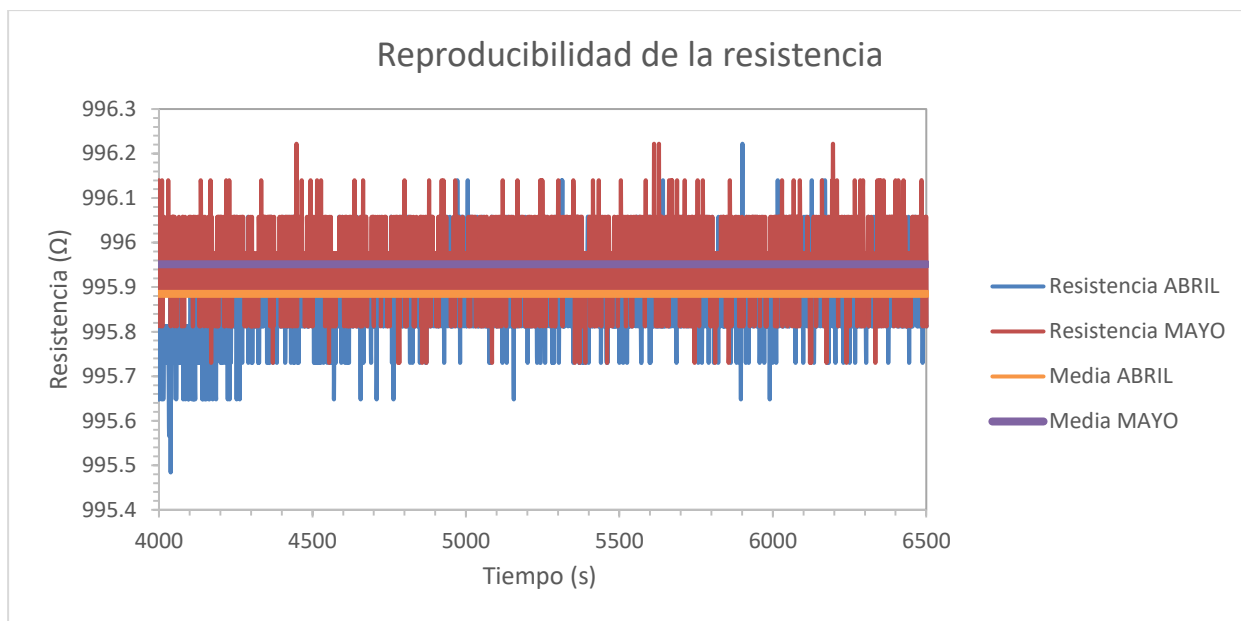


Figura 31: Reproducibilidad de la resistencia

5.2.4. Estabilidad

El análisis de ruido electrónico o de estabilidad durante la medida se realizó empleando las mismas condiciones descritas en los epígrafes anteriores ($R = 1 \text{ k}\Omega$, $I = 10 \text{ }\mu\text{A}$, $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$). También se muestran resultados correspondientes a corrientes de sondeo superiores con objeto de mostrar la influencia de este parámetro en la calidad de la medida.

La Figura 33 muestra la señal registrada bajo nuestra condición estándar una vez que esta alcanza su estado estacionario, mientras que en la Figura 34 se representa el correspondiente histograma. Esta distribución se ajusta a la función de gauss ($r^2 = 0.98$) proporcionando una desviación típica de $\sigma_{Res} = 0.12 \text{ }\Omega$ y una incertidumbre expandida $U = 0.24 \text{ }\Omega$ ($k = 2$). Este valor es significativamente inferior al obtenido en el caso de un termistor P1K0.0805.4P.B.S ($\sigma_{TER} = 0.19$), cuya resistividad se ve notablemente afectada por las fluctuaciones de temperatura. No obstante, el valor incertidumbre obtenido es muy superior al indicado en el certificado de calibración de la unidad de análisis empleada para este rango de resistencias ($\sigma_{CAL} = 0.014 \text{ }\Omega$). Esto se debe, entre otros factores, a la baja corriente de sondeo empleada, la cual también afecta a la resolución. Para ilustrar este punto la Figura 35 muestra el mismo análisis empleando una corriente de sondeo de $100 \text{ }\mu\text{A}$ para la cual la desviación típica se reduce a ($\sigma_{100\mu A} = 0.045 \text{ }\Omega$)

A modo de ejemplo, en la Figura 32 se muestran los valores de las lecturas de resistencias medidos a distintas intensidades, desde $10 \text{ }\mu\text{A}$ hasta 1 mA . Se puede observar a simple vista cómo el ruido electrónico es mayor en la resistencia que ha sido medida con la menor corriente ($10 \text{ }\mu\text{A}$), mientras que con corrientes superiores dicho ruido no es apreciable. Debido a la tolerancia de las resistencias, el valor nominal de resistividad es distinto entre las resistencias escogidas para el análisis de ruido electrónico.

$$N(R) = A \sqrt{\frac{2}{\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(R-\mu)^2}{\sigma^2}}$$

Ecuación 10: Función de distribución de Gauss

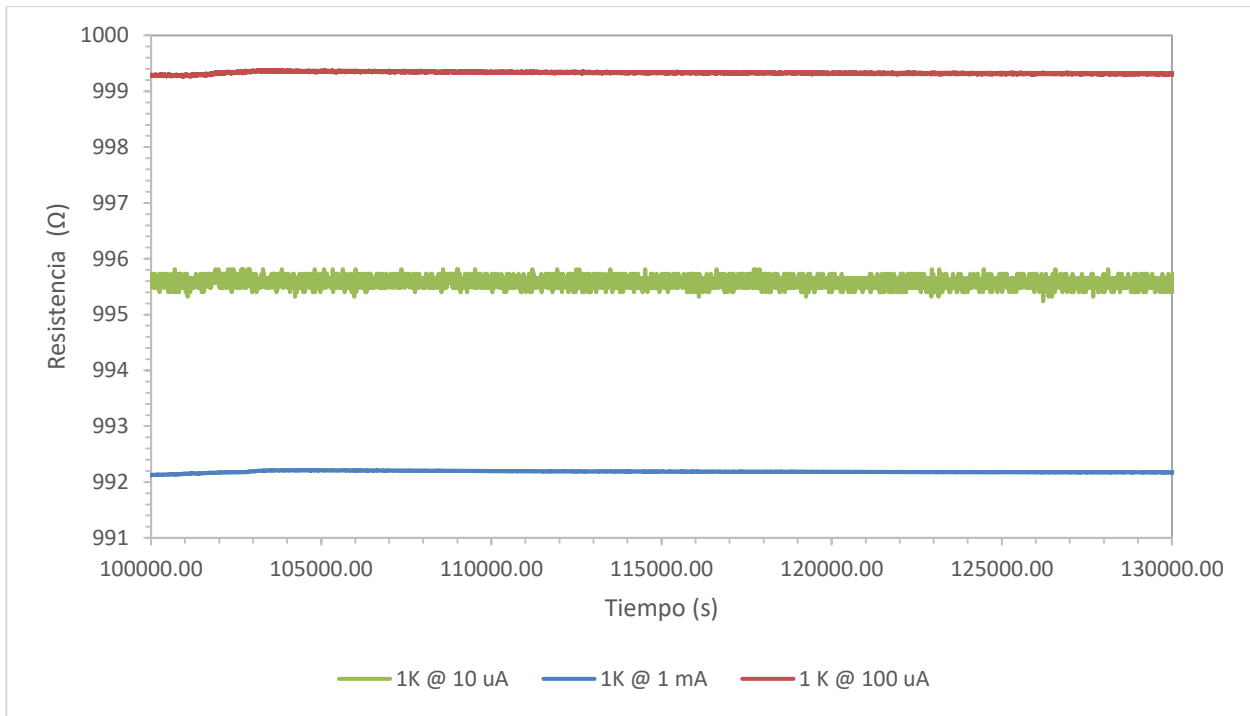


Figura 32: Resistencias de 1 K Ω medidas con diferentes intensidades de polarización

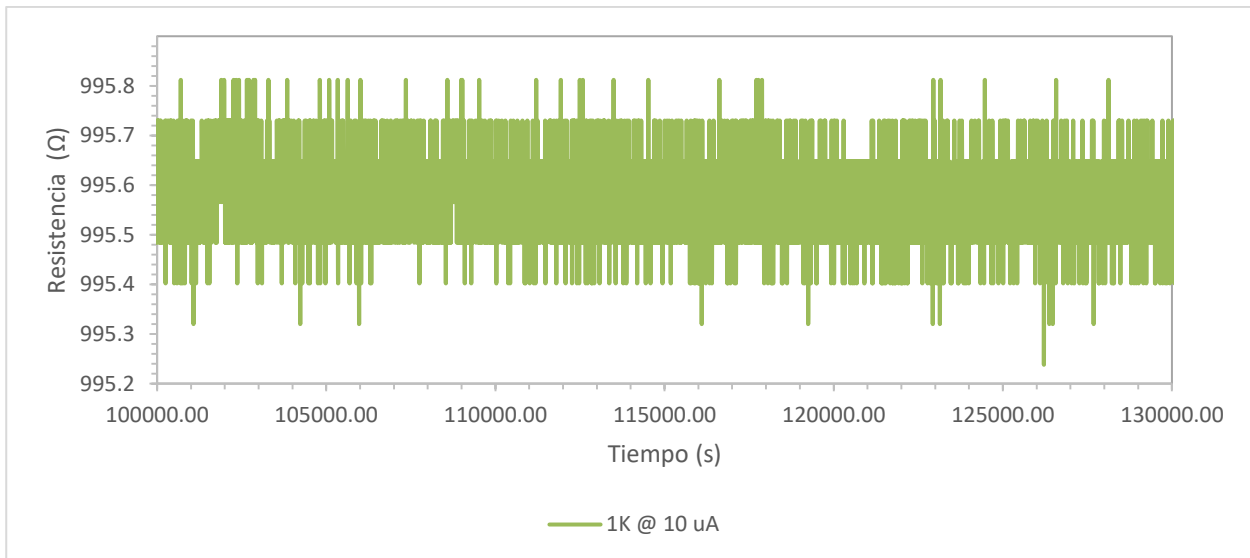


Figura 33: Valor de la resistencia de 1 K Ω medida a 10 μ A, a 0 $^{\circ}$ C

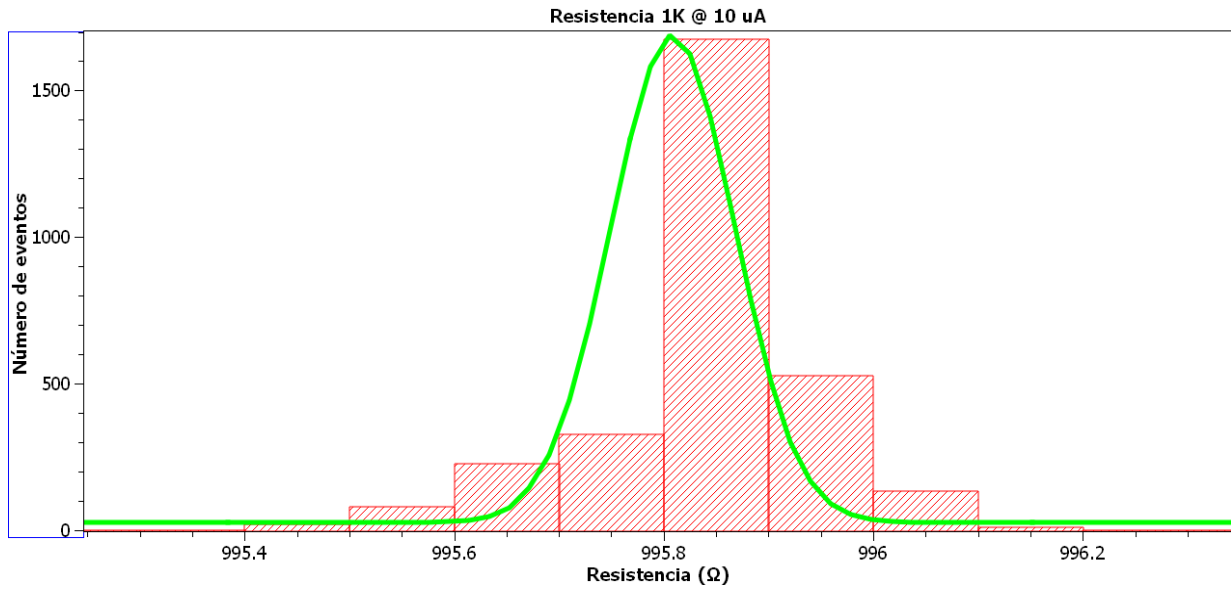


Figura 34: Histograma de valores para la resistencia de 1K Ω medida a 10 μ A a 0 $^{\circ}$ C

