

Álvaro Baceiredo Ramos

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
DISPOSITIVO TERMOELÉCTRICO PARA EL
CONTROL DE ACTUADORES MECÁNICOS
POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA**

Trabajo Fin de Máster

**Dirigido por la Dra. Silvia De la Flor López
y por el Dr. José Luis Ramírez Falo**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2018

DOCUMENTO BÁSICO 1: ÍNDICE GENERAL

**[DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO
TERMOELÉCTRICO PARA EL CONTROL DE ACTUADORES
MECÁNICOS POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA]**

Índice General

DOCUMENTO BÁSICO 1: ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO BÁSICO 2: MEMORIA

1	Objeto	3
2	Alcance	3
3	Referencias	4
3.1	Bibliografía	4
3.2	Programas informáticos	4
3.3	Plan de gestión de la calidad aplicada durante la redacción	4
3.4	Otras referencias	5
4	Glosario	6
5	Justificación y Antecedentes	7
5.1	Polímeros con movimiento activo (<i>Actively-moving polymers</i>)	7
5.1.1	Polímeros con memoria de forma (<i>Shape-memory polymers</i>)	8
5.1.2	Polímeros con cambio de forma (<i>Shape-changing Polymers</i>)	11
5.1.3	Aplicaciones de los <i>AMPs</i>	12
5.2	Polímeros basados en el proceso de curado dual	13
5.2.1	Proceso de curado dual	13
5.2.2	Polímeros con memoria de forma basados en el proceso de curado dual ..	14
5.3	Actuadores mecánicos poliméricos con memoria de forma controlados	15
6	Diseño e Implantación del Dispositivo Termoeléctrico	16
6.1	Síntesis del dispositivo termoeléctrico	16
6.2	Diseño del actuador mecánico polimérico	17
6.2.1	Materiales del actuador mecánico polimérico	18
6.2.2	Diseño del <i>heater</i> del actuador mecánico polimérico	19
6.2.3	Simulaciones térmicas del actuador mecánico polimérico	24
6.2.4	Proceso de construcción y montaje del actuador mecánico polimérico	26
6.2.5	Ensayos mecánicos de flectado	29
6.2.6	Pruebas experimentales preliminares del actuador mecánico polimérico ..	33
6.3	Diseño de la etapa de control	37
6.3.1	Propuestas para la etapa de control	37
6.3.2	Diseño de la etapa de control	44
6.3.3	Implementación de la etapa de control	56
7	Resultados Experimentales	57
7.1	Introducción	57
7.2	<i>Experimental setup</i>	58
7.3	Sistema en lazo abierto	58

7.4	Sistema en lazo cerrado.....	59
8	Resumen de Presupuesto	63
9	Conclusiones y Futuros Estudios.....	63

DOCUMENTO BÁSICO 3: ANEXOS

10	Anexos.....	66
10.1	Anexo 1: Simulaciones térmicas para el diseño del <i>heater</i>	66
10.1.1	Simulaciones térmicas del Diseño-01 (Serpentín rectangular)	66
10.1.2	Simulaciones térmicas del Diseño-02 (500-700-900-1400).....	67
10.1.3	Simulaciones térmicas del Diseño-03 (4 <i>heaters</i>).....	68
10.2	Anexo 2: Simulaciones térmicas del actuador mecánico polimérico	69
10.2.1	Simulaciones térmicas del Actuador-01 (Serpentín rectangular)	69
10.2.2	Simulaciones térmicas del Actuador-02 (Serpentín rectangular red.) ...	79
10.3	Anexo 3: Resultados experimentales preliminares	89
10.3.1	Resultados experimentales Actuador-01 (Serpentín rectangular).....	89
10.3.2	Resultados experimentales Actuador-02 (Serpentín rectangular red.)..	92
10.4	Anexo 4: Simulaciones eléctricas para la Propuesta-I (<i>Boost-Buck</i>).....	94
10.5	Anexo 5: Simulaciones eléctricas para la Propuesta-II (<i>Load switch</i>).....	99
10.6	Anexo 6: Código <i>Arduino</i>	101

DOCUMENTO BÁSICO 4: PLANOS

11	Planos.....	104
----	-------------	-----

DOCUMENTO BÁSICO 5: MEDICIONES

12	Mediciones.....	105
----	-----------------	-----

DOCUMENTO BÁSICO 6: PRESUPUESTOS

13	Presupuesto	111
13.1	Listado de precios unitarios	111
13.2	Presupuesto.....	113
13.3	Resumen del presupuesto	117

DOCUMENTO BÁSICO 2: MEMORIA

**[DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO
TERMOELÉCTRICO PARA EL CONTROL DE ACTUADORES
MECÁNICOS POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA]**

1 Objeto

El objeto principal del presente proyecto es el diseño e implantación del primer prototipo experimental de un dispositivo termoeléctrico que permita el control de un actuador mecánico polimérico con memoria de forma, en base a unos criterios de funcionalidad. Dicho sistema será un elemento de gran utilidad para aplicaciones funcionales donde se requiera un actuador ligero, eficiente, resistente a ambientes agresivos y que se pueda activar de forma rápida y controlada con el mínimo gasto energético posible.

El sistema se proyecta bajo los siguientes requisitos de diseño:

- i) El material polimérico a activar térmicamente (polímero termoestable tiol-epoxi) viene impuesto por el promotor, así como los parámetros de control necesarios (temperatura de activación, velocidad de actuación y dimensiones).
- ii) El sistema que permita al material polimérico alcanzar la temperatura de activación, asegurando así el cambio de forma, estará basado en el calentamiento por *efecto Joule* de una malla conductora. Esta deberá ser integrada completamente en el sistema polimérico de manera que actúen, desde el punto de vista mecánico, como un único elemento actuador.
- iii) La energía eléctrica necesaria para la activación térmica del actuador, de acuerdo a los requisitos de diseño propuestos, será suministrada por una batería o acumulador eléctrico. Entre la batería y el actuador polimérico, se implementará una etapa electrónica de control con el objetivo de obtener el nivel de corriente deseado en función de la modalidad de activación definida. Además, la temperatura a la que se calienta el material será monitorizada y controlada por el sistema.

2 Alcance

En primer lugar, el trabajo presenta un estado del arte de los polímeros con movimiento activo, ya sean polímeros con memoria de forma o de cambio de forma. Con ello se define la topología y las condiciones de diseño más adecuadas para la consecución del objeto propuesto. Seguidamente, a través de simulaciones térmicas, se analiza la viabilidad técnica de distintos diseños propuestos de actuador, permitiendo determinar el modelo que resulta más conveniente para la aplicación proyectada. Una vez definido y evaluado el actuador, y caracterizado el comportamiento de los diferentes materiales que conforman el conjunto mediante una serie de pruebas experimentales preliminares, se diseña e implementa la etapa de control que permita la regulación de la magnitud de corriente de calefacción a valores comprendidos entre 100 mA y 1 A (para conseguir diferentes velocidades de activación), así como dejar de suministrar dicha corriente una vez el actuador recupera completamente su forma original. Finalmente, se realizan las pruebas experimentales pertinentes, con el propósito de validar el prototipo experimental y extraer las conclusiones necesarias de cara a la construcción de un segundo dispositivo. Añadir que para garantizar la mayor calidad y eficiencia en el diseño e implementación del dispositivo termoeléctrico, se realiza una valoración económica de los diferentes componentes empleados, obteniendo así beneficios relacionados con el aspecto económico.

3 Referencias

En el presente apartado se enumeran las fuentes bibliográficas y recursos empleados en la búsqueda de información necesaria para el desarrollo del proyecto.

3.1 Bibliografía

Se han consultado las siguientes fuentes de información:

- A. Belmonte, "Design and characterization of actively-moving polymers obtained via dual-curing processing", Doctoral Thesis, Department of Mechanical Engineering, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain, 2017.
- R. Inglés, "Modelization, simulation and design of micro-electro-mechanicized systems (MEMS) preconcentrators for gas sensing", Doctoral Thesis, Department of Electronic, Electrical and Automatic Control Engineering, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, Spain, 2010.
- R.W. Erickson, D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics". 2ª Edición. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- M.H. Rashid, "Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones". 3ª Edición. México DF: Pearson Educación, 2004.
- J. Blum, "Arduino a Fondo. Aprenda a crear fácilmente gadgets, gizmos, robots y mucho más". Edición Española. Madrid: Ediciones Anaya Multimedia, 2014.
- F.E. Valdés, "Microcontroladores. Fundamentos y aplicaciones con PIC". 1ª Edición. Barcelona: Marcombo, 2007.

3.2 Programas informáticos

Se han empleado los siguientes programas informáticos:

- El programa informático empleado para efectuar las simulaciones termoeléctricas del actuador es *ANSYS*, versión 19.0, de la compañía *Swanson Analysis Systems Inc*®.
- El programa informático empleado para obtener una primera aproximación del comportamiento de los diferentes modelos circuitales es *PSIM*, versión 9.0.3, de *Powersim*®.
- El programa informático empleado para diseñar el esquema circuital de la Etapa de Control es *OrCAD Lite*, versión 17.2, de *Cadence Design Systems*®.

3.3 Plan de gestión de la calidad aplicada durante la redacción

Se sigue un Plan de Gestión de la Calidad para la elaboración del proyecto, con el propósito de garantizar la calidad en la redacción. Se realizan comprobaciones periódicas, que consisten en contrastar los diferentes documentos que componen el proyecto, así como verificar la concordancia que debe existir entre ellos. Al concluirse la redacción del proyecto, los Documentos Básicos que lo conforman serán revisados por el redactor, así como por los directores del proyecto, la Dra. Silvia De la Flor López, profesora del *Departament de Enginyeria Mecànica (DEM)* de la *Universitat Rovira i Virgili* y el Dr. José Luis Ramírez Faló, profesor del *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica (DEEEA)* de la *Universitat Rovira i Virgili*.

3.4 Otras referencias

Seguidamente, se presenta una relación de la información complementaria que ha sido consultada a lo largo de la redacción del presente proyecto:

- [1] M. Behl, A. Lendlein, "Actively moving polymers", *Soft Matter*, 2007, 3, 58–67.
- [2] W.M. Huang, Y. Zhao, C.C. Wang, Z. Ding, H. Purnawali, C. Tang, J.L. Zhang, "Thermo/chemo-responsive shape memory effect in polymers: A sketch of working mechanisms, fundamentals and optimization", *Journal of Polymer Research*, 2012, 19.
- [3] G. Li, A. Wang, "Cold, warm, and hot programming of shape memory polymers", *Wiley Periodicals, Inc. J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.* 2016, 54, 1319–1339
- [4] H.C. Kolb, M.G. Finn, K.B. Sharpless, "Click Chemistry: diverse Chemical Function from a Few Good Reactions", *Angewandte Chemie International Edition*, 2001, 40, 2004–2021.
- [5] D. Guzmán, X. Ramis, X. Fernández-Francos, A. Serra, "Preparation of click thiol-ene/thiol-epoxy thermosets by controlled photo/thermal dual curing sequence", *RSC Adv.*, 2015, 5, 101623–101633.
- [6] G. González, X. Fernández-Francos, A. Serra, M. Sangermano, X. Ramis, "Environmentally-friendly processing of thermosets by two-stage sequential aza-Michael addition and free-radical polymerization of amine-acrylate mixtures", *Polym. Chem.* 2015, 6, 6987–6997.
- [7] X. Fernández-Francos, A-O. Konuray, A. Belmonte, S. De la Flor, A. Serra, X. Ramis, "Sequential curing of off-stoichiometric thiol-epoxy thermosets with a custom-tailored structure", *Polym Chem*, 2016, 7, 2280–2290.
- [8] "DuPont 5064H Silver Conductor. Technical Data Sheet", E.I. du Pont de Nemours and Company, Wilmington, Delaware, United States, 2009 [Online]. Available: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/electronic-and-electrical-materials/documents/prodlib/5064H.pdf>
- [9] "DuPont Kapton. Summary of properties", E.I. du Pont de Nemours and Company, Wilmington, Delaware, United States, 2017 [Online]. Available: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf>
- [10] A. Belmonte, D. Guzmán, X. Fernández-Francos, S. De la Flor, "Effect of the Network Structure and Programming Temperature on the Shape-Memory Response of Thiol-Epoxy Click Systems", *Polymers*, 2015, 7(10), 2146–2164.
- [11] A. Baceiredo, "Diseño y realización de un cargador de baterías para la implementación de una estación meteorológica autónoma", Departament de Electrònica, Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España, 2016.
- [12] E. Zahino, "Diseño e Implementación de un Corrector del Factor de Potencia con Baja Capacidad de Salida", Departament de Electrònica, Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España, 2016.
- [13] U. Ribes, "Síntesis de Resistores Libres de Pérdidas", Departament de Electrònica, Elèctrica i Automàtica, Universitat Rovira i Virgili, Tarragona, España, 2007.

- [14] A. Marcos, E. Vidal, A. Cid, L. Martínez-Salamero, "Loss-Free Resistor-Based Power Factor Correction Using a Semi-Bridgeless Boost Rectifier in Sliding-Mode Control", IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, vol.30, n.10.
- [15] "Arduino Nano. Tech Specs", Arduino Company, Turin, Italy, 2018 [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [16] "Load Switches: What are They, Why Do You Need Them And How Do You Choose The Right One?", Texas Instruments Inc., Dallas, Texas, United States, 2014 [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slva652/slva652.pdf>
- [17] "Arduino. Language Reference", Arduino Company, Turin, Italy, 2018 [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/>
- [18] A. Belmonte, G. C. Lama, G. Gentile, P. Cerruti, V. Ambroggi, X. Fernández-Francos, S. De la Flor, "Thermally-triggered free-standing shape-memory actuators", European Polymer Journal, 2017, Volume 97, 241-252.
- [19] X. Wang, J. Sparkman, J. Gou, "Electrical actuation and shape memory behaviour of polyurethane composites incorporated with printed carbon nanotube layers", Composites Science and Technology, 2017, Volume 141, 8-15.

4 Glosario

AMP: Actively-Moving Polymer

AO: Amplificador Operacional

CCM: Continuous Conduction Mode

CNT: Carbon Nanotubes

DC: Direct Current

EPS: Encapsulated Post Script

FET: Field-Effect Transistor

GCC: GNU Compiler Collection

ICSP: In Circuit Serial Programming

IDE: Integrated Development Environment

GT: Glassy Thermoset

LC: Liquid-Crystalline

LCN: Liquid-Crystalline Networks

LFR: Loss Free Resistor

MCU: Microcontroller Unit

MEF: Método de los Elementos Finitos

PCB: Printed Circuit Board

PFC: Power Factor Correction

POPI: Power Output Power Input

PWM: Pulse-Width Modulation

QOD: Quick Output Discharge

SCE: Shape-Changing Effect

SCP: Shape-Changing Polymer

SMC: Sliding Mode Control

SME: Shape-Memory Effect

SMP: Shape-Memory Polymer

SMR: Shape-Memory Response

SRAM: Static Random Access Memory

5 Justificación y Antecedentes

5.1 Polímeros con movimiento activo (*Actively-moving polymers*)

En [1], se definen los *actively-moving polymers* (*AMPs*) como materiales *stimuli-responsive*, es decir, materiales capaces de experimentar cambios físicos en respuesta a un estímulo externo. El concepto se inspira en los mecanismos "inteligentes" de algunos seres vivos, que permiten la supervivencia y adaptación ante determinados cambios ambientales.

Estos movimientos adaptativos de los seres vivos han inspirado a muchos investigadores en el desarrollo de dispositivos inteligentes, capaces de experimentar transformaciones en formas complejas como respuesta a estímulos externos. Los *AMPs* son los competidores sintéticos de estos mecanismos naturales. Su baja densidad y posibilidad de movimiento a gran escala, los convierten en una atractiva alternativa para una amplia gama de aplicaciones en el campo de los actuadores.

Según [2], los *AMPs* pueden clasificarse en función de su comportamiento motriz como polímeros con memoria de forma (*SMPs*) o polímeros de cambio de forma (*SCPs*). En ambas tipologías, el movimiento físico está causado por la excitación de los dominios de cambio a nivel molecular (cambios a pequeña escala) y la respuesta elástica de sus redes entrecruzadas (movimiento a gran escala). Sin embargo, en los *SCPs*, la estimulación provoca un cambio global en su forma que persiste mientras estén expuestos al estímulo, y una vez éste se suprime, se recupera la forma original. Esta etapa se denomina efecto de cambio de forma (*SCE*). Por el contrario, los *SMPs* pueden adoptar y mantener temporalmente una nueva forma después de someterse a un proceso mecánico (véase el apartado 5.1.1.2 *Ciclo de memoria de forma* del presente Documento Básico), para posteriormente recuperar su forma original como respuesta a un estímulo externo (típicamente temperatura). Esta capacidad es conocida como efecto de memoria de forma (*SME*).

Siguiendo con lo anterior, por un lado, el *SCE* se encuentra principalmente en redes líquido-cristalinas (*LCM*), y es causado por la alineación inducida por tensión de los dominios líquido-cristalinos (*LC*), produciendo una elongación macroscópica que es recuperada a través del desorden de los dominios *LC* y la respuesta elástica de la red entrecruzada.

Por otro lado, el *SME* se encuentra en redes entrecruzadas vítreas y semi-cristalinas. Es causado por un cambio drástico en el volumen interno que sufre el polímero durante el proceso de transición térmica y que posibilita su deformación controlada hacia nuevas formas, donde finalmente, la forma original se recupera mediante el reblandecimiento de la red después de la estimulación (típicamente calentando por encima de la temperatura de transición estructural).

De todo lo anterior, se puede concluir que los *SCPs* presentan una transformación de forma única y reversible en respuesta a un estímulo (generalmente termomecánico o fotomecánico), mientras que los *SMPs* pueden adoptar diferentes formas en respuesta a un estímulo, pero se requiere de un proceso de programación de forma para cada una.

5.1.1 Polímeros con memoria de forma (*Shape-memory polymers*)

Los *SMPs* son materiales que permiten el cambio a una forma programada en respuesta a un estímulo externo. Como se comenta en las líneas anteriores, el efecto de memoria de forma (*SME*) consiste en una programación inicial de la forma temporal, generalmente a través de un proceso termomecánico, y la posterior recuperación de la forma original tras una determinada estimulación (típicamente calentamiento).

5.1.1.1 Efecto de memoria de forma (*Shape-memory effect*)

El *SME* es la capacidad de un *SMP* para almacenar y devolver energía a través de la transformación de su forma, generando así un determinado movimiento. Sin embargo, el *SME* no es una propiedad intrínseca del polímero, es decir, se requiere de una programación externa para reconfigurar y adaptar su estructura.

La forma original viene dada por el proceso de curado (fabricación convencional del polímero), mientras que la programación de la forma temporal consiste en el aporte necesario de energía para superar la "barrera energética" entre ambas formas (véase *Figura 1a*).

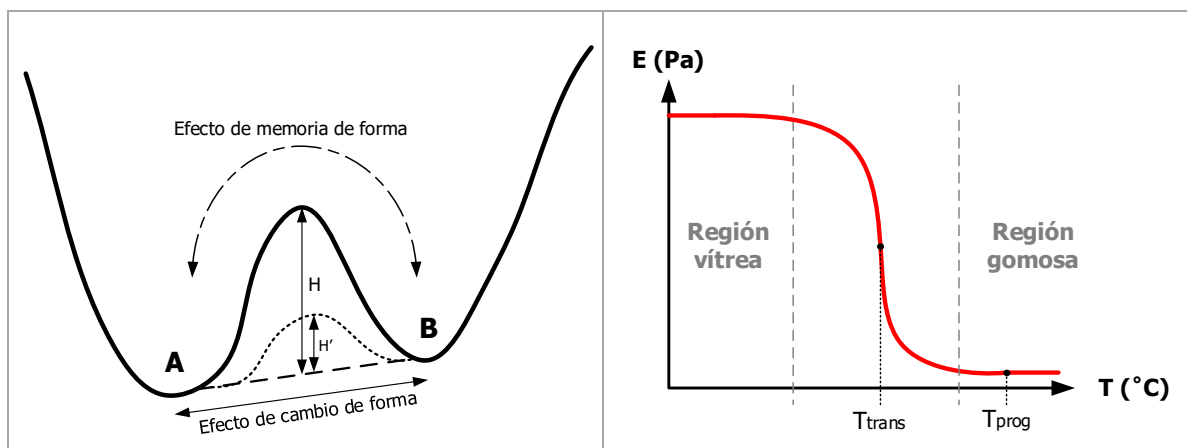


Figura 1. (a) "Barrera energética" para el *SME* y el *SCE*; (b) gráfica módulo de elasticidad-temperatura donde se identifican T_{trans} y T_{prog} .

Nota: Siendo T_{trans} la temperatura a la que se produce la transición, donde en el caso de los polímeros epoxídicos esa transición se denomina *glass transition temperature* (T_g). La T_{prog} la temperatura a la que se programa la forma temporal (cercana a T_{trans}), donde en función de la región a la que se lleve a cabo la programación, se clasifica en *cold* (región vítrea), *warm* (región de transición) y *hot* (por encima de la región de transición).

Habitualmente, la programación se trata de un proceso termomecánico donde se activan los dominios de cambio de la red, aumentando la temperatura hasta un valor cercano o superior a la temperatura de transición (T_{trans}). Cuando se produce dicha activación, la estructura es mucho más flexible, permitiendo la deformación (entrada de energía en el sistema) hasta alcanzar la nueva forma. Si se mantiene la deformación y simultáneamente se disminuye la temperatura, la forma temporal puede estabilizarse por debajo de T_{trans} , desactivando así los dominios de cambio. Las cadenas moleculares a baja temperatura impiden la recuperación del estado original de la red actuando como una "barrera energética" que

puede ser causada por la disminución drástica del volumen interno y/o la formación de interacciones físicas (puntos de entrecruzamiento). Tras la estimulación adecuada de los dominios de cambio, es decir, desencadenando de nuevo la transición estructural, la forma original puede recuperarse mediante la energía almacenada en los puntos de entrecruzamientos permanentes durante la programación.

Teniendo en cuenta lo anterior, el *SME* puede interpretarse como un cambio entrópico asociado a la conformación de las cadenas o enlaces moleculares. Después de programar la forma temporal, la distorsión de las cadenas provoca una transición desde un estado entrópico elevado de equilibrio a un estado entrópico bajo no equilibrado. Tras la estimulación, la fuerza impulsada por el cambio entrópico permite la recuperación de la forma.

5.1.1.2 Ciclo de memoria de forma (*Shape-memory cycle*)

Básicamente, el *SME* consiste en un ciclo de programación y recuperación, comúnmente denominado ciclo de memoria de forma. A continuación, se explica de forma detallada la programación de la forma temporal (paso 1) y la recuperación de la forma original (paso 2), donde se considera la programación termomecánica y la recuperación inducida por calor.

Paso 1: Programación de la forma temporal

La programación involucra un primer paso de deformación que se lleva a cabo a una temperatura cercana a T_{trans} , definida como temperatura de programación (T_{prog}), donde según [3], en función de la región con respecto a la temperatura de transición, se clasifica como *cold* (región vítrea), *warm* (región de transición) y *hot* (región gomosa).

Añadir que la principal diferencia entre la programación en frío y en caliente se encuentra en la respuesta mecánica esfuerzo/deformación del *SMP* durante la etapa de deformación, hecho que conduce a procesos de recuperación completamente diferentes, donde la programación en frío involucra fuerzas energéticas, mientras que en la programación en caliente se tratan de fuerzas entrópicas. Esto afecta directamente sobre la fijación de la forma temporal y la recuperación de la forma original.

Posterior a la etapa de deformación, la forma temporal se estabiliza enfriando la red por debajo de T_{trans} a una temperatura definida como temperatura de ajuste o de almacenaje (T_s), donde la velocidad a la que se lleva a cabo este paso de enfriamiento tiene consecuencias directas sobre la vida útil del polímero.

Paso 2: Recuperación de la forma original

La recuperación de la forma original se divide en tres categorías diferentes: recuperación sin restricciones o libre (*stress-free*), parcialmente restringida y totalmente restringida. Destacar que la recuperación libre representa la definición de un *SMP*, es decir, un material capaz de cambiar su forma y recuperar la forma original o "memorizada".

En la *Figura 2b*, se esquematiza el *SME* sin restricciones, donde se desprende que durante el proceso de programación se fija una deformación programada (ϵ_U) para una forma temporal determinada, que será totalmente recuperada. Sin embargo, la forma recuperada puede sufrir una deformación permanente (ϵ_P) relativa a la deformación plástica. La recuperación sin restricciones se caracteriza por la eficiencia en la que se logra la forma original (es decir,

la minimización de ϵ_p). En la *Figura 2a*, se muestra el proceso de recuperación sin restricciones en una gráfica deformación-temperatura.

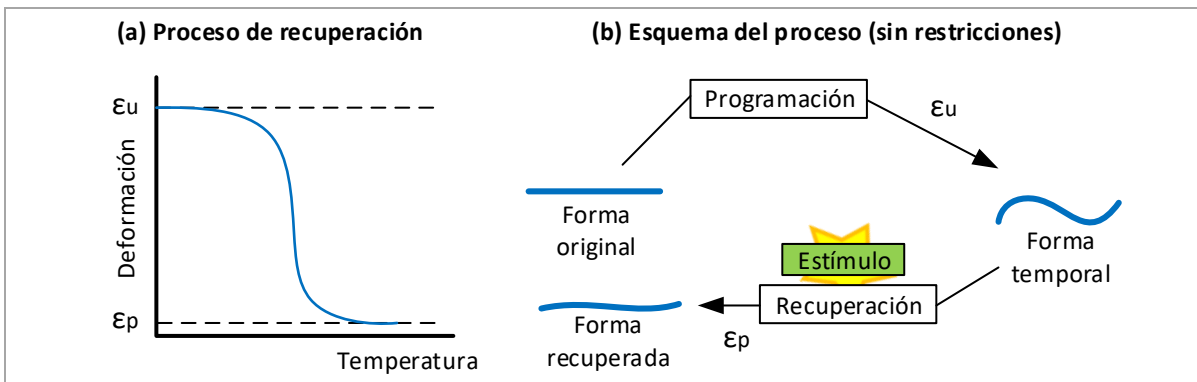


Figura 2. Proceso de recuperación sin restricciones: (a) gráfica deformación-temperatura; (b) esquema general del proceso.

En condiciones con restricciones parciales, el *SMP* está sujeto a una tensión externa durante el proceso de recuperación, denominada tensión de recuperación (σ_{rec}), donde la forma original se recupera parcialmente (véase la *Figura 3*) al mismo tiempo que se genera trabajo mecánico.

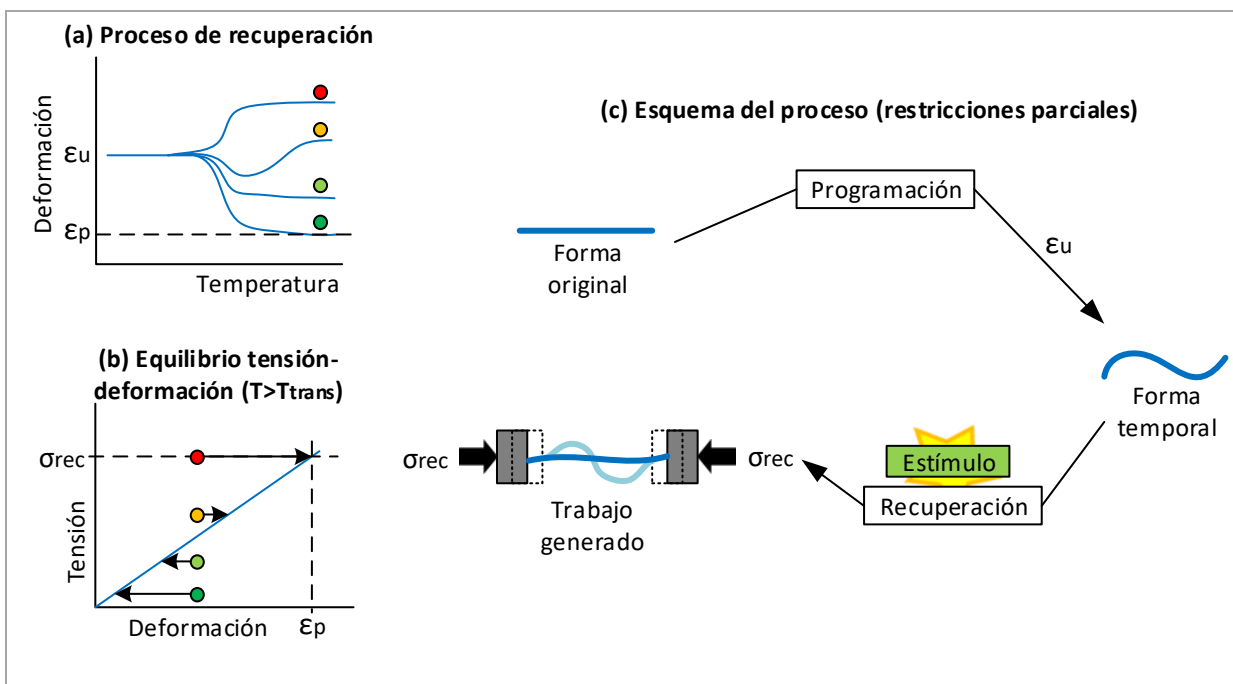


Figura 3. Proceso de recuperación con restricciones parciales: (a) gráfica deformación-temperatura; (b) respuesta tensión-deformación para $T > T_{trans}$; (c) esquema general del proceso.

Unas condiciones de restricción total son, en la práctica, un escenario limitante para el uso de *SMPs* como actuadores mecánicos. En la *Figura 4a* se muestra un gráfico tensión-temperatura durante el proceso de recuperación. En la *Figura 4b*, se muestra de forma esquemática el proceso:

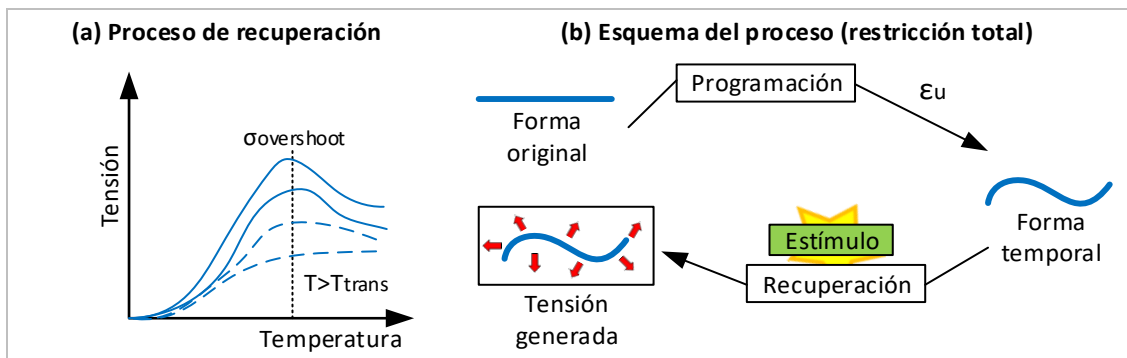


Figura 4. Proceso de recuperación con restricciones totales: (a) gráfica tensión-temperatura; (b) esquema general del proceso.

5.1.2 Polímeros con cambio de forma (*Shape-changing Polymers*)

Los *SCPs* son una clase de materiales capaces de transformarse de una a otra forma como respuesta a un estímulo, donde el efecto de cambio de forma (*SCE*), tal y como se comenta con anterioridad, se basa en la transformación macroscópica causada por cambios estructurales reversibles inducidos cuando el material se expone al estímulo apropiado.

5.1.2.1 Redes líquido-cristalinas (*Liquid-crystalline networks*)

Entre los diferentes *SCPs*, las *LCNs* son la clase más común. Similares a los polímeros *LC* (polímeros con cristalinidad líquida, pero ausencia de estructura de red), las *LCNs* presentan fases ordenadas aisladas denominadas dominios *LC*, formados por determinadas moléculas con tendencia a la autoorganización, los mesógenos, presentes en el esqueleto de la cadena (*main-chain LCNs*) o como grupos pendulares anclados al esqueleto (*side-chain LCNs*). La configuración espacial (orientación y posición) de las unidades mesogénicas en el esqueleto o los grupos pendulares del polímero determina la mesofase *LC*: mesofases esmécticas (sólo orden orientacional u orden unidimensional) o mesofases nemáticas (orden posicional y orientacional u orden bidimensional). Mesofases más complejas, como las fases azules o de núcleo curvo, son inusuales en las *LCNs* debido a la limitación de la movilidad de la red.

Los dominios *LC* son estables bajo ciertas condiciones de temperatura, luz o humedad dependiendo de la naturaleza del polímero. La alteración de los dominios *LC* se denomina isotropización y determina el punto donde la *LCN* se convierte en material gomoso o *rubber* (red amorfa ligeramente entrecruzada), que ocurre cuando se alcanza la temperatura de isotropización (T_{iso}).

5.1.2.2 Efecto de cambio de forma (*Shape-changing effect*)

Como se indica con anterioridad, las *LCNs* sufren cambios de volumen macroscópicos al desordenarse los dominios *LC*. Además, el fenómeno de *soft elasticity* permite procesos de grandes deformaciones con mínimos requerimientos de fuerzas. Por tanto, ambas propiedades pueden aprovecharse para obtener una gran tensión de recuperación cuando se aplica el estímulo adecuado.

Comúnmente, la isotropización o el desorden de los dominios *LC* se debe al aumento de temperatura. Sin embargo, la incorporación de unidades mesogénicas sensibles a la luz (por

ejemplo, las moléculas de azobenceno), permite la reorientación con la exposición lumínica (transiciones mesomórficas).

5.1.2.3 Efecto de cambio de forma libre de actuación externa (*Free-standing shape-changing effect*)

El *SCE* conduce a una actuación bidireccional cuando los dominios *LC* están alineados por tensión, requiriéndose de una carga mecánica externa. Además, el *SCE* está limitado por la configuración tridimensional original de la estructura de red y la dirección de la tensión aplicada, posibilitando únicamente la consecución de simples mecanismos de movimiento unidireccionales en la mayoría de los casos.

Para salvar este inconveniente, el enfoque más común es la incorporación de un componente elástico en una *LCN* recién extendida, que impida la contracción de la *LCN* durante la isotropización, pero adoptando una forma metaestable que sea recuperada debido a la tensión generada en el componente elástico.

En términos generales, la combinación de un elemento de cambio de forma (*LCM*) y un elemento de aplicación de tensión (componente elástico), puede conducir a una actuación bidireccional libre de actuación externa a través de la transición *LC* de la *LCN*. Este componente *stress-applying* puede incorporarse internamente a través del entrecruzamiento de una nueva estructura de red o incorporarse externamente embebiendo una matriz elástica sobre la *LCN*.

5.1.3 Aplicaciones de los *AMPs*

Los *AMPs* presentan tres características principales:

- Son capaces de responder a estímulos externos mediante cambios dimensionales.
- Son materiales ligeros, fácilmente obtenibles y usualmente de bajo coste.
- Sus propiedades se adaptan al diseño estructural de sus redes, pudiendo adoptar formas muy complejas (dado que su conformado es relativamente sencillo).

El acoplamiento de estas características hace que los *AMPs* sean de interés en una amplia gama de aplicaciones. Por un lado, la biocompatibilidad y la biodegradabilidad de algunos de los polímeros los hacen atractivos en aplicaciones biomédicas. Por otro lado, la mejora en las propiedades mecánicas, especialmente la elevada deformabilidad combinada con una alta resistencia a la rotura, pueden resultar de interés en numerosas aplicaciones industriales y aeronáuticas. Igualmente, determinadas propiedades inherentes como la baja densidad y un movimiento "suave", son características ampliamente demandadas en el campo de la *soft robotics*. Asimismo, otras propiedades como la resistencia química, la resistencia térmica o el aislamiento eléctrico amplían el rango de aplicación en ambientes agresivos, como pudiera ser el aeroespacial.

5.2 Polímeros basados en el proceso de curado dual

5.2.1 Proceso de curado dual

El proceso de curado dual es una metodología para el desarrollo de termoestables de red dual a través de dos procesos de reacciones compatibles e independientes. Estas reacciones pueden activarse de forma simultánea o secuencial mediante la combinación de diferentes estímulos (luz ultravioleta o calor), siendo el proceso secuencial de curado dual más atractivo, dado que posibilita la consecución en dos únicas etapas de un gran conjunto de propiedades (por ejemplo, baja temperatura de transición vítrea T_g , baja densidad de entrecruzamiento y/o elevada deformabilidad).

El control preciso de las propiedades del material en la etapa intermedia puede ser utilizado como una metodología de preprocesamiento para el desarrollo de estructuras tridimensionales sin la necesidad de moldes complejos, un inconveniente común en los termostables que no pueden procesarse después del entrecruzamiento y, por tanto, deben estar modelados a partir de una mezcla líquida. Destacar que, la ausencia de molde reduce y facilita el control de la formación de burbujas durante el proceso de curado, otro aspecto importante en el curado de los termostables. En la *Figura 5* se esquematiza la aplicación del procesado secuencial de curado dual en el desarrollo de diseños de formas complejas.

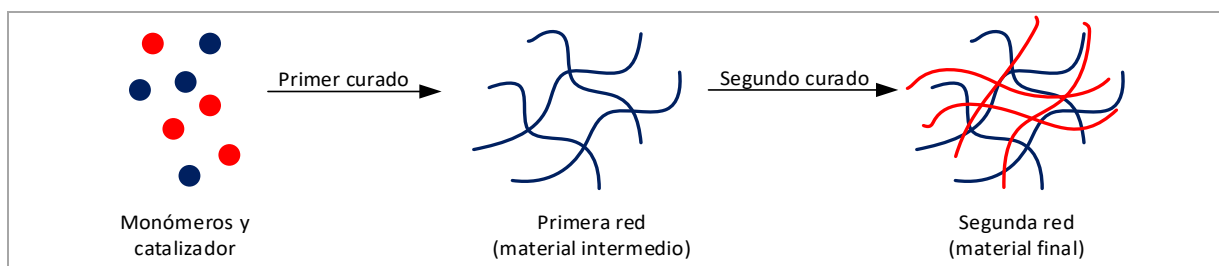


Figura 5. Esquema del procesamiento de polimerización dual hacia diseños de formas complejas.

La posibilidad de lograr diseños de formas complejas ha atraído a muchos investigadores en el campo de los *AMPs*. Técnicas modernas como la impresión 3D, se utilizan para el desarrollo de *SMPs* de formas complejas donde, sin embargo, el control de las propiedades del material sigue estando limitado. Por el contrario, el proceso de curado dual permite controlar la dinámica de polimerización y las redes formadas por polímeros entrecruzados, permitiendo el desarrollo de una amplia gama de *AMPs* con propiedades ajustables.

Para el proceso de curado dual son comúnmente utilizadas las reacciones *click*. El concepto de química *click* fue introducido por K.B. Sharpless et al. [4] para describir reacciones caracterizadas por su selectividad, versatilidad, eficacia, sostenibles ambientalmente y producidas de una manera simple (desde un punto de vista experimental).

Entre las diferentes reacciones *click*, destacan las reacciones *thiol-click* dado la gran celeridad con la que se llevan a cabo en condiciones moderadas (en comparación con el resto). La reacción tiol-epoxi permite obtener materiales funcionales con propiedades mecánicas mejoradas (alta deformabilidad y resistencia de rotura), alta resistencia al impacto, adhesión y alto grado de transparencia.