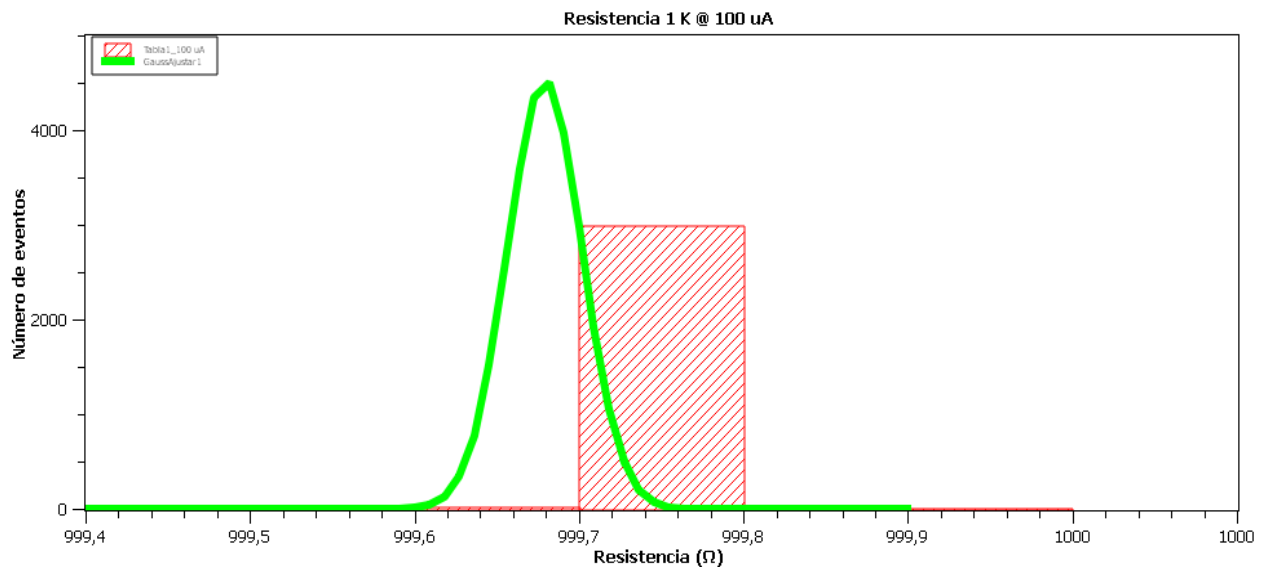


Figura 35: Histograma de valores de la resistencia de 1 K Ω medida a 100 μ A

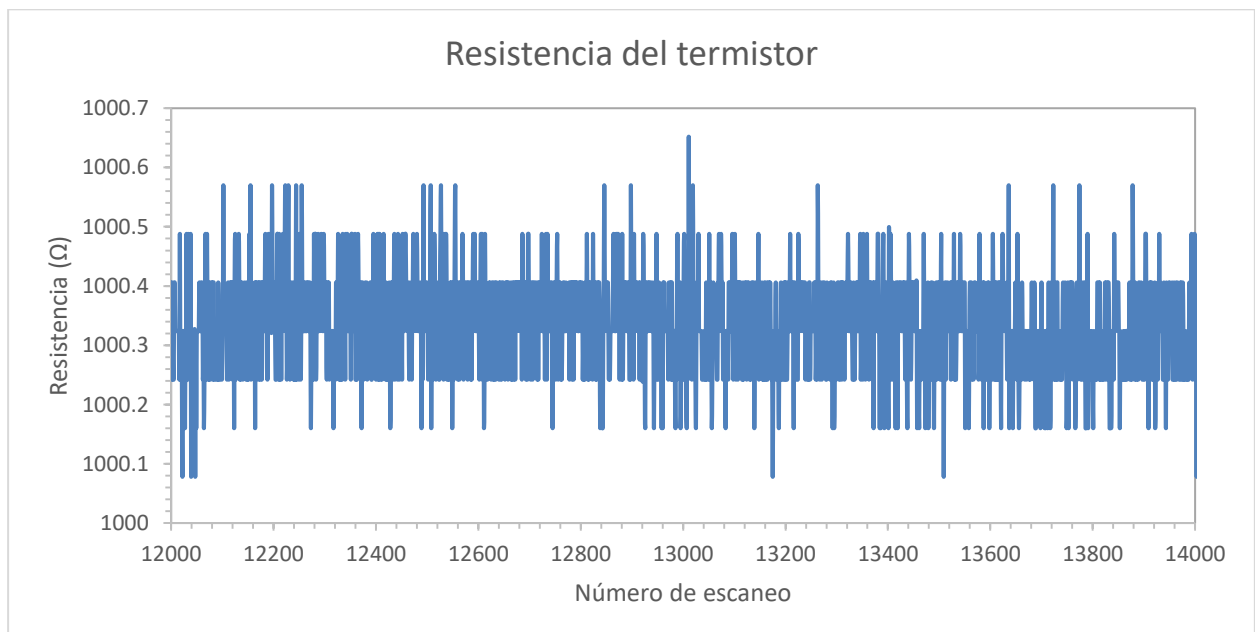


Figura 36: Valores de resistencia de un termistor PIK0.0805.4P.B.S

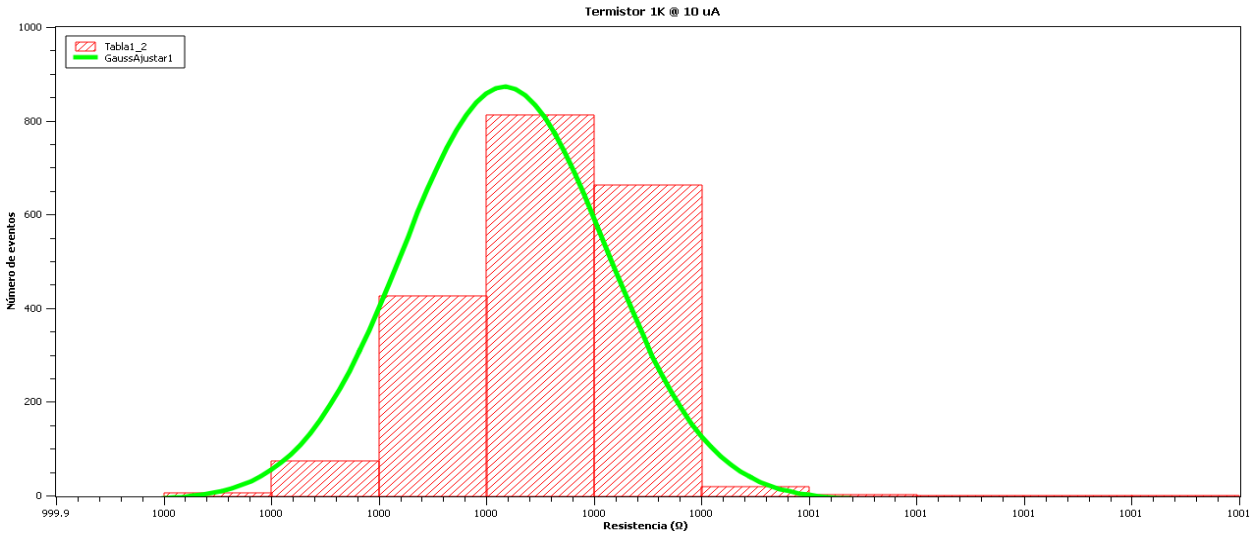


Figura 37: Histograma de valores del termistor PIK0.0805.4P.B.S

5.2.5. Incertidumbre combinada del equipo de caracterización eléctrica

En la Tabla 9 se muestra el cálculo de la incertidumbre combinada correspondiente al equipo de caracterización eléctrica. En esta tabla podemos observar que la incertidumbre combinada es de $\pm 0.24 \Omega$ y que esta principalmente gobernada por la estabilidad de la medida de resistencia. En este cálculo se ha omitido la incertidumbre asociada a la reproducibilidad, ya que como se discutió en el epígrafe 5.2.2 no ha sido posible caracterizarla adecuadamente. No obstante, el valor obtenido no modificaría significativamente el cálculo. Finalmente es importante destacar que la incertidumbre relativa que se obtiene es de $U_r = 0.024 \%$ y por lo tanto es inferior al máximo permitido (0.05 %) según la norma MIL-PFR-32192.

	<i>Incertidumbre expandida</i>	<i>Tipo de distribución</i>
<i>Resolución del indicador</i>	0.042	rectangular
<i>Estabilidad o ruido electrónico</i>	0.24	normal
<i>Incertidumbre combinada</i>	0.24	normal

Tabla 9: Incertidumbre combinada del sistema de caracterización eléctrica.

5.3. Incertidumbre combinada de las medidas de resistencia en termistores.

Como ya se indicó al principio del epígrafe 5 la incertidumbre de la medida de resistencia realizadas en termistores con el sistema aquí descrito depende de la incertidumbre en del sistema de caracterización eléctrica y de la incertidumbre en las medidas de temperatura de acuerdo con lo establecido en la Ecuación 3. En la Tabla 10 se resumen las incertidumbres expandidas y el tipo de distribución para estos dos términos los cuales han sido calculados según se ha explicado en los epígrafes anteriores para el caso de $R = 1 \text{ k}\Omega$, $I = 10 \mu\text{A}$, y $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. En dicha tabla también se incluye la incertidumbre expandida calculada a partir de estos valores y considerando un coeficiente lineal para la relación de Callendar-Van Dusen de $\alpha = 3.85 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

<i>Fuente de incertidumbre</i>	<i>Incertidumbre expandida</i>	<i>Tipo de distribución</i>
<i>Temperatura</i>	0.050 °C	Normal
<i>Caracterización eléctrica</i>	0.24 Ω	Normal
<i>Incertidumbre combinada</i>	0.31 Ω	Normal

Tabla 10: Incertidumbre combinada del sistema

De los valores inferidos de esta tabla podemos determinar que la incertidumbre de las medidas de resistencia realizadas en este sistema bajo las condiciones indicadas arriba es de 0.31 Ω , es decir una incertidumbre relativa del 0.031 % en termistores con una resistencia nominal de 1 k Ω .

6. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

“Si no conozco una cosa la investigaré”

- Louis Pasteur -

Este capítulo se analizan tres parámetros clave relacionados con la temperatura en el interior del sistema de soporte y conexión, los cuales son el tiempo que requiere la temperatura del interior del sistema para alcanzar la estabilidad, el gradiente de temperatura en el interior del chasis y cómo de estable es la temperatura en el interior del sistema. Es decir, se va a caracterizar el comportamiento de la temperatura en las proximidades de los componentes.

6.1. Tiempo de estabilización

El tiempo de estabilización del sistema es el tiempo que tarda la temperatura en alcanzar un valor que permanece relativamente constante en el tiempo. Para realizar esta caracterización se parte de una temperatura de 25 °C y se varía el punto de consigna de la cámara a 0 °C. Al hacer uso de un material aislante para inmunizar el sistema de las fluctuaciones de temperatura producidas por la cámara resulta obvio que la temperatura alcanza un régimen estacionario mucho más lentamente interior del chasis que en el resto de la cámara ambiental. No obstante, la adecuada caracterización de este tiempo requiere establecer un criterio claro para determinar cuando el registro de una sonda determinada alcanza el punto de estabilización. Con este fin se establecido que el que una sonda se encuentra en régimen estacionario la lectura proporcionada se encuentran dentro del rango definido por el valor promedio final ± 0.02 °C.

Originariamente se consideró un criterio de estabilización definido por una variabilidad de ± 0.05 °C (la tolerancia de temperatura indicadas en las condiciones de ensayo), obviamente esta condición genera tiempos de estabilización notablemente inferiores. No obstante, este criterio proporciona resultados no concluyentes tanto en términos de tiempo de estabilización global como en términos de estabilidad, como se muestra en el siguiente epígrafe. Así, cuando se emplea este criterio se obtienen tiempos de estabilización muy dispares entre las tres sondas. Como se muestra en la Tabla 11, estos valores oscilan entre ~2h 30 min para la sonda LE1228.000 y ~3h 30 min LE1229.000.

En contraste cuando se emplea del criterio de estabilización ± 0.02 °C las tres sondas proporcionan tiempos de estabilización razonablemente similares siendo este un buen indicador de la estabilización global del sistema. En este caso se toma como tiempo de estabilización la media temporal de los tres valores registrados $\bar{t} = 5h 29$ min con una desviación típica de $\sigma_t = 3$ min 51 s.

	CRITERIO ± 0.02 °C	CRITERIO ± 0.05 °C
LE1228.000	19 595 s (5 h 26 min)	9 468 s (2 h 37 min)
LE1170.000	19 650 s (5 h 27 min)	10 650 s (2 h 57 min)
LE1229.000	20 020 s (5 h 33 min)	12 975 s (3 h 36 min)

Tabla 11: Tiempos de estabilización

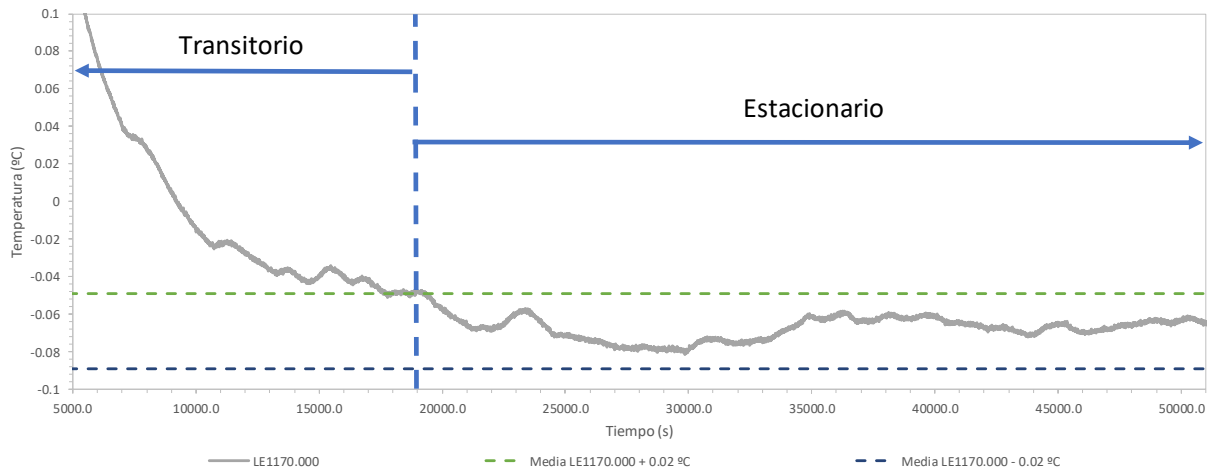


Figura 38: Tiempo de estabilización de la sonda LE1170.000.

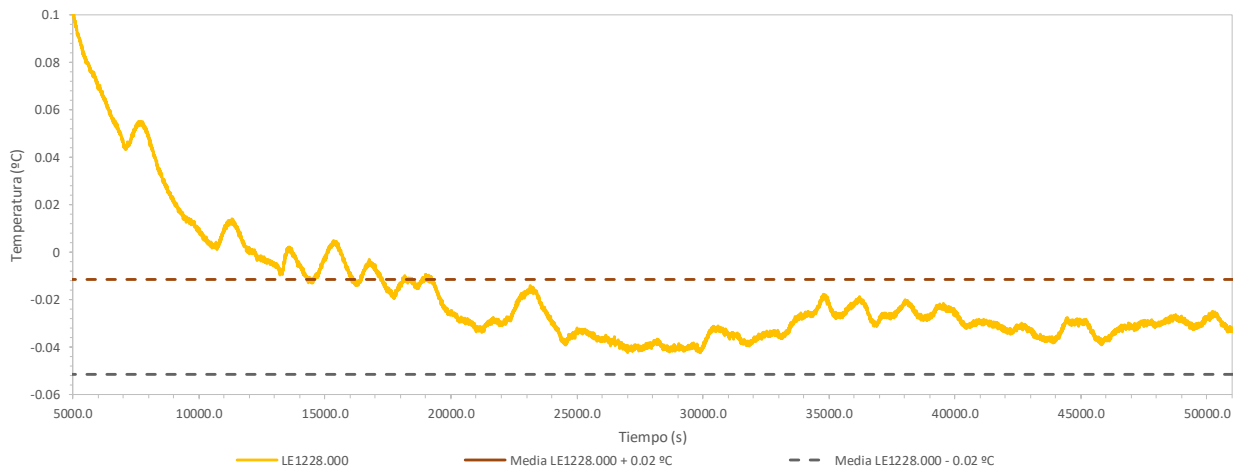


Figura 39: Tiempo de estabilización de la sonda LE1228.000.

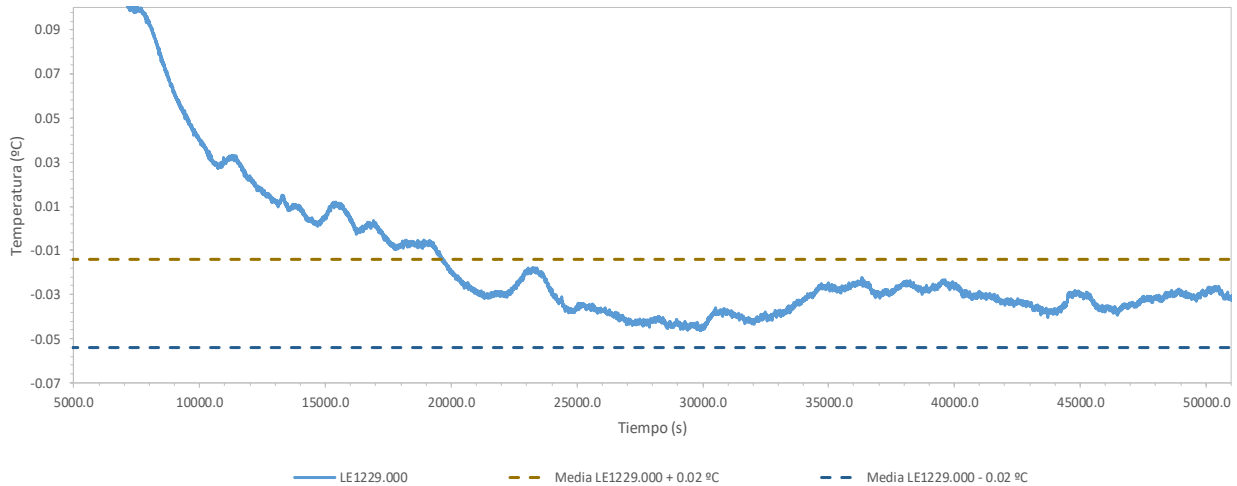


Figura 40: Tiempo de estabilización de la sonda LE1229.000.

6.2. Estabilidad del sistema

Para estudiar la estabilidad de la temperatura en el interior del chasis una vez se ha alcanzado el régimen estacionario se ha analizado el histograma de las lecturas registradas por cada sonda durante un periodo de hora que comienza una hora después de que la señal cruce el umbral de estabilización ± 0.02 °C (Figura 41, Figura 42 y Figura 43). Como puede observarse en estas figuras la mayor parte de los registros de las tres sondas se distribuyen simétricamente entorno al valor medio (comportamiento esperado en el régimen estacionario). Sin embargo, en todos los casos se aprecia claramente un número no despreciable de registros fuera de la campana principal. Estas desviaciones están debidas a la oscilación de temperatura observada en $t \sim 23000$ s en la Figura 38, Figura 39 y Figura 40. No obstante, estos registros se ajustan razonablemente a una distribución normal (Ecuación 10), cuya varianza σ se corresponde con error típico asociado a esta fuente de incertidumbre. La Tabla 12 reúne las correspondientes incertidumbres expandidas calculadas para cada una de las sondas considerando un factor de cobertura de una distribución normal ($k=2$).

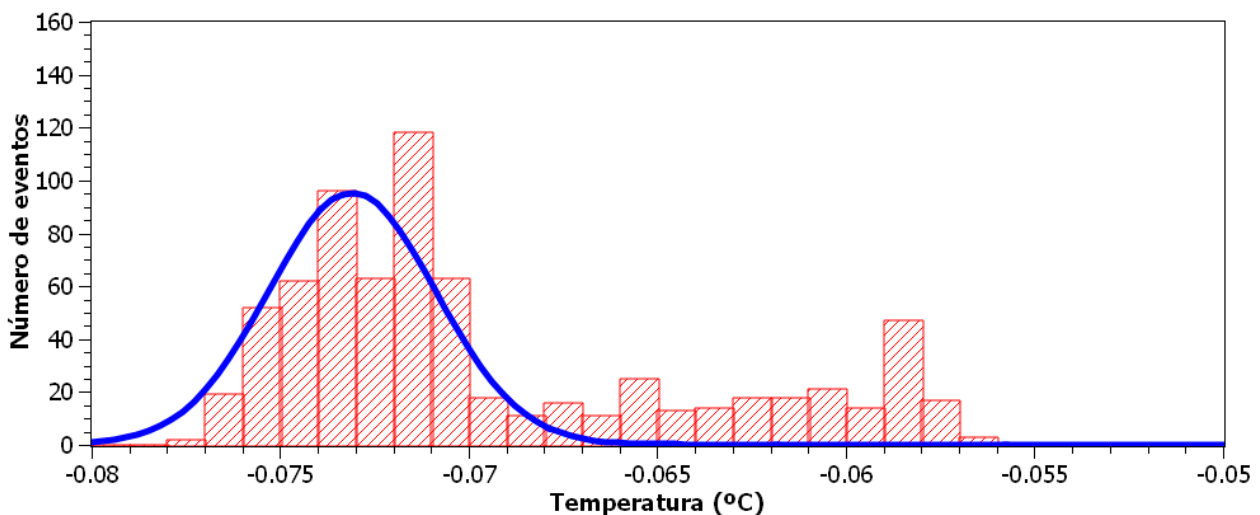


Figura 41: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1170.000.

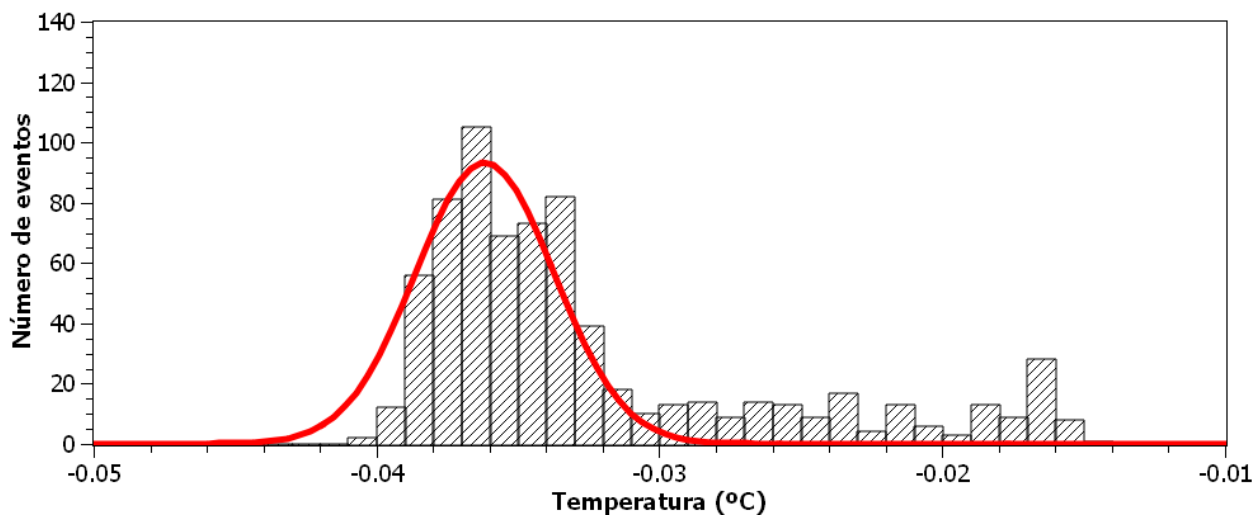


Figura 42: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1228.000.

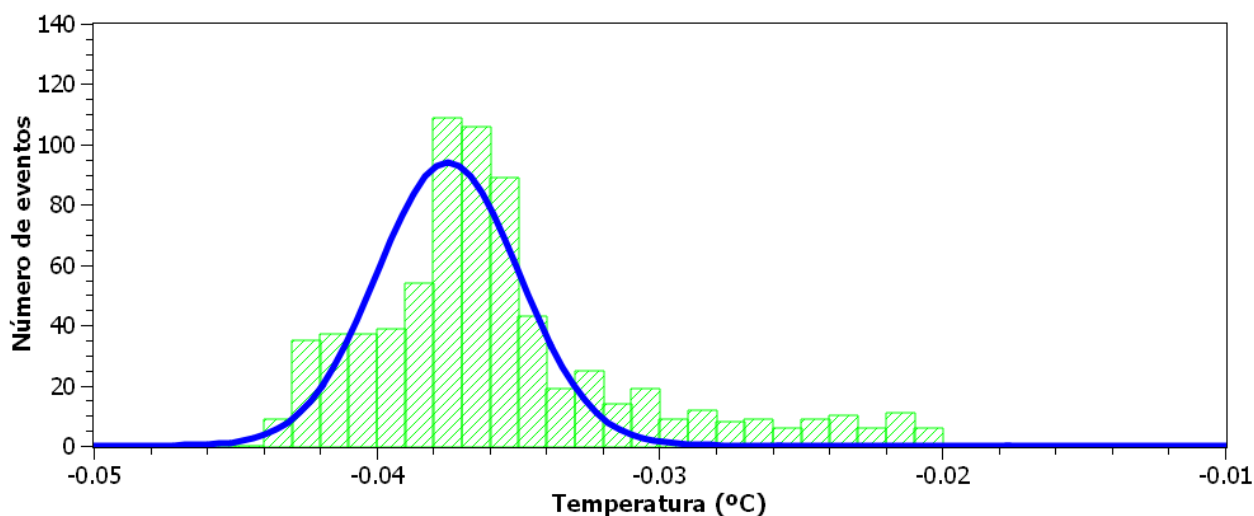


Figura 43: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1229.000.

Sonda	Valor medio (°C)	Varianza (°C)	Calidad del ajuste (r^2)	Incertidumbre expandida (°C)
LE1170.000	-0.073	0.0044	0.82	0.0088
LE1228.000	-0.036	0.0049	0.90	0.0098
LE1229.000	-0.038	0.0050	0.90	0.0100

Tabla 12: Estudio de estabilidad de temperatura en el interior del chasis.

6.3. Uniformidad de temperatura

La uniformidad de temperatura dentro del chasis se evaluó a partir del medio obtenido mediante el ajuste gaussiano de las curvas de estabilidad descritas en el epígrafe anterior. En este estudio se analizan dos condiciones de temperatura: un ensayo tipo a 0 °C. La realización del estudio de la uniformidad de temperatura se ha llevado a cabo comparando las gráficas de las temperaturas registradas por las sondas de temperatura, las cuales se promedian en el intervalo temporal en el que las tres sondas realicen lecturas de temperatura lo más estable posible, de forma que la mayor diferencia entre los promedios de las lecturas de las sondas es la que marca el gradiente de temperatura existente en el interior del chasis, contemplando el plano perpendicular a la compuerta de la cámara.

El estudio de la diferencia de temperatura en el interior del chasis se ha realizado para las temperaturas de 0 °C y 120 °C. Aunque originariamente, al realizar este ensayo, el sistema fue programado para caracterizar el gradiente a más temperaturas, no obstante, la temperatura dentro del sistema no llegó a estabilizar, por lo que fue imposible hacer un promedio real de los valores de temperatura, por lo que no se ha podido establecer un gradiente más que a 0 °C y 120 °C.

6.3.1. Estudio del gradiente de temperatura a 0 °C

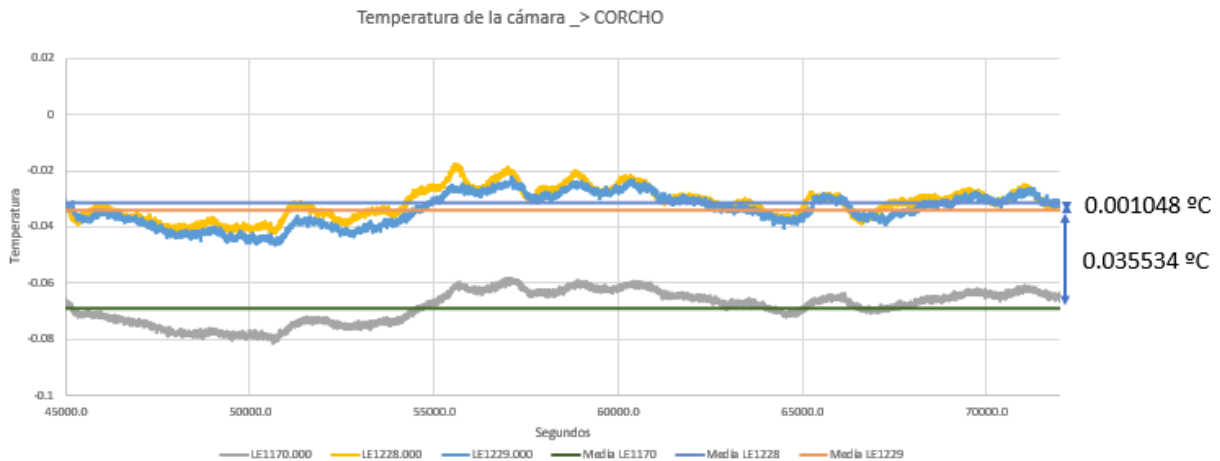


Figura 44: Estudio del gradiente a 0 °C

En la Figura 44 aparecen las gráficas correspondientes a las lecturas de temperatura a lo largo del tiempo, así como los promedios de dichos valores para ese intervalo, el cual ha sido elegido en base a la homogeneidad temporal de las lecturas de las sondas.

Las lecturas de temperatura de las sondas se mantienen en torno al valor medio con cierta varianza con respecto a ese valor. Entre la sonda LE1229.000 y la sonda LE1170.000 existe una diferencia de 0.0355 °C, mientras que entre las sondas LE1229.000 y LE1228.000 la diferencia es hasta un orden de magnitud menor: 0.001 °C.

En total, la mayor discrepancia se produce entre la sonda LE1170.000 y la LE1228.000, teniendo un gradiente en total de **0.0366 °C**.

6.3.2. Estudio del gradiente de temperatura a 120 °C

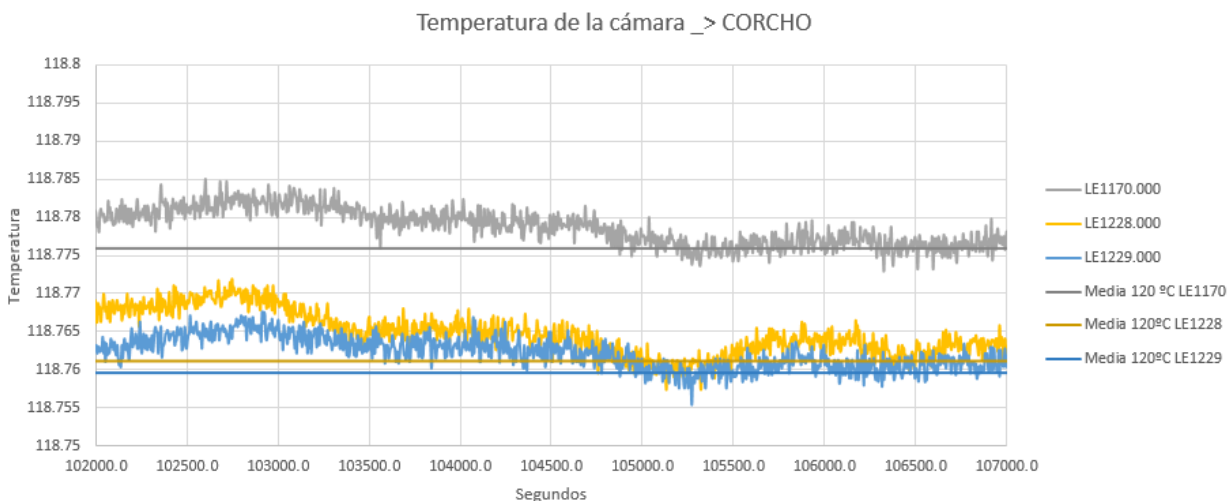


Figura 45: Estudio del gradiente a 120 °C

A 120 °C las diferencias entre lecturas de las sondas se mantienen por debajo de **0.0163 °C**, que es el valor de mayor diferencia entre sondas LE1170.000 y LE1229.000. Mientras que las sondas LE1229.000 y LE1228.000 mantienen lecturas de temperatura relativamente similares, teniendo una diferencia de 0.0015 °C entre sus lecturas.

6.3.3. Conclusiones sobre el estudio del gradiente

A la vista de los resultados que se muestran en epígrafes anteriores, la mayor diferencia entre lecturas del valor de temperatura se encuentra entre los registros de la sonda LE1170.000 y la LE1229.000, mientras que las sondas LE1228.000 y la LE1229.000 realizan lecturas relativamente similares.

Que la diferencia entre los registros la sonda central, LE1170.000, sea mayor con respecto a los valores de las sondas laterales puede deberse a dos factores: El primero de ellos es la diferencia entre calibraciones, ya que las sondas LE1228.000 y LE1229.000 fueron calibradas en 2018 y la central en 2017. Sin embargo, como se ha demostrado en la Subsección 6.1, este factor no afecta tanto como para que sea tenido en cuenta. Por otra parte, la posición de la sonda LE1170.000 está unos milímetros por encima de las otras dos sondas, además, las sondas laterales, al tener una tarjeta de conexión por encima y otra por debajo, están registrando la temperatura en condiciones muy similares, mientras que la sonda LE1170.000 monitoriza la temperatura en un espacio con menor número de obstáculos.