5.2.2 Polímeros con memoria de forma basados en el proceso de curado dual

Los materiales termoestables basados en la combinación tiol-epoxi (*SMPs* basados en reacciones *click*) presentan un control preciso de las propiedades estructurales y termomecánicas, permitiendo el desarrollo de polímeros con estructuras de red homogéneas, excelentes propiedades termomecánicas y buena respuesta a la memoria de forma.

Sin embargo, los termoestables no pueden ser procesados después de la polimerización, por tanto, el diseño de la forma original debe abordarse durante el proceso de curado. En estos casos, el curado se trata de un proceso complejo, que se lleva a cabo con importantes restricciones de tiempo y temperatura, originando cambios drásticos en la respuesta del material y dificultando el desarrollo de formas complejas.

Para corregir lo anterior, en la gran mayoría de casos se suele recurrir a complejas técnicas de modelado que conducen a resultados ineficientes en términos de estructura macroscópica (formación de burbujas) y de control de la cinética de curado (disipación ineficiente del calor liberado durante la reacción).

Una alternativa es el uso de técnicas de curado *B-stage*, que consiste en curar parcialmente una resina (comúnmente conocida como etapa de pre-secado) para obtener un material inicial sólido y estable que puede servir como precursor de la forma final (después del curado completo de la resina). No obstante, esta técnica se limita a un único proceso de polimerización, restringiendo la definición de las propiedades. Además, el control de fenómenos como la gelificación o la vitrificación, son bastante complejos.

En la actualidad, el concepto de curado dual se presenta como una solución efectiva y versátil para mejorar el procesamiento de los termoestables. Como se indica con anterioridad, el proceso de curado dual se basa en la combinación de dos procesos de polimerización compatibles y que pueden activarse de forma secuencial, cuyos procesos de polimerización pueden separarse mediante diferentes estímulos, cinéticas de reacción o la presencia de catálisis latente [5, 6].

Los promotores de este trabajo final de máster demostraron en [7] la posibilidad de lograr un procesamiento secuencial de curado dual con mezclas tiol-epoxi no estequiométricas (exceso de los grupos epoxi) con el objetivo de agregar valor al desarrollo de los *AMPs*, puesto que la reacción *click* tiol-epoxi asegura la formación de *SMPs* con propiedades mecánicas mejoradas, además de la consecución de diseños de formas complejas.

Pese a la reducida investigación realizada en torno al uso de sistemas de curado dual basados en tiol-epoxi para el desarrollo de *AMPs*, las capacidades potenciales de estos sistemas de curado dual y la posibilidad de controlar y mejorar los *AMPs* a través de la variación de los compuestos tiol y epoxi de una manera fácil y eficiente, convierten estos sistemas atractivos en una amplia gama de aplicaciones.

5.3 Actuadores mecánicos poliméricos con memoria de forma controlados

Como primera fase de diseño del prototipo de actuador activado eléctricamente, se van a utilizar materiales *SMP* tiol-epoxi obtenidos mediante técnicas de curado dual. El procesado dual permitirá ensamblar, a modo de sándwich, el elemento conductor/calefactor en la parte central del actuador, comportándose mecánicamente como un único elemento. Al ser elementos *SMP*, se deberán de programar con el elemento conductor/calefactor ya incorporado, lo que deberá contemplarse en el proceso de diseño. Al activar el elemento calefactor, el actuador recuperará la forma original (con la que se procesó) en un movimiento unidireccional. Como trabajo futuro, y en función de los resultados obtenidos en este trabajo de fin de máster, se planteará la posibilidad de extender el diseño a elementos *SCP*, donde se combinará un *LCN* con un sistema tiol-epoxi y el elemento calefactor (también en tipo sándwich) para que el movimiento del actuador pueda ser bidireccional.

En las siguientes líneas se presenta el nuevo enfoque desarrollado para la obtención de actuadores mecánicos, conformado por una malla conductora (*heater*) embebida en una estructura multicapa constituida por láminas vítreas de termoestable (*GT*) de tiol-epoxi (*S3DGEBA-0.65*). Este conjunto que es programado de una determinada forma será capaz de recuperar la forma original una vez el material polimérico alcance una temperatura superior a la temperatura de transición (T_{trans}), a través del calentamiento por *efecto Joule* mediante la malla conductora.

Por un lado, las láminas vítreas de termoestable (*GT*) que se obtienen tras la primera etapa de curado dual de la mezcla tiol-epoxi no-estequiométrica, permiten el desarrollo de configuraciones complejas de actuadores gracias al fácil procesamiento en la etapa intermedia, así como la incorporación del elemento calefactor, y un diseño compacto y resistente debido a la fuerte adhesión entre las capas obtenidas en la etapa de curado final del *GT*.

Por otro lado, la tinta de plata es el material conductor que se utiliza como *heater* para alcanzar en la capa polimérica la temperatura de transición vítrea T_g , dado que exhibe una gran estabilidad en los ciclos de temperatura, una buena conducción térmica (garantizando la uniformidad de temperatura), un coeficiente de temperatura constante y relativamente alto (permitiendo la medición de temperatura mediante el control de las variaciones de resistencia) y presenta cierta facilidad para su fabricación. Añadir que en la conformación de la rejilla conductora, la tinta de plata se deposita sobre un material flexible denominado *Kapton* de 50 μm de espesor, que presenta una afectación mínima de la rigidez global del conjunto del actuador una vez ensamblado.

El *heater* del actuador está alimentado con corriente eléctrica, hecho que permite considerables ventajas con relación a la activación del dispositivo. Los actuadores eléctricos posibilitan un movimiento simple, seguro y limpio. Además, presentan una larga vida útil con un mantenimiento prácticamente nulo, asegurando así un coste total de operación muy bajo en comparación con otros sistemas. Esta tipología de alimentación posibilita la adición de una etapa de control entre la fuente de alimentación (batería) y el propio actuador, con la finalidad de monitorizar la temperatura de forma precisa, permitiendo establecer diferentes estrategias de actuación en relación con las variables de tiempo y velocidad de activación del dispositivo.

6 Diseño e Implantación del Dispositivo Termoeléctrico

6.1 Síntesis del dispositivo termoeléctrico

En primer lugar, se muestra de forma esquemática la denominación y relación entre los diferentes elementos que conforman el dispositivo termoeléctrico. Tal y como puede observarse en la *Figura 6*, el sistema está compuesto por una batería, una etapa de control electrónico y el actuador polimérico.

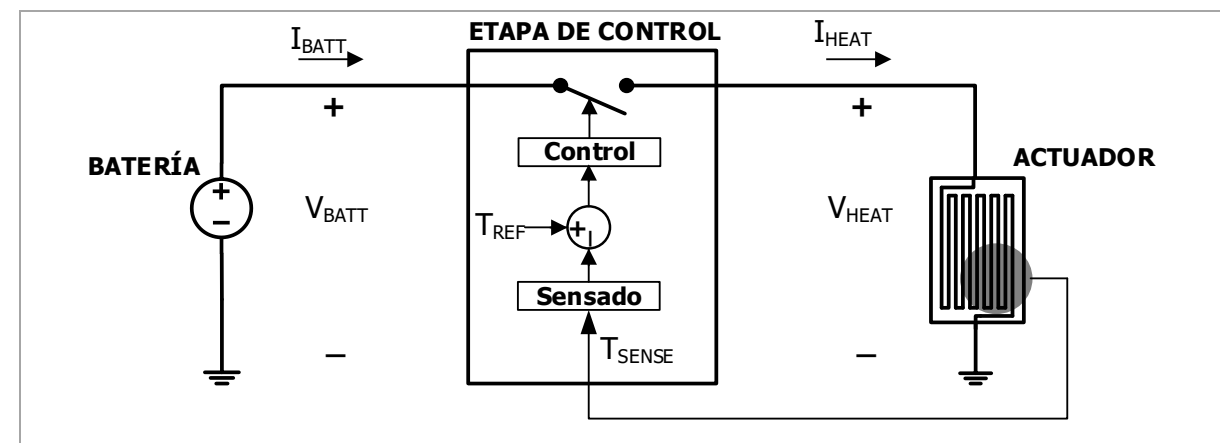


Figura 6. Esquema general del dispositivo termoeléctrico para el control del actuador polimérico.

Seguidamente, se describe la función que realizan cada uno de los elementos constituyentes:

- **Batería (o acumulador eléctrico).** Dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas capaces de convertir la energía química almacenada en corriente eléctrica. Cada celda consta de un electrodo positivo (cátodo), un electrodo negativo (ánodo) y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, asegurando que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función, alimentar eléctricamente la etapa electrónica de control y el actuador polimérico.
- **Etapa de control.** El objetivo de este bloque, conformado por diferentes componentes electrónicos, es obtener en la malla conductora el nivel de corriente requerido en función de la estrategia de actuación deseada, para conseguir la activación del material polimérico (cambio de forma) a través del calentamiento por *efecto Joule*. Para ello, se acondiciona la tensión proveniente de la batería a un valor adecuado tanto para el *heater* como para el resto de los componentes electrónicos. Destacar que el control de dicha etapa está basado fundamentalmente en la temperatura de la malla conductora, parámetro monitoreado por el sistema a través del valor de resistencia del *heater*, que define en cada momento la corriente de calefacción necesaria por tal de cumplir con la velocidad de actuación requerida por el usuario.
- **Actuador polimérico.** Conformado por dos láminas de material polimérico *SMP* termoestable de tiol-epoxi (*S3DGEB A-0.65*), donde se ha embebido en la parte central la malla conductora de tinta de plata impresa sobre una lámina fina de *Kapton*. El sistema, una vez programado, debe ser capaz de recuperar la forma original una vez el material se calienta por encima de la temperatura de transición (T_{trans}).

6.2 Diseño del actuador mecánico polimérico

En el presente apartado, se exponen los pasos realizados en la fase de diseño e implementación del actuador mecánico polimérico (véase *Figura 7*).

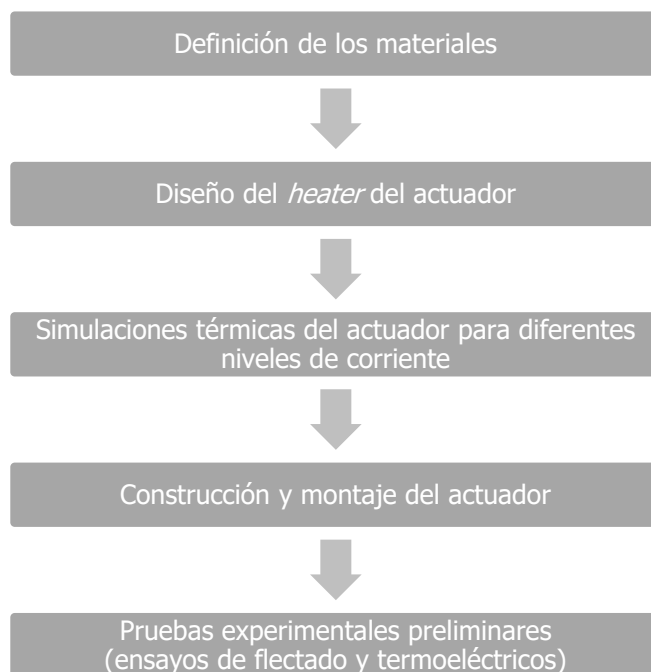


Figura 7. Diagrama de bloques de la fase de diseño e implementación del actuador mecánico polimérico.

En primer lugar, se describen de forma detallada los diferentes materiales que constituyen el actuador mecánico. Seguidamente, a través del programa informático *ANSYS*, se realizan las simulaciones térmicas y eléctricas necesarias para definir el diseño de la malla conductora que permita elevar su temperatura hasta aproximadamente una temperatura de calentamiento de $T_{HEAT} = 80\text{ °C}$, que garantice la activación del material polimérico ($T_g = 61\text{ °C}$). Definido el modelo del *heater*, se simula el comportamiento del actuador alimentado a diferentes niveles de corriente eléctrica de calefacción, con el objetivo de evaluar determinados parámetros de interés como el consumo energético, el tiempo de actuación y la homogeneidad de la temperatura.

Una vez validado de forma teórica el prototipo, se decide la construcción del modelo propuesto, detallando el proceso de construcción y montaje. Con anterioridad al ensamblado de los diferentes elementos, se debe evaluar el comportamiento a flexión del elemento conductor (tinta de plata sobre base de *Kapton*), analizando su actuación tanto a tracción como a compresión y evaluando la variación que sufre de resistencia eléctrica. Este estudio resulta fundamental dado que el elemento conductor debe trabajar a flexión con un nivel elevado de deformación de manera continuada y repetitiva sin perder sus propiedades eléctricas (especialmente en relación a la conductividad eléctrica).

Finalmente, una vez ensamblado el conjunto, se realizan una serie de ensayos experimentales preliminares que permitan validar la activación del actuador polimérico, dentro del rango de corriente eléctrica pretendido (de 100 mA a 1 A).

6.2.1 Materiales del actuador mecánico polimérico

Primeramente se detallan los diferentes elementos empleados en la conformación del actuador mecánico (véase *Figura 7*).

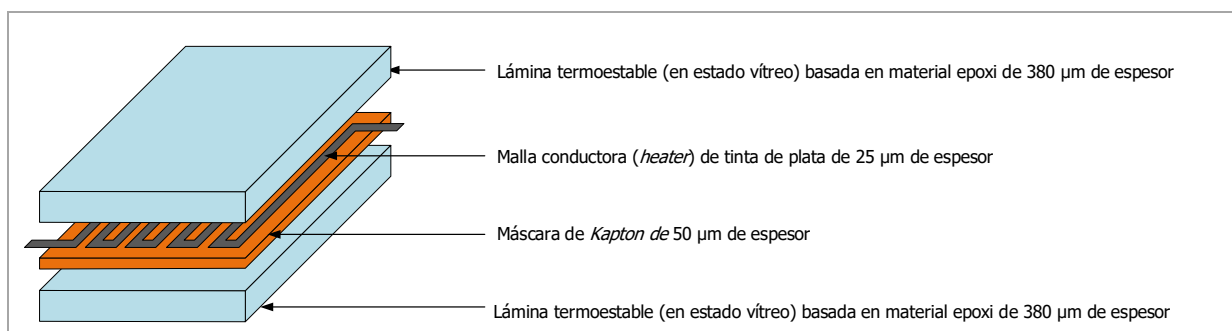


Figura 7. Elementos del actuador mecánico polimérico.

Nota: La *figura* no muestra la relación real de las dimensiones entre los diferentes elementos (no escalada).

La malla conductora o *heater* está constituida por tinta de nanopartículas de plata DuPont 5064H^[8] (DuPont Inc., Wilmington, DE, EEUU) con un contenido sólido del 63 – 66%, una viscosidad de 10 – 20 Pa · s y resistividad de la hoja de $\leq 6 \text{ m}\Omega/\text{sq}/25\mu\text{m}$. El *heater* se imprime sobre una máscara de 50 μm de espesor de *Kapton*^[9], un *film* de poliimida desarrollado por DuPont (DuPont Inc., Wilmington, DE, EEUU), capaz de mantenerse estable en un amplio rango de temperaturas (de $-269 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+400 \text{ }^\circ\text{C}$). El proceso de impresión y desarrollo de la rejilla conductora (junto con toda la tecnología asociada) ha sido realizado por el personal del *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica* de la *Universitat Rovira i Virgili*.

En referencia a la lámina de termoestable (en estado vítreo final tras la segunda etapa del curado) de 380 μm de espesor basada en material epoxi, ha sido desarrollado y sintetizada por personal del *Departament d'Enginyeria Mecànica (DEM)* y del *Departament de Química Analítica i Química Orgànica* de la *Universitat Rovira i Virgili*, en colaboración con personal del *Laboratorio de Termodinámica y Fisicoquímica* de la *Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona* de la *Universitat Politècnica de Catalunya*.

El sistema con el que se va a trabajar se denomina S3DGEBA-0.65 indicando el 0.65 la relación tiol-epoxi (véase en la *Tabla 1* las principales propiedades del material polimérico). Siguiendo [10], para su constitución se emplean:

- Diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA, GY240, Huntsman, Everberg, Bélgica) con un peso epoxi equivalente de 182 g/eq. como resina epoxi.
- Trimetilolpropano tris (3-mercaptopropionato) (S3, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EEUU) con un peso equivalente de tiol de 132,85 g/eq. como agente para el curado en una proporción sub-estequiométrica respecto a los grupos epoxi en el sistema.
- 1-metilimidazol (1MI, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EEUU, 82,1 g/mol) como catalizador en una proporción de 1 phr (partes de catalizador por cien partes de la mezcla total).

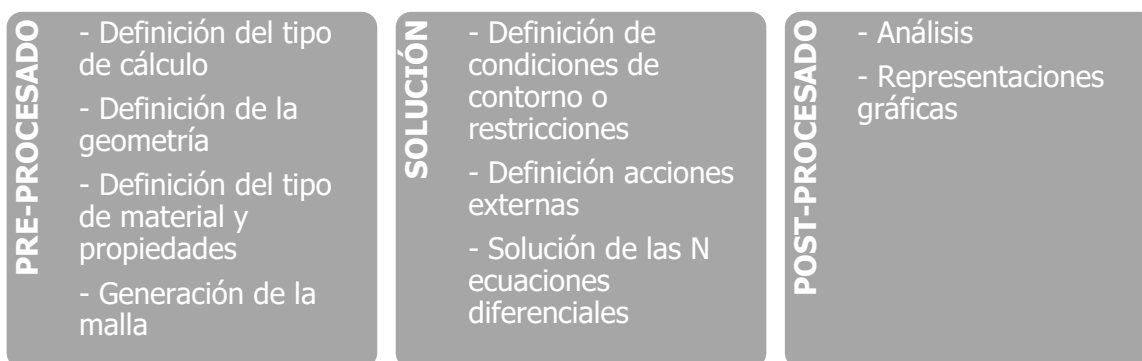
6.2.2 Diseño del *heater* del actuador mecánico polimérico

En el presente apartado se muestran los resultados que se derivan de las simulaciones desarrolladas mediante *ANSYS* para la definición de la forma de la malla conductora del actuador mecánico polimérico. Para la determinación de la alternativa más adecuada, se evalúa el rendimiento de tres *heaters* con diferentes diseños, donde se consideran fundamentalmente tres aspectos. Por un lado, se analiza la eficiencia energética del actuador, es decir, el consumo de energía eléctrica necesaria para la activación del material epoxi. Por otro lado, se estudia la velocidad de activación mediante el tiempo requerido por cada uno de los diseños para alcanzar la temperatura T_{trans} en la superficie polimérica. Finalmente, se examina la distribución de la temperatura, con el propósito de identificar diferencias de temperatura considerables en el área activa actuador, que pudieran provocar tensiones internas en el material, derivando en una mala actuación del conjunto.

Para el estudio de la evolución temporal de la temperatura en el actuador se realizan análisis térmicos transitorios basados en el método de los elementos finitos (MEF) a través del programa informático *ANSYS*. Destacar que el MEF es un método que, pese a no proporcionar la solución exacta, posibilita obtener una solución aproximada más que suficiente.

El método de los elementos finitos subdivide el dominio en porciones mucho más sencillas y no intersectantes de tal manera que, agrupadas y enlazadas adecuadamente, reproduzcan el sistema real original. Esas porciones se denominan elementos finitos y se enlazan a través de sus nodos. El conjunto de nodos discretos se llama malla. Las diferentes magnitudes físicas aplicadas al sólido real se deben aplicar en los nodos, denominándose variables nodales. Puesto que el MEF simplifica la geometría pero no las ecuaciones de resolución, las ecuaciones diferenciales que resuelven el sistema se solucionan sin simplificaciones. Las soluciones se obtienen en los nodos, donde los nodos comunes a dos elementos continuos tienen las mismas variables nodales.

Desde el punto de vista de la programación, las etapas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:



Siguiendo el guion presentado, primeramente, se presentan las dimensiones (facilitadas por el promotor) que debe de cumplir el actuador mecánico:

- La parte exterior del actuador mecánico está formado por dos *layers* (*top* y *bottom*) rectangulares de $47 \times 10 \text{ mm}^2$ de $380 \mu\text{m}$ de espesor de resina epoxi.

- Entre la capa *bottom* de resina epoxi y el *heater* de tinta de plata, se dispone de una máscara rectangular de $45 \times 8 \text{ mm}^2$ de *Kapton* de $50 \text{ }\mu\text{m}$ de espesor.
- La malla conductora (*heater*) encargada de proporcionar la temperatura requerida al actuador está constituida por tinta plata con un espesor de $25 \text{ }\mu\text{m}$.

Dichas simulaciones térmicas se llevan a cabo considerando los siguientes parámetros, relativos a los distintos materiales que constituyen el actuador, presentados en la *Tabla 1*:

	Resina epoxi ^[10]	<i>Kapton</i> ^[9]	Tinta de plata ^[8]
Resistividad a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Omega \cdot \text{m}$)	$1,0 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Coefficiente de temperatura (K^{-1})	0,000034	0,000020	0,002209
Conductividad térmica ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0,20	0,12	429
Densidad ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1600	1420	10490
Capacidad calorífica ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}$)	1400	1090	232

Tabla 1. Parámetros relativos a los materiales constituyentes del actuador.

El entorno conforma una condición frontera del flujo de calor, que emula el calor transferido desde el actuador (simulando una convección natural), donde se establece una temperatura ambiente de $T_{amb} = 22^\circ\text{C}$. Por lo que se refiere a la definición de las acciones externas, se simula el *heater* como una fuente de calor, siguiendo la interrelación entre las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 Q_{HEAT} &= I_{HEAT}^2 \cdot R_{HEAT} \cdot t \\
 Q_{HEAT} &= m_{HEAT} \cdot cp_{AG} \cdot \Delta T \\
 R_{HEAT} &= R_{HEAT,0} (1 + \alpha_{HEAT} \cdot \Delta T)
 \end{aligned} \tag{01}$$

Siendo:

- Q_{HEAT} : Energía disipada por la malla conductora, en J .
- I_{HEAT} : Corriente de calefacción que atraviesa el *heater*, en A .
- R_{HEAT} : Resistencia del *heater*, en Ω .
- t : Tiempo transcurrido, en s .
- m_{HEAT} : Masa del *heater*, en kg .
- cp_{AG} : Calor específico de la tinta de plata utilizada para conformar el *heater*, en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- ΔT : Incremento de temperatura en el *heater*, en K .
- $R_{HEAT,0}$: Resistencia inicial del *heater*, en Ω .
- α_{HEAT} : Coeficiente de temperatura de la tinta de plata que conforma el *heater*, en K^{-1} .

A continuación, se presentan las simulaciones térmicas realizadas para diferentes diseños de la malla conductora. Se supone una resistencia inicial del *heater* $R_{HEAT,0} = 4,5 \Omega$ y una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$, donde las simulaciones se extienden un periodo de tiempo suficiente, hasta alcanzar una temperatura en la malla conductora de $T_{HEAT} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.2.2.1 Diseño-01: Serpentin rectangular

En primer lugar, se proyecta un diseño en forma de serpentin rectangular adaptado a las dimensiones dadas (véase *Figura 8*). Cada barra de material conductor presenta una longitud de 45 mm, con un ancho de pista de 400 μm y una separación de 400 μm entre ellas.

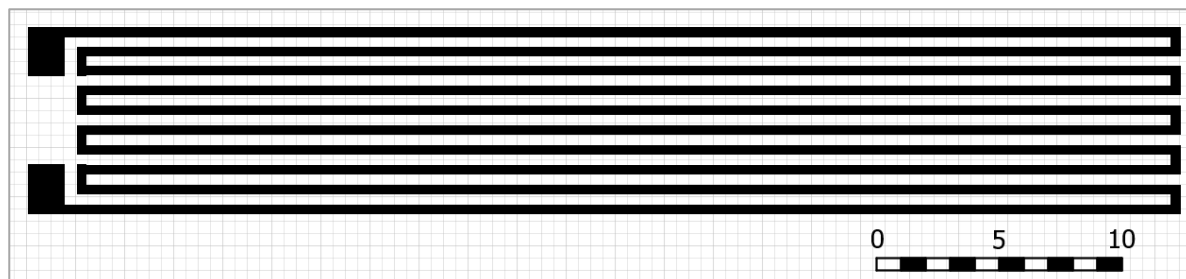


Figura 8. Detalle de las dimensiones del *heater* para el Diseño-01 (Serpentin rectangular).

En la *Figura 9*, se muestra la distribución de temperatura en el plano x-z en la superficie *bottom* del actuador:

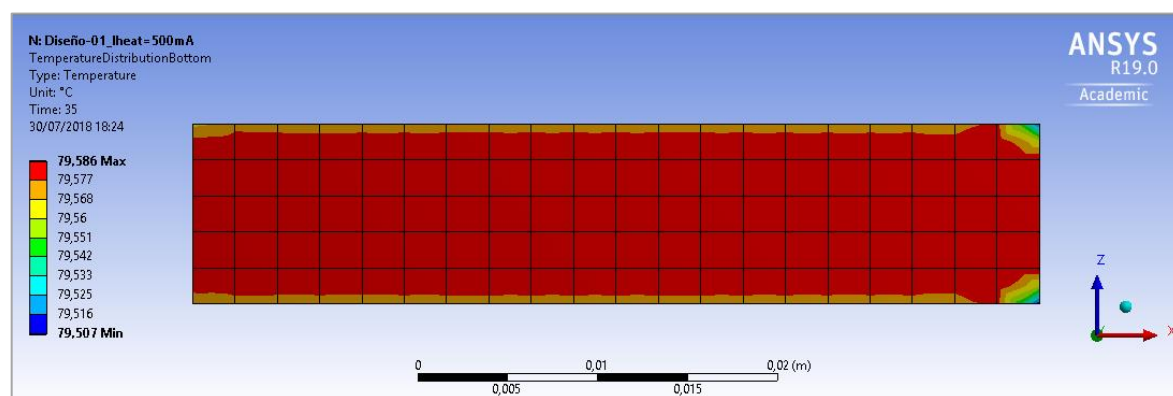


Figura 9. Distribución de temperatura para el Diseño-01 (Serpentin rectangular) para $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

6.2.2.2 Diseño-02: 500-700-900-1400

En el siguiente diseño, se persigue disminuir el ancho de pistas desde la región interior, dado que las pistas exteriores reciben parte del calor que se desprende en la sección central. El *heater* diseñado presenta las siguientes anchuras de pista 500 μm-700 μm-900 μm-1400 μm (desde la parte externa), asegurando en todo caso una distancia entre pistas de 400 μm.

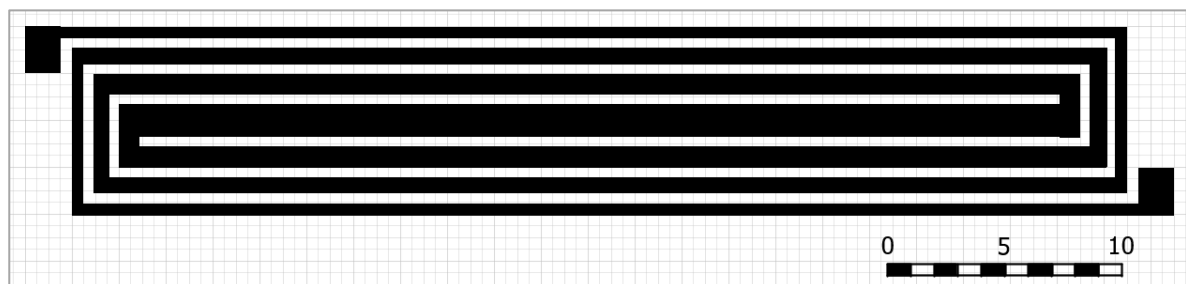


Figura 10. Detalle de las dimensiones del *heater* para el Diseño-02 (500-700-900-1400).

En la *Figura 11*, se muestra la distribución de temperatura en el plano x-z en la superficie *bottom* del actuador:

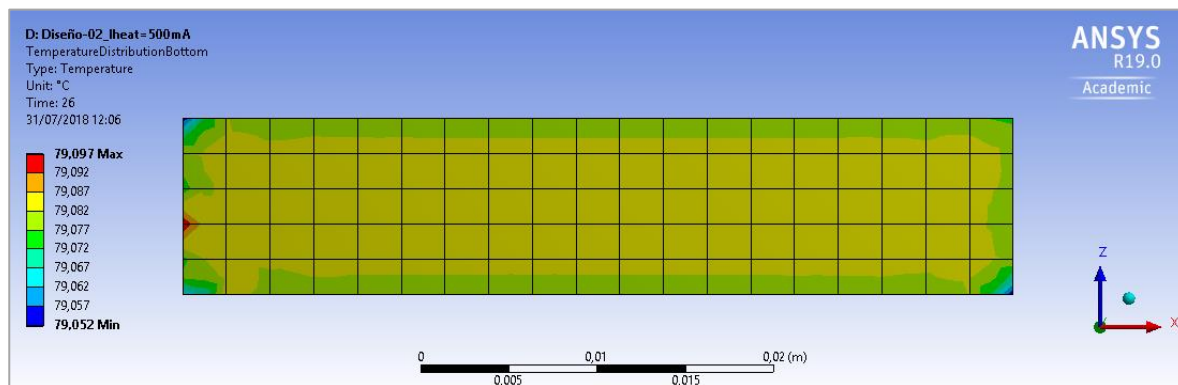


Figura 11. Distribución de temperatura para el Diseño-02 (500-700-900-1400) para $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

6.2.2.3 Diseño-03: 4 heaters

Mediante el siguiente diseño propuesto, se persigue mejorar la homogeneidad de temperatura en la superficie del actuador a través de la constitución de 4 heaters. Del mismo modo que en el caso anterior, las pistas interiores presentan un mayor ancho que las exteriores. Cada uno de los heaters parciales presentan los siguientes anchos de pista $300 \mu\text{m}$ - $300 \mu\text{m}$ - $300 \mu\text{m}$ - $500 \mu\text{m}$ - $800 \mu\text{m}$ (desde la parte externa) asegurando en todo caso $400 \mu\text{m}$ entre pistas.

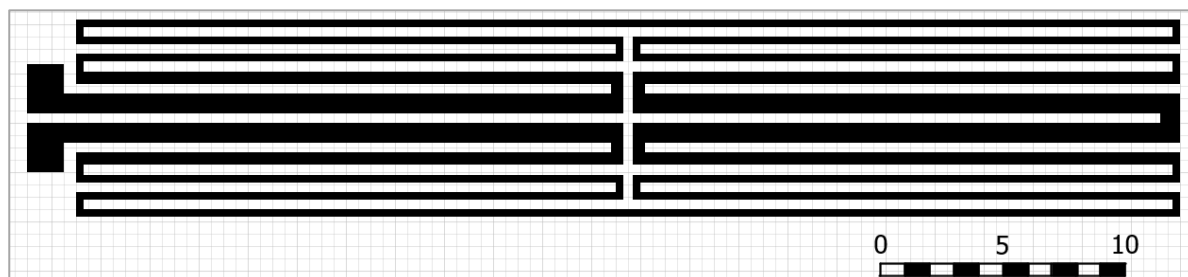


Figura 12. Detalle de las dimensiones del heater para el Diseño-03 (4 heaters).

En la *Figura 13*, se muestra la distribución de temperatura en el plano x-z en la superficie *bottom* del actuador:

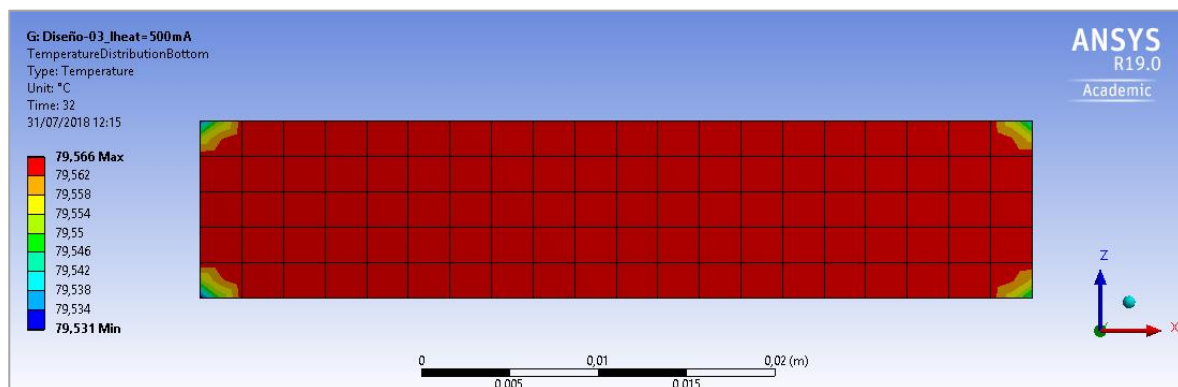


Figura 13. Distribución de temperatura para el Diseño-03 (4 heaters) para $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

6.2.2.4 Comparativa y elección del diseño del *heater*

En la *Tabla 2*, se presentan los resultados que se obtienen de la ejecución de las simulaciones para los distintos diseños de *heaters* planteados, en relación al tiempo de activación (t_{ACT}), área de la malla conductora (A_{HEAT}), potencia media disipada ($P_{DIS,M}$), energía disipada (E_{DIS}), temperatura máxima en el material epoxi (T_{MAX}) y diferencia de temperatura en la superficie externa del actuador polimérico (ΔT):

	t_{ACT} (s)	A_{HEAT} (mm ²)	$P_{DIS,M}$ (W)	E_{DIS} (J)	T_{MAX} (°C)	ΔT (°C)	$\frac{P_{DIS,M}}{A}$ (mW/mm ²)
Diseño-01	35	181,44	1,125	39,38	79,586	0,079	6,200
Diseño-02	26	242,44	1,125	29,25	79,097	0,045	4,640
Diseño-03	32	199,07	1,125	36,00	79,566	0,035	5,651

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos de las simulaciones para diferentes diseños del *heater*.

Nota: Véase en el apartado *10.1 Simulaciones térmicas para el diseño del heater* del Documento Básico *Anexos* las gráficas de respuesta dinámica y perfil de temperatura para las simulaciones realizadas a los diferentes diseños de *heaters* propuestos, para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500$ mA extendidas hasta alcanzar una temperatura en el material conductor de $T_{HEAT} = 80$ °C.

De la *Tabla 2* se desprende que el Diseño-02 requiere del menor tiempo para la activación del actuador, siendo este diseño del *heater* el que permitiría el mejor desempeño, en caso de proyectarse en aplicaciones donde se requiera de una respuesta rápida del actuador (por ejemplo ante situaciones de emergencia, como una válvula de seguridad). En referencia a la homogeneidad de temperatura, para las condiciones simuladas, es el Diseño-03 el que presenta un menor delta de temperatura en la superficie polimérica del actuador, sin embargo, cabe destacar que las tres propuestas planteadas presentan un correcto comportamiento en la distribución de la temperatura en el área activa. También en la *tabla* anterior, se relaciona la potencia media disipada con el área de la malla conductora, cuyo resultado puede utilizarse como un indicador para evaluar el comportamiento termoeléctrico del *heater*. Se observa que es el Diseño-01 el que presenta el valor más alto, en otras palabras, se trata del diseño propuesto que permite la mayor disipación de potencia por unidad de área de material conductor. Además, otro punto que resulta fundamental para la elección del diseño del *heater* es la facilidad para su fabricación, siendo entre las tres alternativas propuestas de malla conductora, el Diseño-01 el más simple de implementar. Por todo lo anterior, se decide la forma de serpentin rectangular como diseño del *heater* para la construcción del primer prototipo de actuador mecánico polimérico (Actuador-01).

6.2.3 Simulaciones térmicas del actuador mecánico polimérico

Una vez determinada la forma del *heater*, en el presente apartado se muestran los resultados que se obtienen del desarrollo de una serie de simulaciones térmicas que permiten validar de forma teórica el correcto comportamiento del actuador propuesto (Actuador-01), dentro del rango de corriente de calefacción deseado (entre 100 mA a 1 A).

Se plantea la construcción de un segundo modelo de actuador de tamaño reducido, manteniendo el mismo diseño de *heater* (forma de serpentín rectangular). Seguidamente, se presentan las dimensiones (facilitadas por el promotor) que debe de cumplir este segundo modelo de actuador (Actuador-02):

- La parte exterior del actuador mecánico está formado por dos *layers* (*top* y *bottom*) rectangulares de $26 \times 10 \text{ mm}^2$ de $380 \mu\text{m}$ de espesor de resina epoxi.
- La rejilla conductora o *heater* está constituida por plata con un espesor de $25 \mu\text{m}$. Cada barra de material conductor presenta una longitud de 24 mm , con un ancho de pista de $500 \mu\text{m}$ y una separación de $500 \mu\text{m}$ entre ellas (véase *Figura 14*).
- Entre la capa *bottom* de resina epoxi y el *heater* de tinta de plata, se dispone de una máscara rectangular de $24 \times 8 \text{ mm}^2$ de *Kapton* de $50 \mu\text{m}$ de espesor.

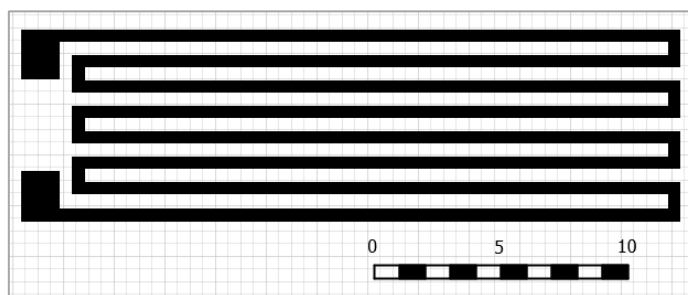


Figura 14. Detalle de las dimensiones del *heater* para el Actuador-02 (Serpentín rectangular reducido).

Para ambos modelos de actuador propuestos, se realiza un análisis térmico transitorio basado en el método de los elementos finitos (MEF) a través del programa informático *ANSYS*. Las simulaciones realizadas se ejecutan considerando los mismos parámetros que se presentan en la *Tabla 1*, en relación con los diferentes materiales que constituyen el actuador. Del mismo modo que en el apartado anterior, el entorno conforma una condición frontera del flujo de calor, que emula el calor transferido desde el actuador, donde se establece una temperatura ambiente de $T_{amb} = 22^\circ\text{C}$. En referencia a la definición de las acciones externas, se simula el *heater* como una fuente de calor siguiendo la interrelación entre las ecuaciones presentadas en la expresión (01) del apartado 6.2.2 *Diseño del heater del actuador mecánico polimérico* del presente Documento Básico.

Tras las simulaciones realizadas se valida de forma teórica que ambos actuadores propuestos son aptos para desarrollar la aplicación pretendida, en base a los criterios de funcionalidad requeridos. Destacar que, por un lado, el Actuador-01 presenta un buen comportamiento en referencia a la distribución de temperatura en la parte activa del actuador, obteniendo diferencias de temperatura reducidas, sin embargo, requiere de tiempos de activación elevados. Por otro lado, por lo que refiere al Actuador-02, pese a que se reduce

considerablemente el tiempo de activación, presenta diferencias de temperatura notorias entre las diferentes partes de las capas externas basadas en material epoxi.