TEMPERATURA (°C)	MÁXIMA DIFERENCIA (°C)
0	0.0366
120	0.0163

Tabla 13: Mayores diferencias de temperatura en el interior del sistema

6.4. Resultados

Los resultados de los análisis de los epígrafes anteriores correspondientes al estudio del gradiente y la estabilidad del sistema contribuyen a la estimación de la incertidumbre asociada a la lectura de temperatura del sistema, junto al estudio de la caracterización de la incertidumbre asociada a las sondas de temperatura.

Aplicando el mismo procedimiento descrito en el epígrafe 5.1.3, se realizará la raíz de la suma de los cuadrados de dichos términos, de esta manera, la incertidumbre asociada a la temperatura se estima en **0.05 °C**.

7. MEJORAS AL SISTEMA

*“Abandona los grandes caminos,
sigue los senderos”
- Pitágoras -*

CON este capítulo se inicia el último bloque del presente proyecto, el cual está dedicado a futuras aplicaciones del sistema descrito y mejoras que pueden ser implementadas en el sistema. Este capítulo en concreto se centra en las mejoras al sistema que se han estudiado, y el desarrollo de ensayos de caracterización del sistema con las propuestas de mejora introducidas a fin poder comparar los resultados con los obtenidos del sistema que se usa actualmente, descrito en anteriores capítulos.

Las mejoras se realizan con el objetivo de optimizar tres factores básicos: el tiempo en el que la temperatura se estabiliza, la estabilidad del sistema y el gradiente de temperatura. En la mayoría de los casos estos factores están contrapuestos, por ejemplo, cuanto menor es el tiempo de estabilización, menor es la estabilidad de la temperatura, por lo que las mejoras buscan un equilibrio entre estos factores.

Las propuestas de mejora se han centrado en cambios en el sistema de soporte y conexión. Se ha buscado un material que sustituyera el policarbonato y el material aislante sin sacrificar la estabilidad térmica ni el gradiente de temperatura, mejorando el tiempo de estabilización.

7.1. Modelos anteriores

En un principio, el sistema de soporte y conexión se introducía sin revestimiento, lo que provocaba que la temperatura en su interior sufriera las fluctuaciones que introduce la cámara (las cuales superan el ± 0.05 °C que especifica la GSFC-S-311-P-827), y que no fuera homogénea en todos los puntos. Este hecho justificó el uso de un material de espuma de poliuretano aislante, que aumenta el tiempo de estabilización, pero garantiza una estabilidad y homogeneidad térmica.

Antes de usar la unidad de análisis 34980 A (ver apartado 3.3), se usaba un modelo más básico, el 34970 A, el cual sólo tiene tres slots para la conexión de módulos de medida, se usaban dos módulos 34901 A, que dispone de 22 canales, de los cuales sólo se pueden usar 20 para medida de resistencia o voltaje, ya que los otros dos canales se usan para medida de intensidad. En total se disponía de 40 canales para medir 103 elementos. Al igual que se hace con el 34980 A, la conmutación entre las tarjetas de conexión para conectarlas a la unidad de análisis

se realiza manualmente. El principal problema de la unidad de análisis 34970 A era que la escasez de canales no permitía realizar las medidas a cuatro hilos (ver apartado 1.2), lo que provocaba que el error de la medida de la resistencia del termistor fuese elevado.

La medida de termistores de montaje superficial, como es el caso de los termistores P1K0.0805.4P.B.S, resulta imposible de medir en los zócalos de medida directamente debido a su reducido tamaño (el encapsulado de los termistores que se han citado es del tipo 0805), por lo que se optó por realizar un estañado de los pads, de manera que hubiera conexión eléctrica entre ambos.

7.2. Revestimiento de aluminio

Esta propuesta de mejora consiste en sustituir el material aislante, hasta ahora se ha usado la espuma de poliuretano, por papel de aluminio. El objetivo de usar este revestimiento es realizar una caracterización que registre mejoras notables en uno de los tres factores clave, tiempo de estabilización, estabilidad y gradiente, de esta forma este sistema constituye un modelo de pruebas que justificaría realizar un futuro ensayo de caracterización de un chasis de aluminio.

La elección del aluminio como material de recubrimiento se debe a que este material, a diferencia de la espuma de poliuretano, es un material con una alta conductividad térmica, de manera que, si con el poliuretano se intentaba ralentizar el traspaso de temperatura para que la temperatura fuese homogénea y estable en el interior del chasis, con el recubrimiento de aluminio se busca que la temperatura se propague rápidamente por el aluminio y de este se traspase al interior del chasis de manera homogénea. Además, el traspaso de medios (de aluminio a policarbonato) puede conseguir ralentizar la temperatura lo suficiente como para que la estabilidad de esta magnitud en el interior del chasis no se vea comprometida por las fluctuaciones de la cámara.

7.2.1. Tiempo de estabilización

El estudio del tiempo de estabilización de la temperatura en el interior del chasis es de especial interés en el sistema que se está estudiando ya que, teóricamente, al ser el aluminio un buen conductor térmico, alcanzará la estabilidad en un menor periodo de tiempo, comparado con el revestimiento de espuma de poliuretano.

Al igual que se hizo en el análisis de estabilización del sistema en el apartado 6.1, se ha establecido un criterio de estabilización en ± 0.02 °C con respecto a la media del intervalo considerado. El análisis se ha llevado a cabo a una temperatura de 0 °C. A modo de referencia y a fin de comparar con el ensayo realizado en el apartado 6.1, se realizó el mismo análisis con el criterio ± 0.05 °C con respecto a la media.

Al igual que ocurría con el ensayo realizado con el recubrimiento de espuma de poliuretano, la sonda que menor tiempo de estabilización registra es la LE1228.000, mientras que la que mayor tiempo de estabilización registra es la sonda LE1229.000. El tiempo de estabilización del ensayo realizado con el recubrimiento del poliuretano es más de una hora mayor que el del recubrimiento de aluminio para el criterio de estabilización de ± 0.02 °C. Es decir, con recubrimiento de aluminio la temperatura en el interior del chasis estabiliza antes, mientras que con el criterio de ± 0.05 °C las diferencias entre ambos tiempos de estabilización, a pesar de ser mejores los del recubrimiento de aluminio, no aportan una mejora significativa.

La sonda LE1228.000 registra un tiempo de estabilización de la temperatura, haciendo uso del criterio de ± 0.02 °C, de **15 250 segundos** (4 horas y 13 minutos), mientras que con el criterio de ± 0.05 °C el tiempo que requiere la temperatura para estabilizar registrado por esta sonda es de 7 960 segundos (2 horas y 12 minutos).

El tiempo de estabilización registrado por la sonda LE1170.000 es de **15 260 segundos** (4 horas y 14 segundos), para el criterio de ± 0.02 °C, apenas 10 segundos más que la sonda LE1128.000, mientras que para el criterio de ± 0.05 °C, esta sonda registra un tiempo de 8 750 segundos (2 horas y 25 minutos) para la estabilización de la temperatura.

La sonda LE1229.000 es la que registra mayor tiempo de estabilización, para el criterio de ± 0.02 °C, esta sonda registra **16 070 segundos** (4 horas y 27 minutos) antes de que la temperatura entre en el rango de estabilización, mientras que para el criterio de ± 0.05 °C la sonda registra un tiempo de 9 674 segundos (2 horas y 40 minutos).

Comparando los resultados con el ensayo anterior (ver Tabla 14), se concluye que con recubrimiento de aluminio la temperatura del sistema reduce significativamente el tiempo que requiere para estabilizar para el criterio de

± 0.02 °C. El criterio de estabilización de ± 0.05 °C no debe tenerse en cuenta, ya que compromete la integridad del análisis de estabilidad porque toma valores del régimen transitorios y los interpreta como régimen permanente.

Por lo tanto, se considera que el tiempo que tarda la temperatura en estabilizar es de 16 070 segundos, es decir, 4 horas y 27 minutos, ya que es el mayor tiempo registrado por una sonda.

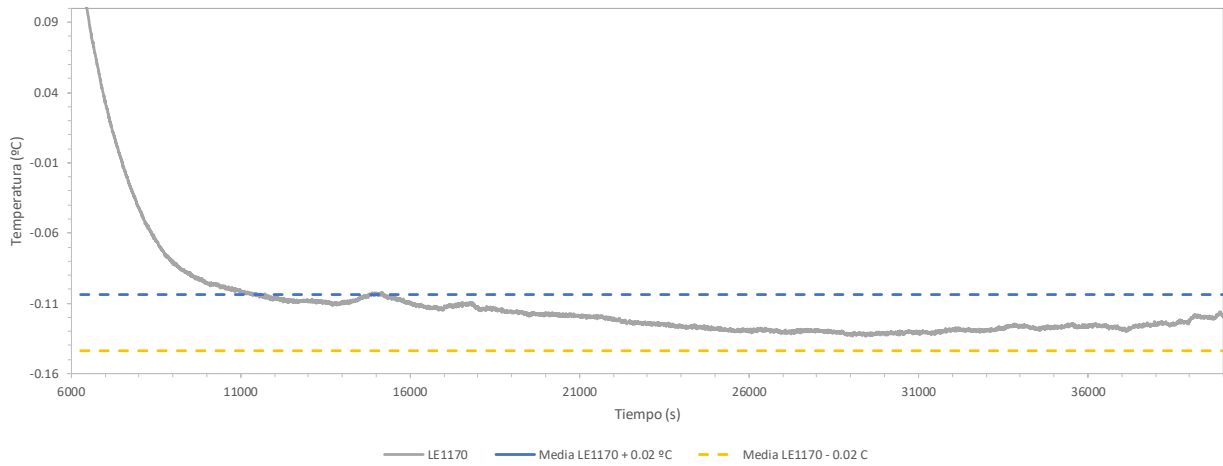


Figura 46: Criterio de estabilización registrado por la sonda LE1170.000 con el criterio de ± 0.02 °C

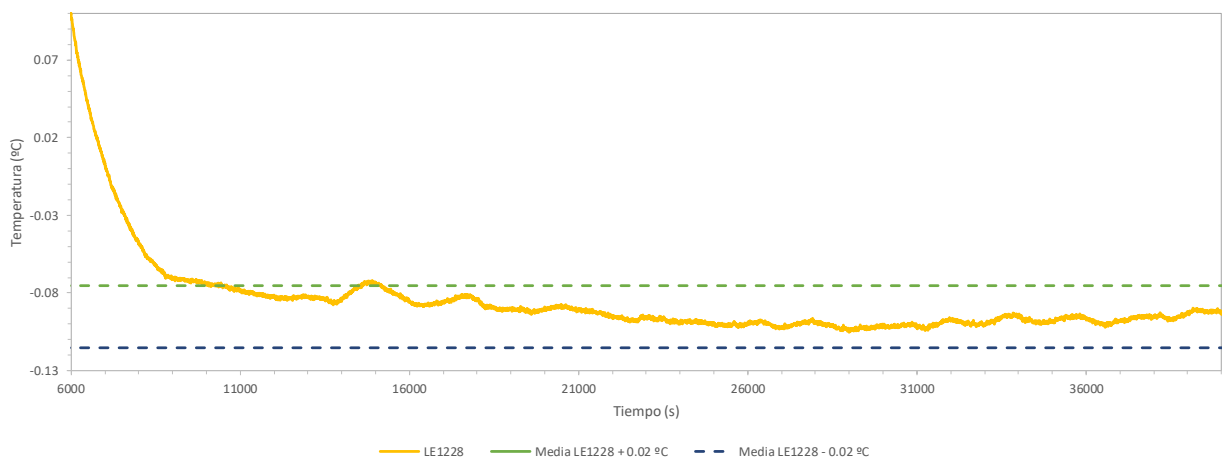


Figura 47: Criterio de estabilización registrado por la sonda LE1228.000 con el criterio ± 0.02 °C

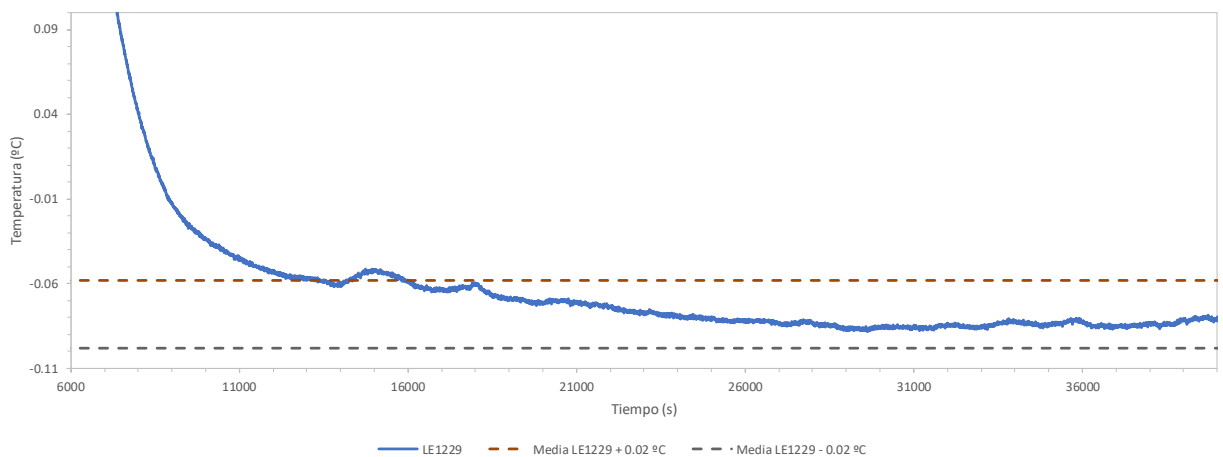


Figura 48: Criterio de estabilización registrado por la sonda LE1229.000 con el criterio ± 0.02 °C

Sonda	Chasis de <u>policarbonato</u> con revestimiento de <u>poliuretano</u>	Chasis de <u>policarbonato</u> con revestimiento de <u>aluminio</u>
LE1228.000	19 595 s (5 h 26 min)	15 250 s (4 h 13 min)
LE1170.000	19 650 s (5 h 27 min)	15 260 s (4 h 14 min)
LE1229.000	20 020 s (5 h 33 min)	16 070 s (4 h 27 min)

Tabla 14: Comparación entre tiempos de estabilización para los recubrimientos de poliuretano y aluminio usando el criterio ± 0.02 °C

7.2.2. Estabilidad térmica

El estudio de estabilidad con chasis de policarbonato y recubrimiento de aluminio se ha llevado a cabo, al igual que el que se describe en el apartado 6.2 para el sistema con el recubrimiento de espuma de poliuretano, haciendo uso de los histogramas de valores y un ajuste gaussiano al histograma, de esta manera se consiguen las desviaciones típicas correspondientes a la estabilidad de la temperatura registradas por las sondas. Los histogramas de las sondas LE1770.000 y LE1228.000 se ajustan razonablemente a una distribución gaussiana ($r^2 > 0.9$) proporcionando las desviaciones típicas incluidas en la Tabla 15. En el caso de las sondas LE1229.000 cuya desviación típica también se incluyen en la tabla, el ajuste es de peor calidad y se asemeja a una distribución bimodal. Este es un resultado singular contrasta con el de las distribuciones monomodo registradas por las otras dos sondas y se requerirían nuevos ensayos para confirmarlo. A falta de nuevos ensayos se concluye que el empleo del revestimiento de aluminio no empeora significativamente la estabilidad de temperatura en el interior de chasis.