En la *Tabla 3* y en la *Tabla 4* se presentan los resultados que se obtienen de la ejecución de las diferentes simulaciones realizadas a ambos modelos de actuador planteados (Actuador-01 y Actuador-02) para una corriente de alimentación con valores comprendidos entre 100 mA hasta 1 A.

6.2.3.1 Actuador-01: Serpentin rectangular

I_{heat} [mA]	t_{act} [s]	$P_{m,dis}$ [W]	T_{max} [°C]	ΔT [°C]	$P_{m,dis}/(A_h \cdot \Delta T)$
100	975	0,0478	79,995	0,001	0,2634
200	244	0,1913	79,921	0,013	0,0811
300	109	0,4304	79,870	0,027	0,0879
400	54	0,7652	79,622	0,059	0,0715
500	35	1,1956	79,586	0,079	0,0834
600	24	1,7217	78,859	0,154	0,0616
700	18	2,3434	78,867	0,178	0,0726
800	12	3,0608	78,374	0,242	0,0697
900	10	3,8738	78,902	0,235	0,0909
1000	8	4,7825	77,908	0,344	0,0766

Tabla 3. Resultados de las simulaciones para el Actuador-01 para diferentes valores de corriente de calefacción.

Nota: Véase en el apartado *10.2.1 Simulaciones térmicas del Actuador-01 (Serpentin rectangular)* del Documento Básico *Anexos* la distribución de temperatura en el actuador polimérico y las gráficas de respuesta dinámica y perfil de temperatura, para las simulaciones realizadas para el Actuador-01, para diferentes valores de corriente de calefacción comprendidos entre $100 \text{ mA} \leq I_{HEAT} \leq 1 \text{ A}$, extendidas hasta alcanzar una temperatura en la malla conductora de $T_{HEAT} = 80 \text{ °C}$.

6.2.3.2 Actuador-02: Serpentin rectangular reducido

I_{heat} [mA]	t_{act} [s]	$P_{m,dis}$ [W]	T_{max} [°C]	ΔT [°C]	$P_{m,dis}/(A_h \cdot \Delta T)$
100	606	0,0266	79,963	1,168	0,000233
200	152	0,1064	79,834	4,652	0,000234
300	68	0,2394	79,655	10,391	0,000235
400	34	0,4256	79,388	18,892	0,000230
500	22	0,6650	79,010	28,209	0,000241
600	15	0,9576	77,626	36,297	0,000269
700	11	1,3034	76,547	41,876	0,000318
800	8	1,7024	77,766	47,396	0,000367
900	6	2,1546	74,970	48,576	0,000453
1000	5	2,6600	74,061	49,367	0,000550

Tabla 4. Resultados de las simulaciones para el Actuador-02 para diferentes valores de corriente de calefacción.

Nota: Véase en el apartado *10.2.2 Simulaciones térmicas del Actuador-02 (Serpentin rectangular reducido)* del Documento Básico *Anexos* la distribución de temperatura en el actuador polimérico y las gráficas de respuesta dinámica y perfil de temperatura, para las simulaciones realizadas al Actuador-02, para valores de corriente de calefacción comprendidos entre $100 \text{ mA} \leq I_{HEAT} \leq 1 \text{ A}$, extendidas hasta alcanzar una temperatura en la malla conductora de $T_{HEAT} = 80 \text{ °C}$.

6.2.4 Proceso de construcción y montaje del actuador mecánico polimérico

En la *Figura 15*, se esquematiza el proceso de montaje del actuador mecánico polimérico que capacite al dispositivo para dar una respuesta a un estímulo externo, evolucionando desde una forma temporal a su forma original, fijada a través de un proceso de programación.

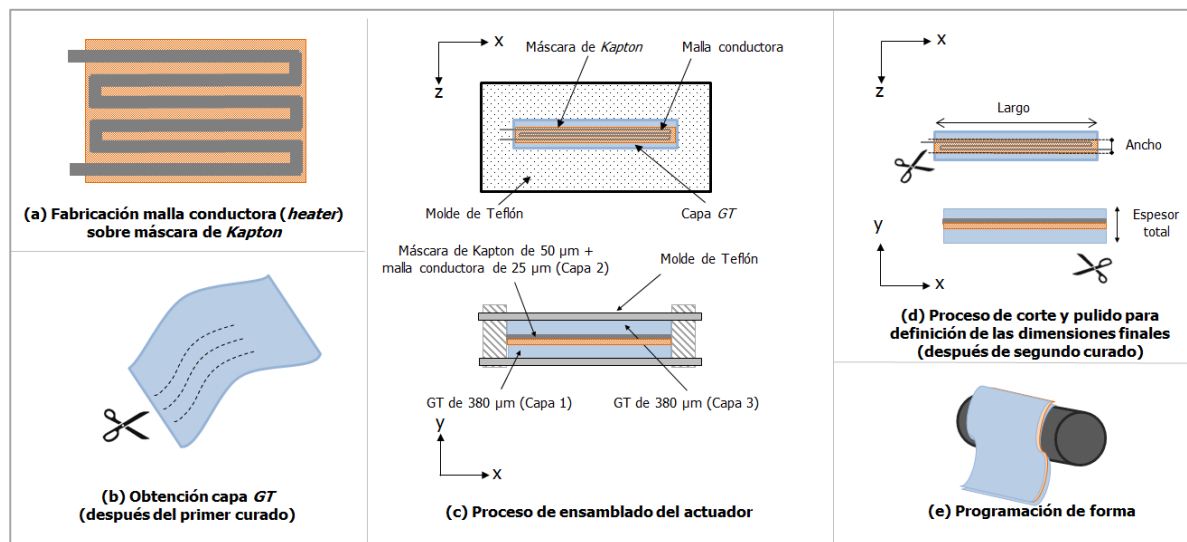


Figura 15. Proceso de constitución del actuador: (a) Impresión del *heater*; (b) Obtención de las capas GT; (c) Proceso de ensamblaje del actuador; (d) Definición de las dimensiones del actuador después de la segunda etapa de curado; (e) Programación de forma.

Por un lado, para la constitución del *heater* (véase *Figura 15a*) se utiliza un *film* comercial de poliimida de alta resistencia (*Kapton* de 50 μm de espesor) sobre el cual se deposita la tinta de plata. Además, para fabricar la plantilla de la malla conductora, es necesaria una segunda película de *Kapton* adhesiva de 25 μm de espesor, que se adhiere a la anterior. El diseño pretendido de la rejilla conductora se traza en un *software* editor de gráficos vectoriales, creando un archivo con extensión *EPS* (*Encapsulated Post Script*) compatible con el *software* del láser.

Posteriormente, la poliimida adhesiva se recorta con un láser de CO_2 siguiendo el diseño pretendido y se elimina manualmente el material sobrante, creando unas cavidades donde se deposita la tinta de plata. Destacar que antes del vertido de la tinta conductora, se limpia la superficie con etanol. La tinta de plata se distribuye con una espátula que rellena completamente los orificios y se deja secar en un horno a 130 °C durante 20 minutos. Finalmente, las partes restantes de poliimida adhesiva se retiran cuidadosamente, conformando así una malla conductora de 25 μm de espesor, impresa sobre una máscara de *Kapton* de 50 μm de espesor (véase *Figura 16*).



Figura 16. Malla conductora de tinta de plata de 25 μm de espesor impresa sobre una máscara de *Kapton* de 50 μm.

Por otro lado, se obtienen las láminas del material *GT* de $380\ \mu\text{m}$ después de la primera etapa de curado (véase *Figura 15b*). Dichas láminas deben de presentar una dimensión mayor a la malla conductora para asegurar que toda la superficie del *heater* entre en contacto con el material polimérico después de unir ambos materiales, garantizando un perfecto sellado del conjunto final. En esta primera etapa de curado, se deja reaccionar la mezcla durante *1 hora y 45 minutos* a $50\ ^\circ\text{C}$ para que tenga lugar la policondensación tiol-epoxi.

La ventaja del curado dual se pone de manifiesto en esta etapa de montaje. El material *GT*, sin un primer curado, es totalmente líquido y, por tanto, resulta imposible la obtención de formas específicas. Al obtener las dos capas de *GT* que forman el sándwich con el primer curado, la manejabilidad y el trabajo para el conformado final es mucho más sencillo.

Una vez obtenidas las dos láminas de *GT* tras su primer curado y la malla conductora de tinta de plata, se ensambla el conjunto (véase *Figura 15c*) formando un sándwich que consiste en una capa de *GT* de $380\ \mu\text{m}$ colocada en la parte inferior (Capa 1), el *heater* situado en el centro (Capa 2) y una segunda capa de *GT* de $380\ \mu\text{m}$ colocada en la parte superior (Capa 3). Se posicionan las diferentes capas sobre un molde de teflón (véase *Figura 17*) y se lleva a cabo la segunda etapa de curado del material *GT*, donde se persigue un perfecto ajuste y adhesión del material polimérico con la malla conductora y la máscara de *Kapton*. Con este segundo curado se obtiene además un material *GT* con unas características mecánicas muy mejoradas.



Figura 17. Posicionado de las diferentes capas que constituyen el actuador sobre el molde de teflón.

Según los estudios realizados previamente con estos materiales *GT*, esta segunda etapa de curado se debía de realizar a una temperatura de $120\ ^\circ\text{C}$ para activar la homopolimerización del exceso de epoxi (segunda etapa de curado), manteniendo dicha temperatura durante un espacio de *2 horas* para completar la reacción. Sin embargo, con el sistema tipo sándwich (con el *heater* en la parte central), se observó que se producía un sobrecalentamiento del polímero en las partes que están en contacto con la malla calefactora (véase *Figura 18*).

Por tanto, se decidió reducir la temperatura de este segundo curado (hasta un valor de $90\ ^\circ\text{C}$) extendiendo el tiempo del curado hasta las *6 horas*, asegurándose así la homopolimerización del epoxi, a la vez que se evita sobrecalentar el polímero debido a la elevada transmisión térmica de la tinta de plata (consiguiendo así un conjunto sólido y continuo).

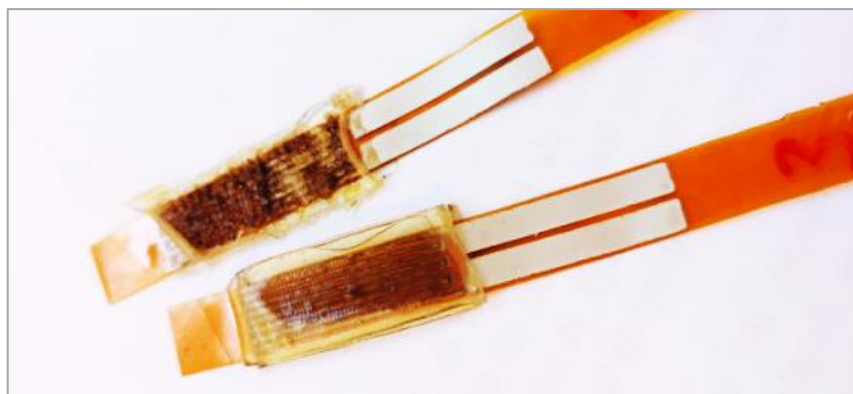


Figura 18. Sobrecalentamiento del polímero durante la segunda etapa de curado.

Seguidamente, se corta y pule el material resultante *Figura 15d*, hasta que todas las capas presenten las mismas dimensiones de anchura y longitud, conduciendo a la configuración deseada del actuador.

Llegados a este punto, se lleva a cabo el proceso de programación tal y como sigue (véase *Figura 15e*). En primer lugar, se calienta todo el conjunto (sándwich) hasta la temperatura de programación ($T_{prog} = 81\text{ }^{\circ}\text{C}$) y se le da la forma pretendida, por ejemplo, en forma de U mediante un dispositivo de flexión (véase *Figura 19*). Una vez deformado, se enfría el conjunto rápidamente con agua fría mientras se mantiene la fuerza aplicada. De esta manera, se programa una forma en U, mientras que la forma a recordar será plana.

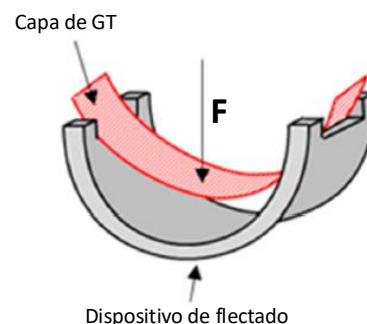


Figura 19. Representación esquemática de la deformación de la capa de GT a través de un dispositivo de flexión.

Hay que hacer notar que la forma final o forma “a recordar” tras el segundo curado, puede ser totalmente recta o en forma curvada, dependiendo de cómo se pretenda que actúe el dispositivo. En las pruebas realizadas con el prototipo en el presente proyecto, se decide que la forma a recordar sea recta y que la forma programada sea curva (véase *Figura 20*). En consecuencia, al activar el *heater*, el sistema actuará progresivamente desde un ángulo de curvatura de aproximadamente 180° hasta 0° .



Figura 20. Imagen del actuador polimérico (Actuador-02) ya programado.

6.2.5 Ensayos mecánicos de flectado

Como se ha mencionado anteriormente, el *heater*, que se dispone en la parte central del actuador, debe ser flectado de manera significativa durante el proceso de programación. Esto requiere que tanto el material base (*Kapton*) como la rejilla conductora, sean capaces de soportar repetidos ciclos de flectado sin perder estabilidad mecánica ni capacidad conductora. Además, es importante determinar si existen fluctuaciones significativas de la resistencia eléctrica que tengan que ser consideradas en la programación del *heater*.

En este apartado se presenta el estudio experimental realizado para analizar el comportamiento en flexión del *film* conductor de tinta de plata (*heater*). Para ello, se utiliza una máquina universal de ensayos *Shimazu AGS-X 10 kN* con mordazas adaptadas a las muestras (con la finalidad de no dañar los terminales de medida) y se somete el *film* a un desplazamiento progresivo de compresión al tiempo que se registra la resistencia eléctrica del conjunto (véase *Figura 21a*). Al producirse el pandeo del elemento (véase *Figura 21b* y *Figura 21c*), se consigue una flexión de toda la zona conductora y, en función de la colocación de la muestra, se puede analizar el elemento conductor (tinta de plata) a tracción (*Figura 21b*) o a compresión (*Figura 21c*).

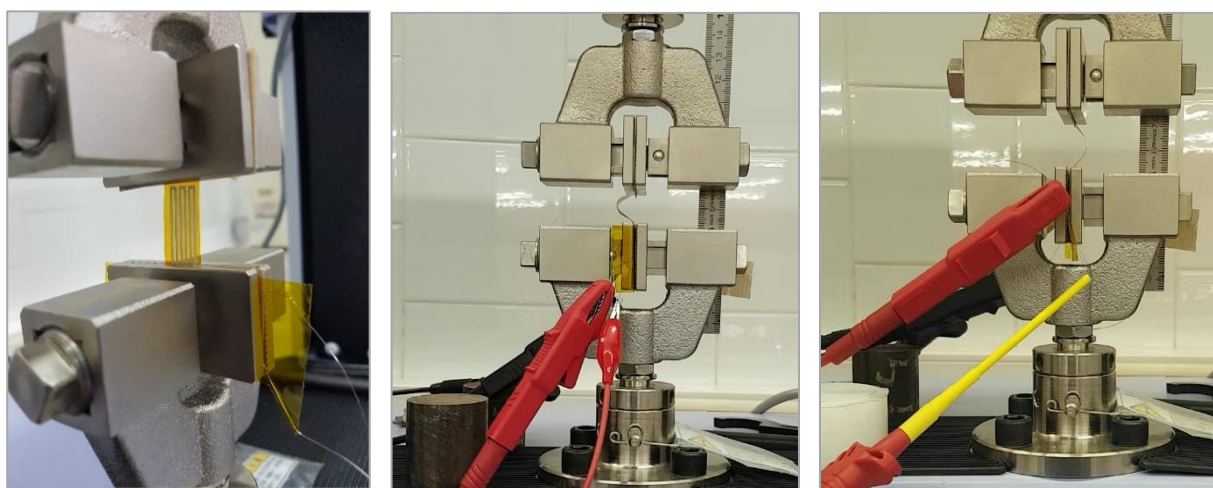


Figura 21. Dispositivo de ensayo para la medición de deformadas y resistencia eléctrica: (a) Disposición para medir la curvatura en la zona de rejilla; (b) *film* conductor a tracción; (c) *film* conductor a compresión.

Se realizan los siguientes ensayos:

- i) Ensayo de la rejilla a tracción (100 ciclos a 6 mm).
- ii) Ensayo de la rejilla a compresión (100 ciclos a 6 mm).

6.2.5.1 Ensayo de la malla conductora a tracción

Se somete al conjunto a un ciclado de 100 ciclos consecutivos aplicando un desplazamiento de carro de $\Delta L = 6 \text{ mm}$, a una velocidad de ensayo de 20 mm/min y con una distancia inicial entre mordazas de $24,15 \text{ mm}$. En el proceso de flexión se diseña el ensayo para garantizar que la malla conductora esté sometida a tracción. Los valores registrados y el comportamiento observado se presentan en la *Figura 22* y la *Figura 23*.

Destacar que el comportamiento mecánico es el esperado. El desplazamiento del carro provoca que, en cierto instante, el sistema entre en inestabilidad elástica y pandee; a partir de ese momento la F aplicada se mantiene relativamente constante. El comportamiento en el ciclado es muy estable. Lógicamente, el primer ciclo es ligeramente diferente a los demás (con una $F_{crítica}$ ligeramente superior).

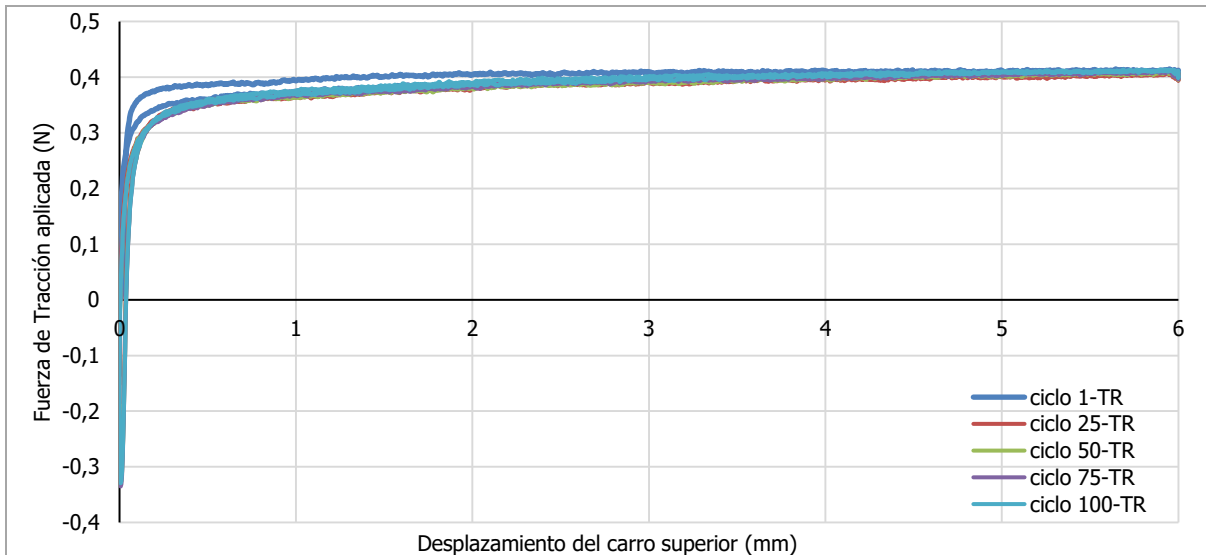


Figura 22. Gráfica fuerza-desplazamiento de carro (ensayo a tracción).

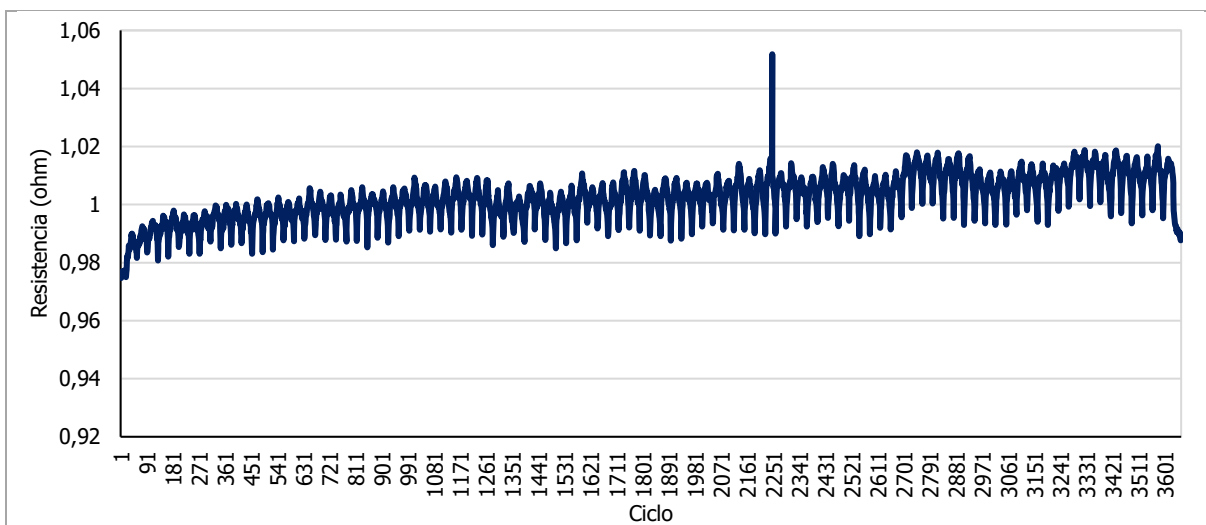


Figura 23. Gráfica de la variación de la resistencia para 100 ciclos (ensayo a tracción).

Por lo que refiere al comportamiento de la resistencia, se presenta una ligera deriva creciente con tendencia a la estabilización del valor máximo alcanzado con los 6 mm como se puede ver en la *Figura 24*. No se aprecia, sin embargo, que la diferencia entre la mínima resistencia y la máxima para cada ciclo varíe con el ciclado.

En cuanto al cálculo de la flecha máxima que se deforma el *heater* en cada ciclo, para un ΔL de 6 mm y una distancia inicial entre mordazas de 24,15 mm, resulta $f = 3,61$ mm. Además, aproximando la deformada a un arco, se obtiene un radio de curvatura $R_{curv} = 4,88$ mm.

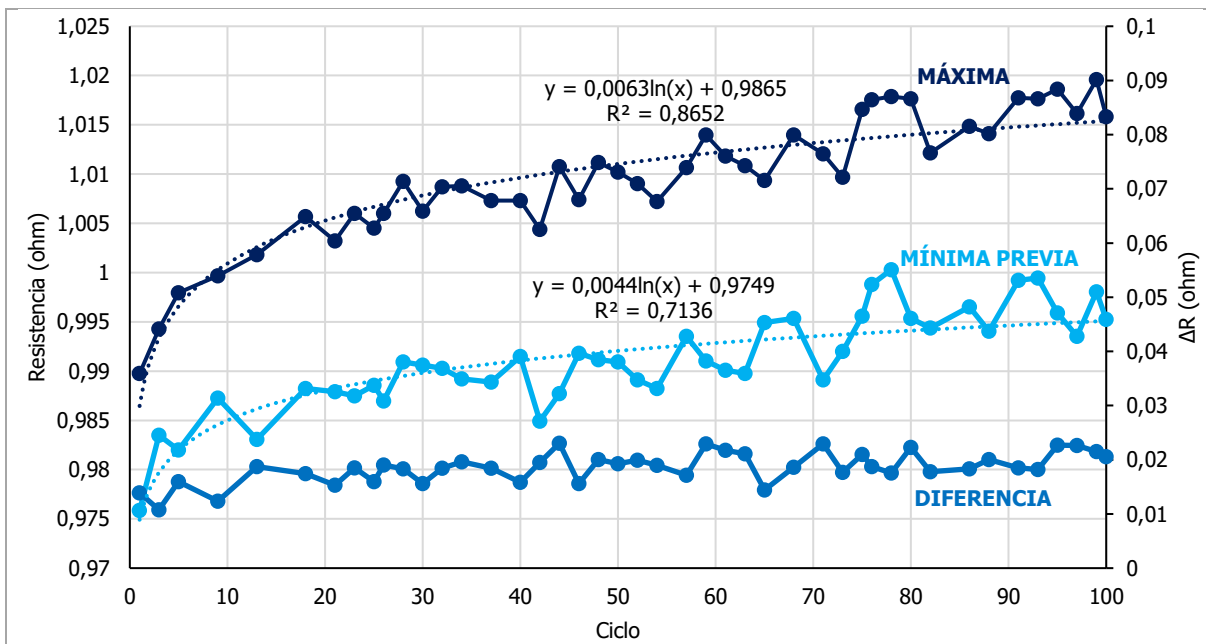


Figura 24. Evolución de la resistencia máxima, mínima previa y diferencia para 100 ciclos en tracción.

6.2.5.2 Ensayo de la malla conductora a compresión

Se somete al conjunto a un ciclado de 100 ciclos consecutivos aplicando un desplazamiento de caro de $\Delta L = 6 \text{ mm}$, a una velocidad de ensayo de 20 mm/min y con una distancia inicial entre mordazas de $25,49 \text{ mm}$. En el proceso de flexión, se diseña el ensayo para garantizar que la malla conductora esté sometida a compresión. Los valores registrados y el comportamiento se representan en la *Figura 25* y la *Figura 26*.

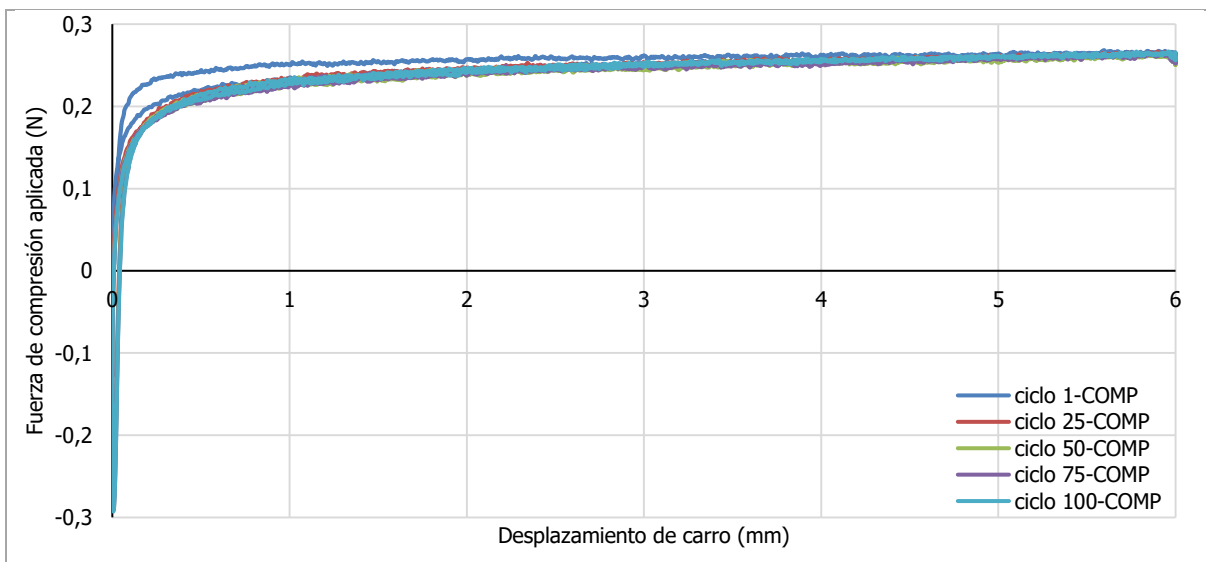


Figura 25. Gráfica Fuerza-desplazamiento de carro (ensayo a compresión).

El comportamiento mecánico a compresión también es el esperado, pudiendo extrapolarse lo indicado en el ensayo a tracción. En relación con la evolución de la resistencia, esta presenta una ligera deriva creciente (a pesar de que no se aprecia tan claramente la estabilización como en el caso del ensayo a tracción), aunque las diferencias en el ciclado son menores.

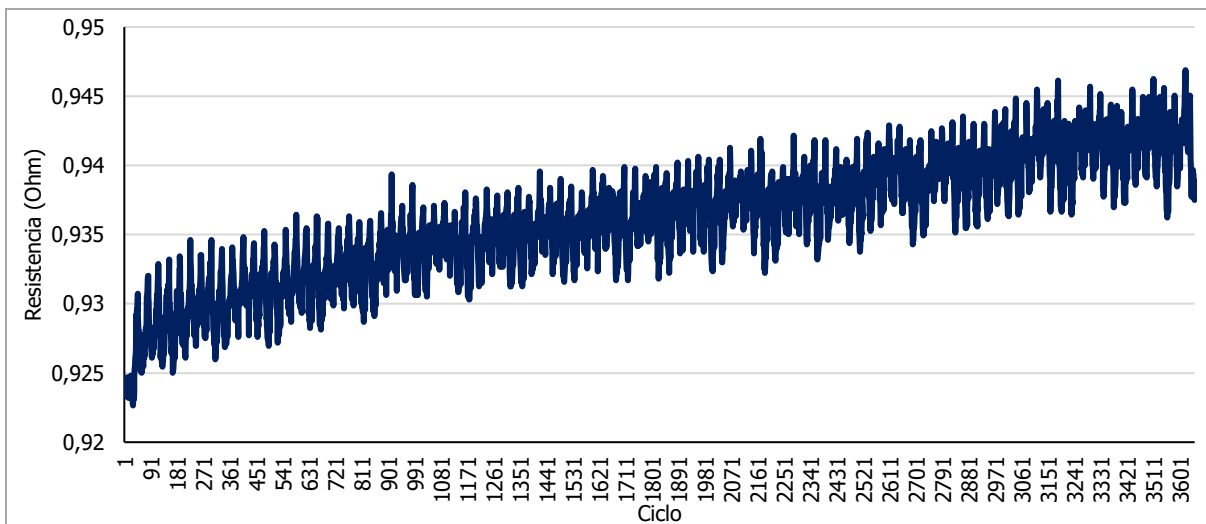


Figura 26. Gráfica de la variación de la resistencia para 100 ciclos (ensayo a compresión).

Sin embargo, como se observa en la *Figura 27*, la diferencia entre la mínima y máxima resistencia para cada ciclo experimenta una variación mínima con el ciclado.

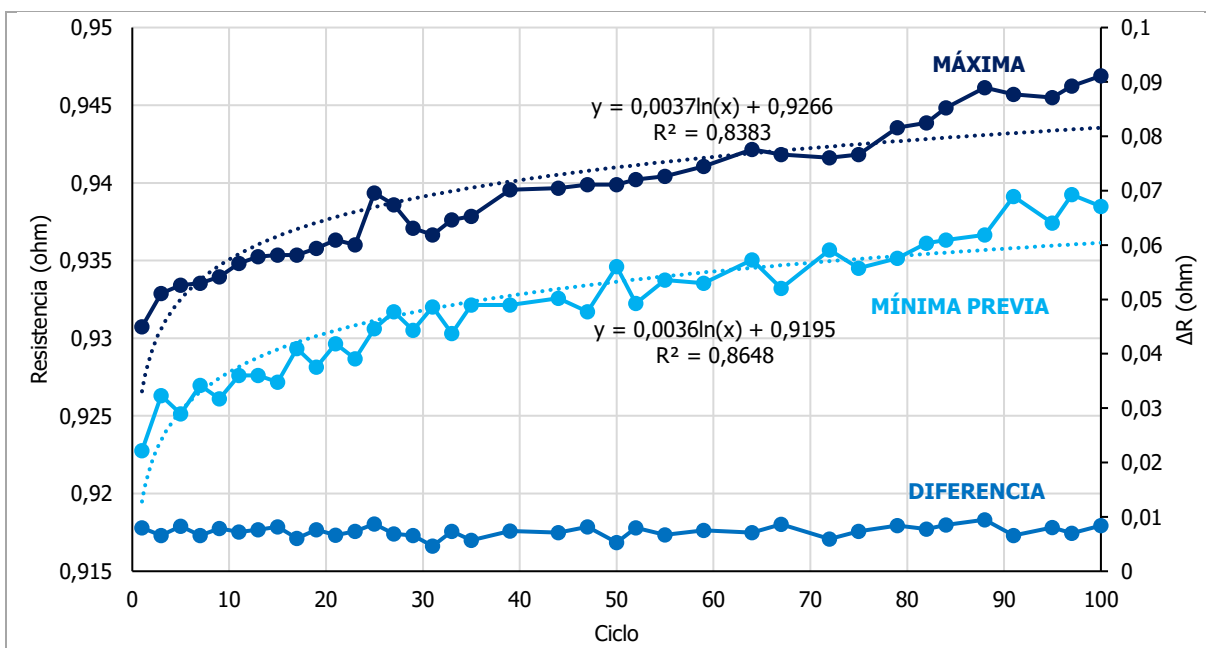


Figura 27. Evolución de la Resistencia máxima, mínima previa y diferencia para 100 ciclos en compresión.

En cuanto al cálculo de la flecha máxima en cada ciclo, para un ΔL de 6 mm y con una distancia inicial entre mordazas de 25,49 mm, resulta $f = 3,74$ mm. Además, aproximando la deformada a un arco, se obtiene un radio de curvatura $R_{curv} = 4,90$ mm.

En consecuencia, tras los ensayos realizados es posible asegurar que los *heaters* diseñados por el *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica (DEEEA)* de la *Universitat Rovira i Virgili* presentan una gran estabilidad frente al ciclado y con una variación de resistencia eléctrica en el ciclado muy controlable, haciéndolos perfectamente aptos para su aplicación como *heater* en los actuadores mecánicos poliméricos desarrollados.

6.2.6 Pruebas experimentales preliminares del actuador mecánico polimérico

En el presente apartado se muestran los resultados que se obtienen de las pruebas experimentales para los modelos de Actuador-01 (Serpentín rectangular) y Actuador-02 (Serpentín rectangular reducido), para diferentes valores de corriente de calefacción (I_{heat}), que permiten validar tanto la respuesta eléctrica del *heater* como la respuesta térmica y mecánica del conjunto, con vistas a la construcción de la etapa de control. Estos ensayos preliminares se realizaron en el Laboratorio 334 del *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica (DEEEA)* de la *Universitat Rovira i Virgili* con una fuente de alimentación controlada de manera manual.

Para llevar a cabo estas pruebas experimentales preliminares, únicamente se requiere del actuador y una fuente de alimentación de corriente continua. Básicamente, la prueba consiste en alimentar al *heater* directamente desde la fuente de alimentación con un valor constante de corriente eléctrica. Siguiendo la *Ley de Joule*, cuando dicha corriente eléctrica atraviesa la malla conductora, se disipa calor, aumentando la temperatura del elemento y variando de forma lineal su valor resistivo. Por tanto, entregando un valor invariante de intensidad de corriente y midiendo el nivel de tensión eléctrica, es posible determinar por simple *Ley de Ohm*, el valor de la resistencia en cada instante temporal. Conociendo el valor de la resistencia inicial del *heater*, el coeficiente de temperatura de la tinta de plata empleada ($\alpha_{heater} = 0,002209 K^{-1}$) y la temperatura ambiente, es posible monitorizar la temperatura a la que se encuentra la rejilla conductora en todo momento.

6.2.6.1 Actuador-01: Serpentín rectangular

El ensayo se divide en tres pruebas, cada una realizada a un valor diferente de corriente de calefacción (I_{HEAT}). En la *Figura 28*, se muestra la evolución de la temperatura en el *heater* (T_{HEAT}) para las distintas pruebas realizadas:

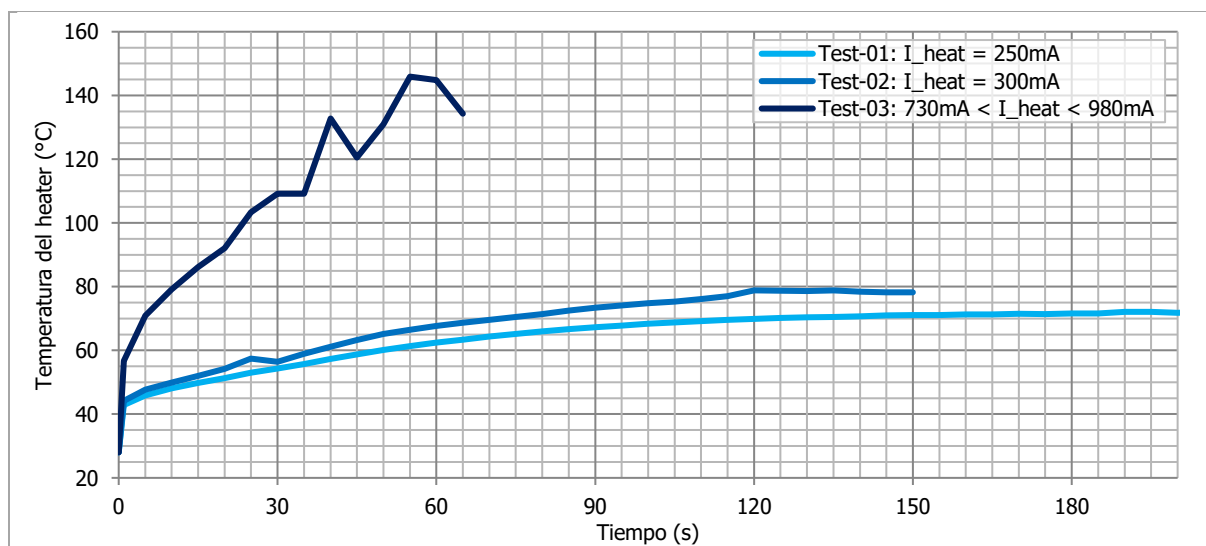


Figura 28. Evolución de la temperatura en el *heater* del Actuador-01 para diferentes valores de corriente de calefacción (I_{HEAT}).

Nota: Véase en el apartado 10.3.1 *Resultados experimentales preliminares del Actuador-01* del Documento Básico *Anexos* las tablas donde se recogen los datos relativos a las gráficas presentadas.

De la *gráfica* anterior se desprende que:

- En referencia al Test-01, donde se entrega al *heater* una corriente de valor de 250 mA , se decide suspender la prueba con anterioridad a la activación completa del actuador, dado que a lo largo de los 300 s que se extiende este primer ensayo, no se consigue alcanzar la temperatura pretendida en la malla conductora.
- En la segunda prueba (Test-02), se aumenta la intensidad de corriente hasta un valor de 300 mA , donde se alcanza en la malla conductora un delta de temperatura de $50,25\text{ °C}$ durante 150 s , logrando el cambio de forma del actuador. En la *Figura 29*, se muestra de forma gráfica la evolución de la respuesta del actuador durante el desarrollo de este ensayo.
- Por lo que refiere al Test-03, se persigue conocer si el Actuador-01 puede soportar una alimentación del orden de 1 A . Por este motivo, se decide iniciar el ensayo partiendo de un valor de 730 mA hasta alcanzar 980 mA (donde el incremento de la corriente de calefacción se regula de forma manual). Durante un periodo de tiempo de 65 s se consigue un incremento de temperatura de $106,27\text{ °C}$ en la malla conductora, asegurando el cambio de forma del actuador.