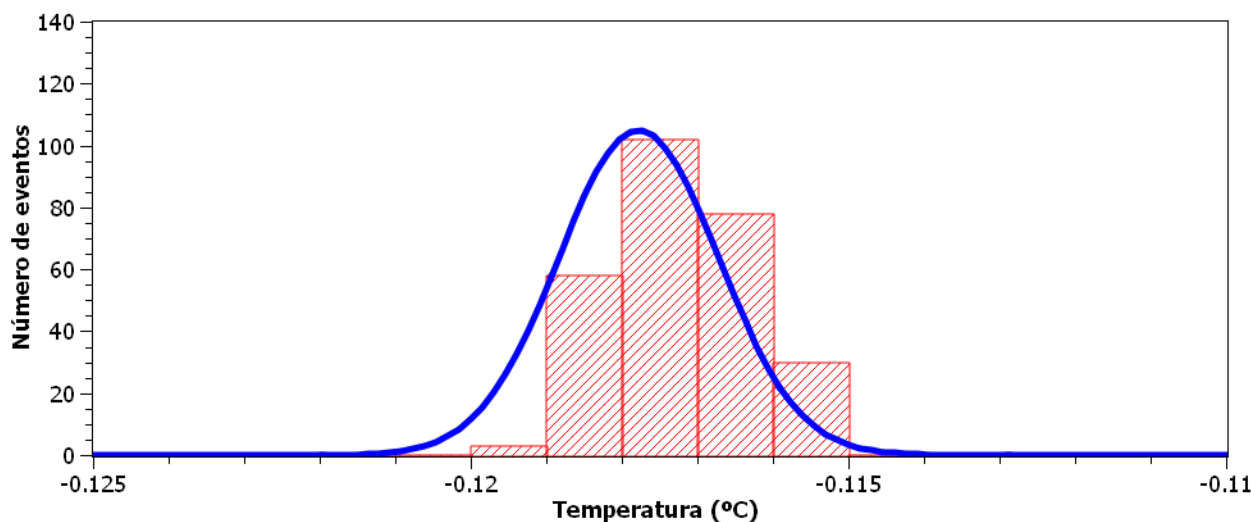


Figura 49: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1170.000. Prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de papel de aluminio.

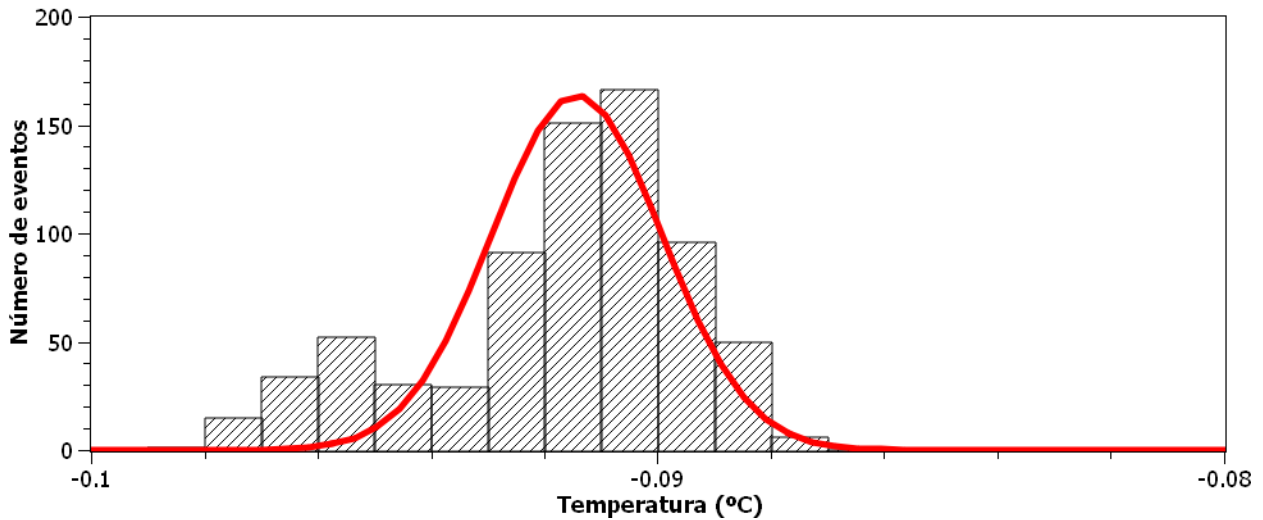


Figura 50: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1228.000. Prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de papel de aluminio.

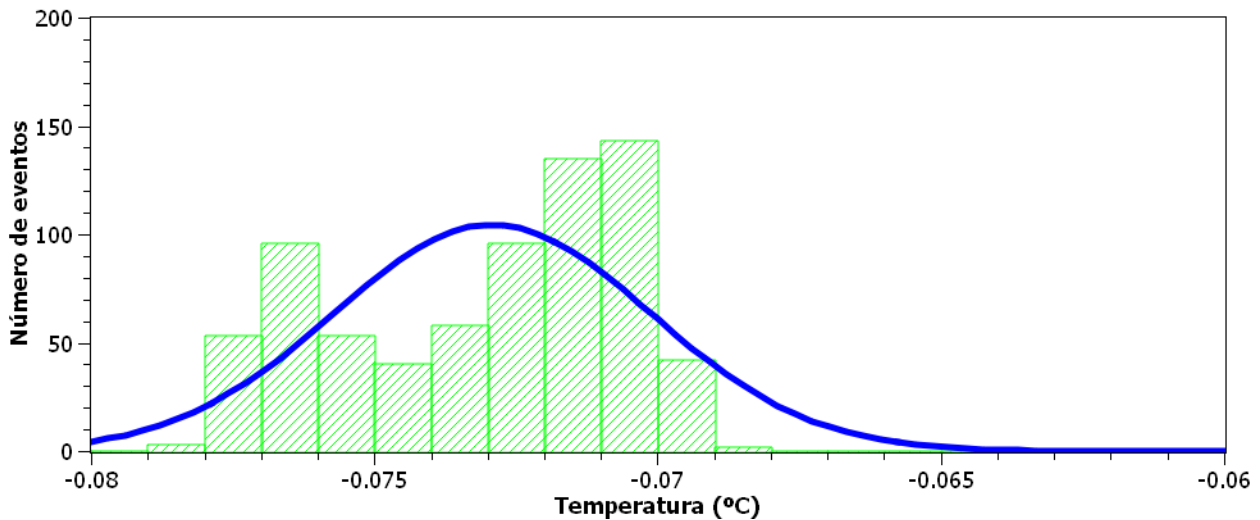


Figura 51: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1229.000. Prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de papel de aluminio.

Sonda	Valor medio (°C)	Varianza (°C)	Calidad del ajuste (r^2)	Incertidumbre expandida ($k=2$)
LE1170.000	-0.117	0.0021	0.994	0.0042
LE1228.000	-0.091	0.0030	0.94	0.0060
LE1229.000	-0.073	0.0056	0.75	0.0112

Tabla 15: Estudio de estabilidad de temperatura en el interior del chasis. Prototipo 1, chasis de policarbonato con revestimiento de aluminio.

7.2.3. Uniformidad de temperatura en el interior del chasis

La uniformidad de temperatura en el interior del chasis, recubierto de aluminio, se ha llevado a cabo de la misma manera que se realizó el ensayo con el recubrimiento de espuma de poliuretano (ver apartado 6.3). De esta forma, se ha promediado los valores de la temperatura registradas por las sondas de temperatura en el intervalo de

máxima estabilidad de temperatura a fin de cuantizar la diferencia de temperatura en dos puntos del interior del chasis. Debido a la falta de tiempo, el ensayo se ha realizado tan solo a 0 °C.

La mayor diferencia entre las lecturas de sondas está entre la sonda LE1170.000 y la LE1229.000 hay una diferencia de **0.045720 °C**, lo cual es algo mayor que la diferencia de temperatura registrada cuando se hacía uso del recubrimiento de espuma de poliuretano. Es decir, con el recubrimiento de poliuretano la temperatura en el interior del chasis es más homogénea.

	<i>Chasis de <u>policarbonato</u> con revestimiento de <u>poliuretano</u></i>	<i>Chasis de <u>policarbonato</u> con revestimiento de <u>aluminio</u></i>
<i>Gradiente de temperatura</i>	0.018	0.022

Tabla 16: Comparación del gradiente entre el sistema con recubrimiento de poliuretano y el de recubrimiento de aluminio

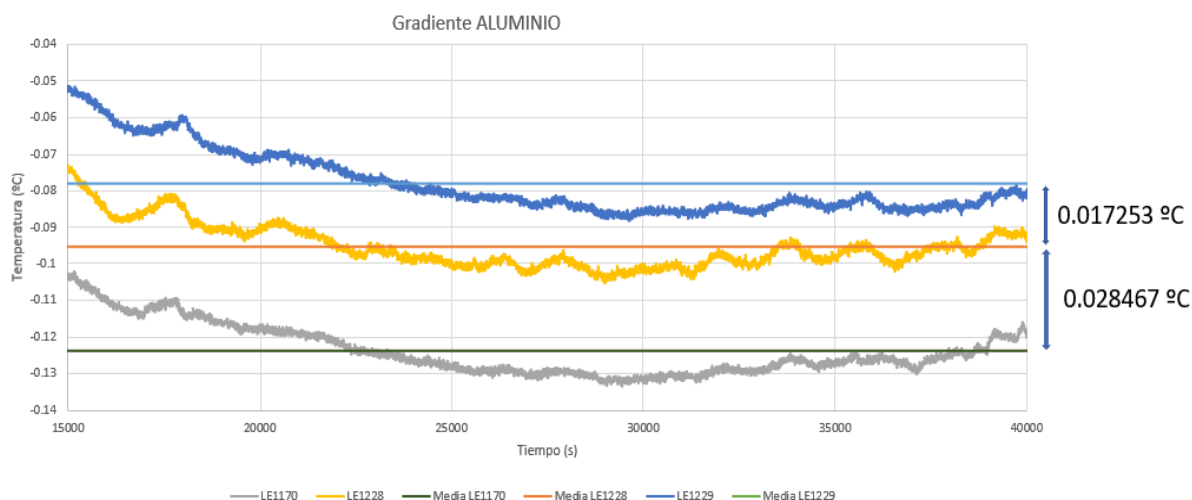


Figura 52: Gradiente de la cámara con revestimiento de aluminio

7.2.4. Conclusiones del prototipo 1 chasis de policarbonato con revestimiento de aluminio

A la vista de los resultados anteriores, se concluye que recubrir el sistema con aluminio mejora significativamente el tiempo de estabilización sin sacrificar estabilidad en el interior del chasis. Sin embargo, se detecta cierto empeoramiento en el parámetro de uniformidad. A este respecto cabe indicar que no se pudo realizar una cobertura de aluminio completamente homogénea y sin fisuras. Por otro lado, es importante destacar que las mejoras observadas en ese prototipo en el tiempo de estabilización son mucho más importantes que la pérdida de homogeneidad. Finalmente, los resultados aquí expuestos parecen indicar que si bien al retirar la funda de poliuretano se acelera el tiempo de estabilización el grosor del revestimiento de aluminio no es lo suficientemente elevado como para acelerar de manera similar la difusión de calor lateral y por lo tanto asegurar la uniformidad de temperaturas requeridas. No obstante, en vista de estos positivos resultados, el correspondiente análisis, y la baja disponibilidad de tiempo de ensayo se decide proceder directamente con un chasis construido enteramente de aluminio que si bien admite el mismo número de termistores presenta un volumen de ensayo sensiblemente inferior.

7.3. Chasis de aluminio

La presente sección describe los ensayos de caracterización realizados sobre un prototipo del chasis fabricado íntegramente de aluminio. Puesto que el ensayo del sistema con revestimiento de aluminio tuvo resultados positivos, es interesante sustituir el chasis de policarbonato (ver apartado 3.2.1) por uno de aluminio. Teóricamente, un chasis hecho de este material debe conseguir estabilizar la temperatura en su interior en menor tiempo que el chasis de policarbonato revestido con el material aislante, no obstante, la estabilidad térmica, así

como el gradiente en este sistema pueden verse afectados, ya que un tiempo de estabilización menor significa mayor sensibilidad a las fluctuaciones de temperatura que introduce la cámara.

El chasis escogido para realizar el ensayo de caracterización ha sido la *Carcasa de Aluminio* del fabricante *RS Pro*. Este chasis tiene unas dimensiones similares al de policarbonato de 260 x 160 x 90 mm, con muros de 3 milímetros de ancho. Cuenta con un grado de protección IP66 y una goma de neopreno para el completo aislamiento.

El chasis se muestra en la Figura 53, no obstante, no dispone de ningún orificio por donde puedan pasar las sondas de temperatura. Por esta razón se realizaron tres taladrados en uno de los laterales con el fin que sirviera de soporte a las tres sondas. Para las sondas laterales se usó una broca de 8 mm, mientras que para la broca central se hizo uso de una broca de 14 mm (ver Figura 54).

A la hora de realizar el taladrado se llevaron a cabo las medidas pertinentes de los orificios del chasis anterior y el diámetro de las sondas por su parte más ancha (ver Figura 8 y Figura 9) con un calibre. No obstante, la sonda central (ref. LE1170.000) tiene un diámetro de 13 mm, sin embargo, al no existir una broca de tales dimensiones en el taller de ATN, se optó por usar una broca de 14 mm. Esto provoca que la sonda tenga holgura al momento de ser introducida en el chasis, lo cual se ha solucionado con cinta aislante, de esta forma se garantiza que el chasis queda herméticamente cerrado.



Figura 53: Chasis de aluminio

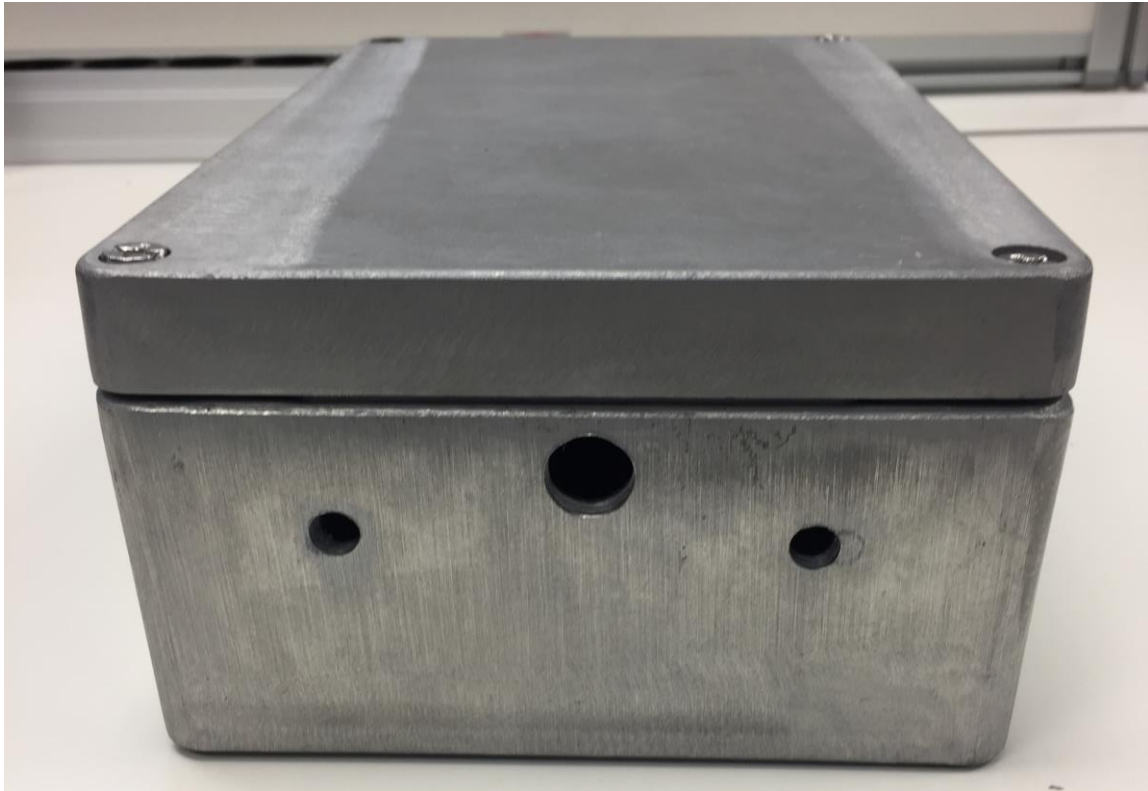


Figura 54: Taladrados del lateral del chasis de aluminio

7.3.1. Tiempo de estabilización

Como se ha especificado en apartados anteriores, el criterio que se está usando para considerar que la temperatura es estable parte de la media de la zona de máxima estabilidad de las lecturas que se han efectuado por parte de las sondas de temperatura, a esta media se le suma $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ para establecer un límite superior, y se le resta la misma cantidad para establecer el límite inferior. El tiempo de estabilización es el tiempo que tardan las lecturas en entrar en dicho rango.

A fin de poder comparar los resultados con los que se han realizado en ensayos anteriores, también se ha realizado la cuantización del tiempo que tarda la temperatura en estabilizar con el criterio de $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.3.1.1. Tiempo de estabilización registrado por la sonda LE1228.000

La sonda lateral LE1228.000 registra un tiempo de estabilización de **9 502 segundos** (2 horas y 37 minutos) para el criterio de $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que para el criterio de $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ el tiempo se reduce a 8 713 s (2 horas y 25 minutos).

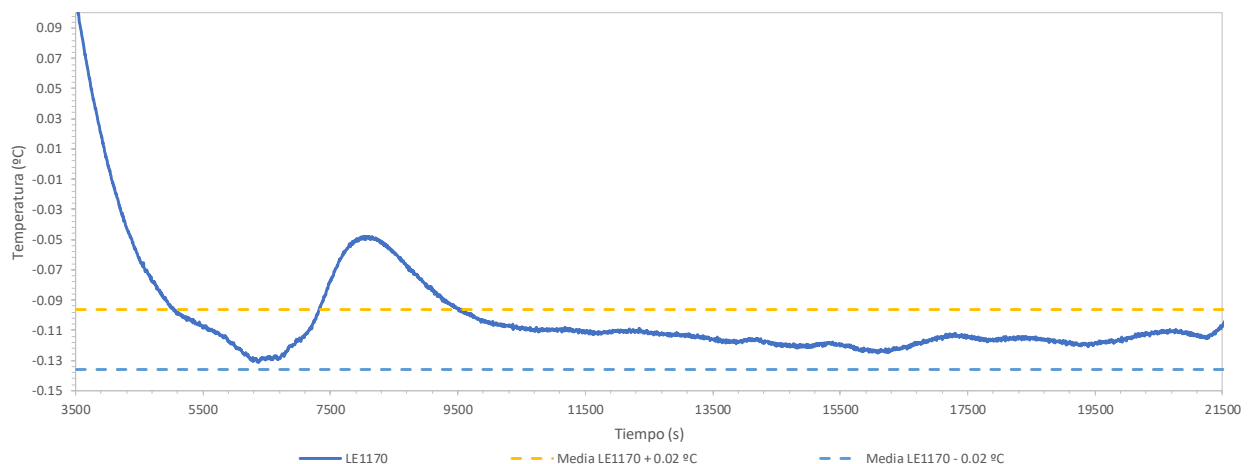


Figura 55: Gráfica temporal del registro de la sonda LE1228.000 con el criterio de estabilización de ± 0.02 °C

7.3.1.2. Tiempo de estabilización registrado por la sonda LE1170.000

La sonda central es la que menor tiempo de estabilización registra, alcanzando la estabilidad térmica en el interior del chasis, para el criterio de ± 0.02 °C, a los **9 552 segundos** (2 horas y 39 minutos), mientras que si se considera el criterio de ± 0.05 °C este tiempo se reduce a 8 677 segundos (2 horas y 24 minutos).

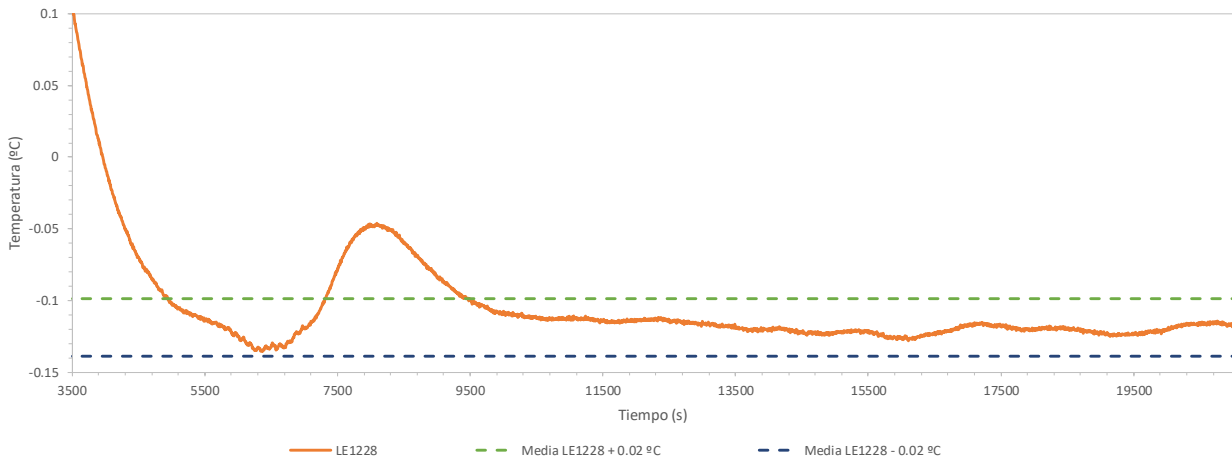


Figura 56: Gráfica temporal del registro de la sonda LE1170.000 con el criterio de estabilización de ± 0.02 °C

7.3.1.3. Tiempo de estabilización registrado por la sonda LE1229.000

La sonda lateral LE1229.000 registra un tiempo de estabilización de **9 573 segundos** (2 horas y 39 minutos) para el criterio de ± 0.02 °C, y 8 706 segundos (2 horas y 24 minutos) para el criterio de ± 0.05 °C.

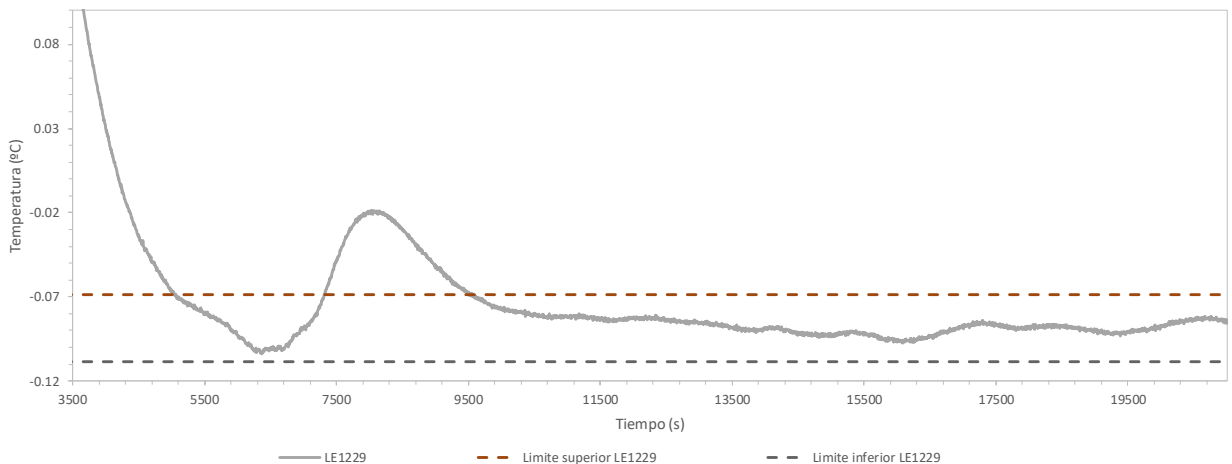


Figura 57: Gráfica temporal del registro de la sonda LE1229.000 con el criterio de estabilización de ± 0.02 °C

7.3.1.4. Conclusión sobre el tiempo de estabilización

Los resultados anteriores demuestran lo que se anticipaba al comienzo de esta sección, el chasis de aluminio mejora significativamente el tiempo de estabilización con respecto a los otros dos sistemas propuestos (ver Tabla 17). No obstante, al observar la Tabla 18 el tiempo de estabilización no solo no mejora con respecto al chasis de policarbonato con recubrimiento de aluminio, sino que para el caso concreto de la sonda LE1228.000 empeora incluso con respecto al material aislante.

A priori, puede parecer que el chasis de aluminio empeora el tiempo de estabilización en casos concretos para el criterio de ± 0.05 °C, pero mantiene un tiempo de estabilización global (cuando se estabiliza la temperatura en el interior del chasis al completo) del orden del sistema revestido con aluminio.

Sin embargo, el tiempo de estabilización es muy similar para las tres sondas para ambos criterios, esto quiere decir que las tres sondas entran dentro de su rango de estabilización a la vez, lo que significa que la temperatura se está transmitiendo de manera mucho más homogénea al interior del chasis, este hecho muestra que el gradiente de temperatura en el interior puede haber mejorado, aunque para afirmar esto hace falta un estudio más detallado, el cual se especifica más adelante.

Otro dato que llama la atención es la escasa diferencia entre los datos presentados en la Tabla 17 y la Tabla 18. Entre los tiempos de estabilización obtenidos con el criterio de ± 0.05 °C y los obtenidos con el criterio de ± 0.02 °C hay como máximo 15 minutos, mientras que con el revestimiento de aluminio esta diferencia de cerca de dos horas y con el sistema original casi tres horas. Estos datos demuestran que la temperatura del interior del chasis es capaz de seguir el punto de consigna mejor que el resto de sistemas propuestos.

SONDA	POLIURETANO (S)	PAPEL ALUMINIO (S)	CHASIS ALUMINIO (S)
LE1228.000	19 595 s (5 h 26 min)	15 250 s (4 h 13 min)	9 502 s (2 h 37 min)
LE1170.000	19 650 s (5 h 27 min)	15 260 s (4 h 14 min)	9 552 s (2 h 39 min)
LE1229.000	20 020 s (5 h 33 min)	16 070 s (4 h 27 min)	9 573 s (2 h 39 min)

Tabla 17: Comparación del tiempo de estabilización para el criterio de ± 0.02 °C

SONDA	POLIURETANO (S)	PAPEL ALUMINIO (S)	CHASIS ALUMINIO (S)
LE1228.000	9 468 s (2 h 37 min)	7 960 s (2 h 12 min)	8 713 s (2h 25 min)
LE1170.000	10 650 s (2 h 57 min)	8 750 s (2 h 25 min)	8 677 s (2 h 24 min)
LE1229.000	12 975 s (3 h 36 min)	9 674 s (2 h 40 min)	8 706 s (2 h 24 min)

Tabla 18: Comparación del tiempo de estabilización para el criterio de ± 0.05 °C

A modo de comparación, se han montado unas gráficas con los valores de lectura de las diferentes sondas para los tres sistemas, de tal manera que se ha partido del tiempo en el que el punto de consigna de la cámara pasa a ser 0 °C para los diferentes ensayos que se han llevado a cabo. Todas parten de la temperatura ambiente del laboratorio (25 ± 2 °C) y la temperatura en el interior del chasis comienza a tender a la temperatura del punto de consigna de la cámara ambiental de manera exponencial.

A modo de referencia, la Figura 58 muestra cómo han variado las lecturas que ha registrado la sonda LE1170.000 para los tres sistemas que se han propuesto en apartados anteriores. De esta manera, se puede apreciar gráficamente la mejora que introduce con respecto al tiempo de estabilización el chasis de aluminio, cuantificada anteriormente en esta apartado. Se observa cómo las lecturas correspondientes al sistema con chasis de aluminio se pueden modelar mediante una exponencial con una constante de tiempo menor que el resto del sistema. No obstante, en esta gráfica no se aprecia bien a qué se deben los datos mostrados en la Tabla 18, en la cual, la sonda LE1228.000 tiene un retraso de hasta 13 minutos en el tiempo de estabilización para el criterio de ± 0.05 °C.

Estos datos se aprecian con más detalle en la Figura 59, Figura 60 y Figura 61, en las cuales representan una comparativa de las sondas, de la misma manera que se muestran en la Figura 58, con la salvedad de que los límites de representación verticales se centran en 0 °C y los horizontales se desplazan 20 000 segundos. El punto de consigna de la cámara está establecido a -0.25 °C para todos los ensayos, ya que es la temperatura para la cual en el interior del chasis con revestimiento de espuma de poliuretano se consigue un valor próximo a 0 °C.

Es interesante observar la Figura 60, ya que debido a la fluctuación que sufre la lectura de temperatura de la sonda en para el chasis de aluminio a los 8 000 segundos (introducida por la cámara climática) el tiempo de estabilización de la temperatura en el interior del chasis de aluminio se retrasa, lo que provoca que la sonda LE1228.000 tenga un tiempo de estabilización mayor para el chasis de aluminio que para el chasis de policarbonato revestido de aluminio. No obstante, al observar la Figura 61, se puede apreciar cómo las gráficas correspondientes a las lecturas de las sondas del sistema con el chasis de policarbonato se desplazan hacia la

derecha, lo que significa que aumenta el tiempo que requiere la temperatura para ser estable en el interior del chasis. Esto demuestra gráficamente lo que observaba numéricamente en la Tabla 17 y Tabla 18, la temperatura para el chasis de aluminio se introduce homogéneamente en el interior, mientras que para el policarbonato la temperatura se introduce por uno de los laterales y avanza lentamente hasta que se iguala en todo el chasis.

La fluctuación que sufre la cámara a los 8 000 segundos en el ensayo de caracterización del sistema con chasis de aluminio se debe a un error de la propia cámara. En este apartado se ha considerado que el tiempo de estabilización es posterior a la fluctuación, pero como se observa en la Figura 58, la temperatura en el interior del chasis metálico se estabiliza mucho antes. Despreciando la aparición de esta anomalía, el tiempo de estabilización que registra las sondas se muestra en la Tabla 19, los cuales demuestran un tiempo de estabilización del orden de 3 horas menos que el tiempo de estabilización del chasis de policarbonato revestido de aluminio, y del orden de 4 horas, en para el chasis de policarbonato revestido con espuma de poliuretano usando el criterio de $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se puede observar, que al igual que se muestra en la Tabla 17 o la Tabla 18, las sondas registran temperaturas en el rango de estabilidad con minutos de diferencia. Con el fin de realizar una mejor caracterización se había diseñado un nuevo ensayo, no obstante la cámara ambiental es un recurso compartido por todo el personal de la empresa, en la cual se realizan ensayos a diario.