En la *Figura 29*, se muestra la evolución de la respuesta a la memoria de forma del Actuador-01 para el Test-02, realizado para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$:

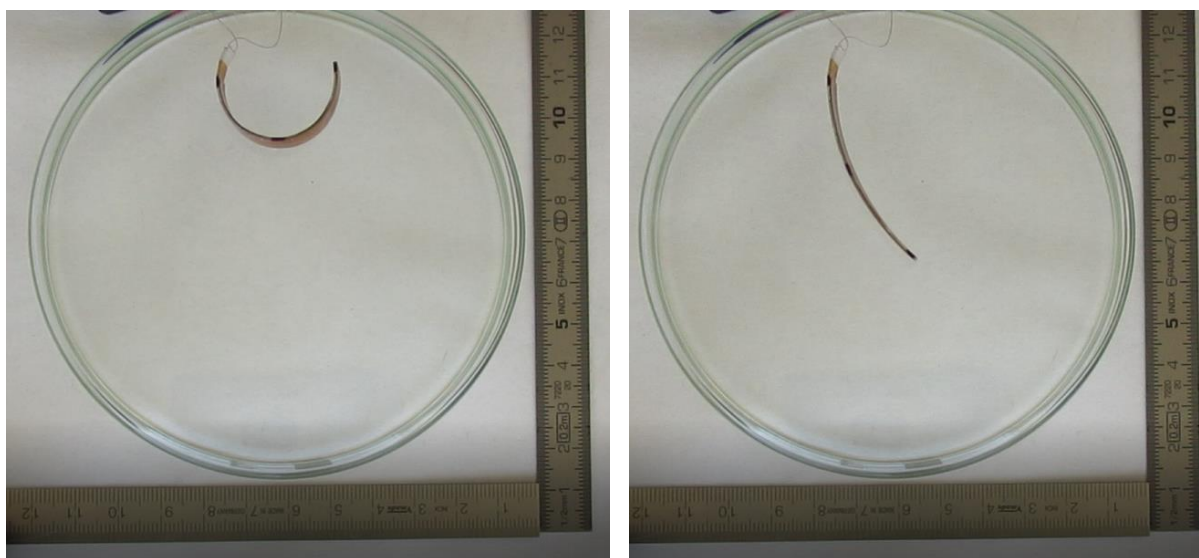


Figura 29. Evolución de la respuesta a la memoria de forma del Actuador-01 durante el desarrollo del Test-02 para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$: (a) Imagen del actuador polimérico para $t = 0'00''$; (b) Imagen del actuador polimérico para $t = 2'30''$.

En consecuencia, tras las pruebas experimentales preliminares realizadas es posible asegurar que el Actuador-01 diseñado por el *Departament de Enginyeria Mecànica* y el *Departament de Química Analítica i Química Orgànica* de la *Universitat Rovira i Virgili* en colaboración con el *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica* de la *Universitat Rovira i Virgili* es apto para su aplicación como actuador mecánico polimérico con memoria de forma, en base a los criterios de funcionalidad pretendidos.

6.2.6.2 Actuador-02: Serpentin rectangular reducido

El ensayo se divide en cuatro pruebas, cada una realizada a un valor diferente de corriente de calefacción (I_{HEAT}). En la *Figura 30*, se muestra la evolución de la temperatura en el *heater* (T_{HEAT}) para las distintas pruebas realizadas:

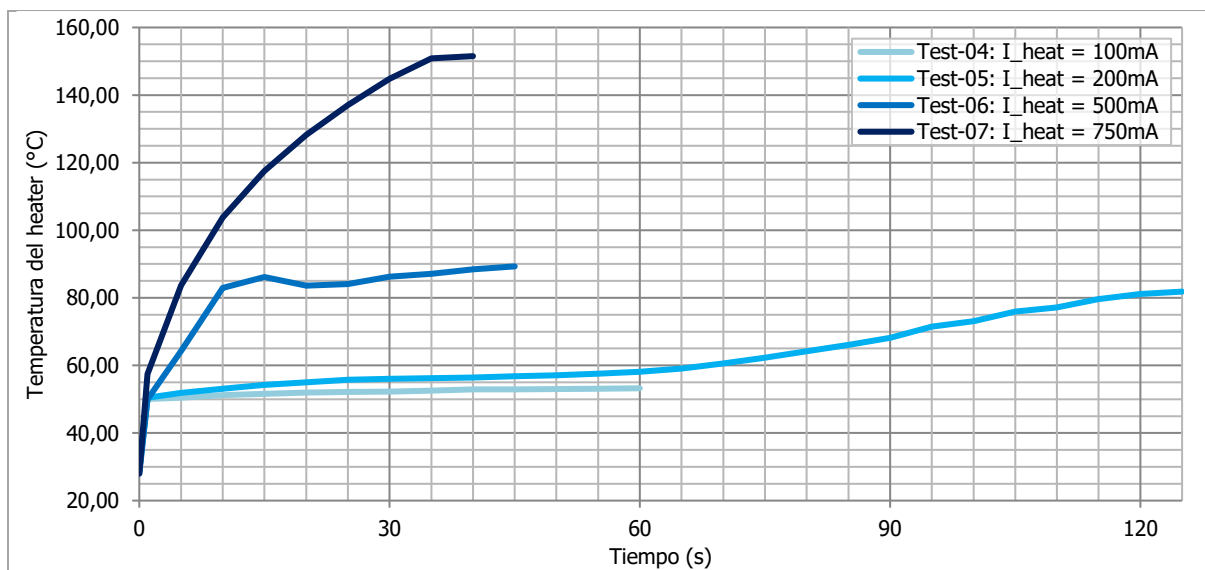


Figura 30. Evolución de la temperatura en el *heater* del Actuador-02 para diferentes valores de corriente de calefacción (I_{HEAT}).

Nota: Véase en el apartado 10.3.2 *Resultados experimentales preliminares del Actuador-02* del Documento Básico *Anexos* las tablas donde se recogen los datos relativos a las gráficas presentadas.

De la *gráfica* anterior se desprende que:

- En referencia al Test-04, donde se entrega al *heater* una corriente de valor de 100 mA, se decide suspender la prueba con anterioridad a la activación del actuador, dado que a lo largo de los 60 s que se extiende este primer ensayo, únicamente se consigue un delta de temperatura en la malla conductora de 24,24 °C.
- En la segunda prueba (Test-05), se aumenta la intensidad de corriente hasta un valor de 200 mA, donde se alcanza un delta de temperatura en la malla conductora de 52,85 °C durante 125 s, logrando el cambio de forma del actuador.
- Por lo que refiere al Test-06, se alimenta el *heater* del actuador con un valor de corriente de 500 mA, donde durante un periodo de tiempo de 45 s se consigue un incremento de temperatura en la malla conductora de 61,30°C, provocando el cambio de forma del actuador. En la *Figura 31*, se muestra de forma gráfica la evolución de la respuesta del actuador durante el desarrollo de este ensayo.
- En el Test-07, se suministra a la malla conductora del actuador un valor de corriente de 750 mA. Pese a que rápidamente (aproximadamente 5s) se alcanza la temperatura de activación, se decide mantener dicho nivel de intensidad durante un espacio de tiempo adicional de 35s, donde se alcanza en el *heater* un delta de temperatura superior a los 120 °C.

- Finalmente, a pesar de que no se recogen los resultados de la prueba, se persigue conocer si el actuador puede soportar una alimentación del orden de 1 A. Pese a que no se observa a simple vista la rotura de las pistas que dibujan la malla conductora, dicha prueba provoca un deterioro considerable del conjunto del actuador polimérico (tanto *heater* como material epoxi).

En la *Figura 31*, se muestra la evolución de la respuesta a la memoria de forma del Actuador-02 para el Test-06, realizado para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$:



Figura 31. Evolución de la respuesta a la memoria de forma del Actuador-02 durante el desarrollo del Test-06 para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$: (a) Imagen del actuador polimérico para $t = 0'00''$; (b) Imagen del actuador polimérico para $t = 0'40''$.

En consecuencia, tras las pruebas experimentales preliminares realizadas es posible asegurar que el Actuador-02 diseñado por el *Departament de Enginyeria Mecànica* y el *Departament de Química Analítica i Química Orgànica* de la *Universitat Rovira i Virgili* en colaboración con el *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica* de la *Universitat Rovira i Virgili* es apto para su aplicación como actuador mecánico polimérico con memoria de forma, en base a los criterios de funcionalidad pretendidos.

6.3 Diseño de la etapa de control

En el presente apartado se exponen los pasos que se siguen en la fase de diseño e implementación del dispositivo para el control del actuador mecánico polimérico.

En primer lugar se introducen las especificaciones a cumplir en relación con las modalidades de activación planteadas por los promotores del proyecto. Seguidamente, se describen dos posibles propuestas para conformar dicha etapa. La primera alternativa está basada en la electrónica analógica (control con variables continuas), mientras que la segunda opción está basada en la electrónica digital (control con variables discretas). A través del programa *PSIM*, se realizan las simulaciones eléctricas necesarias para validar el comportamiento de ambas propuestas descritas de forma teórica.

A la hora de decantarse por la solución más conveniente para la aplicación proyectada, se plantean las principales ventajas e inconvenientes que presentan ambas propuestas. Una vez se decide por una de las alternativas sugeridas, se diseña la etapa de control completa y se seleccionan los componentes necesarios, traduciendo el circuito teórico planteado a su respectivo esquemático real, donde se describen de forma detallada los distintos bloques que conforman el dispositivo de control. Finalmente, se implementa el diseño propuesto.

6.3.1 Propuestas para la etapa de control

Se presenta en la *Tabla 5* las especificaciones a cumplir por dispositivo de control, con el propósito de gestionar la activación del actuador en función de las modalidades pretendidas:

Tensión de alimentación (V_{BATT}): De 5 V hasta 15 V
Corriente de calefacción (I_{HEAT}): De 100 mA hasta 1 A

Tabla 5. Especificaciones de la etapa de control.

En base a las especificaciones mostradas con anterioridad, se describen a grandes rasgos dos posibles propuestas para conformar la etapa de control:

- i) La primera alternativa propuesta (Propuesta-I) consiste en una etapa *PFC* (*Power Factor Correction*) activa *DC/DC* y una etapa reductora en cascada, donde la etapa de corrección del factor de potencia presenta un comportamiento de resistor libre de pérdidas, transmitiendo idealmente la totalidad de la potencia de entrada a su salida. Ambas etapas de conmutación se efectúan a través de controles analógicos independientes de corriente por histéresis mediante la técnica de control *SMC* (*Sliding Mode Control*).
- ii) La segunda alternativa propuesta (Propuesta-II) consiste en una arquitectura de gran simplicidad basada en una placa de desarrollo que controla, a través de una salida digital por modulación por ancho de pulsos, un *load switch*. Este componente puede asimilarse a un relé electrónico, en otras palabras, actúa como un interruptor permitiendo el paso de la corriente eléctrica al actuador en función de la modalidad de control seleccionada.

A continuación, se describen de forma detallada ambas propuestas.

6.3.1.1 Propuesta-I: *Boost-Buck*

La primera alternativa propuesta para la conformación del dispositivo de control consiste en una etapa *PFC (Power Factor Correction)* activa *DC/DC* y una etapa reductora en cascada (véase *Figura 32*). La etapa *PFC* presenta un comportamiento de *loss free resistor (LFR)*, transmitiendo idealmente la totalidad de la potencia de entrada a su salida (topología *POPI*). La etapa posterior corresponde a un convertidor reductor que permite la regulación de la corriente que se suministra al *heater* en un rango de valores comprendidos entre 100 mA hasta 1 A. Ambas etapas de conmutación se gestionan a través de controles analógicos independientes de corriente por histéresis mediante la técnica de control *SMC (Sliding Mode Control)*. Este tipo de control mantiene al convertidor funcionando en modo deslizante en torno al punto de equilibrio de una de las variables de estado del sistema delimitado por unos márgenes de histéresis.

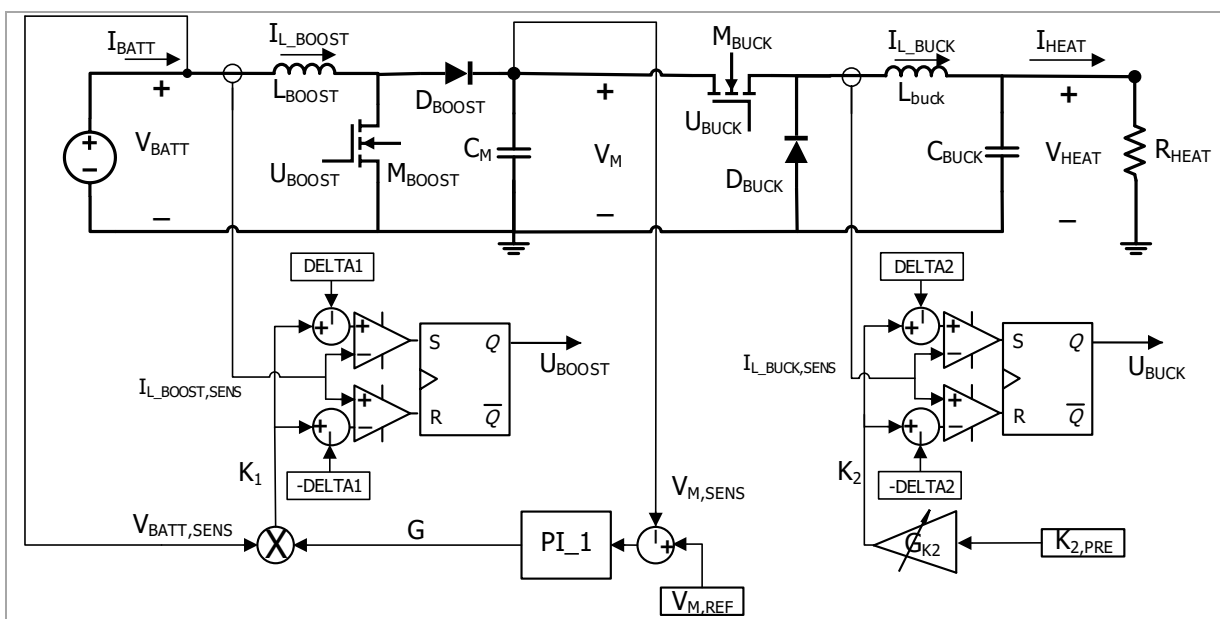


Figura 32. Esquema eléctrico de la Propuesta-I (*Boost-Buck*).

Nota: $I_{L_{BOOST},SENS}$, G , $I_{L_{BUCK},SENS}$, $K_{2,PRE}$ y K_2 son señales de tensión.

La etapa *Boost* se basa en el concepto de resistor libre de pérdidas, definido en [12] como un pre-regulador que, visto desde la entrada, dota a la carga un comportamiento muy próximo al resistivo, aprovechando de esta manera la mayor transferencia de potencia. Al mismo tiempo, se consigue una proporcionalidad entre la tensión y la intensidad de entrada, evitando el desfase de ambas señales.

La modelización ideal del *LFR* consiste en un bipuerto que presenta una resistencia emulada o virtual (R_E) en el puerto de entrada y una fuente de potencia en el puerto de salida (P), de forma que se transmite idealmente toda la potencia de entrada absorbida por el resistor al puerto de salida (topología *POPI*). Además, la resistencia emulada, que por simple *Ley de Ohm* es la relación entre tensión y corriente de entrada, puede ser controlada regulando así la transferencia de potencia del puerto de entrada al de salida.

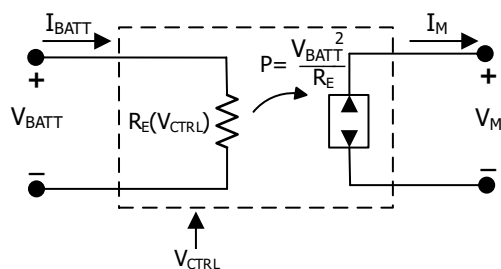


Figura 33. Modelo del circuito equivalente del *LFR*.

Varias estructuras de convertidores pueden ser sintetizadas con los principios del *LFR*, dependiendo del control implementado para lograrlo y el modo de conducción del convertidor [13]. Debido a la simplicidad y buenas prestaciones de regulación de tensión, se selecciona el convertidor *Boost* como etapa *PFC* [14]. A este convertidor se le sintetiza un comportamiento de *LFR* mediante un control analógico de corriente por histéresis que trabaja a frecuencia variable.

El convertidor *Boost* eleva la tensión de salida respecto la tensión de entrada mediante los estados de conmutación introducidos por el control, donde la relación de tensiones de entrada y salida en estado estacionario es equivalente a la expresión del convertidor *Boost* operando en *CCM*, donde D_{BOOST} representa el ciclo de trabajo:

$$\frac{V_M}{V_{BATT}} = \frac{1}{1 - D_{BOOST}} \quad (02)$$

Por lo que refiere a la etapa reductora, a pesar de la existencia de diferentes alternativas, se propone el convertidor *Buck* como etapa secundaria *DC/DC* previa a la alimentación del actuador. Añadir que en la presente aplicación no se requiere controlar la componente de tensión continua de salida, sino permitir al usuario del dispositivo una regulación del nivel de la corriente de salida durante el periodo de alimentación del actuador.

Destacar que en el convertidor *Buck* la relación entre la intensidad de entrada y salida es inversamente proporcional a la relación de sus tensiones en estado estacionario, es decir, se produce una elevación de la corriente de salida respecto su corriente de entrada que se traduce en una ganancia de la corriente de calefacción (I_{HEAT}), obteniendo así un mejor rendimiento en la etapa de control. Esta relación del nivel de corriente y tensión entre la entrada y la salida de la etapa se consigue a través de los estados de conmutación introducidos por el control. Para la aplicación proyectada se plantea la conmutación en *CCM*, de modo que la relación de tensiones de entrada y salida en estado estacionario es la siguiente, donde D_{BUCK} representa el ciclo de trabajo:

$$\frac{V_{HEAT}}{V_M} = D_{BUCK} \quad (03)$$

Tal y como se comenta en líneas anteriores, ambas etapas de conmutación se gestionan a través de controles analógicos independientes de corriente por histéresis mediante la técnica de control *SMC* (*Sliding Mode Control*). Esta técnica de control de estructura variable trata de fijar una variable de estado del sistema o varias en una superficie o trayectoria del espacio

de estados $S(x, t)$, intentando delimitar esta superficie dentro de un rango de histéresis. La conmutación de los interruptores tiene lugar cuando la variable de estado seleccionada sobrepasa los límites de superficie, forzándola a evolucionar sobre ésta. Dicha superficie induce un régimen deslizante sobre la variable controlada una vez alcance la superficie y opere en torno a su punto de equilibrio, permaneciendo inalterable a las variaciones en los parámetros de la planta y a las perturbaciones externas, propiciando de este modo la reducción del orden del sistema.

Para facilitar la comprensión de dicha técnica de control, en la *Figura 34*, a modo de ejemplo, se ilustra de forma gráfica la evolución de la variable de estado $i_{L_{BUCK}}(t)$ (corriente en el inductor de la etapa *Buck*), la superficie $S_2(t)$ y la lógica de control $u_2(t)$, donde es posible apreciar que los cambios de estado en la superficie de deslizamiento coinciden en sobrepasar los límites de histéresis.

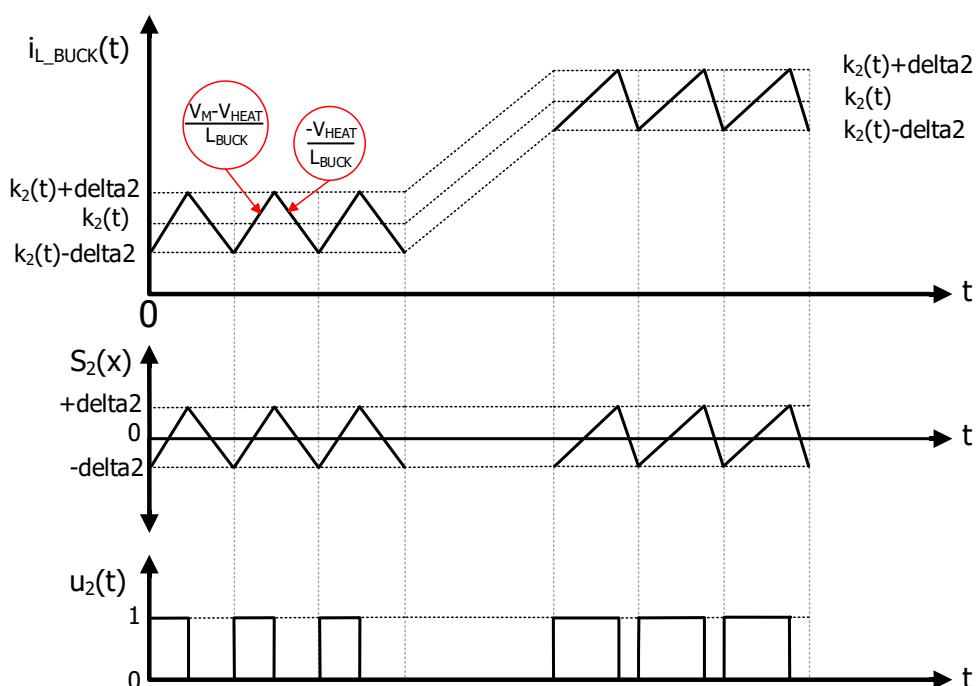


Figura 34. Evolución de la variable de estado $i_{L_{BUCK}}(t)$ (corriente de conmutación en la bobina del *Buck*), superficie de deslizamiento con margen de histéresis $S_2(t)$ y lógica de control $u_2(t)$.

Finalmente se presenta en el apartado *10.4 Simulaciones eléctricas para la Propuesta-I (Boost-Buck)* del Documento Básico *Anexos*, las simulaciones efectuadas mediante el software *PSIM* para validar el comportamiento de la etapa de control propuesta. Por un lado, puede visualizarse en la *Figura A68* el circuito implementado para efectuar las simulaciones. Por otro lado, en las *Figuras A69, A70 y A71*, se demuestra el correcto funcionamiento del *Boost* como *LFR* (cumpliéndose la relación que se establece entre tensión y corriente de entrada a través de la conductancia) y se presenta la evolución temporal de las señales V_{BATT} , V_M y V_{HEAT} , para diferentes valores de corriente de calefacción (I_{HEAT}) dentro del rango de regulación pretendido.

6.3.1.2 Propuesta-II: *Load switch*

La segunda alternativa que se propone para conformar la etapa para el control termoeléctrico del actuador mecánico polimérico consiste en una arquitectura más sencilla, flexible y versátil respecto a la presentada con anterioridad. Básicamente, está conformada por una placa de desarrollo (que contiene un microcontrolador capaz de ejecutar el *software* para el control termoeléctrico del actuador) y un interruptor de carga integrado (véase *Figura 35*). Este *load switch*, que actúa como un relé electrónico permitiendo el encendido y apagado de la fuente de alimentación, es controlado por el microcontrolador de la placa de desarrollo a través de una señal modulada por ancho de pulsos desde una de las salidas digitales, permitiendo la regulación de la corriente eléctrica suministrada al *heater* entre valores comprendidos de 100 mA hasta 1 A, así como dejar de suministrar dicha corriente una vez el control detecta que el actuador polimérico ha alcanzado la temperatura requerida.

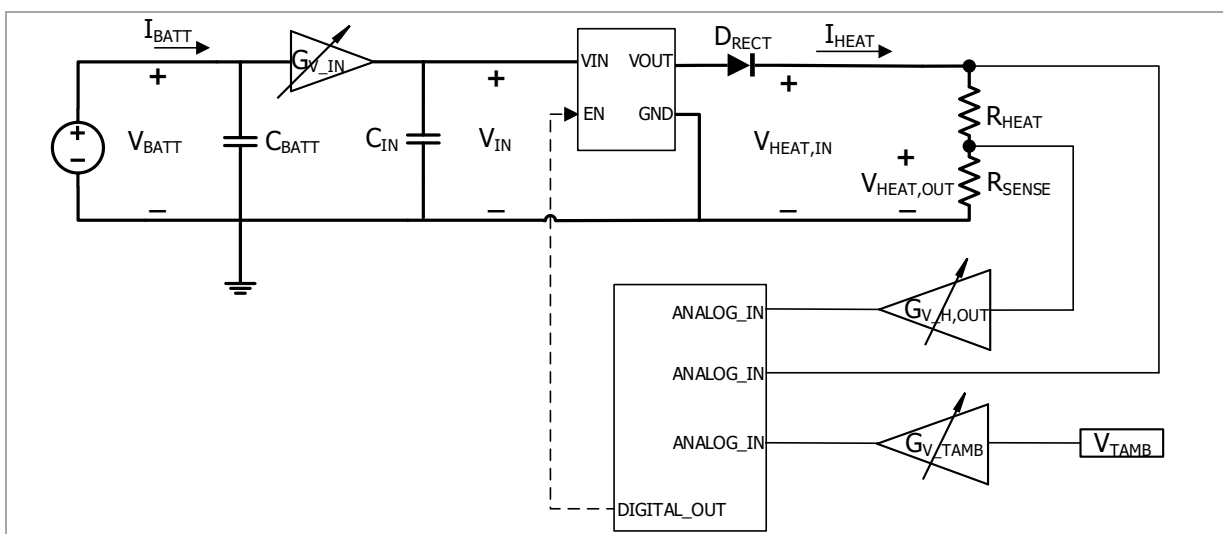


Figura 35. Esquema eléctrico de la Propuesta-II (*Load switch*).

En referencia al encendido y apagado de la fuente de alimentación, tal y como se comenta con anterioridad, dicha conmutación se realiza mediante un interruptor de carga integrado o *load switch*, cuyo funcionamiento se basa en habilitar/deshabilitar el propio dispositivo a través del pin de *EN*, el cual activa/desactiva un *FET*, que permite el paso de la corriente desde el pin de entrada al pin de salida. Este componente incluye adicionalmente protección contra corriente inversa, limitación de corriente y apagado térmico.

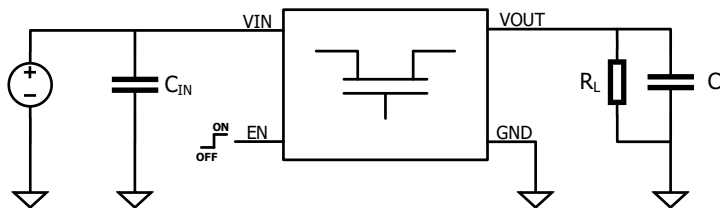


Figura 36. Diagrama general del circuito del interruptor de carga ^[15].

Nota: De forma general, la mayoría de los interruptores de carga constan de cuatro pines: tensión de entrada (V_{IN}), tensión de salida (V_{OUT}), *enable* (EN) y tierra (GND).

El estado del *FET* de “paso” del *load switch* está gobernado por una señal lógica externa proveniente de la placa de desarrollo, componente que puede definirse como una computadora completa sobre una única placa de circuito impreso. Básicamente, dicho dispositivo debe de disponer de un microcontrolador capaz de ejecutar el código programado para el control del conjunto proyectado (en función de la modalidad de actuación seleccionada), así como una serie de entradas analógicas para la monitorización de las diferentes señales sensadas y una salida digital *PWM* conectada al *enable* del interruptor de carga, para la regulación del valor de corriente de calefacción (I_{HEAT}), a través de la relación (*Ley de Ohm*) que se establece entre la tensión de entrada (V_{IN}) y el valor de resistencia del *heater* (R_{HEAT}).

Añadir que la modulación de ancho de pulso (*PWM*, por sus siglas en inglés *pulse-width modulation*) de una señal es una técnica que logra producir el efecto de una señal analógica sobre una carga, a partir de la variación de la frecuencia y ciclo de trabajo de una señal digital. Por un lado, el ciclo de trabajo (D) describe la cantidad de tiempo que la señal se encuentra en un estado lógico alto, como un porcentaje del tiempo total sobre un ciclo completo o periodo (T). Por otro lado, la frecuencia determina cómo de rápido se completa un ciclo. Por tanto, al cambiar una señal de estado alto a bajo con una tasa lo suficientemente rápida y con un ciclo de trabajo determinado, es posible aproximar el comportamiento de la salida como una señal analógica constante cuando está siendo aplicada a algún dispositivo cuya constante de tiempo es mucho mayor que el periodo (T) de la señal *PWM*.

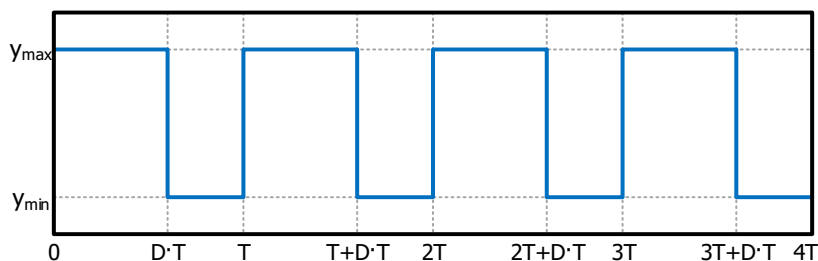


Figura 37. Señal cuadrática de amplitud acotada (y_{min} , y_{max}).

Ejemplo: Para crear una señal de 3V dada una fuente digital que puede ser alta (5 V) o baja (0 V), puede utilizarse un *PWM* con un ciclo de trabajo del 60%; en otras palabras, una señal de 5 V activa el 60% del tiempo.

Finalmente, se presenta en el apartado *10.5 Simulaciones eléctricas para la Propuesta-II (Load switch)* del Documento Básico *Anexos* las simulaciones efectuadas mediante el *software PSIM* para validar el comportamiento de la etapa de control propuesta. Por un lado, puede visualizarse en la *Figura A73* el circuito implementado para efectuar las simulaciones. Por otro lado, en las *Figuras A74, A75 y A76*, se presenta la evolución temporal de las señales de tensión V_{BATT} y V_{HEAT} , para diferentes valores de corriente de calefacción (I_{HEAT}) dentro del rango de regulación pretendido.

6.3.1.3 Análisis de alternativas

Una vez presentadas ambas propuestas, que pueden clasificarse como una solución analógica (Propuesta-I) o digital (Propuesta-II), a la hora de decantarse por una u otra alternativa, es necesario plantearse cuales son las ventajas e inconvenientes que presentan ambas propuestas.

De forma general, los sistemas digitales poseen mayor inmunidad al ruido, dado que la información almacenada en formato digital es menos sensible a las alteraciones producidas por las fluctuaciones no deseadas de tensión, permitiendo así obtener una mayor precisión respecto a los circuitos analógicos. Además, se consigue una importante reducción del número de componentes necesarios, facilitándose así su diseño y alcanzando un mayor grado de flexibilidad. A todo lo anterior, hay que añadir una mayor facilidad para el almacenamiento de información y el procesamiento de ésta a una velocidad extraordinaria. En referencia a los inconvenientes que presenta el empleo de sistemas digitales, éstos se reducen fundamentalmente a uno: los sistemas del mundo real son principalmente analógicos. Sin embargo, en caso de que se necesite trabajar con un sistema cuyas entradas sean analógicas, es posible recurrir a conversores analógicos-digitales (*A/D*), pudiendo realizar así el procesado y tratamiento de datos de forma digital.

A todo lo anterior se debe de añadir que en los últimos tiempos, se ha producido un gran crecimiento de compañías que proporcionan herramientas que permiten una considerable simplificación en el trabajo con sistemas digitales, acercando esta tecnología a cada vez más usuarios. Dentro de este conjunto destaca *Arduino*, una compañía *open source* y *open hardware* dedicada al diseño y manufactura de placas de desarrollo de *hardware*. Los diferentes productos de la compañía *Arduino* se basan en una plataforma de computación física de código abierto sobre una simple placa electrónica constituida a partir de un microcontrolador y un entorno de desarrollo. Las principales características son:

- Productos económicos en comparación con otras plataformas de microcontroladores.
- Multiplataforma, es decir, es posible ejecutar el *software* de *Arduino* en los sistemas operativos *Windows*, *MacOS* y *Linux*.
- Entorno de programación simple y claro, suficientemente intuitivo para principiantes y suficientemente flexible para usuarios avanzados.
- Código *software* abierto y extensible, publicado como herramienta de código abierto.
- *Hardware* extensible donde los planos de los módulos están publicados bajo una licencia de *Creative Commons*, permitiendo así la propia constitución, ampliación y mejora del módulo.

En base a todo lo anterior, se decide por implantar la segunda alternativa (Propuesta-II). Puesto que se pretende la construcción de un módulo real, el hecho de optar por una arquitectura más sencilla permite reducir el tiempo de montaje y minimizar la necesidad de depuración de posibles errores del *hardware*. Además, teniendo en cuenta que no se requiere de una gran capacidad de procesamiento, se decide por una placa *Arduino* para la implementación del primer prototipo experimental para el control termoeléctrico del actuador con el coste más acotado posible, siendo el *Arduino Nano* ^[15] la actual revisión que mejor encaja con los requisitos de funcionalidad requeridos.

6.3.2 Diseño de la etapa de control

En el presente apartado se describe el diseño de la etapa de control que constituye la parte del sistema dedicada a la gestión de la alimentación del actuador polimérico en base al modo de activación deseado, traduciendo la propuesta teórica planteada en el apartado 6.3.1.2. *Propuesta-II: Load switch* del presente Documento Básico a su modelo eléctrico, para la posterior implantación.

Seguidamente, se muestra una descripción a grandes rasgos de la etapa de control, acompañada de un esquemático del conjunto (véase *Figura 38*).

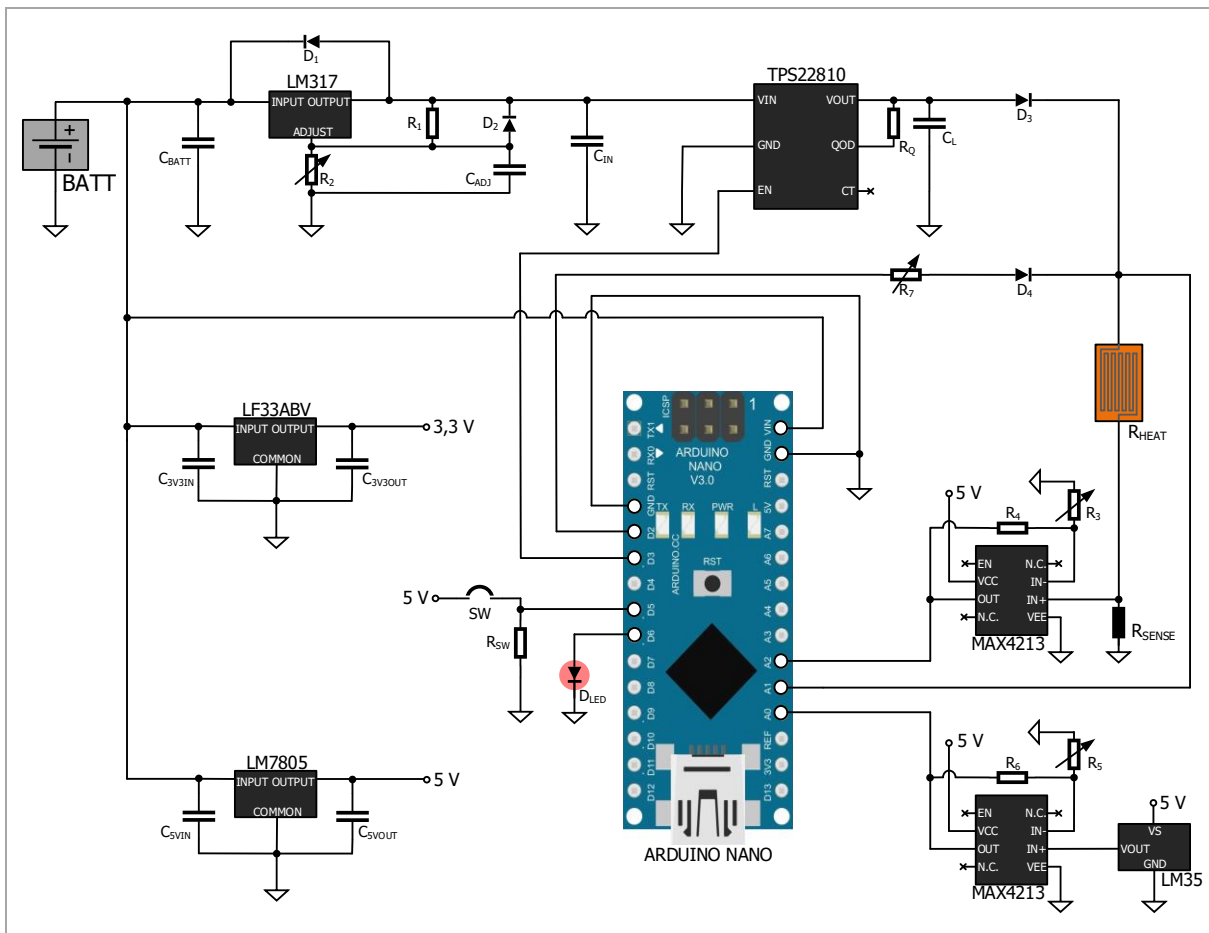


Figura 38. Esquemático de la etapa de control del actuador mecánico polimérico.

En la parte superior izquierda se localiza el borne de entrada donde se conecta la fuente de alimentación o batería (permitiendo un rango de tensión comprendido entre los 7 V hasta los 15 V). En este punto, se conecta el bloque de acondicionamiento, el cual se conforma por tres conjuntos independientes entre sí.

Por un lado, para alimentar los diferentes componentes que constituyen la etapa de control (AOs y sensor de temperatura), se establecen dos fuentes lineales reguladas para la generación de los niveles de tensión de $+3,3 V_{DC}$ y $+5 V_{DC}$. Por otro lado, para adaptar el nivel de tensión variable proveniente de la batería a la etapa de control, se integra un regulador de tensión variable que permite obtener en la salida un rango de valores comprendidos entre 1,25 V hasta 5 V.

A la salida del bloque de acondicionamiento se conecta el bloque de conmutación, basado en un interruptor de carga integrado que, controlado por una señal externa proveniente del microcontrolador de la placa de desarrollo (del bloque de computación y control), permite la gestión del encendido y apagado de la fuente de alimentación que suministra la energía eléctrica necesaria al conjunto. En el pin de salida del *load switch* se dispone de un diodo para bloquear el paso de la corriente eléctrica en el sentido inverso. Posterior al paso por el bloque de conmutación, se conecta el actuador mecánico polimérico.

Para la ejecución de la estrategia de control propuesta, resulta necesario el permanente sensado del valor de resistencia del *heater*. Dicho parámetro puede determinarse en todo momento conociendo la tensión de entrada y de salida del actuador. El valor de tensión sensado a la entrada del actuador se conecta directamente al pin analógico A1 del *Arduino Nano*, mientras que el valor sensado de la tensión de salida del actuador atraviesa una etapa de amplificación no inversora de ganancia $G_{V_{H,OUT}} = 500$, con anterioridad al conexionado en el pin analógico A2. Además, se utiliza un sensor de temperatura que proporciona una tensión de salida proporcional a la temperatura ambiente (parámetro requerido en los instantes iniciales para la estrategia de control). Dicho valor de tensión sensado atraviesa una etapa de amplificación no inversora de ganancia $G_{V_{TAMB}} = 10$, previo a su conexión en el pin analógico A0.

Finalmente, por lo que refiere al bloque de computación, basado en la placa de desarrollo *Arduino Nano*, tal y como se comenta en el párrafo anterior, se conectan a las entradas analógicas los diferentes valores de tensión sensados (adaptados a los márgenes de tensión de dichas entradas para obtener una correcta resolución). En referencia a las salidas, se conecta una salida digital *PWM* (D3) al *enable* del interruptor de carga, para la gestión del encendido y apagado de la fuente de alimentación en función de la modalidad de control seleccionada. Además, para determinar la resistencia inicial del *heater*, se emplea una salida digital (D2) que se activa durante un instante de tiempo determinado, permitiendo el paso de un valor de corriente controlado (del orden de 10 mA), pudiendo así conocer a través del sensado de tensión descrito en las líneas anteriores, el valor de la resistencia inicial. Añadir que se dispone de un pulsador (conectado en el pin digital D5) para controlar el inicio del proceso de calentamiento, así como de un diodo LED (conectado en el pin digital D6) que permite proporcionar información visual acerca del estado del proceso.

A continuación, se describen de forma detallada los diferentes bloques que conforman la etapa de control de actuador (bloque de acondicionamiento, bloque de conmutación, bloque de sensado y bloque de computación y control).

6.3.2.1 Bloque de acondicionamiento

Algunos de los componentes que conforman la etapa de control necesitan ser alimentados con un valor de tensión determinado. Por su sencillez y estabilidad, se generan los valores de tensión de $+3,3 V_{DC}$ y $+5 V_{DC}$ a través de fuentes lineales reguladas alimentadas directamente desde el borne de entrada de la batería. Además, para adaptar el nivel de tensión variable proveniente de la batería a la etapa de control para una correcta regulación de la corriente de calefacción del *heater* (según la modalidad de activación elegida), se integra un regulador de tensión variable que permite obtener en la salida un rango de valores comprendidos entre $1,25 V$ hasta $5 V$.

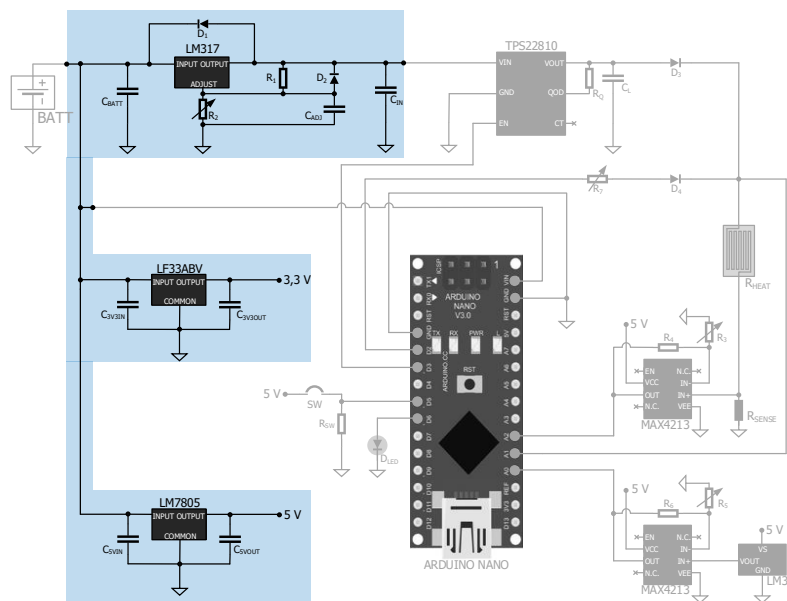


Figura 39. Esquemático de la etapa de control, donde se diferencia el bloque de acondicionamiento.

6.3.2.1.1 Generación de $+5 V_{DC}$ y $+3,3 V_{DC}$

La existencia de componentes que deben de ser alimentados a una tensión de $+3,3 V_{DC}$ y $+5 V_{DC}$ hace necesaria la integración de fuentes lineales reguladas en bornes de la fuente de alimentación.

Por un lado, para la generación de una tensión continua de $3,3 V$, la tensión de la batería es filtrada por un condensador de película de poliéster (C_{3V3IN}) de $100 nF$. Esta alimentación en continua es regulada por el regulador lineal LF333ABV (U1). Seguidamente, se coloca un condensador electrolítico de aluminio (C_{3V3OUT}) de $2,2 \mu F$, donde a su salida se obtiene la tensión deseada.

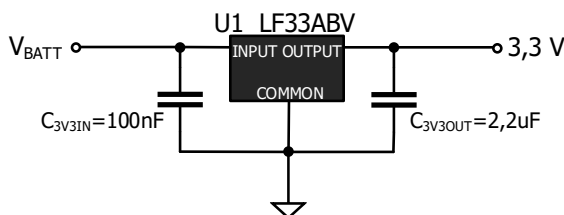


Figura 40. Esquema circuital para la generación de la tensión $+3,3 V_{DC}$ mediante regulador lineal LF333ABV.

Por otro lado, para obtener una tensión continua de 5 V, la tensión de la batería es filtrada por un condensador de película de poliéster (C_{5VIN}) de 330 nF. Esta alimentación en continua es regulada por el regulador lineal LM7805 (U2). Seguidamente, se coloca un condensador de película de poliéster (C_{5VOUT}) de 100 nF, donde a su salida se obtiene la tensión deseada.

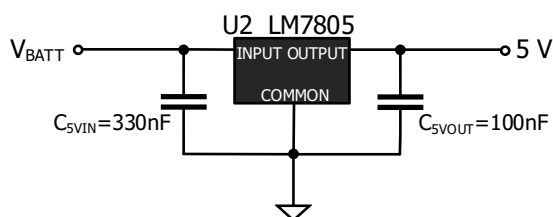


Figura 41. Esquema circuital para la generación de la tensión +5 V_{DC} mediante regulador lineal LM7805.

6.3.2.1.2 Regulación de la tensión de entrada

Para otorgar una mayor flexibilidad al dispositivo, es posible alimentar la etapa de control en un rango entre 7 V hasta 15 V (donde se encuentran comprendidos los valores más usuales de baterías comerciales). Dado que el valor de corriente de calefacción se establece a través de la relación (*Ley de Ohm*) entre la tensión de entrada y la resistencia del *heater* del actuador, siendo los valores típicos de resistencia de la malla conductora para las dimensiones proyectadas del orden de 4,5 Ω para el Actuador-01 y de 2,5 Ω para el Actuador-02, se considera conveniente a fin de limitar la corriente de calefacción a 1 A (valor máximo de corriente eléctrica pretendido por el promotor), la reducción del valor de tensión de entrada en un rango entre 1,25 V a 5 V. Por este motivo se requiere de la integración de un regulador de tensión variable en bornes de la fuente de alimentación.

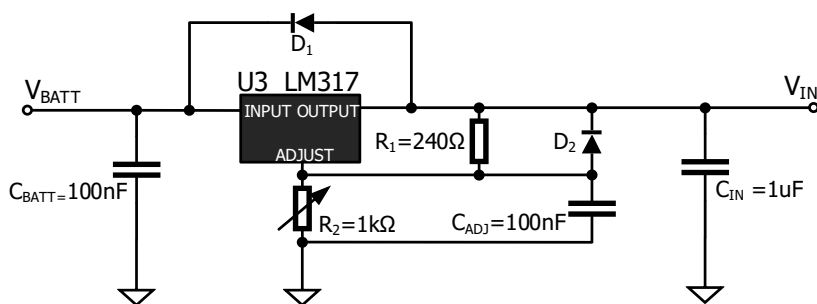


Figura 42. Esquema circuital para la regulación de la tensión de entrada mediante regulador LM317.

Para la generación del rango de tensión pretendido (1,25 V a 5 V), la tensión de la batería es filtrada por un condensador de película de poliéster (C_{BATT}) de 100 nF. Esta alimentación en continua es regulada por el regulador ajustable LM317 (U3). La resistencia fija de valor de 240 Ω (R_1) y la resistencia variable de 1 kΩ (R_2) son necesarias para configurar la tensión de salida del bloque de acondicionamiento, donde se calcula V_{IN} siguiendo la expresión (04), siendo I_{ADJ} típicamente 50 μA (negligible en la mayoría de las aplicaciones):

$$V_{IN} = V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2 \approx 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (04)$$

Se coloca en la salida un condensador de película de poliéster (C_{IN}) de $1 \mu F$ para mejorar la respuesta transitoria. Destacar que el condensador C_{ADJ} reduce la amplificación del rizado, recomendándose su uso a medida que el nivel de tensión se establece en valores superiores. Se recomienda el diodo de protección D_2 si se emplea C_{ADJ} , proporcionando el diodo una ruta de descarga de baja impedancia para evitar que el condensador se descargue en la salida del regulador. Del mismo modo, se recomienda el diodo de protección D_1 si se utiliza C_{IN} , a fin de proporcionar una ruta de descarga de baja impedancia.

6.3.2.2 Bloque de conmutación

A fin de conseguir el nivel de corriente de calefacción (I_{HEAT}) requerido en función de la modalidad de calentamiento seleccionada, tal y como se comenta en líneas anteriores, se debe considerar que dicho parámetro se define mediante la relación entre la variación de la tensión de entrada (V_{IN}) y el valor de la resistencia del *heater* (R_{HEAT}), donde en el bloque de conmutación (véase *Figura 43*), se controla el nivel de la tensión de entrada a través de la gestión del encendido y apagado de la fuente de alimentación.

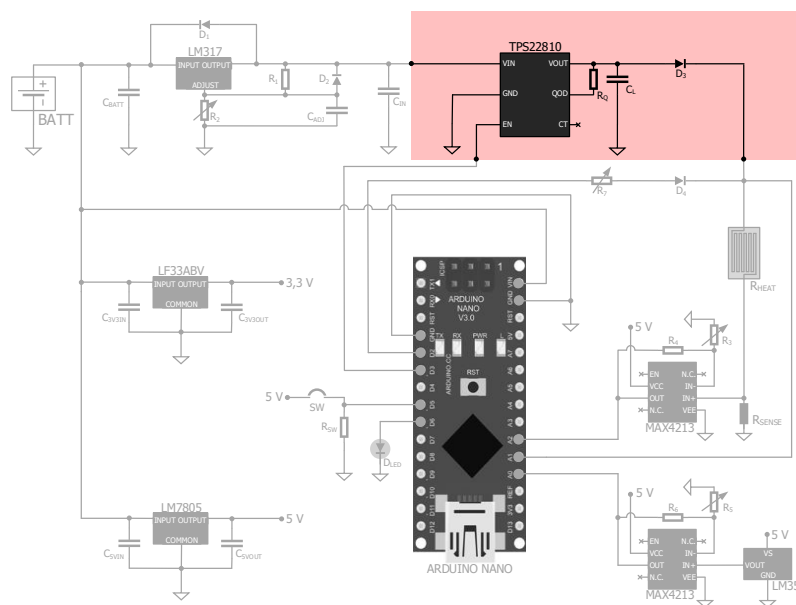


Figura 43. Esquemático de la etapa de control, donde se diferencia el bloque de conmutación.

Para ello se implementa un interruptor de carga integrado (*load switch*) controlado por una señal externa *PWM* proveniente del microcontrolador (salida digital D3 del *Arduino Nano*). Mediante esta técnica, a partir de la variación de la frecuencia y el ciclo de trabajo, se logra producir el efecto de una señal analógica constante sobre la carga (malla conductora del actuador), dado que al cambiar una señal de estado alto a bajo con una tasa lo suficientemente rápida, se obtiene un valor de tensión eficaz determinado en los terminales de salida del componente (con una relación cuadrática respecto al ciclo de trabajo).

Para la conmutación de la señal de entrada, se emplea el TPS22810 (U_4), un interruptor de carga de un solo canal con tiempo de subida configurable y con descarga rápida de salida (*QOD*) integrada. Además, el dispositivo cuenta con apagado térmico para proteger el dispositivo contra altas temperaturas, por tanto, el área segura de operación del dispositivo

está protegida inherentemente. El dispositivo contiene un *MOSFET* de canal N que puede funcionar en un rango de tensión de entrada de 2,7 V a 18 V, admitiendo una corriente máxima de 3 A. En base al *datasheet* proporcionado por el fabricante, se establece el siguiente esquema circuital (véase *Figura 44*), donde se añade una resistencia de valor fijo de 470 Ω (entre los pines VOUT y QOD), así como un condensador electrolítico de aluminio (C_L) de 22 μF en el pin de salida. Añadir que para bloquear el paso de la corriente eléctrica en el sentido inverso, se dispone de un *ultra fast diode* (D_3), previo a la conexión del bloque de conmutación con el actuador mecánico polimérico.

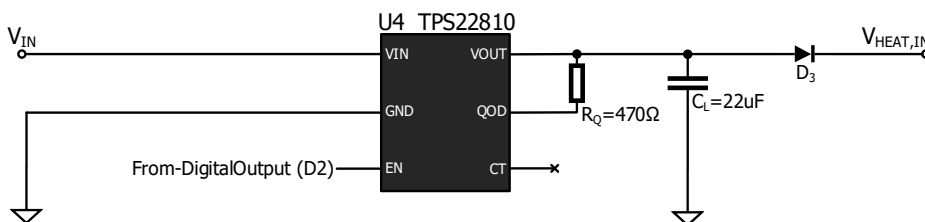


Figura 44. Esquema circuital para la conmutación de la señal de entrada mediante el interruptor de carga.

6.3.2.3 Bloque de sensado

Para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo termoeléctrico es necesario conocer en todo momento diferentes parámetros de control, como son la tensión de entrada ($V_{HEAT,IN}$) y de salida ($V_{HEAT,OUT}$) del *heater* del actuador por tal de determinar el valor de resistencia de la malla conductora (R_{HEAT}), así como la temperatura ambiente.

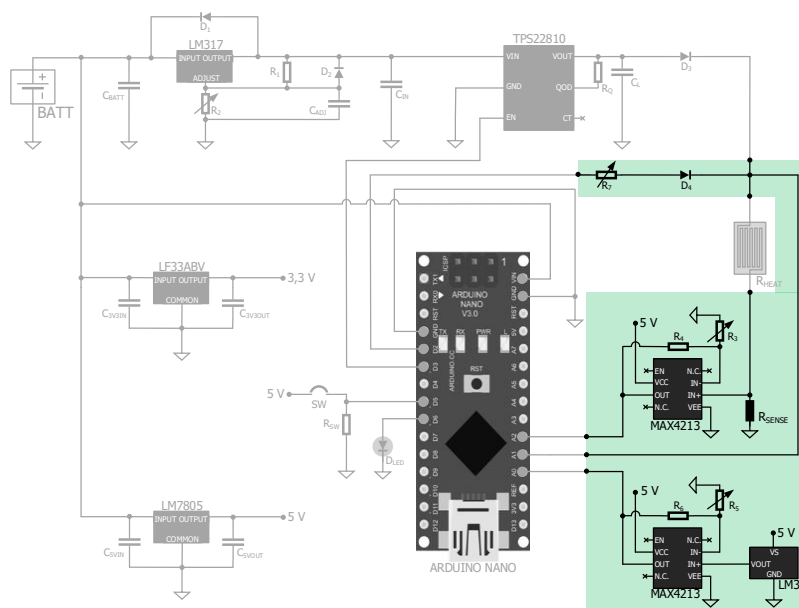


Figura 45. Esquemático de la etapa de control, donde se diferencia el bloque de sensado.

Nota: Cuando se realiza una lectura analógica a través de *Arduino*, la función *analogRead* proporciona un valor entre 0 y 1023 (1024 valores posibles), devolviendo 0 en caso de tener 0 V en la entrada sensada, mientras que devuelve 1023 si se tiene 5 V.

En el bloque de sensado (véase *Figura 45*), se lleva a cabo la adquisición de dichas señales y su posterior acondicionamiento, es decir, la adaptación a los márgenes de tensión de las entradas analógicas del *Arduino Nano* para obtener una correcta resolución.

6.3.2.3.1 Sensado de la resistencia del actuador

Por lo que refiere a la monitorización del valor de resistencia del *heater* (R_{HEAT}), se establece una estructura de divisor de tensión, donde se dispone de una resistencia de sensado (R_{SENSE}) de $10\text{ m}\Omega$. Tal y como se comenta en líneas anteriores, es necesario el sensado de la tensión de entrada $V_{HEAT,IN}$ y de salida $V_{HEAT,OUT}$ de la malla conductora del actuador, pudiendo conocer el valor resistivo del *heater* a través de la siguiente expresión:

$$R_{HEAT} = R_{SENSE} * (V_{HEAT,IN}/V_{HEAT,OUT} - 1) \quad (05)$$

Por un lado, por lo que refiere a la tensión de entrada ($V_{HEAT,IN}$), se conecta dicho punto directamente a la entrada analógica A1 del *Arduino Nano*, dado que el valor de la tensión de entrada variará entre un nivel de 0 V a 5 V , por tanto, no es necesario la adaptación a los márgenes de tensión del microcontrolador para una correcta resolución.

Por otro lado, respecto al voltaje de salida ($V_{HEAT,OUT}$), se obtiene un valor de tensión que varía en función de la corriente de calefacción (I_{HEAT}) en valores comprendidos entre 1 mV y 10 mV , a consecuencia del divisor de tensión aplicado:

$$V_{HEAT,OUT} = I_{HEAT} \cdot R_{SENSE} \quad (06)$$

A fin de acondicionar dicho valor de tensión sensado ($V_{HEAT,OUT}$) a un valor de tensión adecuado a los márgenes de lectura de la entrada analógica (A2), se implementa una estructura amplificadora no inversora de ganancia $G_{V_{H,OUT}} = 500$ (véase *Figura 46*), constituida por el AO *MAX4213* (U5), una resistencia fija de $51\text{ k}\Omega$ (R_4) y un potenciómetro (R_3) de $1\text{ k}\Omega$, que permite regular la ganancia, otorgando al sistema un mayor grado de flexibilidad.

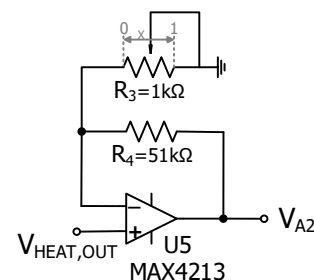


Figura 46. Etapa amplificadora no inversora de ganancia $G_{V_{H,OUT}} = 500$.

Nota: Se cumple $V_{A2} = V_{HEAT,OUT} \cdot [1 + R_4/(x \cdot R_3)]$, siendo $V_{A2}/V_{HEAT,OUT} = 500 \rightarrow x = 0,10$

Además, para el cálculo de la resistencia inicial del *heater*, se emplea la salida digital (D2), que es activada durante un instante de tiempo determinado, permitiendo el paso de un valor de corriente controlado (del orden de 10 mA), pudiendo así conocer a través del sensado de tensión descrito en las líneas anteriores, el valor de la resistencia inicial. En la *Figura 47*, se muestra el esquema circuital propuesto para determinar el valor de resistencia de la malla conductora del actuador mecánico polimérico (R_{HEAT}):

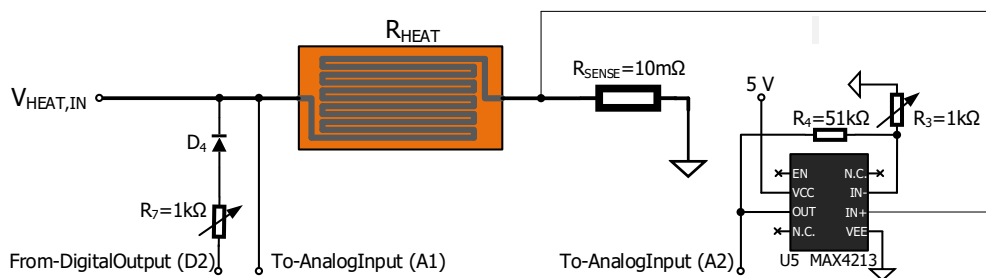


Figura 47. Esquema circuital para la determinación del valor de resistencia del *heater* del actuador.

6.3.2.3.2 Sensado de la temperatura ambiente

Por lo que refiere al monitoreo de la temperatura ambiente, se emplea el sensor de temperatura *LM35* (U6). Dicho sensor permite la adquisición de temperaturas desde $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ equivale a 10 mV . En la *Figura 48*, se muestra el esquema circuital propuesto para el sensado del valor de temperatura ambiente:

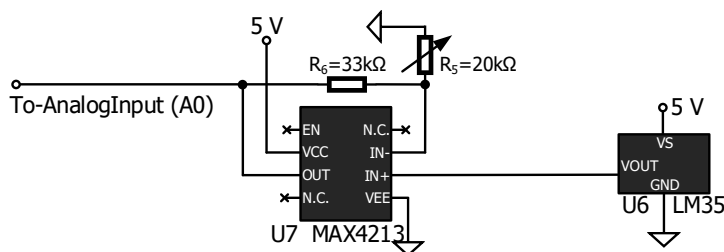


Figura 48. Esquema circuital para el sensado del valor de temperatura ambiente.

A la salida del sensor se obtiene una tensión proporcional a la temperatura ambiente (V_{TAMB}), que varía entre valores comprendidos entre 0 V hasta $0,35\text{ V}$ (para un rango de valores de temperatura entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $35\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A fin de acondicionar dicho valor de tensión sensado a un valor de tensión adecuado a los márgenes de lectura de la entrada analógica (A0), se implementa una estructura amplificadora no inversora de ganancia $G_{V_{TAMB}} = 10$ (véase *Figura 49*), constituida por el AO *MAX4213* (U7), una resistencia fija de $33\text{ k}\Omega$ (R_6) y un potenciómetro (R_5) de $20\text{ k}\Omega$, que permite regular la ganancia, otorgando al sistema un mayor grado de flexibilidad.

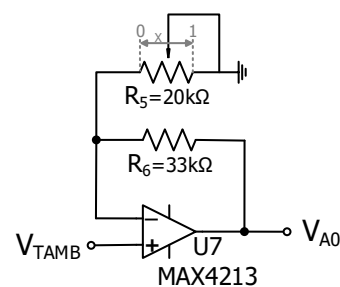


Figura 49. Etapa amplificadora no inversora de ganancia $G_{V_{TAMB}} = 10$.

Nota: Se cumple $V_{A0} = V_{TAMB} \cdot [1 + R_6/(x \cdot R_5)]$, siendo $V_{A0}/V_{TAMB} = 10 \rightarrow x = 0,18$

6.3.2.4 Bloque de computación y control

Se constituye el bloque de conmutación y control con el propósito de leer e interpretar los valores de tensión sensados, necesarios para el control termoeléctrico del actuador en base a los criterios de funcionalidad establecidos por el promotor, así como establecer una interface que posibilite un cierto grado de interacción entre el sistema y el usuario, permitiendo, por ejemplo, la gestión del inicio del proceso de calefacción o el seguimiento de la temperatura en la malla conductora del actuador. Tal y como se comenta en el apartado *6.3.1.2 Propuesta-II: Load switch* del presente Documento Básico, este bloque se basa en Arduino Nano (U8), una plataforma de desarrollo de computación física de código abierto, conformada por un microcontrolador y un entorno de desarrollo para la creación del *software* (programa para el control termoeléctrico del actuador), para la gestión de la activación del actuador y el establecimiento de un cierto nivel de comunicación con el usuario del dispositivo.

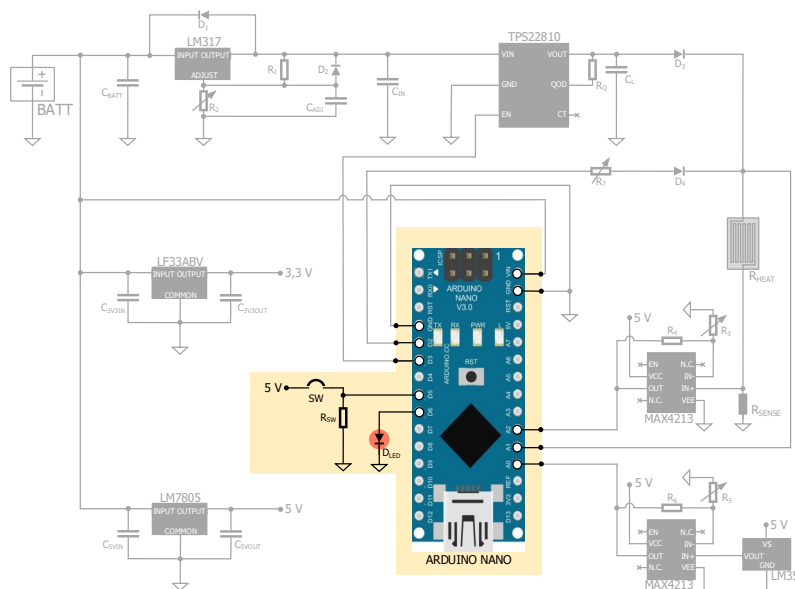


Figura 50. Esquemático de la etapa de control, donde se diferencia el bloque de computación y control.

Por un lado, el *hardware* de la placa de desarrollo consiste en un microcontrolador *Atmel AVR* sobre una placa de circuito impreso a la que se le pueden conectar placas de expansión (*shields*) a través de la disposición de los puertos de entrada y salida. Por otro lado, el *software* se asienta en un entorno de desarrollo (*IDE*) basado en *Processing* y en la estructura del lenguaje de programación *Wiring*.

La placa puede ser energizada por puerto *USB* y programada a través del puerto Serial que incorpora haciendo uso del *bootloader* que trae programado por defecto. Destacar que el *ATmega328* en la placa *Arduino Nano* viene precargado con un gestor de arranque (*bootloader*) que permite la carga de un nuevo código sin necesidad de un programador por *hardware* externo. Sin embargo, también es posible saltar el gestor de arranque y programar directamente el microcontrolador a través del puerto *ICSP (In Circuit Serial Programming)*, utilizando en este caso un programador externo.

A continuación, en la *Tabla 6*, se presentan las principales especificaciones técnicas sobre la placa seleccionada:

Microcontrolador: <i>ATmega328</i>
Arquitectura: <i>AVR</i>
Tensión de operación: <i>5 V</i>
Tensión de entrada: <i>7 V</i> hasta <i>12 V</i>
Corriente continua por pin de E/S: <i>40 mA</i>
Pines analógicos: <i>8</i>
Pines digitales: <i>22 (6 PWM)</i>
<i>EEPROM: 1 KB</i>
<i>SRAM: 2 KB</i>
Memoria flash: <i>32 KB (2 KB para bootloader)</i>
<i>Clock speed: 16 MHz</i>
Consumo: <i>19 mA</i>
Dimensiones <i>PCB: 18x45 mm</i>
Peso: <i>7 g</i>

Tabla 6. Principales especificaciones técnicas de la placa *Arduino NANO* ^[15].

Tal y como se ha mostrado con anterioridad, se emplean una serie de pines de entrada y salida tanto analógicos como digitales de la placa de desarrollo. Por un lado, se conectan a los pines analógicos los diferentes valores de tensión sensados (adaptados para obtener una correcta resolución, en caso de ser necesario). En referencia a la tensión proporcional de la temperatura ambiente ($V_{T_{AMB}}$) que se obtiene a la salida del sensor de temperatura, posterior a su acondicionamiento en una estructura amplificadora no inversora, se conecta al pin analógico A0. Por lo que refiere a los valores de tensión en bornes de la malla conductora del actuador, que permiten determinar el valor de resistencia del *heater*, se lleva la tensión de entrada del actuador ($V_{HEAT,IN}$) directamente al pin analógico A1, mientras que, la tensión de salida sensada ($V_{HEAT,OUT}$), se adecua a los márgenes de lectura, a través de una etapa amplificadora no inversora, cuya salida se conecta al pin analógico A2.

Por otro lado, en relación a los pines digitales, se conecta una salida *PWM* (D3) al *enable* del interruptor de carga, permitiendo la gestión del encendido y apagado de la fuente de alimentación en base a la modalidad de control seleccionada. Además, para el cálculo de la resistencia inicial del *heater*, se emplea una salida digital (D2) que se activa durante un instante de tiempo determinado, permitiendo el paso de un valor de corriente controlado (del orden de 10 mA), pudiendo así conocer a través del sensado de tensión descrito en las líneas anteriores, el valor de la resistencia inicial. Añadir que se dispone de un pulsador (SW), conectado en el pin digital D5, para controlar el inicio del proceso de calentamiento, así como se conecta en el pin digital D6 un diodo LED (D_{LED}) que proporciona información visual acerca del estado del proceso.

Una vez definidas las diferentes entradas y salidas tanto analógicas como digitales necesarias, se muestra un diagrama de bloques (véase *Figura 51*) donde se visualiza la estrategia de control planteada:

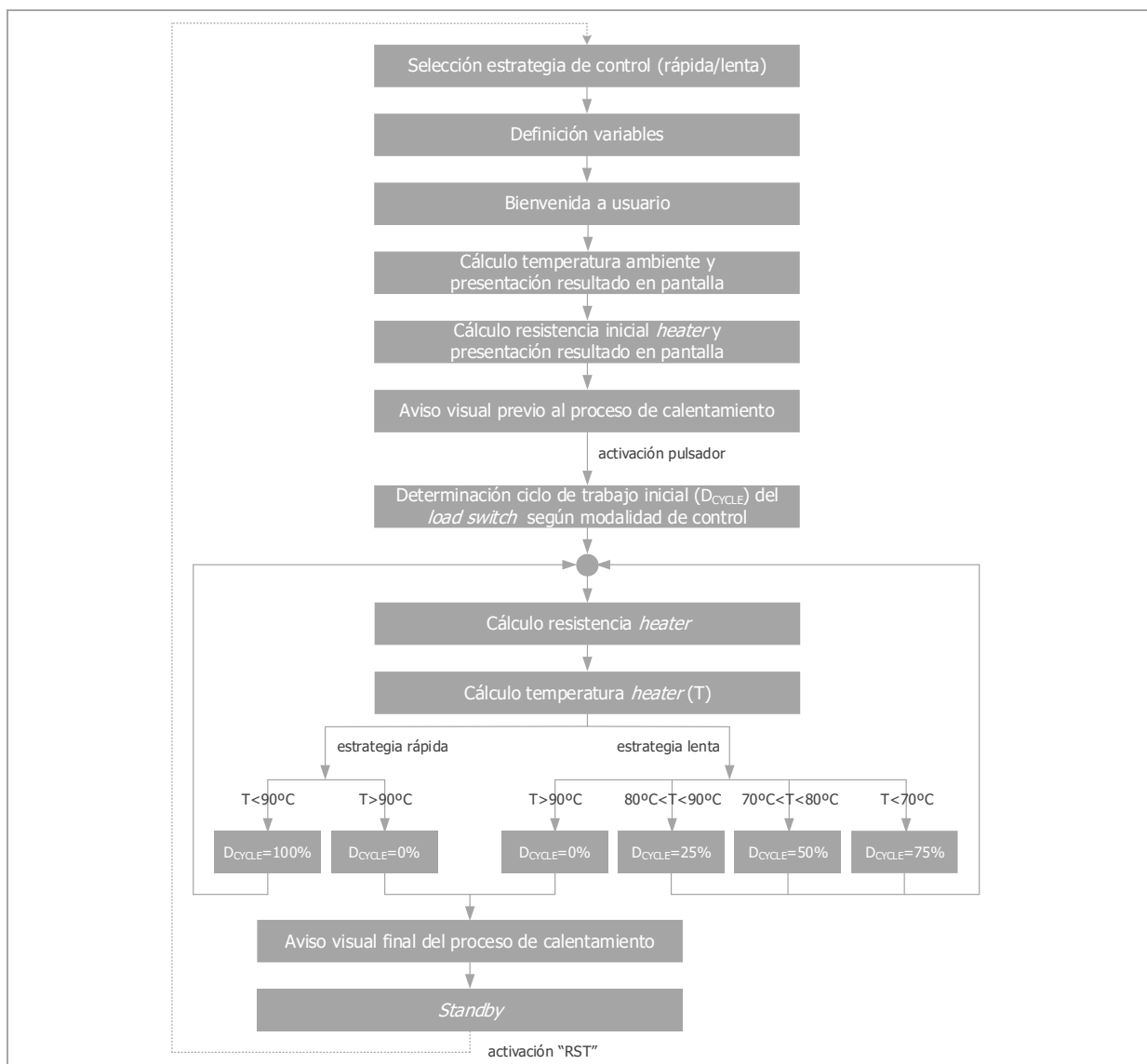


Figura 51. Diagrama de bloques de la estrategia de control propuesta.

Nota: Se detalla el código fuente con sus respectivos comentarios en el apartado *10.6 Código Arduino* del Documento Básico *Anexos*.

El lenguaje de programación de *Arduino* es *C++*, aunque es posible programarlo en otros lenguajes. Cabe destacar que no es un *C++* puro sino una adaptación proveniente de *avr-libc* que provee de una librería de *C* de alta calidad para usar con *GCC* (compilador de *C* y *C++*) en los microcontroladores *AVR* de *Atmel*, denominado *avr-gcc*, y otras muchas funciones específicas para los microcontroladores *AVR* de *Atmel*. Sin embargo, el *IDE* de *Arduino* está basado en *Processing*, un lenguaje de programación y entorno de desarrollo integrado de código abierto basado en *Java* (de más fácil utilización).

Todo programa *Arduino* debe de contener al menos dos funciones básicas: *setup()* y *loop()*. La función *setup()* se ejecuta una única vez cuando se inicia un boceto (*sketch*), es decir, después de conectar la placa *Arduino* a la fuente de alimentación o cuando se pulse el botón *reset* de la placa. Posterior a la ejecución de la función *setup()*, la función *loop()* se ejecuta de manera consecutiva e ininterrumpida, es decir, cuando se llega al final de dicha función,

se ejecuta nuevamente desde el inicio hasta que se vuelve a reiniciar la placa, siendo en el interior de esta función donde se escribe el código para el proceso de calentamiento.

Seguidamente, en la *Tabla 7*, se presentan algunas de las estructuras, variables y funciones utilizadas en el código planteado, con la finalidad de proporcionar una visión general del lenguaje de programación ^[17]:

Estructuras	
Sintaxis básica:	
; [delimitador de línea de código]	{ } [delimitador de bloques de código]
// [comentarios en una línea]	/* */ [comentarios en múltiples líneas]
Estructuras de control:	
if [comparador si-entonces]	for [bucle con contador]
if...else [comparador si...si no]	while [bucle por comparación booleana]
do... while [bucle por comparación booleana]	switch... case [comparador múltiple]
break [salida de bloque de código]	continue [continuación en bloque de código]
return [devuelve valor a programa]	goto [salta a una etiqueta]
Operadores aritméticos:	
= [asignación]	+ [suma]
- [resta]	* [multiplicación]
/ [división]	++ [incremento en uno]
Operadores de comparación:	
== [igual a]	!= [distinto de]
< [menor que]	> [mayor que]
<= [menor o igual que]	>= [mayor o igual que]
Operadores booleanos:	
&& [y]	[o]
Variables	
Constantes:	
HIGH LOW [estado de un pin de E/S digital]	
INPUT OUTPUT [comportamiento de un pin de E/S digital]	
true false [estado de un resultado lógico]	
Tipo de datos:	
boolean (booleano que puede ser cierto o falso, ocupando 8 <i>bits</i> en memoria)	
int [entero de 16 <i>bits</i> , con signo]	
float [valor en coma flotante de 32 <i>bits</i>]	
Funciones	
E/S Digital:	
pinMode(pin, mode) [configura el pin a modo de entrada o salida]	
digitalWrite(pin, value) [escritura digital]	
digitalRead(pin) [lectura digital]	
E/S Analógica:	
analogRead(pin) [lectura analógica]	
analogWrite(pin, valor) [escritura analógica donde se genera una señal cuadrada con el ciclo de trabajo que se le indique como parámetro, con valor de 0 hasta 255, siendo la frecuencia de la señal <i>PWM</i> de 490 Hz]	
Tiempo:	
delay(ms) [espera activa en <i>ms</i>]	

Tabla 7. Estructuras, variables y funciones basadas en *Processing*.

6.3.3 Implementación de la etapa de control

En el presente apartado se muestra la implementación de la etapa electrónica para el control del actuador mecánico polimérico, traduciendo el circuito teórico planteado en el apartado 6.3.2. *Diseño de la etapa de control* a un conjunto de placas que conforman el dispositivo de control termoeléctrico. Seguidamente, se muestra fotografía de la etapa de control implementada (véase *Figura 52*).

La etapa de control está conformada por diferentes módulos que responden a los distintos bloques (acondicionamiento, conmutación, sensado y computación y control) que se han descrito de forma detallada con anterioridad. Dado que se trata de un primer prototipo experimental, se decide construir los distintos módulos sobre placa matriz de circuito impreso perforada. El conjunto persigue una cierta secuencialidad entre los diferentes bloques, exhibiendo una forma en "U". En la parte central izquierda se localizan los bornes de entrada (tensión continua proveniente de la batería o fuente de alimentación comprendida en un rango entre 5V y 15V), mientras que en la parte superior se conectaría el actuador polimérico sobre el cual se efectúa el proceso de calefacción por *Efecto Joule* en base a la modalidad de control seleccionada.

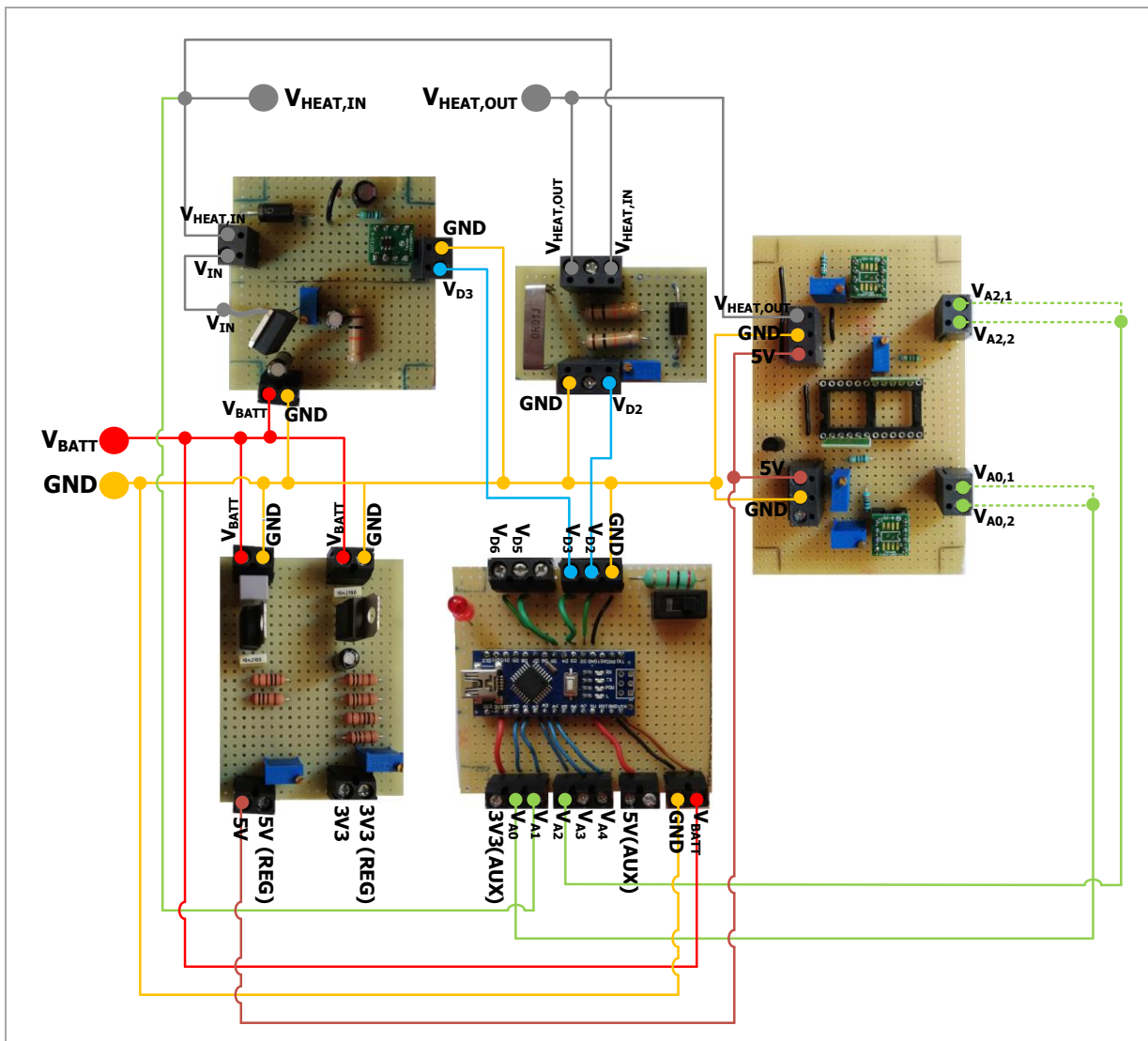


Figura 52. Fotografía de la etapa de control del actuador implementada.