Se puede observar una diferencia de temperatura en las figuras de las lecturas de las gráficas, siendo las gráficas correspondientes al sistema con revestimiento de espuma de poliuretano las que tienen un valor más elevado de temperatura, mientras que las que usan aluminio se mantienen más próximas al punto de consigna de $-0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

SONDA	CRITERIO $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$	CRITERIO $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$
LE1228.000	4 955 s (1 h 22 min)	4 492 s (1 h 14 min)
LE1170.000	5 034 s (1 h 24 min)	4 566 s (1 h 15 min)
LE1229.000	5 035s (1 h 24 min)	4 568 s (1 h 15 min)

Tabla 19: Tiempos de estabilización de la temperatura en el interior del chasis de metal despreciando la anomalía



Figura 58: Gráfica comparativa de las lecturas que ha efectuado la sonda LE1170.000 en los sistemas propuestos

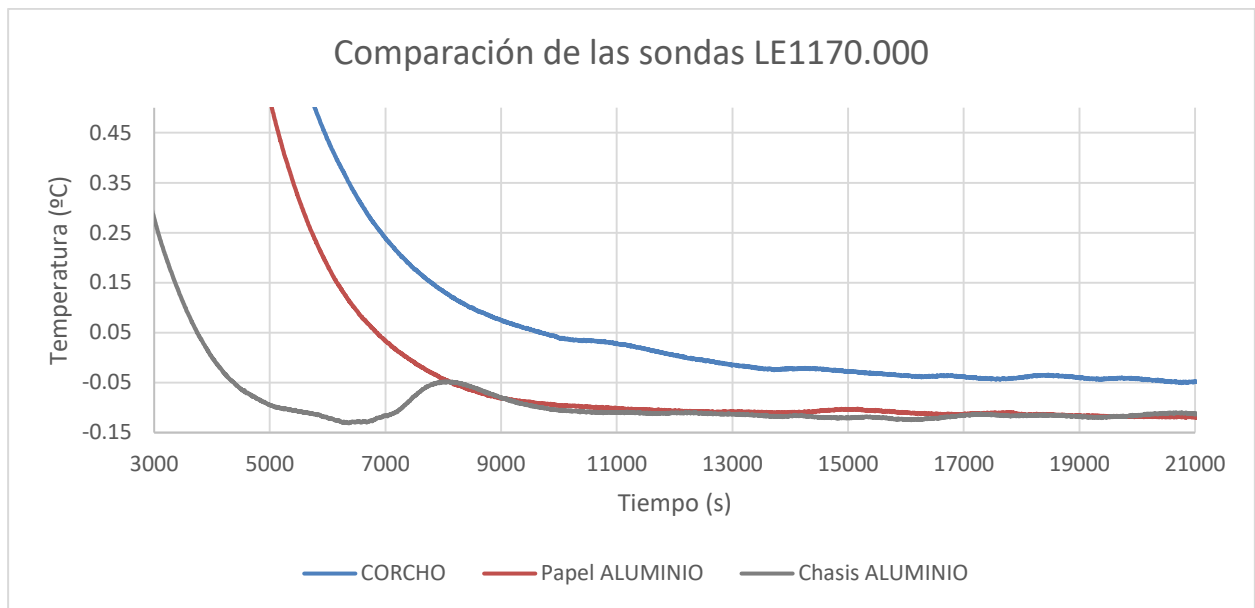


Figura 59: Detalle de la comparativa de los registros de la sonda LE1170.000

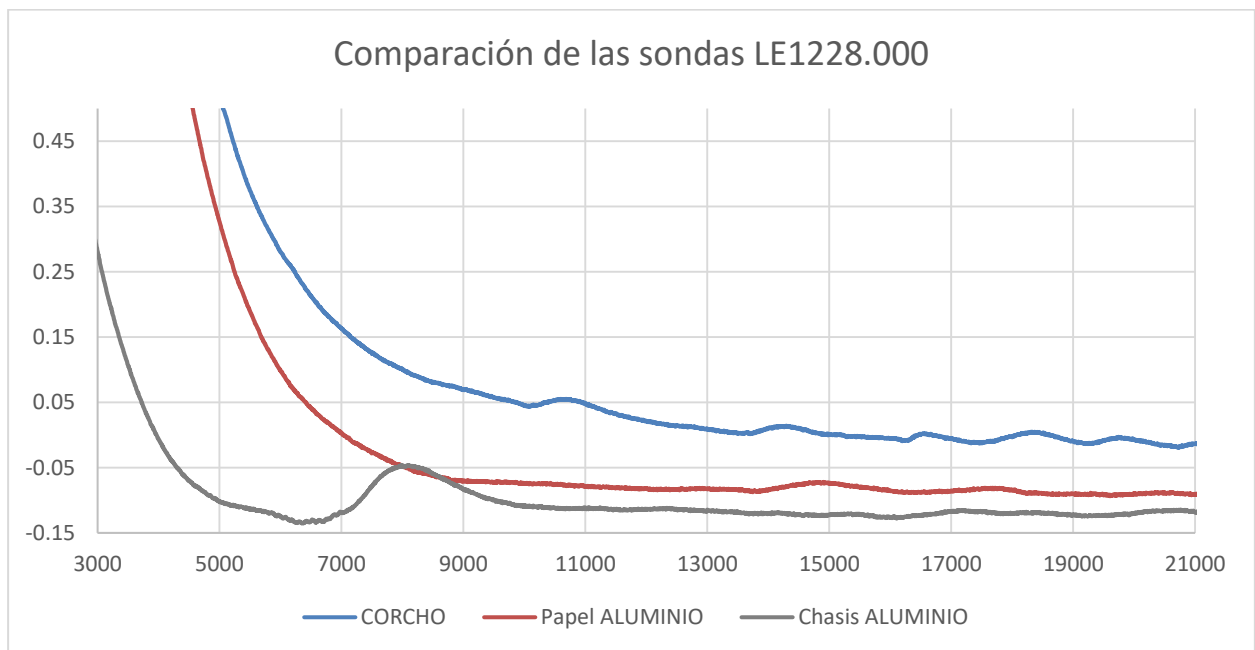


Figura 60: Detalle de los registros de la sonda LE1228.000

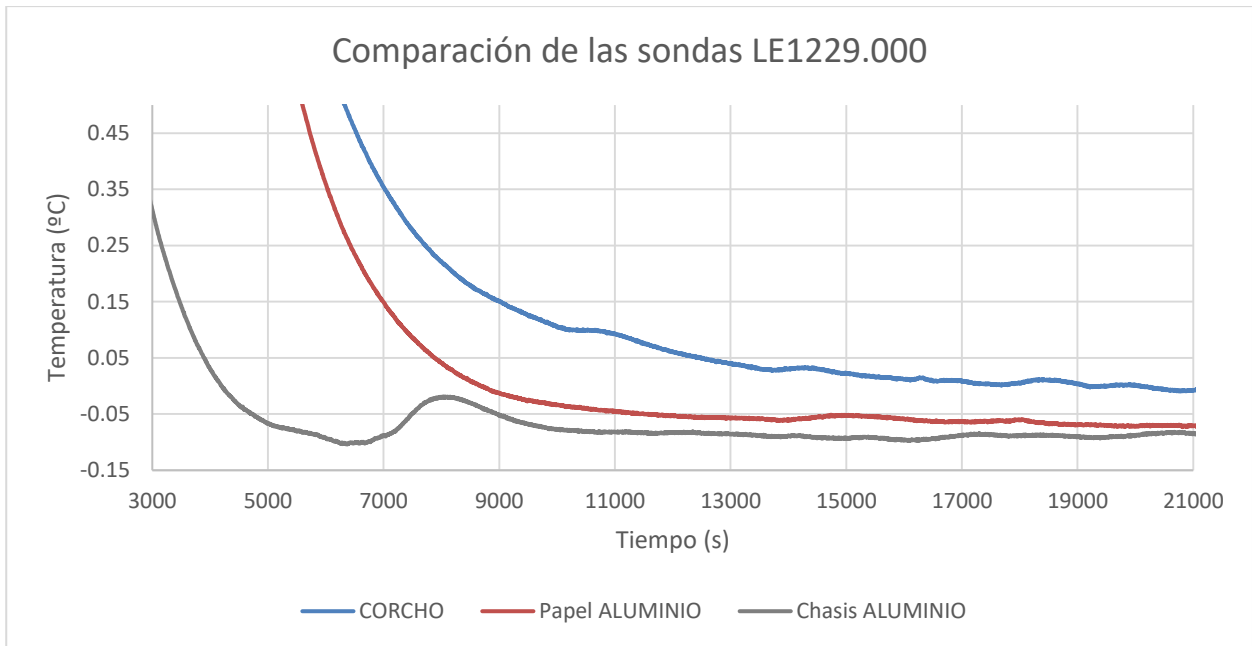


Figura 61: Detalle de los registros de la sonda LE1229.000

7.3.2. Estabilidad térmica

La estabilidad de la temperatura una vez alcanzado el régimen estacionario se ha evaluado mediante un ajuste a una distribución normal siguiendo los pasos establecidos en el epígrafe 6.2.

Los histogramas representados en la Figura 62, la Figura 63 y la Figura 64 se ajustan correctamente a una distribución normal. Los resultados de estos ajustes se incluyen en la Tabla 20. En esta tabla no se parecía empeoramiento en la estabilidad asociado que la sustitución del chasis de policarbonato por el chasis de aluminio.

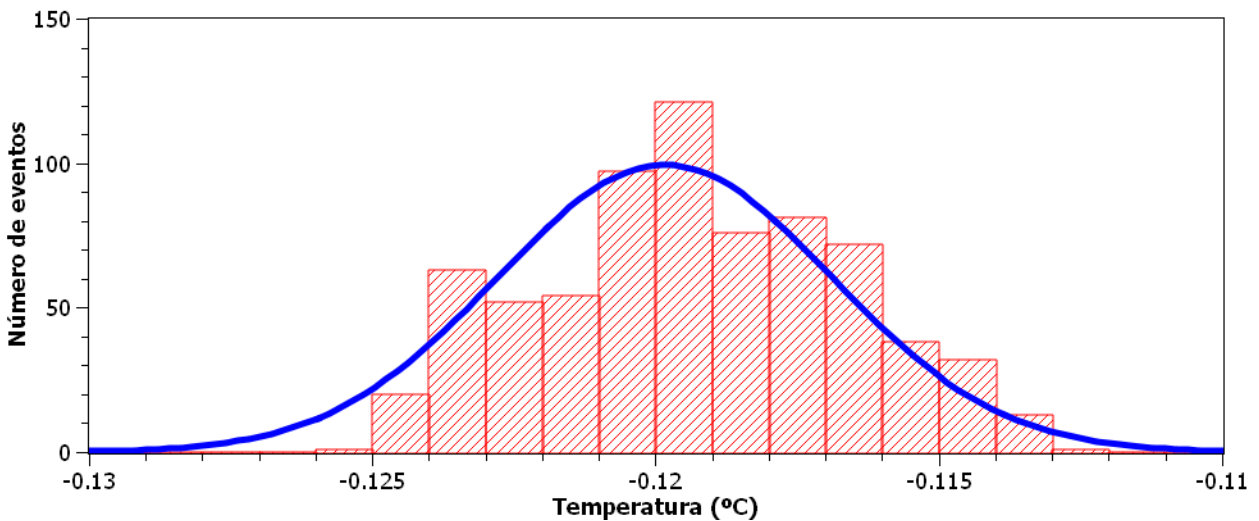


Figura 62: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1170.000. Prototipo 2 chasis de aluminio.

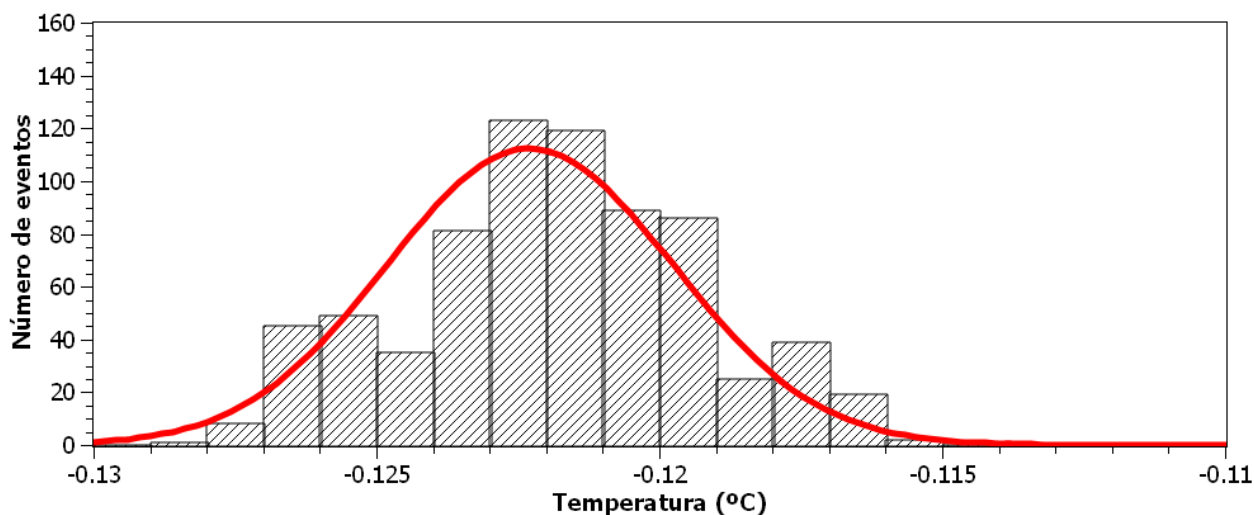


Figura 63: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1228.000. Prototipo 2 chasis de aluminio.

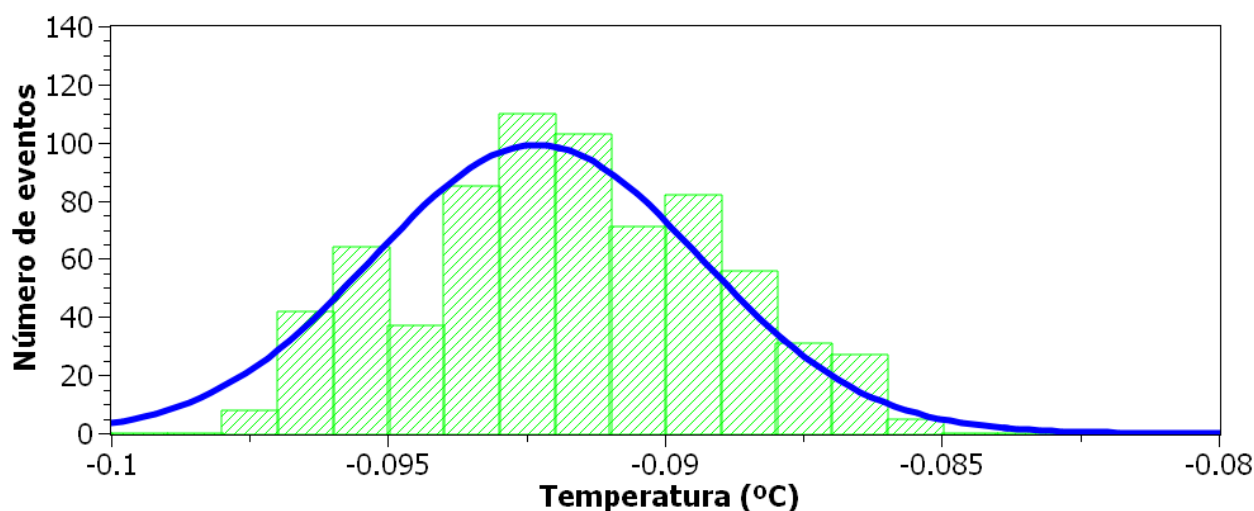


Figura 64: Histograma de temperaturas de registradas por la sonda LE1229.000. Prototipo 2 chasis de aluminio.

Sonda	Valor medio (°C)	Varianza (°C)	Calidad del ajuste (r^2)	Incertidumbre expandida ($k = 2$)
LE1170.000	-0.120	0.0013	0.999996	0.0026
LE1228.000	-0.122	0.0051	0.95	0.0102
LE1229.000	-0.092	0.0059	0.96	0.0118

Tabla 20: Estudio de estabilidad de temperatura en el interior del chasis. Prototipo 2, chasis de aluminio.