7 Resultados Experimentales

7.1 Introducción

El objetivo del presente apartado es realizar las pruebas experimentales necesarias para validar que el sistema implementado cumple con los criterios de funcionalidad que establece el promotor del proyecto. Por ello, se debe de asegurar la correcta activación del actuador en función de la modalidad escogida, garantizando así el adecuado comportamiento del prototipo experimental en diferentes modos de funcionamiento, dentro del margen de corriente de calentamiento establecido, simulados en capítulos anteriores. Añadir que los resultados obtenidos permiten verificar aquellos bloques que funcionan de forma apropiada, así como analizar puntos de mejora con vistas a la construcción de un segundo prototipo.

Para la elaboración de las pruebas experimentales, se sigue el guion presentado en la *Figura 53*. En primer lugar, se realizan las pruebas en lazo abierto (salida generada dependiendo de la entrada). Seguidamente, cerciorado el buen funcionamiento de los elementos de potencia, se realizan las pruebas en lazo cerrado (salida generada dependiendo de las consideraciones y correcciones realizadas por la retroalimentación), haciendo activar el actuador en base a la modalidad de control seleccionada por el usuario.

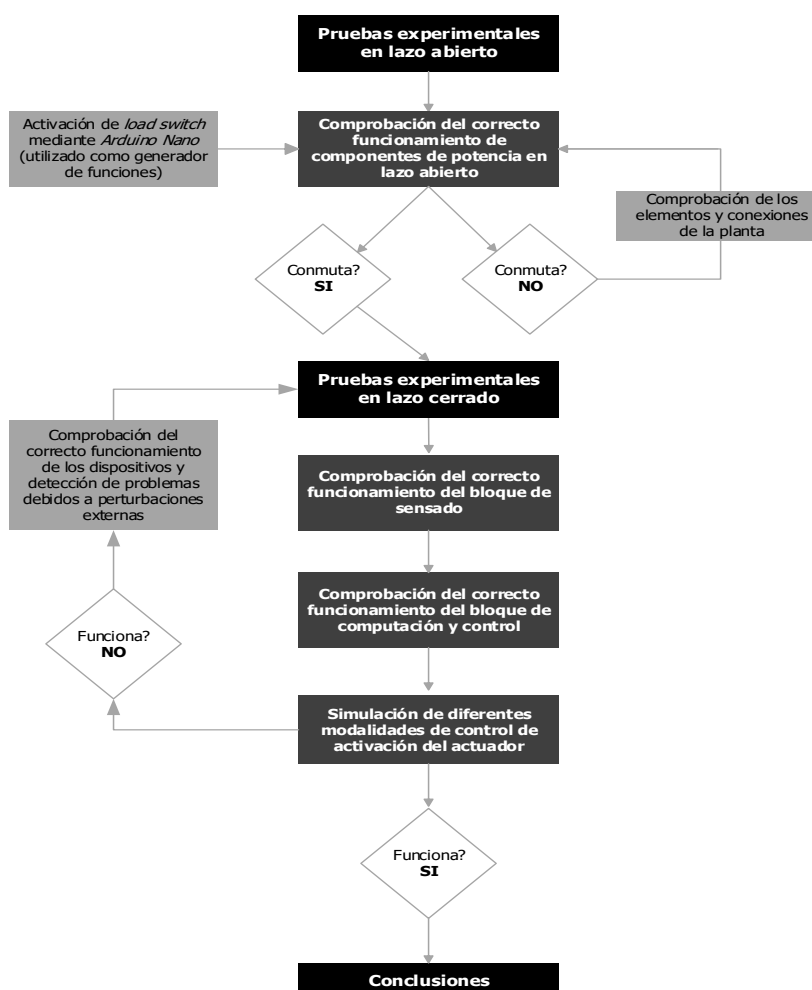


Figura 53. Diagrama de bloques correspondiente a las pruebas experimentales.

7.2 Experimental setup

En la *Figura 54*, se presenta el montaje conformado para llevar a cabo las pruebas experimentales. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio 330 de la *Facultat de Química* de la *Universitat Rovira i Virgili*.

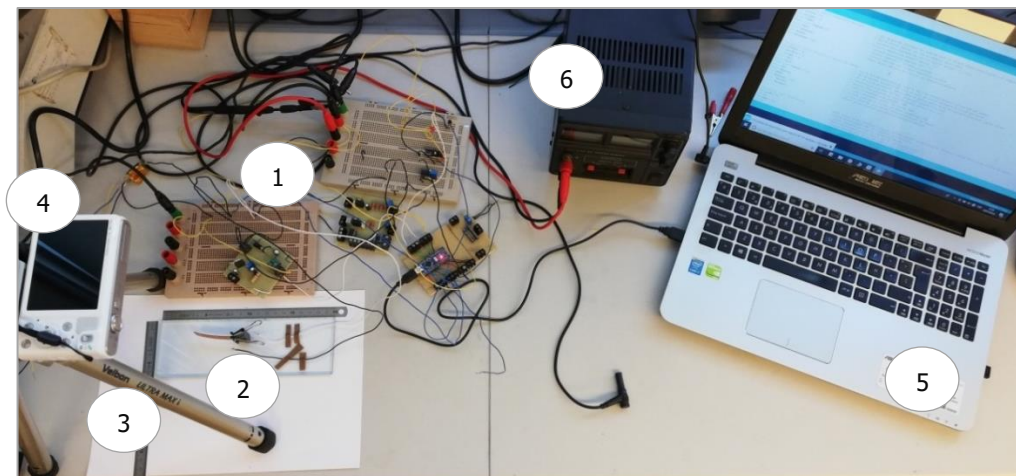


Figura 54. Set Up del montaje en el laboratorio.

Se tienen los diferentes módulos electrónicos¹ que conforman el dispositivo termoeléctrico para el control del actuador². Dicho actuador se dispone sobre una superficie métricamente definida³ para poder evaluar la respuesta a la memoria de forma, analizada a través de una metodología visual, donde se registra el proceso de recuperación isotérmica mediante una cámara digital⁴. A través del puerto serie del *Arduino Nano* se establece la comunicación con un ordenador⁵, donde a partir de la herramienta *Monitor Serie*, el usuario puede conocer en todo momento el estado del proceso de calefacción. Finalmente, se emplea para los ensayos realizados una fuente de alimentación tipo *MANSON EP-613*⁶ como suministro de energía eléctrica para el sistema proyectado (en lugar de una batería).

7.3 Sistema en lazo abierto

Las pruebas experimentales del sistema en lazo abierto permiten cerciorar el correcto funcionamiento de los elementos de potencia, así como el conexionado entre ellos.

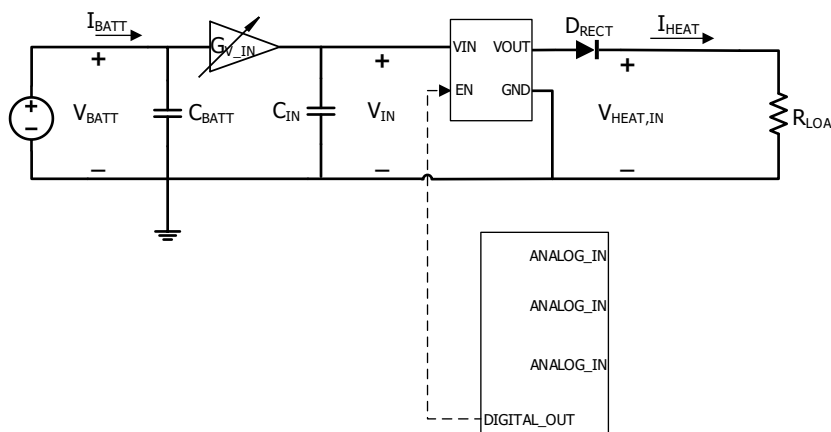


Figura 55. Esquema simplificado del montaje en lazo abierto.

Se alimenta la entrada del sistema con una tensión continua, fijándose un valor aproximado de $V_{BATT} = 9 V_{DC}$, regulado por el bloque de acondicionamiento hasta alcanzar el nivel de tensión V_{IN} deseado, y se coloca una carga resistiva (R_{LOAD}) en bornes de salida del sistema (en sustitución del actuador). A partir de una de las salidas digitales *PWM* del *Arduino Nano*, mediante la función “*analogWrite*” se lleva a cabo la habilitación e inhabilitación del *load switch* a través del pin de *enable*.

7.4 Sistema en lazo cerrado

Las pruebas experimentales del sistema en lazo cerrado permiten determinar el comportamiento en régimen permanente del prototipo en diferentes modos de funcionamiento. Manteniendo en la entrada del sistema una tensión de alimentación continua fijada en un valor $V_{BATT} = 9 V$, regulada por el bloque de acondicionamiento hasta alcanzar el nivel de tensión V_{IN} deseado para cada una de las pruebas realizadas (en función del valor resistivo del elemento conectado en bornes de salida del sistema), se llevan a cabo los ensayos siguiendo el proceso de validación que se presenta a continuación, con el principal propósito de evitar posibles daños en los componentes empleados, especialmente a consecuencia de niveles elevados de corriente y temperatura, así como ajustar el control propuesto (a nivel de código), hasta cumplir con los criterios de funcionalidad requeridos por el promotor del presente proyecto.

Por tal de verificar la correcta respuesta del control termoeléctrico propuesto, se realiza una primera prueba donde se mantiene la carga resistiva de potencia de 2Ω utilizada con anterioridad (en sustitución del actuador) y se incluye una resistencia de sensado (R_{SENSE}) variable que se regula hasta alcanzar un valor cercano a los 2Ω (véase *Figura 56*). Se concluye que el control responde en los diferentes modos de activación requeridos.

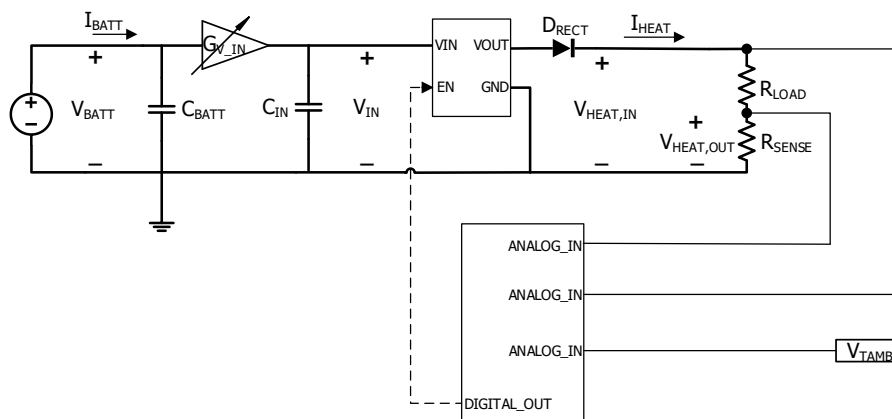


Figura 56. Esquema simplificado del montaje en lazo cerrado con carga resistiva y $R_{SENSE} = 2 \Omega$.

Sin modificar el conexionado presentado en la *figura* anterior, se sustituye la carga resistiva de potencia (R_{LOAD}) por el actuador polimérico (R_{HEAT}), por tal de contrastar que el control permite la activación de ambos modelos estudiados (Actuador-01 y Actuador-02).

Seguidamente, se sustituye la resistencia variable utilizada por una resistencia fija de valor $R_{SENSE} = 0,01 \Omega$ y se incluye el bloque de amplificación, para adaptar el valor de tensión de la señal adquirida a los márgenes de tensión de las entradas analógicas del *Arduino Nano*, garantizando una correcta resolución de la medida sensada. Destacar que el hecho de

aminorar el valor de la resistencia de sensado, permite una considerable reducción del consumo eléctrico necesario para la actuación del elemento mecánico, consiguiendo así una mayor eficiencia desde un punto de vista energético. Resulta la configuración que se presenta en la *Figura 57*.

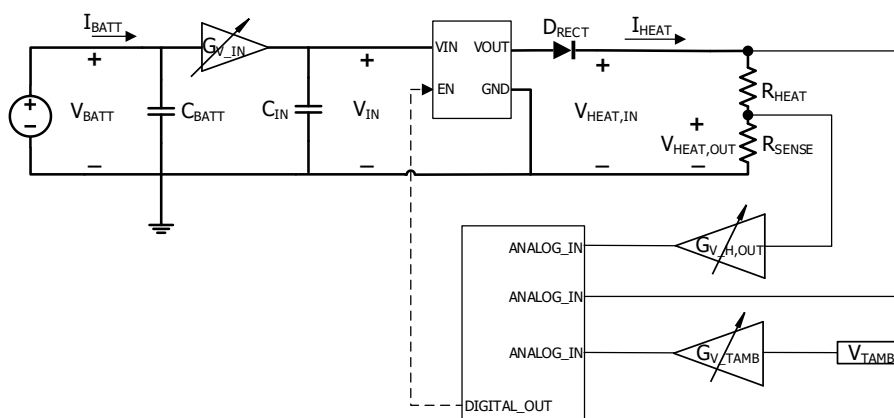


Figura 57. Esquema simplificado del montaje en lazo cerrado con actuador polimérico y $R_{SENSE} = 0,01 \Omega$.

Una vez se valida que el conjunto propuesto para el control termoeléctrico del actuador permite la regulación de la corriente de calefacción dentro del rango requerido, determinando así que funciona de la manera esperada en lazo cerrado, tal y como se comenta con anterioridad, el objetivo fundamental de estos ensayos es determinar que el sistema responde correctamente en las diferentes modalidades de actuación requeridas, permitiendo al usuario la definición de distintos tiempos de activación del actuador. Con el propósito de cerciorar el correcto funcionamiento del conjunto, se evalúa la respuesta a la memoria de forma a través de una metodología visual que permite monitorizar el proceso de recuperación isotérmica [10].

Tal y como se presenta en el apartado 6.2.4. *Proceso de construcción y montaje del actuador mecánico polimérico* del presente Documento Básico, el proceso de programación de la forma se realiza siguiendo los siguientes pasos. En primer lugar, se calienta el material epoxi hasta la T_{prog} y se le proporciona la forma pretendida (en el presente proyecto forma curvada). A continuación, se enfría la muestra rápidamente mientras se mantiene la fuerza aplicada para la deformación, fijando así la forma curvada.

La metodología mencionada se limita al proceso de recuperación de forma, que se lleva a cabo a partir de la conducción de corriente eléctrica por el *heater* del actuador. Esta técnica consiste básicamente en el registro del proceso de recuperación mediante una cámara de alta resolución, donde se analiza la evolución del movimiento, midiendo el ángulo como se muestra en la *Figura 58* y aplicando la ecuación (07), donde %SR es la recuperación de forma en %, Φ_0 es el ángulo inicial, $\Delta\Phi_t$ es la diferencia entre el ángulo en el instante t (Φ_t) y Φ_0 , y t_{sr} es el tiempo de recuperación de forma.

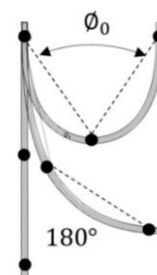


Figura 58. Representación esquemática de la metodología para la monitorización de la recuperación isotérmica.

$$(\%SR)_\Phi = \frac{\Delta\Phi_t}{180^\circ - \Phi_0} \cdot 100 \tag{07}$$

$$t_{sr} = t_{(\%SR)_{85}} - t_{(\%SR)_{15}}$$

En la *Tabla 8*, se presentan las cuatro modalidades planteadas para la activación del actuador, donde se detalla la estrategia que se sigue, en función del ciclo de trabajo (D) de la señal de salida digital de la placa de desarrollo, el tiempo (t_{HEAT}) durante el que se extiende el proceso de calefacción hasta alcanzar una temperatura en la malla conductora (T_{HEAT}) de $90^\circ C$ y el valor de corriente medio (\bar{I}_{HEAT}) que se entrega al actuador durante el proceso de calentamiento. Añadir que se llevan a cabo las diferentes pruebas para el modelo de Actuador-01, con un valor de resistencia inicial $R_{HEAT,0} = 6,23 \Omega$.

Modalidad	Estrategia de activación	t_{HEAT} (s)	\bar{I}_{HEAT} (mA)
Emergencia	$D = 100\%$ hasta $T_{HEAT} = 90^\circ C$	25	750
Rápida	$D = 66\%$ hasta $T_{HEAT} = 90^\circ C$	65	500
Normal	$D = 44\%$ hasta $T_{HEAT} = 90^\circ C$	130	333
Lenta	$D = 22\%$ hasta $T_{HEAT} = 90^\circ C$	300	167

Tabla 8. Modalidades de activación definidas para el estudio de la respuesta a la memoria de forma.

A continuación, se presenta en la *Figura 59*, los resultados que se obtienen, para el modelo de Actuador-01, de los ensayos realizados para evaluar la evolución de la respuesta a la memoria de forma para cada una de las modalidades planteadas:

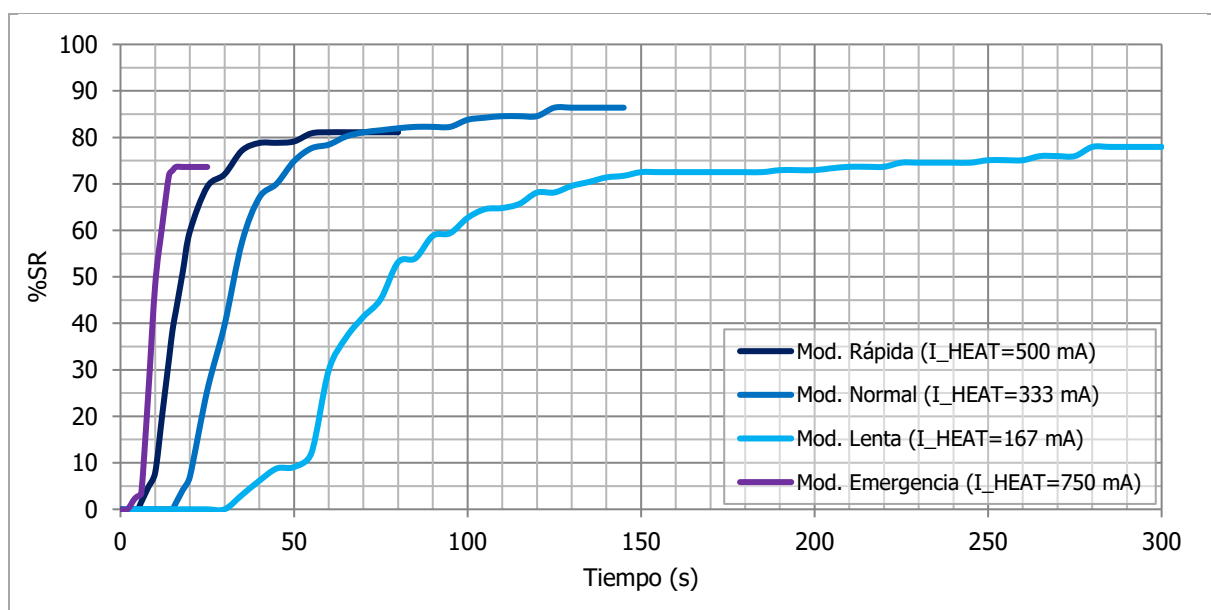


Figura 59. Evolución temporal del porcentaje de recuperación de forma para las modalidades planteadas.

Finalmente, se muestra en la *Figura 60, 61, 62 y 63*, las imágenes de la secuencia de recuperación obtenida en los ensayos realizados para las diferentes velocidades de activación:

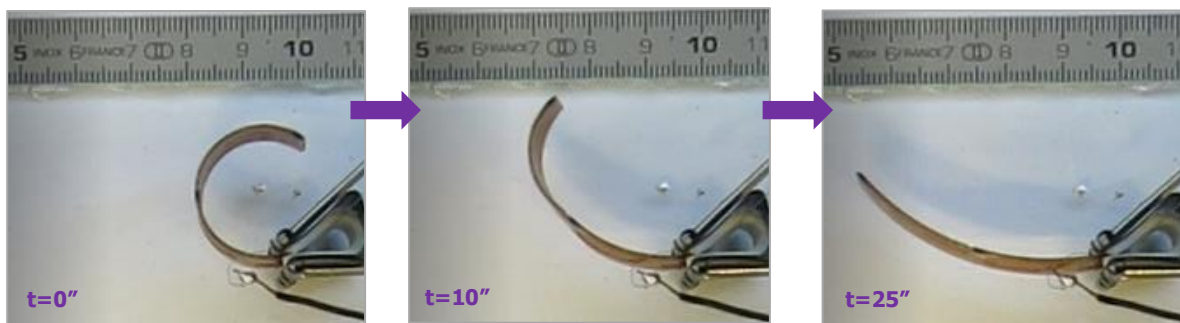


Figura 60. Secuencia de recuperación de forma para la modalidad "emergencia" ($I_{HEAT} = 750 \text{ mA}$).

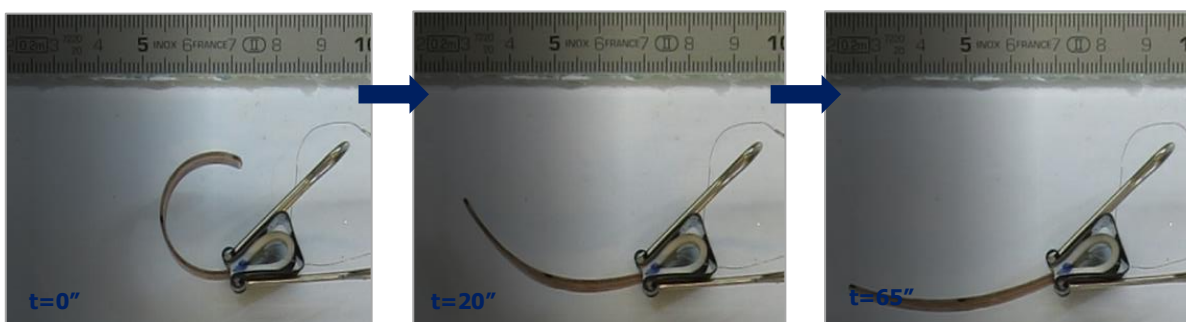


Figura 61. Secuencia de recuperación de forma para la modalidad "rápida" ($I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$).



Figura 62. Secuencia de recuperación de forma para la modalidad "normal" ($I_{HEAT} = 333 \text{ mA}$).

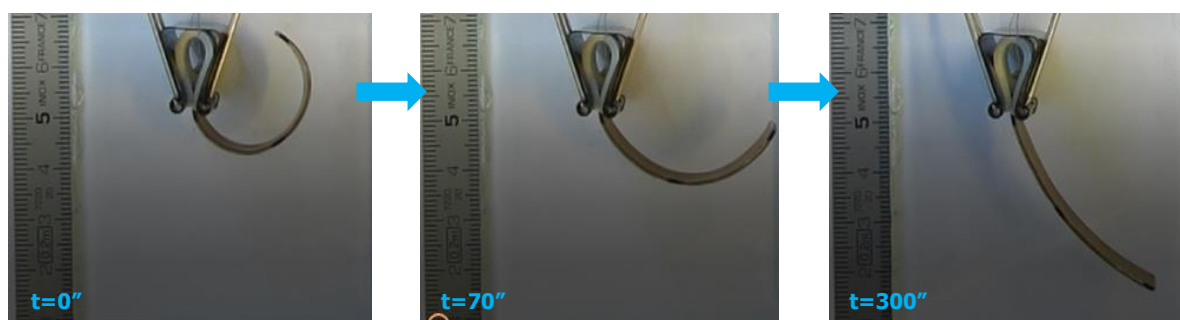


Figura 63. Secuencia de recuperación de forma para la modalidad "lenta" ($I_{HEAT} = 167 \text{ mA}$).

8 Resumen de Presupuesto

Resumen	Importe	%
MATERIALES.....	95,47 €	100,00
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL	95,47 €	
13,00% Gastos Generales.....	12,41 €	
6,00% Beneficio Industrial.....	5,73 €	
SUMA DE G.G. y B.I.	113,61 €	
21,00% I.V.A.....	23,86 €	23,86 €
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL	137,47 €	

Sube el Presupuesto a:

CIENTO TRENTA Y SIETE EUROS con CUARENTA Y SIETE CÉNTIMOS



Firmado por ÁLVARO BACEIREDO RAMOS con fecha 03 de SEPTIEMBRE de 2018.

9 Conclusiones y Futuros Estudios

Durante el presente proyecto se ha propuesto el diseño, construcción y validación de un primer prototipo experimental para el control termoeléctrico de actuadores mecánicos poliméricos, conformando así un sistema de gran utilidad para aplicaciones funcionales donde se requiera de un actuador ligero, resistente a ambientes agresivos y pueda activarse de manera controlada con el mínimo gasto energético posible.

El actuador se diseña bajo dos criterios fundamentales. Por un lado, el material polimérico a activar térmicamente (polímero termoestable tiol-epoxi) viene impuesto por el promotor, así como los parámetros de control necesarios (temperatura de activación, velocidad de actuación y dimensiones). Por otro lado, el sistema que permita al material polimérico alcanzar la temperatura de activación, asegurando así el cambio de forma, está basado en el calentamiento por *efecto Joule* de una malla conductora. Esta debe ser integrada completamente en el sistema polimérico de manera que actúen, desde el punto de vista mecánico, como un único elemento actuador.

Por lo que refiere al diseño del actuador mecánico polimérico, se realizan una serie de simulaciones termoeléctricas para la definición de la malla conductora que permita elevar la temperatura hasta garantizar la activación del material polimérico ($T_g = 61\text{ °C}$). Seguidamente, se simula el comportamiento del actuador alimentado a diferentes niveles de corriente eléctrica de calefacción, con el objetivo de validar de forma teórica el modelo propuesto, con anterioridad a su construcción. Destacar que, se realizan una serie de

ensayos preliminares en los cuales se evalúa el comportamiento a flexión del material conductor, así como el desempeño del actuador alimentado a diferentes niveles de corriente de calefacción dentro del rango pretendido.

Para el control del actuador se implementa una etapa electrónica basada en una arquitectura sencilla, flexible y versátil, conformada por una placa de desarrollo (que contiene un microcontrolador capaz de ejecutar el *software* para el control termoeléctrico del actuador) y un interruptor de carga integrado. Este *load switch*, que actúa como un relé electrónico permitiendo el encendido y apagado de la fuente de alimentación, es controlado por el microcontrolador de la placa de desarrollo a través de una señal modulada por ancho de pulsos desde una de las salidas digitales, permitiendo la regulación de la corriente eléctrica suministrada al *heater* en valores comprendidos entre 100 mA hasta 1 A, así como dejar de suministrar dicha corriente una vez el control detecta que el actuador polimérico ha alcanzado la temperatura requerida.

A tenor de los resultados obtenidos se puede concluir que se han cumplido los objetivos marcados en el inicio del proyecto, siendo posible afirmar que el conjunto funciona de acuerdo con lo pretendido. Por lo que refiere al actuador polimérico, tanto en las pruebas experimentales finales como en los primeros ensayos preliminares, se valida su comportamiento termoeléctrico dentro del margen de corriente de calefacción establecido, a lo largo de repetidos ciclos de activación. Cabe destacar, los avances realizados en relación con el proceso de constitución y ensamblaje, que se derivan de la elaboración de los actuadores mecánicos poliméricos con memoria de forma por parte del *Departament de Enginyeria Mecànica* y el *Departament de Química Analítica i Química Orgànica* de la *Universitat Rovira i Virgili* en colaboración con el *Departament d'Enginyeria Elèctrica, Electrònica i Automàtica* de la *Universitat Rovira i Virgili*.

Centrando la atención en la etapa de control, no se plantea sustituir el control digital actual (Propuesta-II) por un control analógico (Propuesta-I), puesto que el control implementado evidencia una serie de ventajas como son una menor susceptibilidad al deterioro, menor sensibilidad a los ruidos y a las vibraciones en las señales, mayor flexibilidad y mejor sensibilidad frente a la variación de sus parámetros. A todo lo anterior, se le suma la consecución de una arquitectura más sencilla y de menor coste. Además, en el desarrollo de las pruebas experimentales, se examina el comportamiento de los diferentes bloques que componen la etapa de control, permitiendo establecer puntos de mejora de cara a la construcción de un segundo prototipo.

Por último, añadir que el presente proyecto se encuentra en un estado inicial de desarrollo, estando aún lejos de convertirse en un "producto" definido que pueda instalarse en una aplicación industrial. En esta primera fase, principalmente, los esfuerzos se han centrado en el concepto como sistema y en la definición de su función como conjunto. Sin embargo, el hecho de poder desarrollar un primer prototipo experimental completo permite evidenciar una serie de hechos a considerar en base a futuros estudios.

En primer lugar, de los ensayos realizados, y por simple inspección, se desprenden desemejanzas en el movimiento de las diferentes regiones del actuador. Principalmente, este hecho está basado en los deltas de temperatura que aparecen entre distintas áreas de la zona activa. Con el propósito de mejorar la homogeneidad de la temperatura en las capas externas del actuador conformadas por resina epoxi, pudiera resultar de utilidad depositar

capas de nanotubos de carbono (*CNTs*). Los *CNTs* se emplean como un refuerzo conductivo en el desarrollo de actuadores poliméricos debido a su ligereza, resistencia a la oxidación, bajo coste de fabricación y alta eficiencia energética. En [18], se presenta un novedoso proceso para la deposición de capas de nanotubos de carbono en películas de polímero con memoria de forma.

Además, una de las principales limitaciones que se encuentran en los actuadores poliméricos proyectados es su comportamiento unidireccional, es decir, una vez el material recupera su forma original a través del proceso de calefacción, este se mantiene en la nueva posición adoptada de forma indefinida, siendo necesaria una reprogramación (proceso que requiere de un periodo de tiempo del orden de 30 *min*). Resulta obvio que este hecho acota de forma considerable el campo de desempeño, haciéndolo válido únicamente en aplicaciones donde se requiera de un único ciclo de trabajo. Una posible solución para salvar esta circunstancia sería incorporar en el actuador una lámina de *LCN*. Las redes líquido-cristalinas o *liquid-crystalline networks (LCN)* son una clase de *AMPs* capaces de pasar de una a otra forma temporal de forma reversible (comportamiento bidireccional) bajo el efecto de una carga constante y un estímulo externo, requiriendo únicamente un solo proceso de programación. Sin embargo, la necesidad de una carga constante en la dirección de desplazamiento limita considerablemente el empleo de *LCNs* en sistemas de actuación. Una estrategia para superar este inconveniente es la incorporación de un componente *stress-applying* (interno o externo) en una *LCN* ya estirada, dificultando la recuperación de la forma original, pero adoptando una forma metaestable "*state-of-ease*" después de la contracción. En [19], se presenta una metodología para desarrollar *AMPs two-way* autónomos con un control mejorado de la respuesta de actuación.

Por otra parte, de forma puntual a lo largo del proceso de calentamiento de la malla conductora, se constatan determinados errores en la señales de tensión sensadas y posteriormente adquiridas por la placa de desarrollo. Dichas distorsiones podrían ser minimizadas integrando los distintos bloques en una única placa de circuito impreso (*PCB*), reduciendo la necesidad de conectores y cableado, así como sustituyendo los elementos ajustables por otros fijos, disminuyendo la flexibilidad del sistema, al tiempo que se gana en robustez. Asimismo, con el propósito de mejorar la interacción entre sistema y usuario, sería de gran utilidad la inclusión de un *display* conectado a la placa de desarrollo, donde sea mostrada la temperatura del *heater* del actuador en todo momento u otra información de interés para el usuario del dispositivo.

DOCUMENTO BÁSICO 3: ANEXOS

[DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO TERMOELÉCTRICO PARA EL CONTROL DE ACTUADORES MECÁNICOS POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA]

10 Anexos

10.1 Anexo 1: Simulaciones térmicas para el diseño del *heater*

A continuación, se presentan las gráficas del perfil de temperatura en la superficie exterior del actuador y la respuesta dinámica de temperatura en el centro y en uno de los vértices de la capa polimérica. Ambas gráficas se obtienen como resultado de las simulaciones térmicas realizadas para la elección del diseño del *heater* (véase el apartado 6.2.2 *Diseño del heater del actuador mecánico polimérico* del Documento Básico *Memoria*).

10.1.1 Simulaciones térmicas del Diseño-01 (Serpentín rectangular)

En la *Figura A1*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

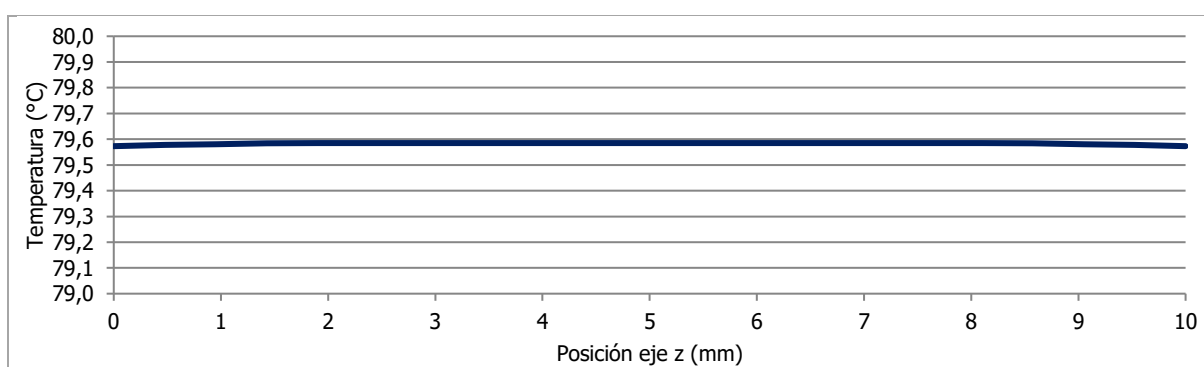


Figura A1. Perfil de temperatura en el eje z para el Diseño-01 (Serpentín rectangular) para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

En la *Figura A2*, se presenta la respuesta dinámica en el centro y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

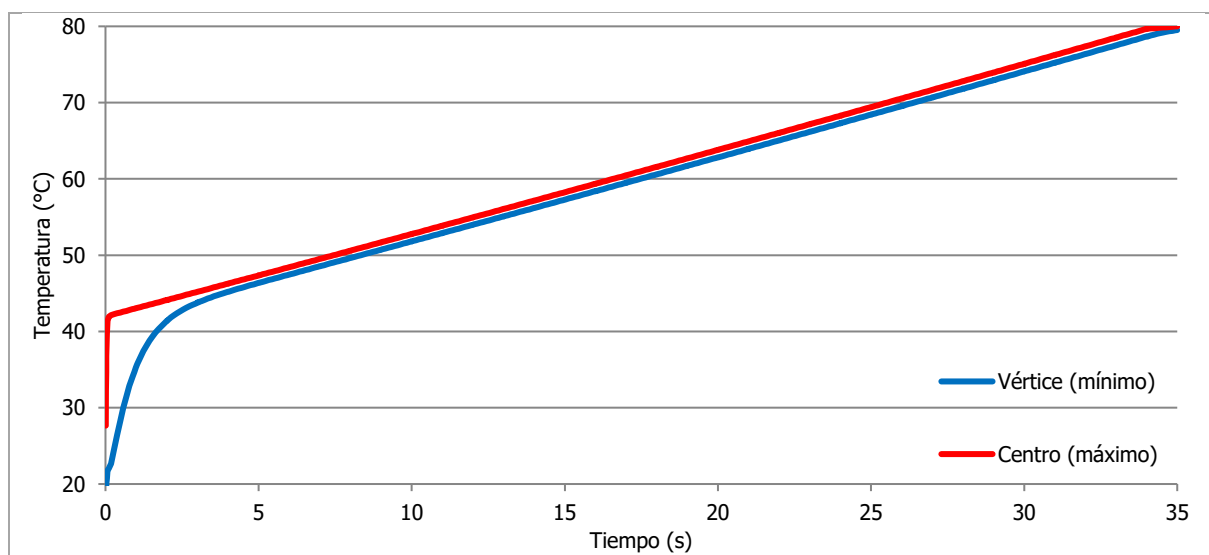


Figura A2. Respuesta dinámica simulada para el Diseño-01 (Serpentín rectangular) para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

10.1.2 Simulaciones térmicas del Diseño-02 (500-700-900-1400)

En la *Figura A3*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

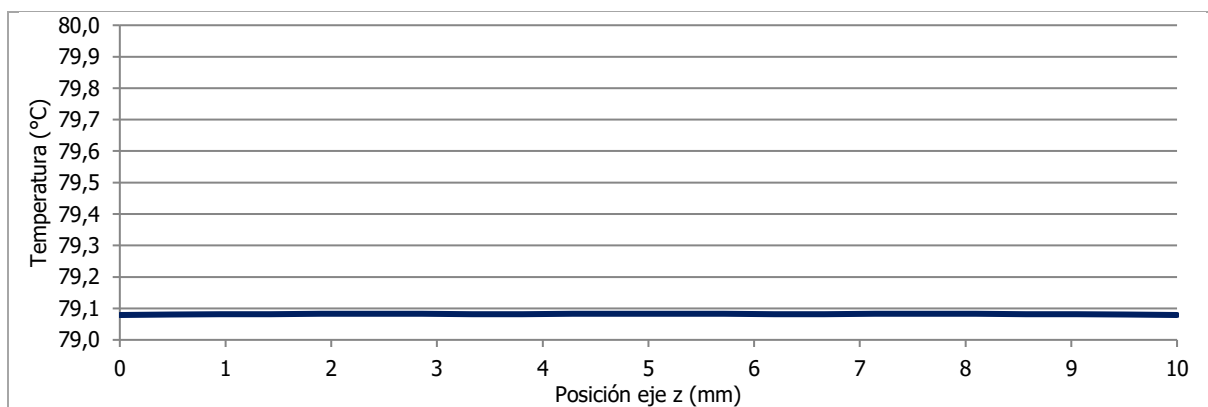


Figura A3. Perfil de temperatura en el eje z para el Diseño-02 (500-700-900-1400) para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

En la *Figura A4*, se presenta la respuesta dinámica en el centro y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

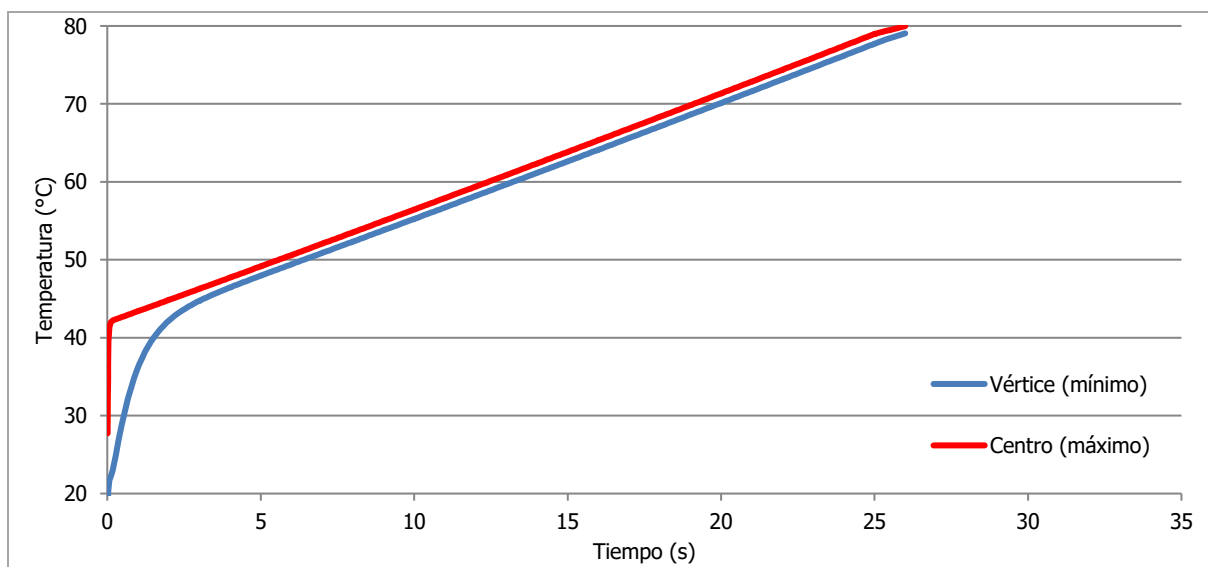


Figura A4. Respuesta dinámica simulada para el Diseño-02 (500-700-900-1400) para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

10.1.3 Simulaciones térmicas del Diseño-03 (4 heaters)

En la *Figura A5*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

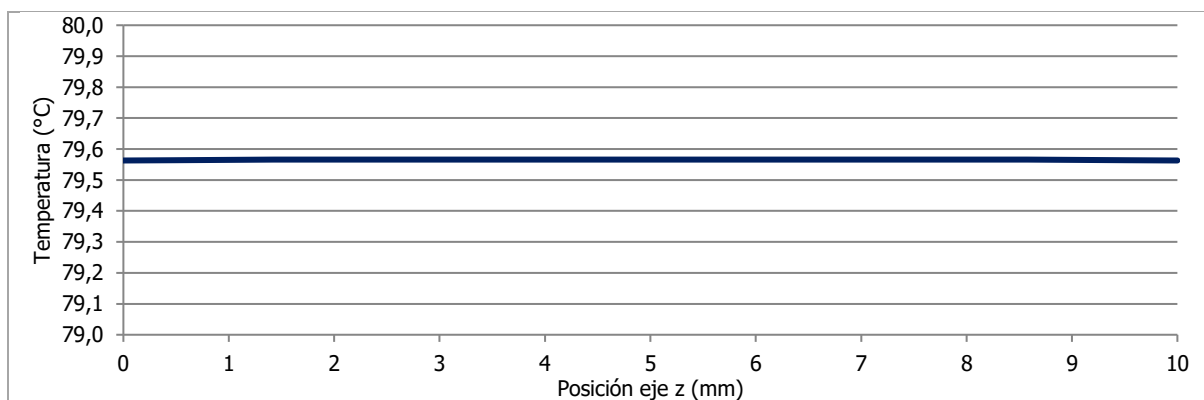


Figura A5. Perfil de temperatura en el eje z para el Diseño-03 (4 heaters) para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

En la *Figura A6*, se presenta la respuesta dinámica en el centro y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

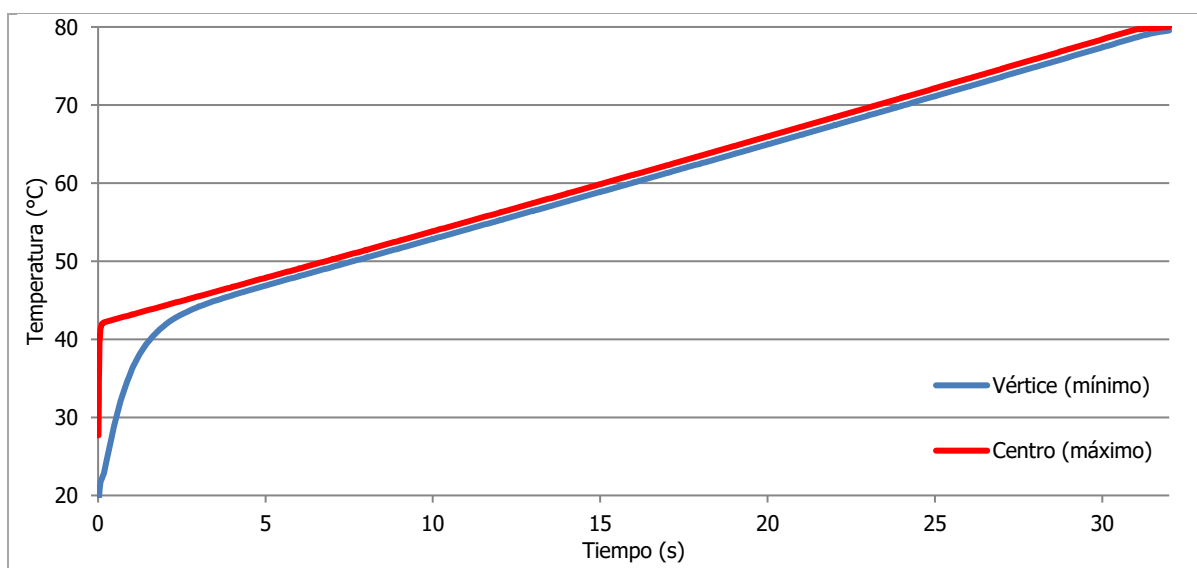


Figura A6. Respuesta dinámica simulada para el Diseño-03 (4 heaters) para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

10.2 Anexo 2: Simulaciones térmicas del actuador mecánico polimérico

A continuación, se presenta la distribución de temperatura en el actuador, así como las gráficas del perfil de temperatura en la superficie exterior y la respuesta dinámica de temperatura en el centro y en uno de los vértices de la capa polimérica. Los resultados mostrados se derivan de las simulaciones realizadas para el estudio del comportamiento térmico del Actuador-01 y del Actuador-02 (véase el apartado 6.2.3 *Simulaciones térmicas del actuador mecánico polimérico* del Documento Básico *Memoria*).

10.2.1 Simulaciones térmicas del Actuador-01 (Serpentín rectangular)

10.2.1.1 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 100\text{ mA}$

En la *Figura A7*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

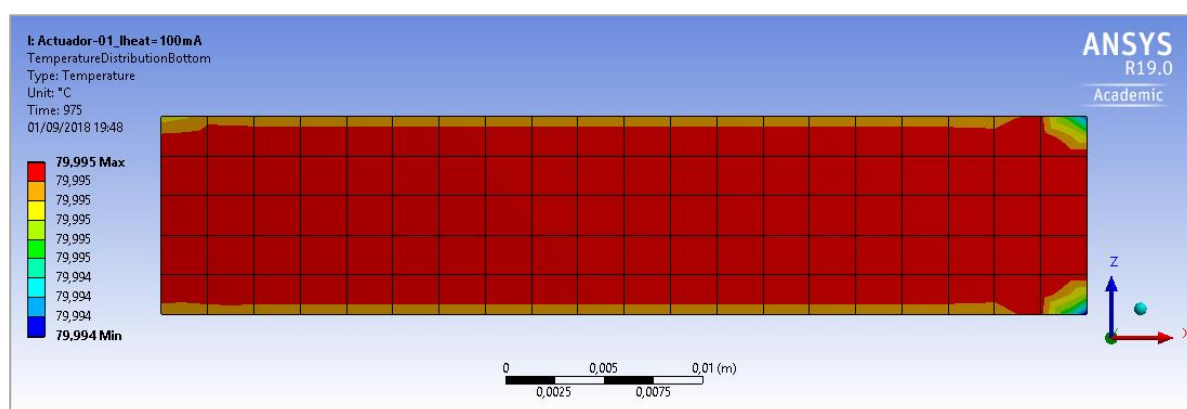


Figura A7. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 100\text{ mA}$.

En la *Figura A8*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

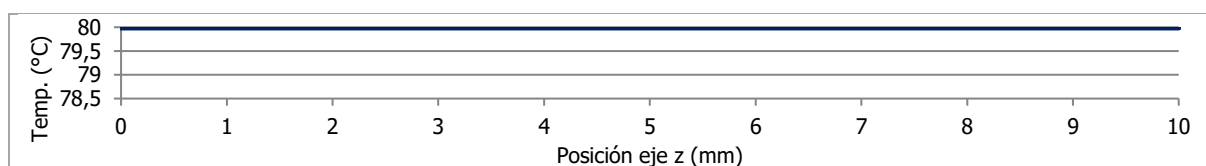


Figura A8. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 100\text{ mA}$.

En la *Figura A9*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

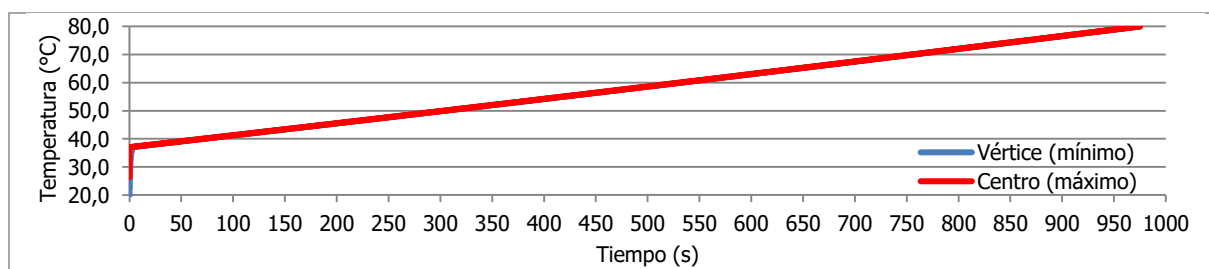


Figura A9. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 100\text{ mA}$.

10.2.1.2 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$

En la *Figura A10*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

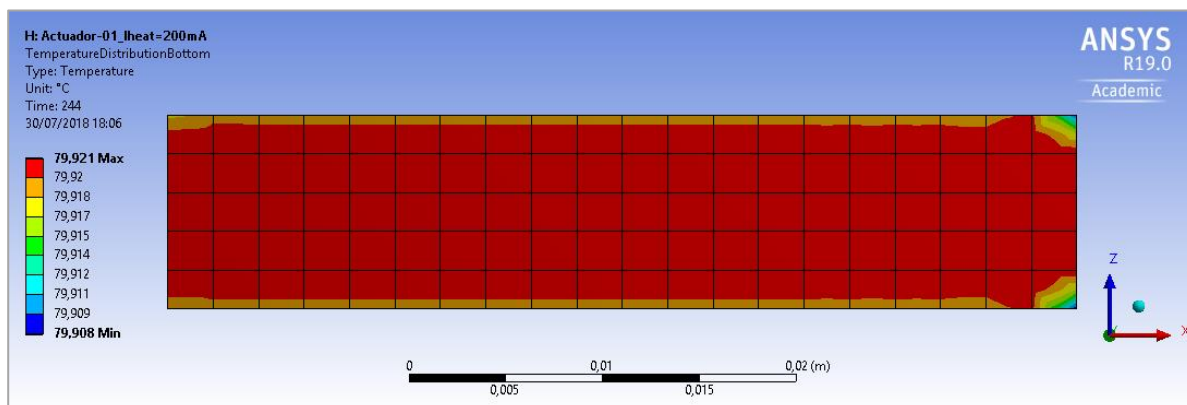


Figura A10. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$.

En la *Figura A11*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

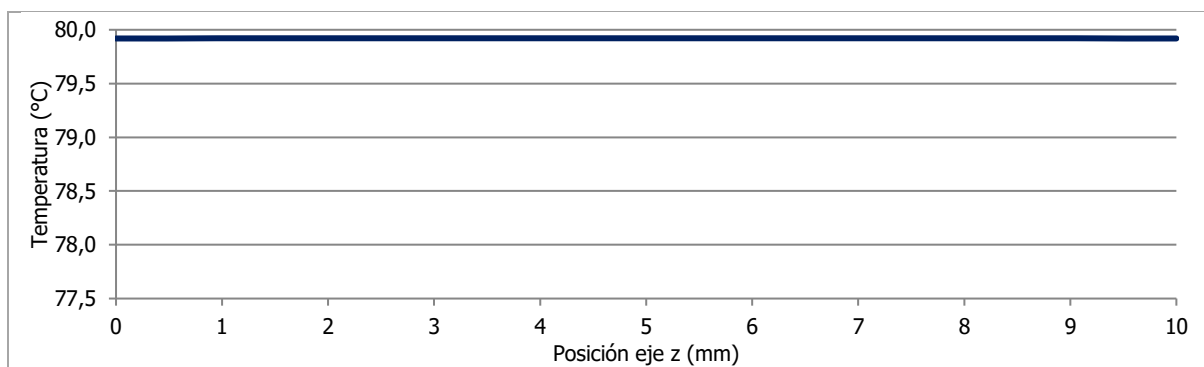


Figura A11. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$.

En la *Figura A12*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

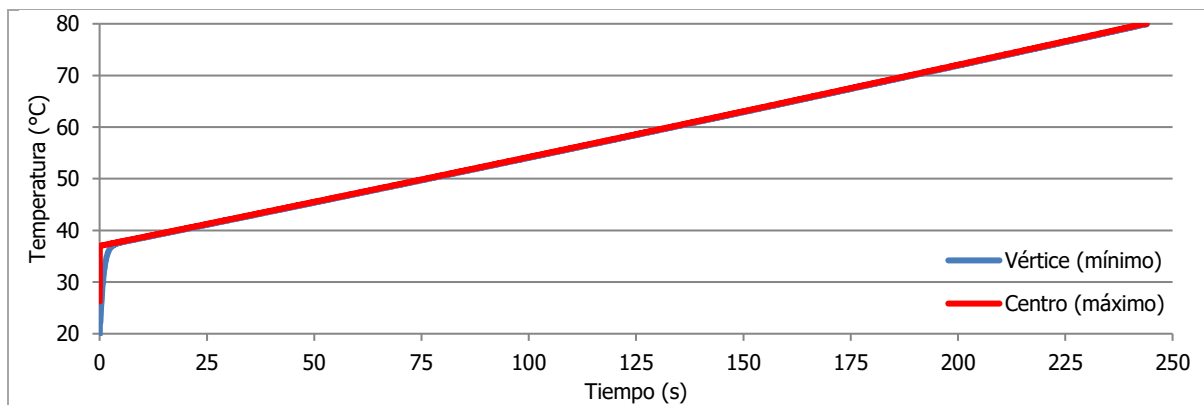


Figura A12. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$.

10.2.1.3 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$

En la *Figura A13*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

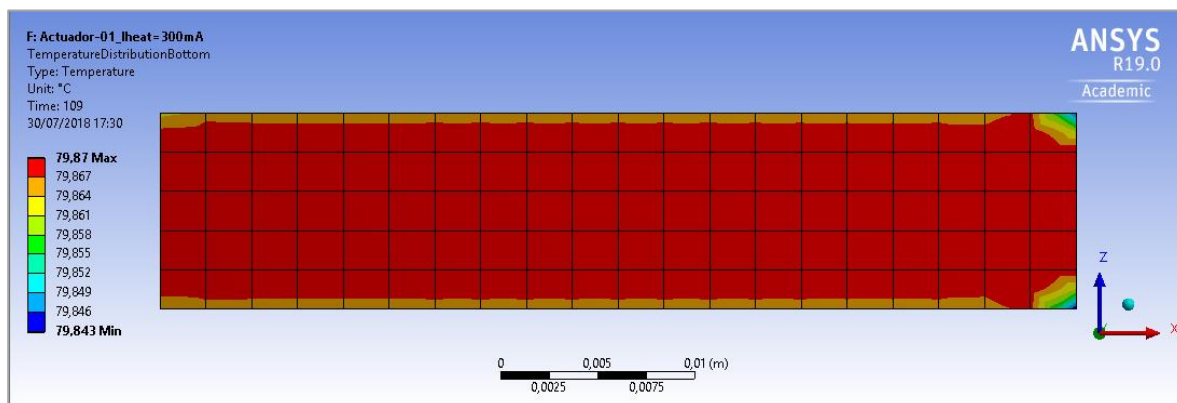


Figura A13. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$.

En la *Figura A14*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

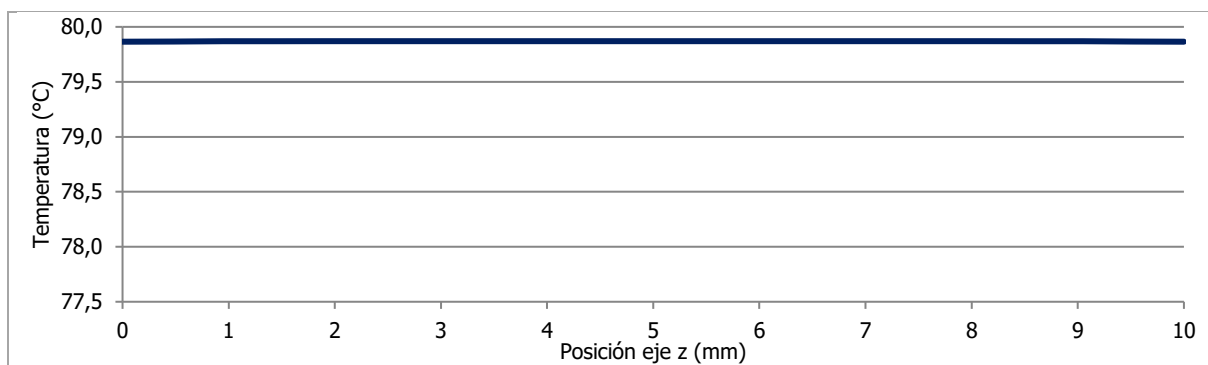


Figura A14. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$.

En la *Figura A15*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

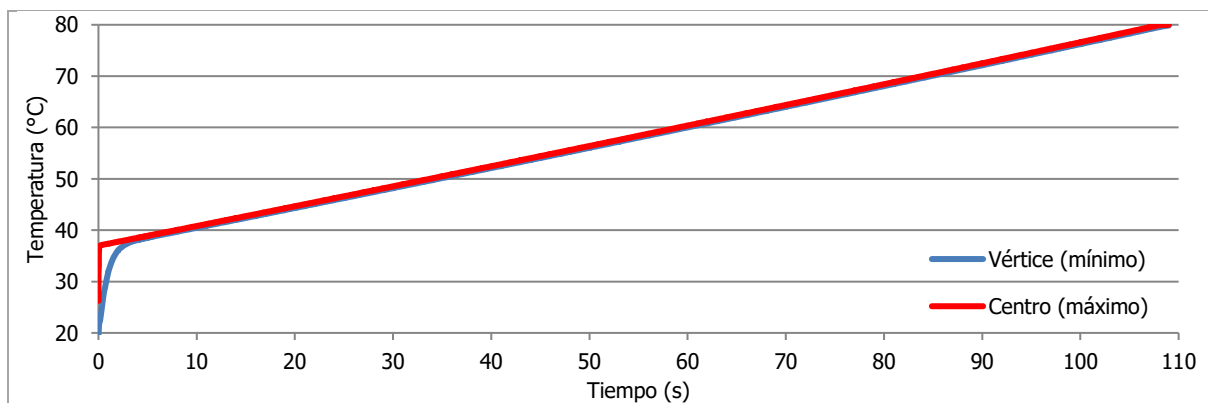


Figura A15. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$.

10.2.1.4 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$

En la *Figura A16*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

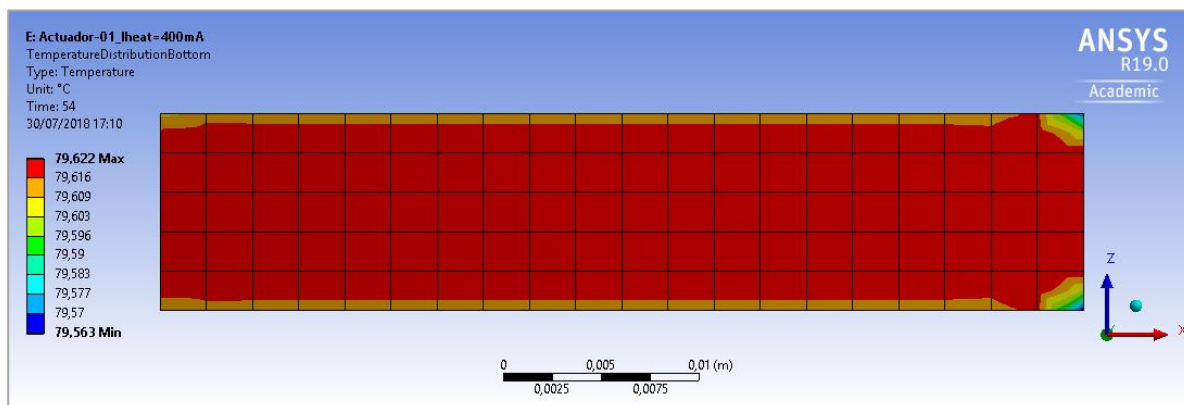


Figura A16. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$.

En la *Figura A17*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

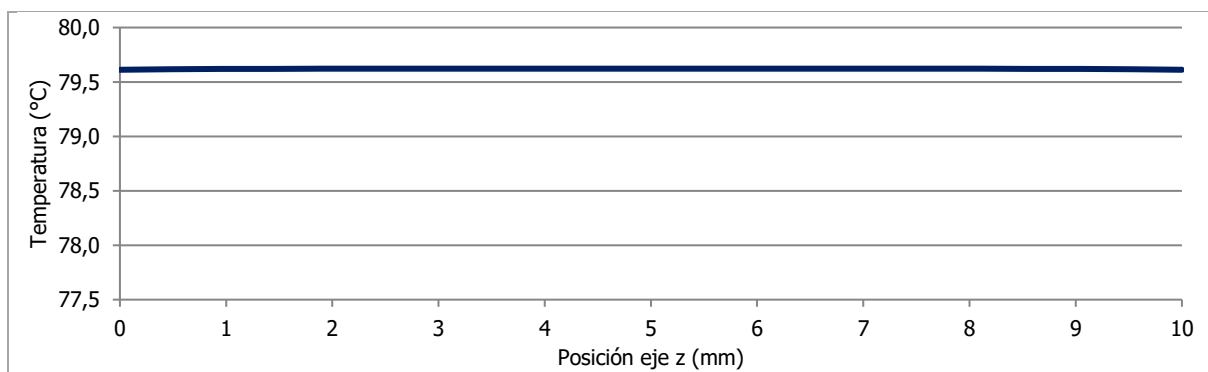


Figura A17. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$.

En la *Figura A18*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

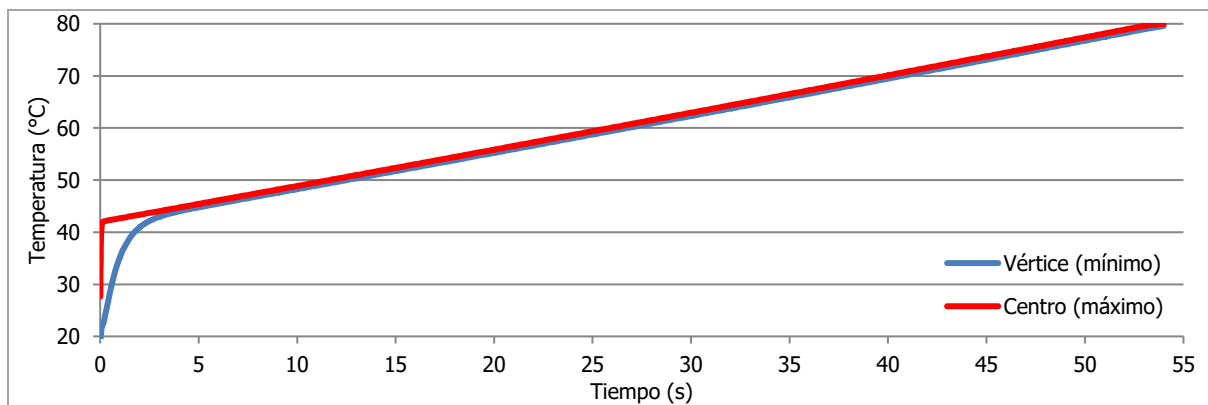


Figura A18. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$.

10.2.1.5 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$

En la *Figura A19*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

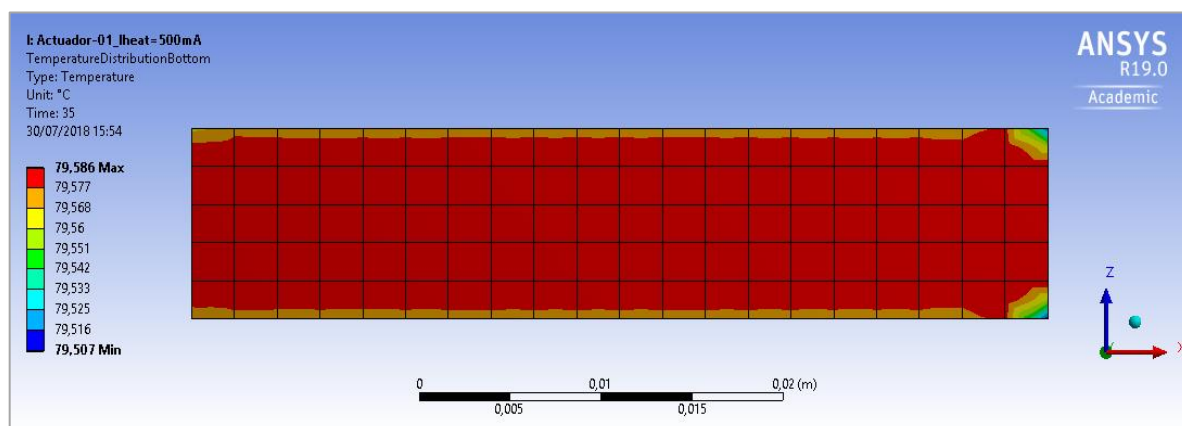


Figura A19. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

En la *Figura A20*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

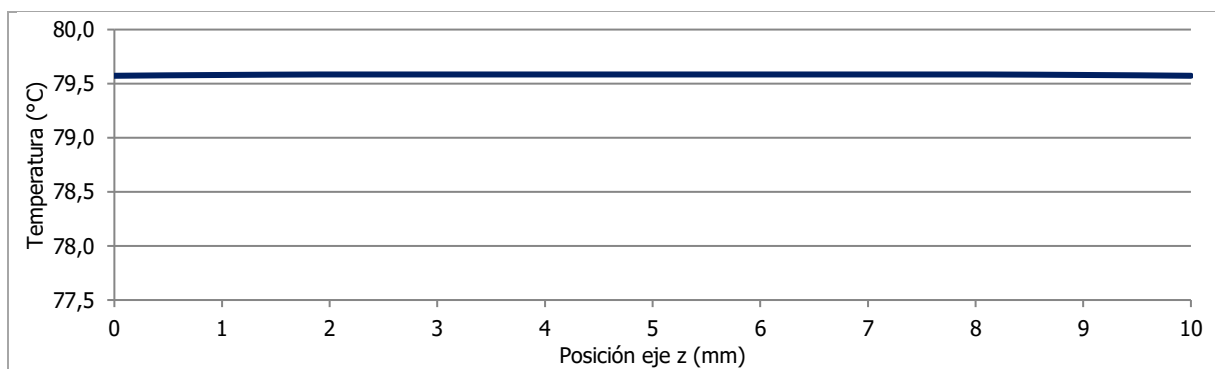


Figura A20. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

En la *Figura A21*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

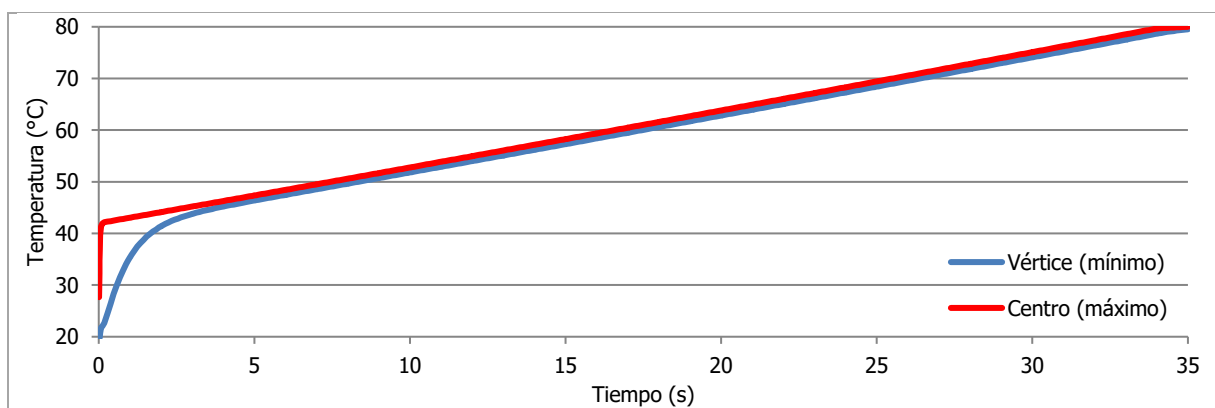


Figura A21. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

10.2.1.6 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$

En la *Figura A22*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

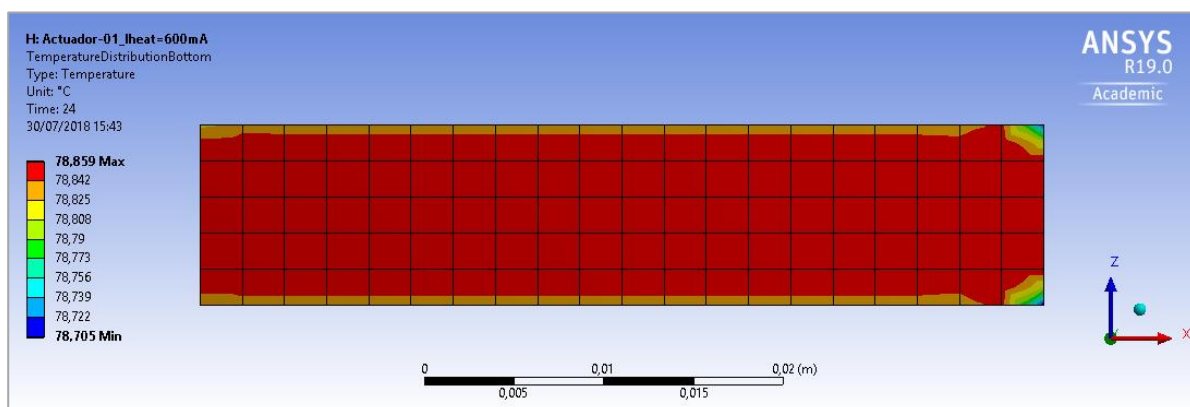


Figura A22. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$.

En la *Figura A23*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

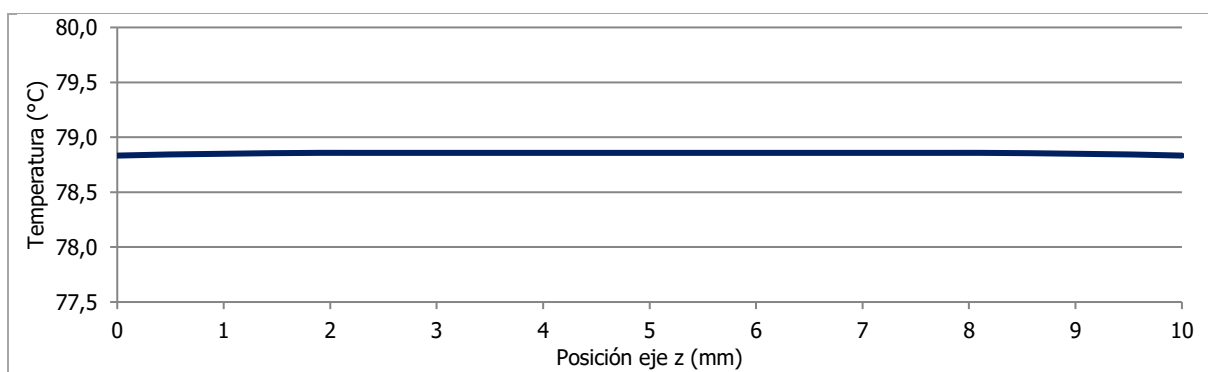


Figura A23. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$.

En la *Figura A24*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

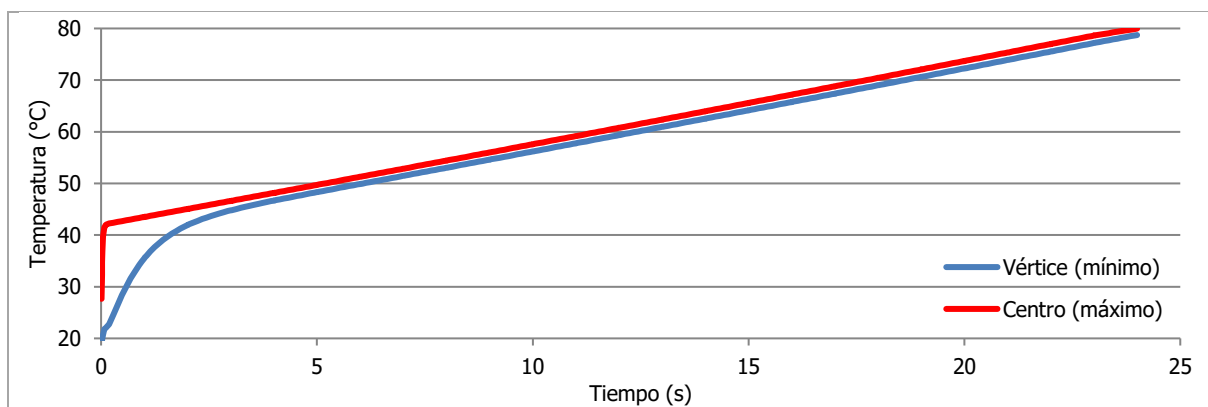


Figura A24. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$.

10.2.1.7 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 700 \text{ mA}$

En la *Figura A25*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

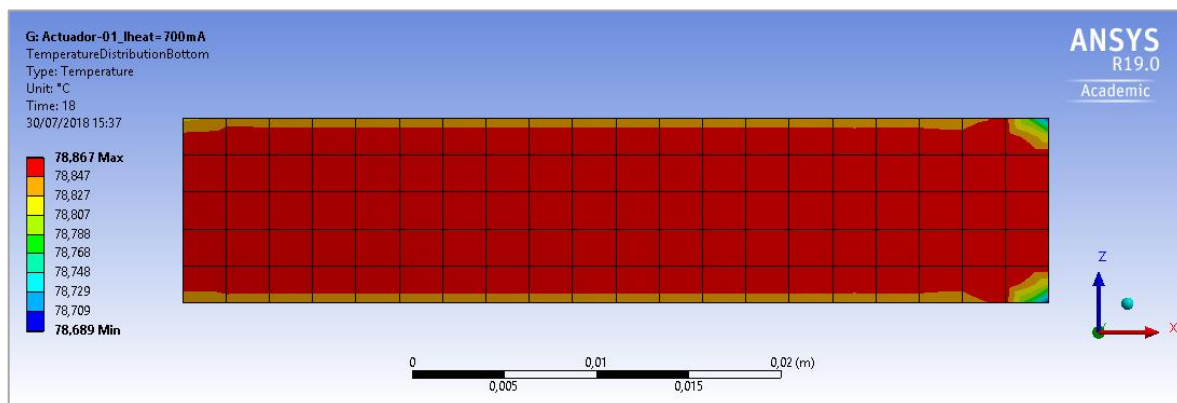


Figura A25. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 700 \text{ mA}$.

En la *Figura A26*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

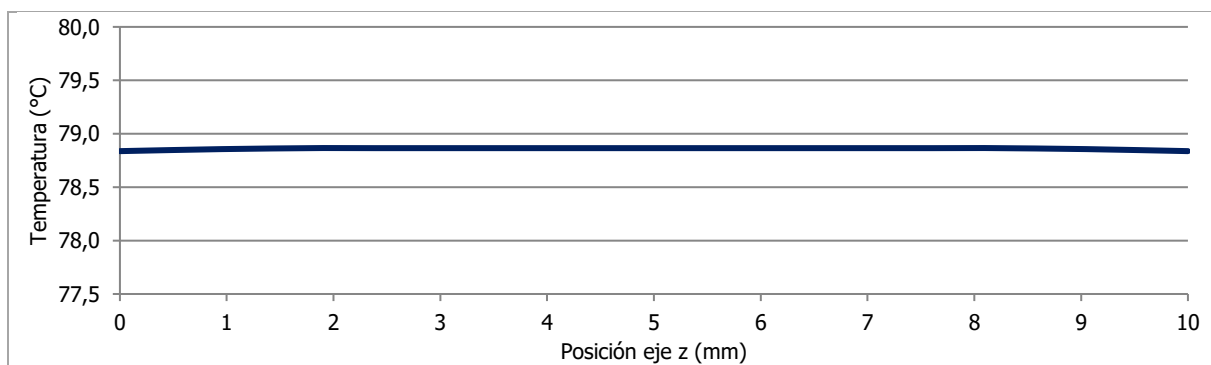


Figura A26. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 700 \text{ mA}$.

En la *Figura A27*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

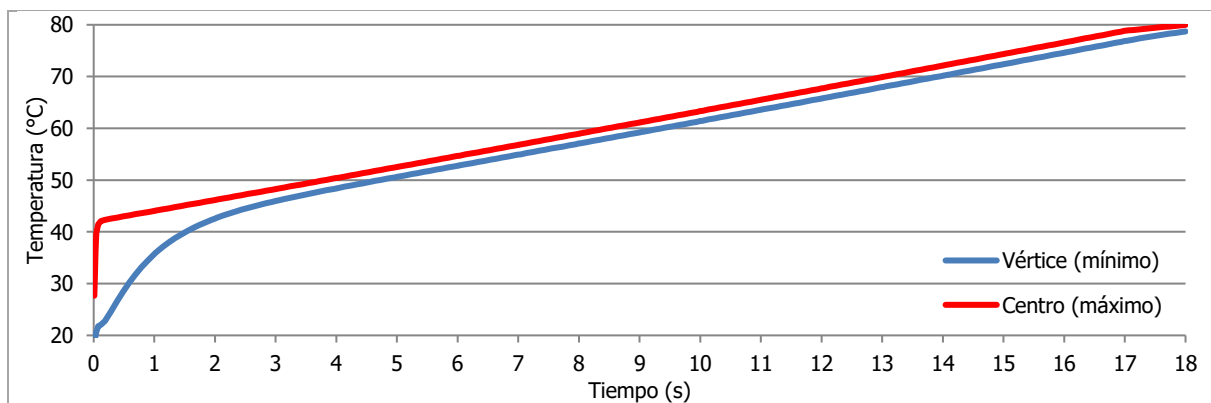


Figura A27. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 700 \text{ mA}$.