7.3.3. Uniformidad de temperatura en el interior del chasis de aluminio

Al igual que se ha realizado en los apartados 6.3 y 7.2.3, el estudio de la homogeneidad en el interior del chasis de aluminio se ha llevado a cabo promediando el intervalo de mayor estabilidad dentro del rango de ± 0.02 °C. En este caso, como demostraban los resultados del análisis del tiempo de estabilización en el apartado 7.3.1.4, la temperatura entra de manera homogénea por todos los puntos del chasis, por lo que se ha supuesto que el gradiente de temperatura es mucho menor en este ensayo que en el resto.

De esta manera, los estudios realizados con el promedio muestran que la diferencia de temperatura en el interior del chasis es de al menos **0.03** °C, siendo la diferencia entre la sonda LE1229.000 y LE1228.000 las que mayor diferencia registran, lo cual es lógico pues son las sondas más distantes entre sí, mientras que entre las sondas

LE1228.000 y la sonda LE1170.000 hay una diferencia de 0.003 °C (ver Figura 65). Este dato demuestra que el gradiente de temperatura mejora con respecto al chasis de policarbonato revestido con papel de aluminio, pero se obtiene un resultado muy similar al resultado que se obtenía al estudiar el sistema del revestimiento de espuma de poliuretano, por lo que se puede concluir que la homogeneidad de temperatura en el interior del chasis de aluminio no registra cambios significativos al sustituir el material del chasis.

El hecho de que la sonda LE1229.000 registre los valores de temperatura con un mayor offset que el resto de las sondas puede deberse a un error de calibración. No obstante, esta sonda fue calibrada en abril de 2018 por el CEM, por lo que es más probable que la temperatura no se introduzca en el chasis de aluminio de una forma tan homogénea como se supuso inicialmente.

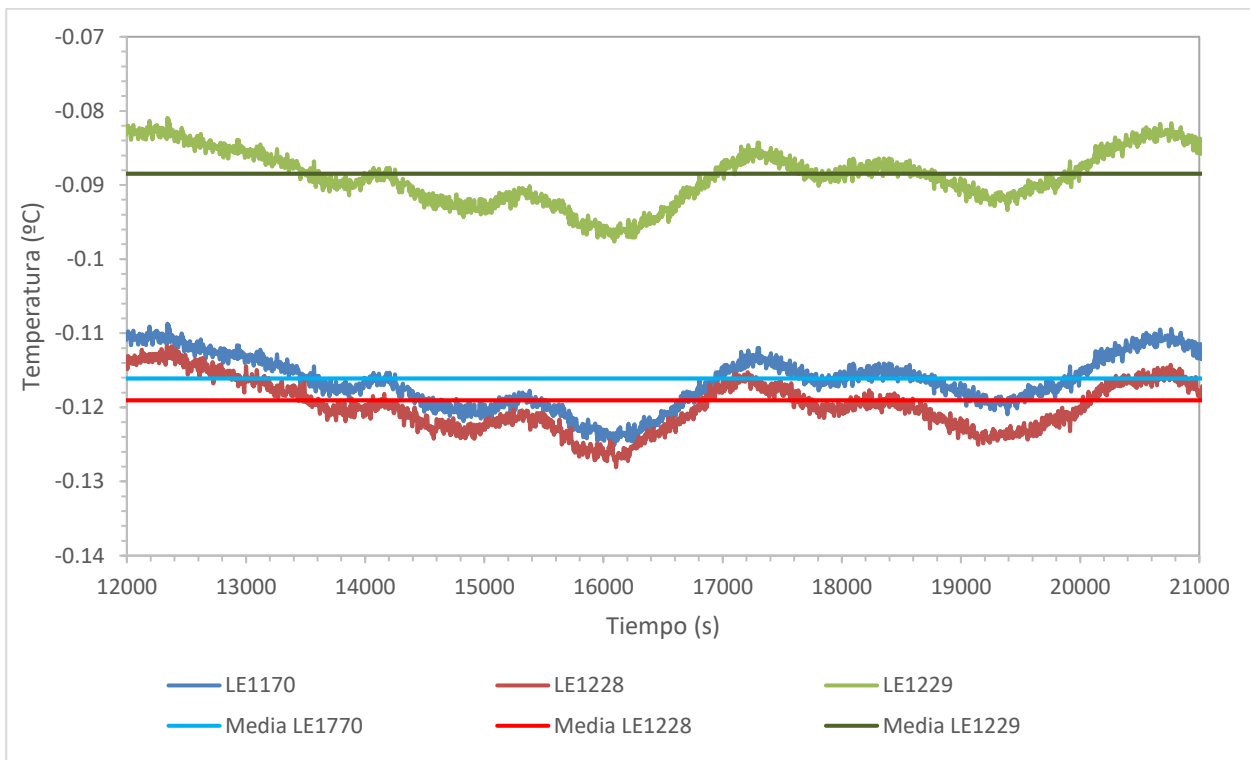


Figura 65: Gradiente de temperatura en el interior del chasis de aluminio

	Policarbonato + poliuretano	Poliuretano + aluminio	Aluminio
Incertidumbre expandida (°C)	0.018	0.022	0.015

Tabla 21: Estudio comparativo de uniformidad de los tres sistemas analizados.

7.3.4. Resultados de la propuesta de mejora

A la vista de los resultados obtenidos en los análisis anteriores, se concluye que el chasis de aluminio mejora considerablemente el tiempo de estabilización. Esta es una notable mejora que permite optimizar la secuencia de ensayos. Como ejemplo el sistema original limita el número de ensayos realizables a un máximo de 3 ensayos cada dos días mientras que los tiempos de estabilización alcanzados con el chasis de aluminio permitirá duplicar de manera sencilla la productividad del sistema. De manera similar este resultado también implica tiempos de reacción más cortos frente a correcciones en la temperatura de consigna, que es una operación que hay que realizar con bastante frecuencia en este tipo de ensayos. Esta reducción en la inercia del sistema también facilita la potencial automatización del ajuste fino de la temperatura de ensayo. Proceso que actualmente se realiza en modo manual. Como se ha comentado esta mejora no implica una reducción en la incertidumbre asociada a la estabilidad de la temperatura en el interior del chasis, pero si una mejora sensible en el parámetro de uniformidad. el cual también uno de los puntos de mejor propuestos.

A pesar de esto prometedores resultados es importante indicar que estos están soportados en tres ensayos y sería

recomendable tener la posibilidad de relajar estudios adicionales para confirmar la cuantía de las mejoras observadas. No obstante, la amplia reducción del tiempo de estabilización indica sin lugar a duda la validez de la aproximación aquí empleada.

7.4. Otras mejoras al sistema

Además de las mejoras aquí expuestas, se considera que otro punto crítico para minimizar el tiempo de realización del ensayo es la automatización del ajuste fino de la temperatura de ensayo (punto 4 de la secuencia de ensayo, epígrafe 2.3). A este respecto se realizaron con el fabricante quien nos indicó que esta opción no está habilitada en los equipos disponibles en el laboratorio y no existe una manera directa de implementarla sin reprogramar todo el sistema de control de temperatura, lo que quedaba fuera del ámbito del trabajo propuesto. No obstante, se considera que este es una de las principales debilidades del sistema y habría que invertir recursos en este sentido.

Además, debido a la poca disponibilidad de las cámaras de tratamiento no se estudiaron las siguientes vías de mejora que se quedan aquí detalladas para posteriores desarrollos. Estas medidas están encaminadas a mejorar la uniformidad de temperatura que tras las mejoras propuestas se considera otro de los principales puntos de mejora.

- 1) La cámara ambiental empleada presenta una elevada inestabilidad según su última calibración. Sería recomendable realizar estudios con otros modelos del mismo fabricante disponibles en el laboratorio.
- 2) En las configuraciones empeladas la transferencia de calor final al dispositivo tiene lugar por convección natural de aire si bien estos sistemas son los que presenta una mayor estabilidad temporal, en nuestro caso hemos observado que este no es un parámetro crítico. En los sistemas de control ambiental basados en convección forzada este parámetro se sacrifica a cambio de una mejora en la uniformidad. De forma general las normas UNE para la realización de ensayos climáticos establecen la necesidad de que el aire circule libremente entre los especímenes con objeto de asegurar la uniformidad del proceso. Sería recomendable realizar una prueba de concepto empleando un sistema de sujeción que no obstruyese la circulación del aire.
- 3) Las normas UNE destacan que una mayor velocidad de circulación de aire mejora la homogeneidad de temperatura. Sería recomendable realizar pruebas en este sentido tanto en un chasis abierto como con el chasis de aluminio.

8. LÍNEAS FUTURAS Y CONCLUSIONES

*“Mozart, Beethoven and Chopin never died,
they simply became music”
- Robert Ford -*

LA parte final de este proyecto está dedicada a las líneas futuras que puede seguir el sistema descrito, así como las conclusiones alcanzadas sobre el desarrollo del proyecto. El objetivo del proyecto ha sido el desarrollo de una nota técnica que describiera el sistema a utilizar, los protocolos que deben seguirse para la realización de los ensayos con los elementos constructivos. Además, se han propuesto mejoras al sistema, para las cuales ha sido necesario realizar una caracterización detallada del sistema.

8.1. Líneas futuras

Como se ha ido viendo a lo largo de este proyecto, el sistema ha sido diseñado específicamente para la medida de 100 termistores P1K0.0805.4P.B.S del fabricante IST, no obstante, este sistema es de aplicación a cualquier componente EEE que requiera un ensayo de caracterización a una temperatura controlada con una estabilidad térmica de ± 0.02 °C.

Algunos ejemplos para los cuales se puede usar el sistema son:

- Termistores, siguiendo la normativa GSFC-S-311-P-827 A (para los ensayos descritos en el apartado 1.3)
- Condensadores, para el ensayo de impacto térmico descrito por la MIL-STD-202-107
- Relés, para el ensayo de impacto térmico descrito por la MIL-STD-202-107
- Resistencias, para el ensayo de impacto térmico descrito por la MIL-STD-202-107
- *Thermofoil Heater*, para el ensayo de impacto térmico descrito por la MIL-STD-202-107

La versatilidad del sistema reside en los zócalos de inserción de las tarjetas de conexión (ver apartado 3.2.2), los cuales son capaces de conectar cualquier componente *through hole* que requiera la medición de su resistencia a una temperatura determinada. En el caso de componentes SMD, como es el caso de los termistores P1K0.0805.4P.B.S, es posible realizar un estañado de pads para poder usarlos con este sistema.

A la vista de los resultados de los estudios de mejora (ver Capítulo 6), se espera que en breve se sustituya el chasis original de policarbonato con revestimiento de espuma de poliuretano por el chasis de aluminio. Esto

implica realizar taladros más precisos con las brocas adecuadas en un chasis nuevo (habida cuenta de los problemas con las brocas descritos en apartado 7.3) para las sondas de temperatura y los fresados pertinentes en los laterales del chasis para los conectores de las tarjetas de conexión, así como taladros de un calibre menor para el anclaje de las tarjetas de conexión al chasis.

Se espera que en un breve periodo de tiempo se haya implementado el sistema propuesto para la conmutación automática de los termistores entre los dispositivos de las distintas tarjetas de conexión, hasta hora hechas manualmente, por parte de la unidad de análisis 34980 A. Como se describió en el capítulo mencionado anteriormente, la unidad de análisis realiza una conmutación automática de los dispositivos conectados a una tarjeta de conexión mediante un módulo de medida, haciendo uso de la tarjeta de adaptación ATN_PCB-ADP-029, tendiendo la capacidad limitada a 25 termistores y 3 sondas de temperatura medidos a cuatro hilos. Hoy en día se está estudiando la posibilidad de realizar más tarjetas de adaptación y adquirir más módulos de medida para que de esta forma la conmutación la lleve a cabo la propia unidad de análisis.

Aún está por hacer un estudio de la deriva de la sonda LE1170.000, ya que debido a los resultados obtenidos en el apartado 5.1.2.1, es posible que la sonda requiera una calibración anual. No obstante, este estudio no se va a poder realizar hasta su próxima calibración en 2019.

8.2. Conclusiones

Este proyecto ha desembocado en una nota técnica en propiedad de ATN, la cual comparte los primeros epígrafes del presente documento.

Durante el desarrollo de este proyecto se ha descrito el sistema completo empleado para la realización de ensayos de caracterización de componentes EEE para aplicaciones de vuelo espacial que requieran la medida de características eléctricas en condiciones controladas de temperatura, así como los elementos constructivos que componen el sistema. Esta descripción ha resultado de utilidad para realizar una caracterización detallada del comportamiento de la temperatura en el sistema.

También se ha realizado un análisis detallado de la incertidumbre del sistema, en este análisis se ha determinado la incertidumbre asociada a la lectura de temperatura del sistema, debida al gradiente y la estabilidad del sistema, junto al estudio de la caracterización de la incertidumbre asociada a las sondas de temperatura. De esta manera, la incertidumbre asociada a la temperatura se estima en **0.05 °C**, coincidiendo con el valor de precisión de temperatura que especifica la norma MIL-PFR-32192.

Con respecto al análisis de incertidumbre asociada al equipo de caracterización eléctrica, se ha determinado una incertidumbre estimada en **0.24 Ω** para las sondas de temperatura, lo cual, expresado en forma de incertidumbre relativa, resulta en **0.024 %**, que es inferior al máximo permitido por la norma citada anteriormente (0.05 %). Para los termistores que se han ensayado, la incertidumbre se estima en **0.31 Ω**, lo que significa que la incertidumbre relativa de un termistor se estima en **0.031 %** en termistores cuya resistencia nominal es 1 kΩ.

En lo referente a la caracterización del sistema, se concluye que el sistema que se usa actualmente en los laboratorios de ATN (chasis de policarbonato recubierto de poliuretano) ralentiza la estabilización de la temperatura hasta en 5 horas y media (considerando estable la temperatura cuando entra en el rango de la media del intervalo más estable ± 0.02 °C, en los ensayos llevados a cabo se parte de 25 °C y se estabiliza a 0 °C), a cambio consigue una estabilidad térmica de 0.01 °C. No obstante, se ha demostrado que sustituyendo el chasis por uno de aluminio la temperatura estabiliza en una hora y media, manteniendo unas condiciones de estabilidad y gradiente del mismo orden o mejor que en el sistema original. Con un menor tiempo de establecimiento es posible realizar un mayor número de ensayos por día, aumentando la productividad.

REFERENCIAS

- [1] M. M. P. Hernández, «Estimación de incertidumbres. Guía GUM,» *Revista Española de Metrología*, p. 18, 2012.
- [2] Comité Conjunto de Guías en Metrología, «Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la Incertidumbre de Medida,» 2008.
- [3] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - GODDARD SPACE FLIGHT CENTER, “GSFC-S-311-P-827A-Thermistor (Thermally Sensitive Resistor), Chip, Negative Temperature Coefficient or Positive Temperature Coefficient,” GREENBELT, MARYLAND 20771, 2008.
- [4] US Department of Defense, “MIL-PFR-32192: RESISTOR, CHIP, THERMAL (THERMISTOR),” Columbus, OH, 2012.
- [5] US Department of Defense, «MIL-STD-202G –TEST METHOD STANDARD - METHOD 107, THERMAL SHOCK,» Columbus, OH, 2013.
- [6] Comité International des Poids et Mesures, «Échelle Internationale de Température de 1990,» 1990.
- [7] B. N. Taylor y C. E. Kuyatt, «Guidelines for Evaluating and expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results,» 1993.