10.2.1.8 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 800\text{ mA}$

En la *Figura A28*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

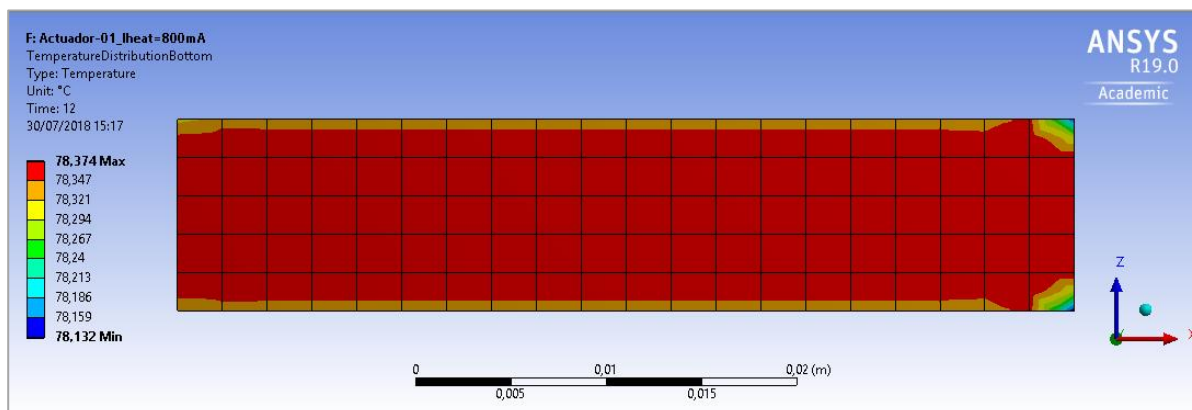


Figura A28. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 800\text{ mA}$.

En la *Figura A29*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

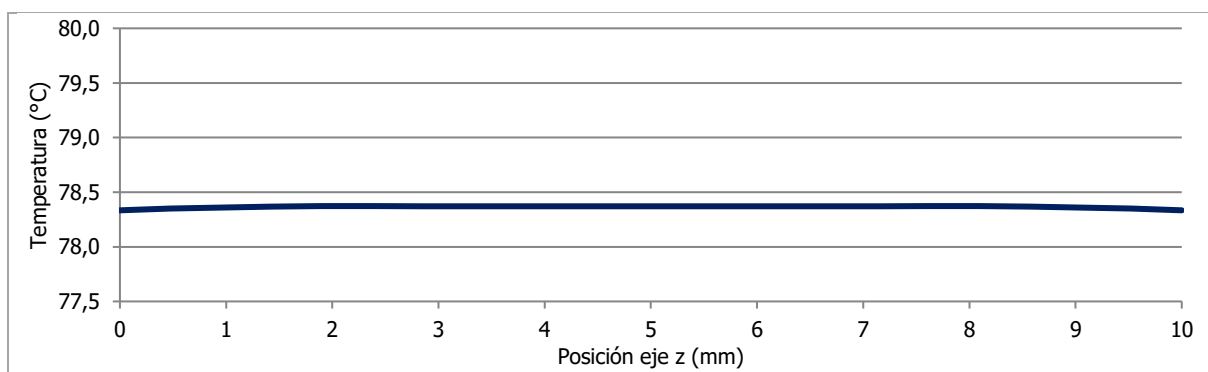


Figura A29. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 800\text{ mA}$.

En la *Figura A30*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

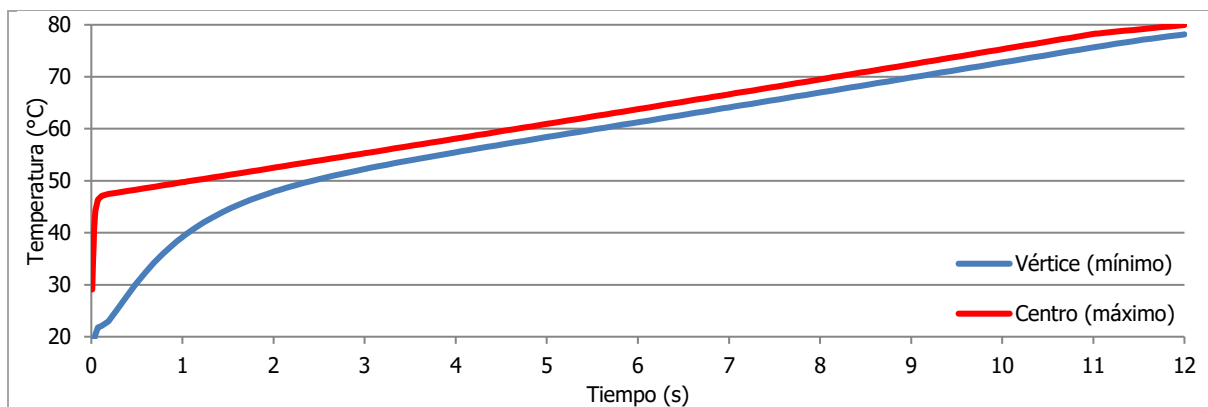


Figura A30. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 800\text{ mA}$.

10.2.1.9 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$

En la *Figura A31*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

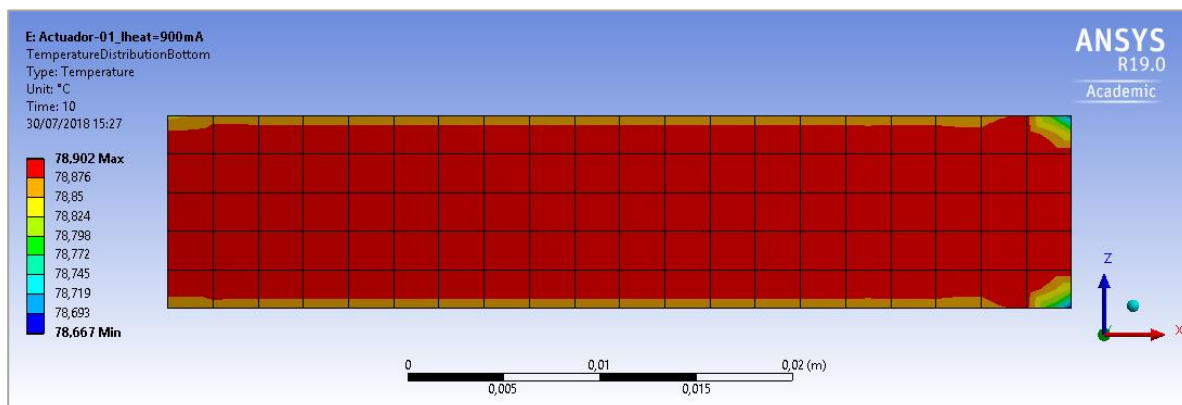


Figura A31. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$.

En la *Figura A32*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

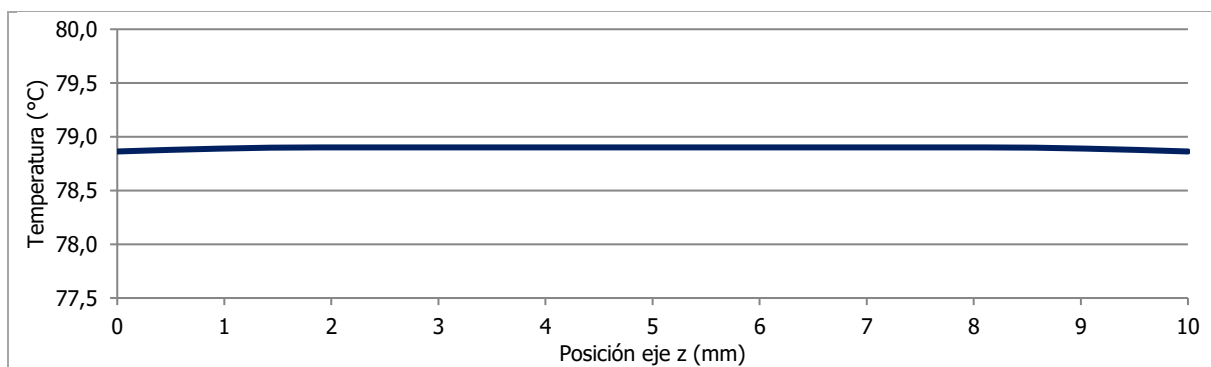


Figura A32. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$.

En la *Figura A33*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

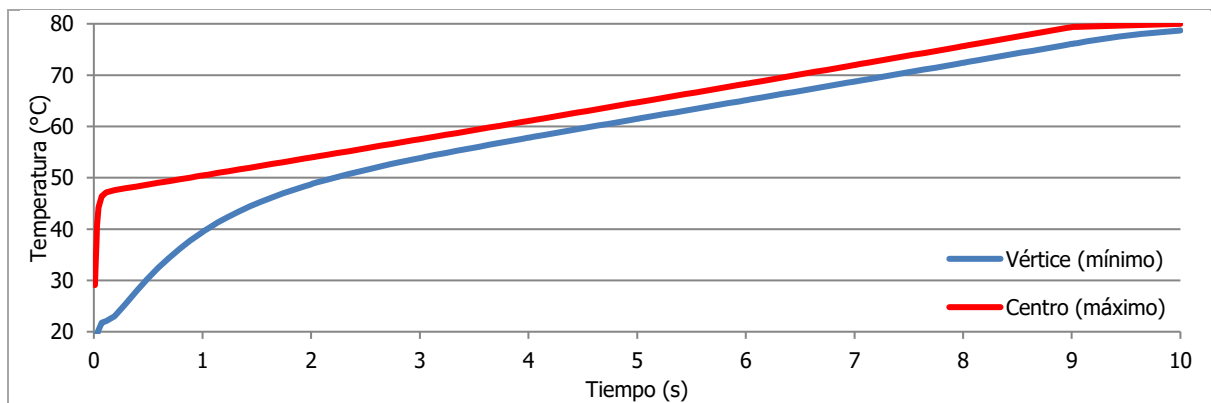


Figura A33. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$.

10.2.1.10 Simulaciones térmicas del Actuador-01 para $I_{HEAT} = 1 A$

En la *Figura A34*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

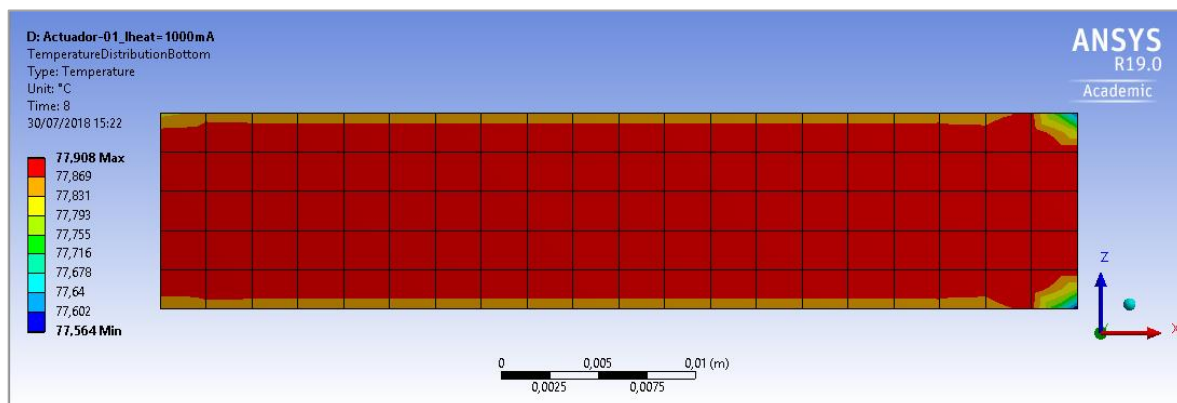


Figura A34. Distribución de temperatura del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 1000 mA$.

En la *Figura A35*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

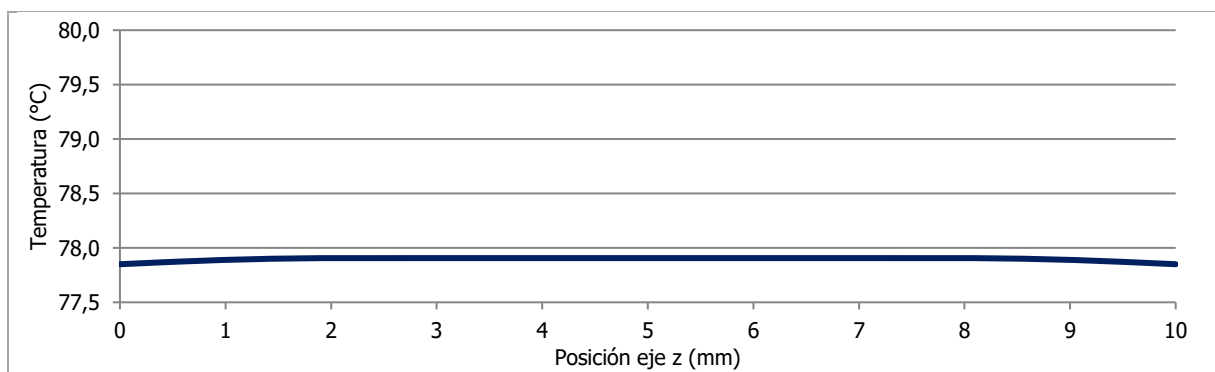


Figura A35. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 1000 mA$.

En la *Figura A36*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

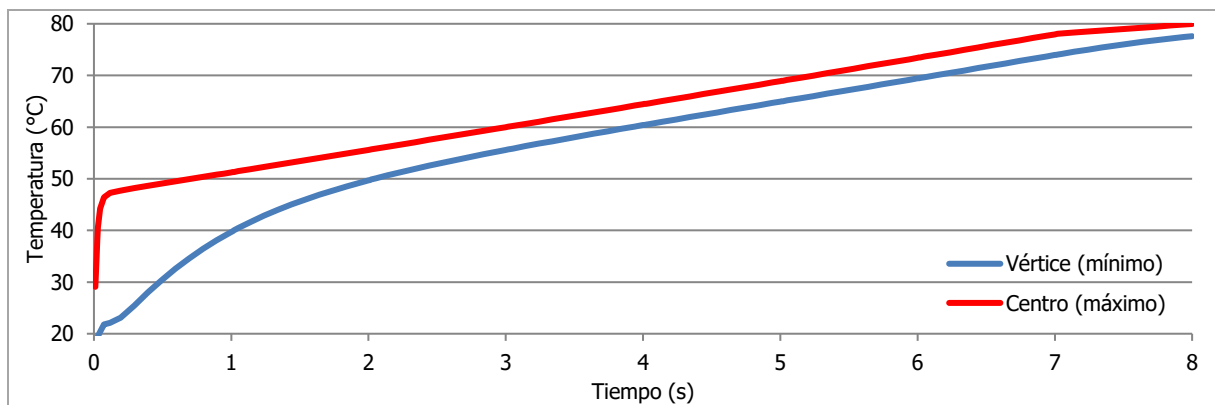


Figura A36. Respuesta dinámica simulada del Actuador-01 para una corriente $I_{HEAT} = 1000 mA$.

10.2.2 Simulaciones térmicas del Actuador-02 (Serpentín rectangular reducido)

10.2.2.1 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$

En la *Figura A37*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

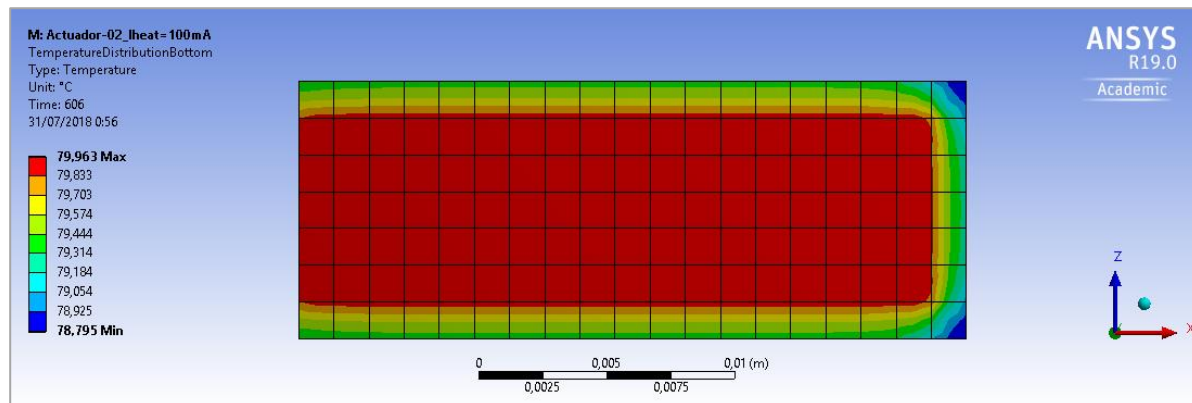


Figura A37. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$.

En la *Figura A38*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

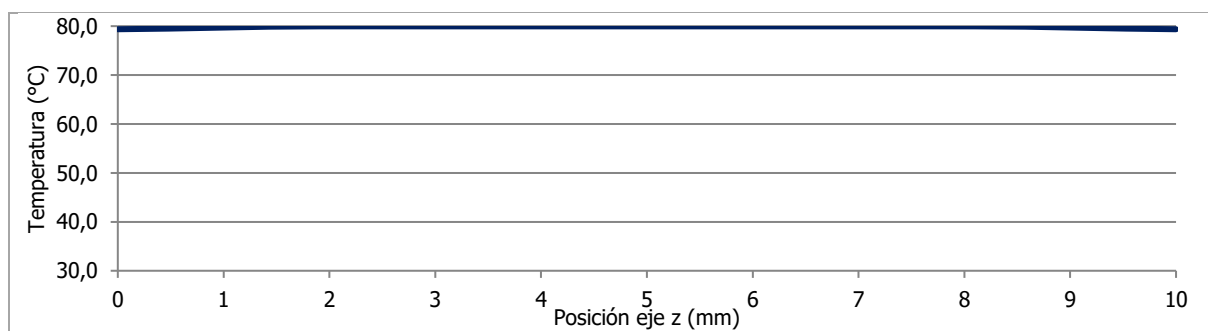


Figura A38. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$.

En la *Figura A39*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

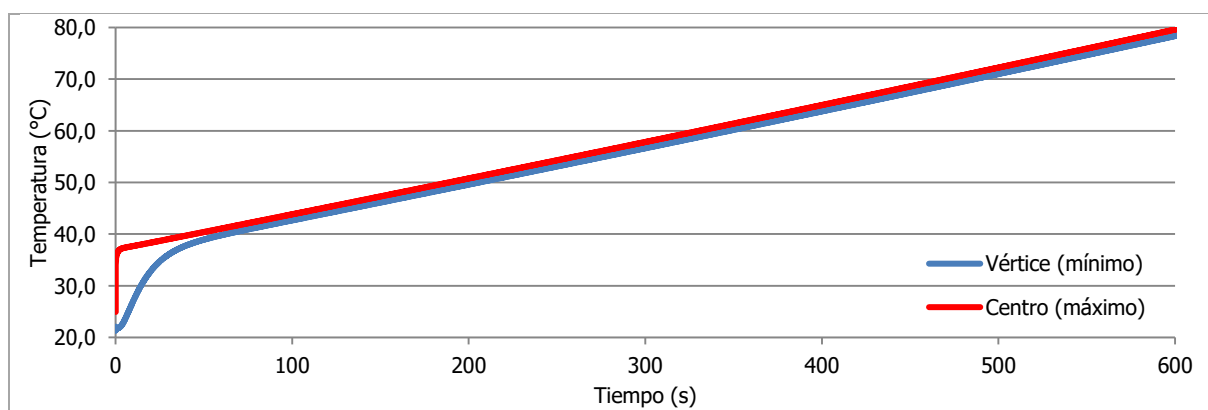


Figura A39. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$.

10.2.2.2 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$

En la *Figura A40*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

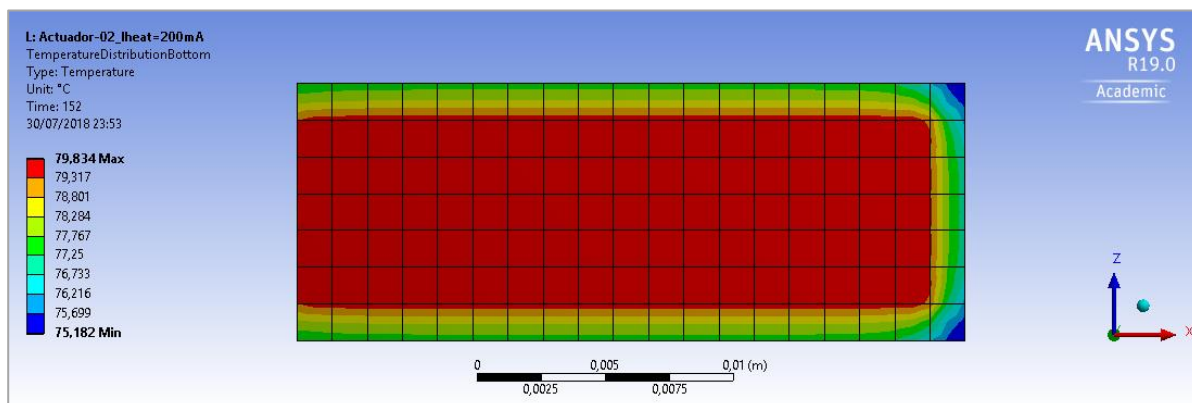


Figura A40. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$.

En la *Figura A41*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

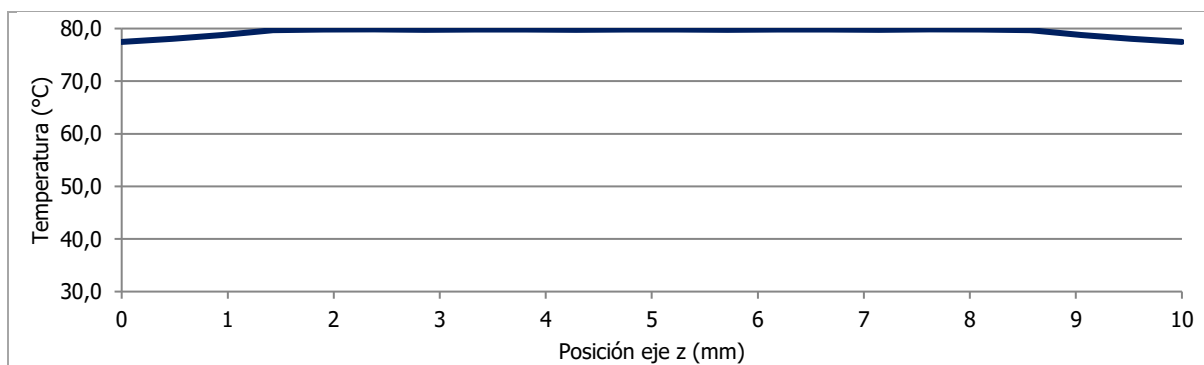


Figura A41. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$.

En la *Figura A42*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

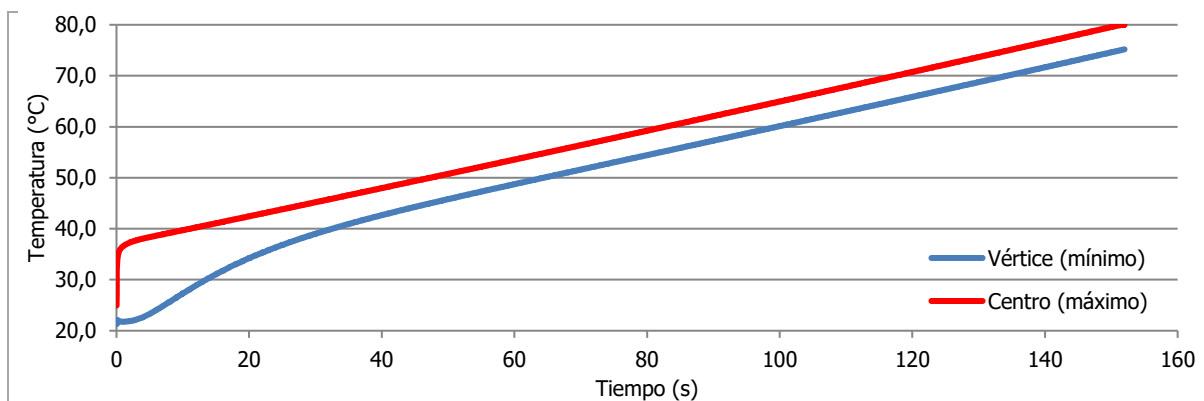


Figura A42. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 200\text{ mA}$.

10.2.2.3 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$

En la *Figura A43*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

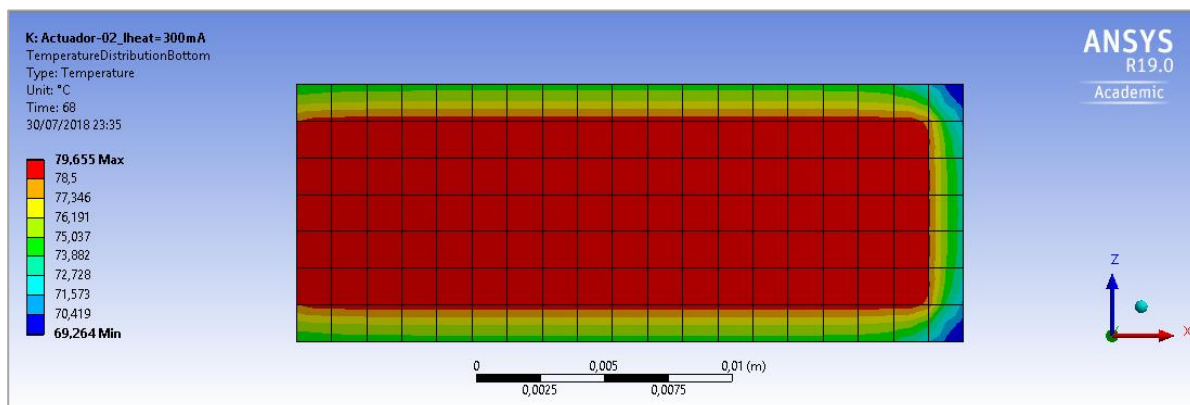


Figura A43. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$.

En la *Figura A44*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

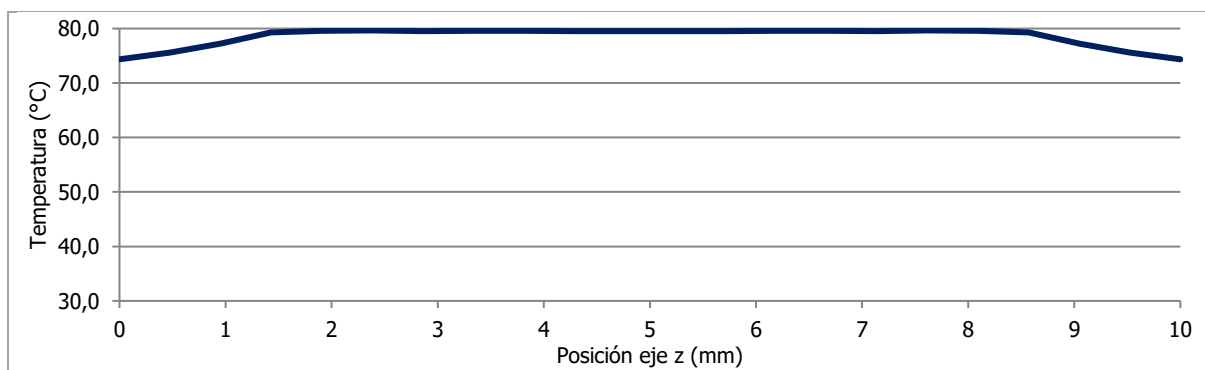


Figura A44. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$.

En la *Figura A45*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

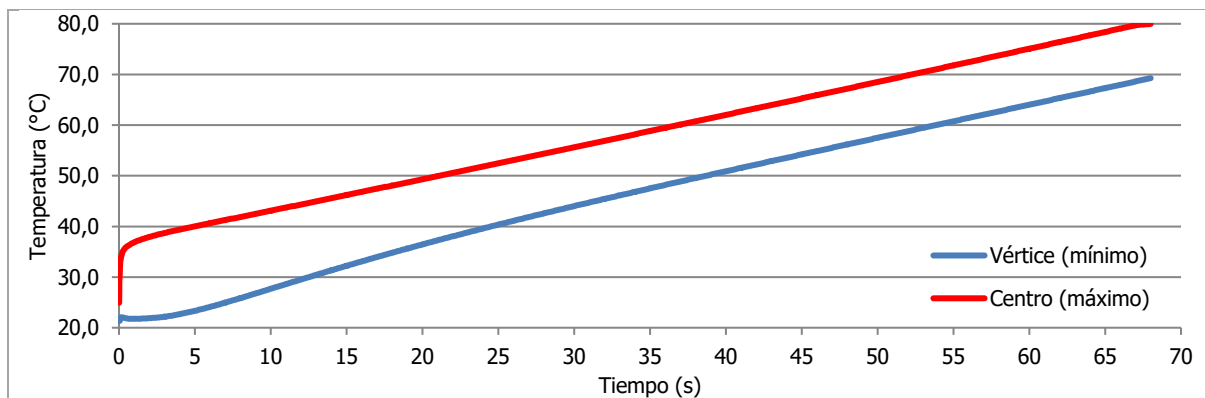


Figura A45. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 300\text{ mA}$.

10.2.2.4 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$

En la *Figura A46*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

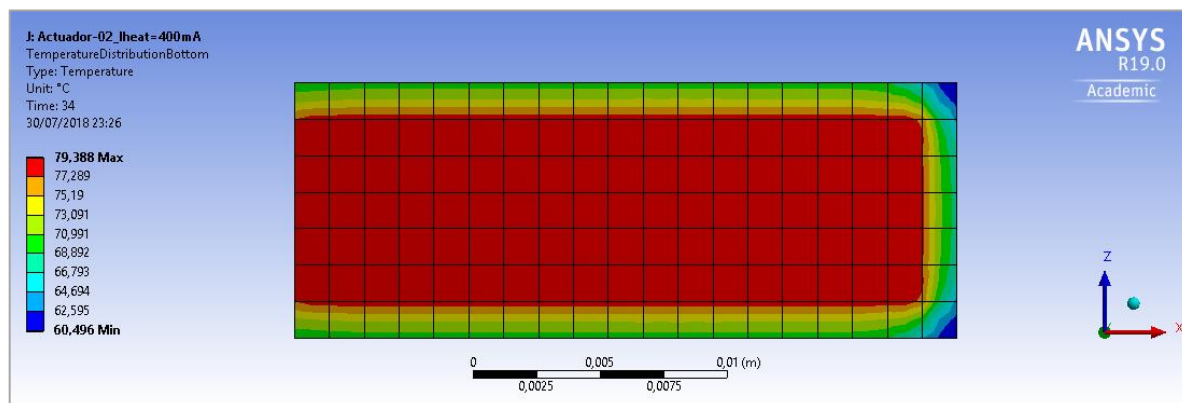


Figura A46. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$.

En la *Figura A47*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje *z* en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

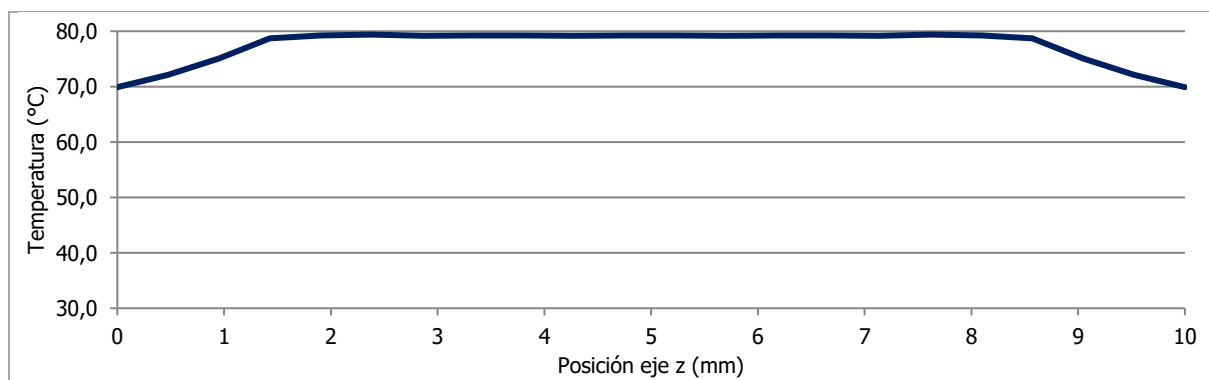


Figura A47. Perfil de temperatura en el eje *z* del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$.

En la *Figura A48*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

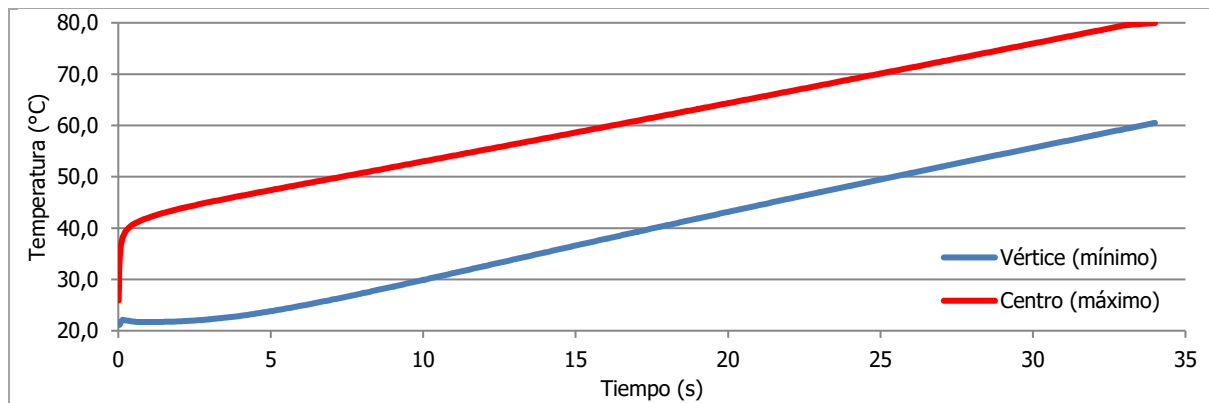


Figura A48. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 400\text{ mA}$.

10.2.2.5 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$

En la *Figura A49*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

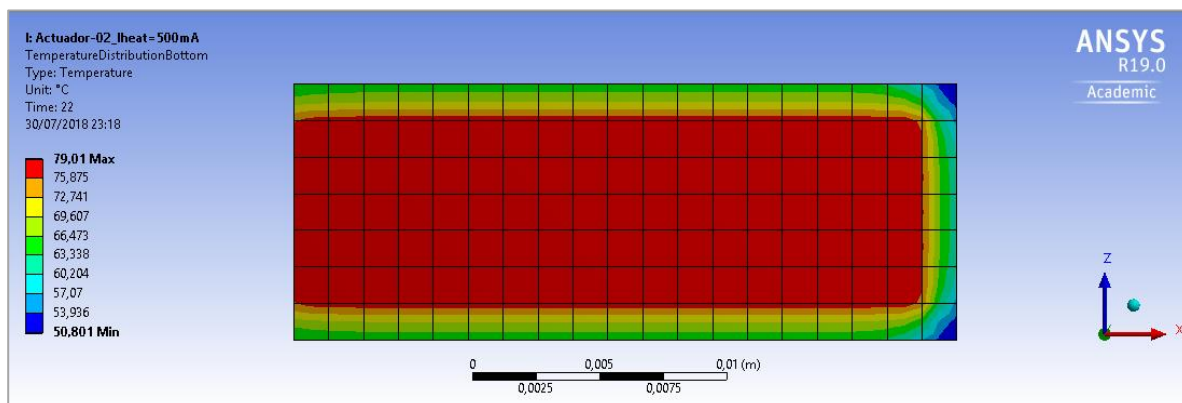


Figura A49. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

En la *Figura A50*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

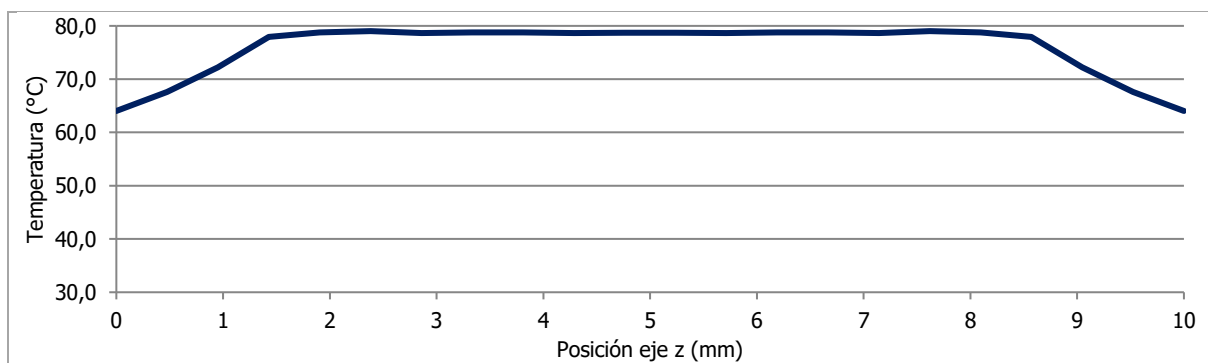


Figura A50. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

En la *Figura A51*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

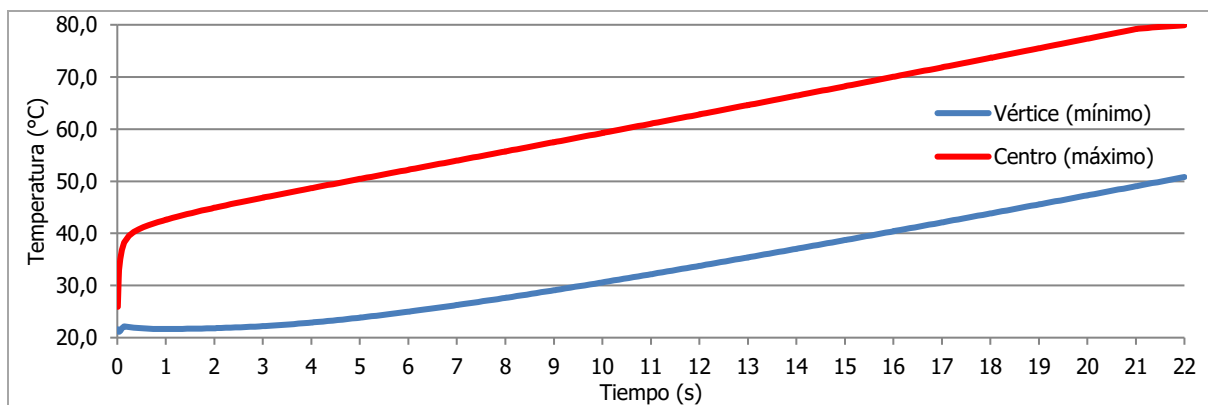


Figura A51. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

10.2.2.6 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$

En la *Figura A52*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

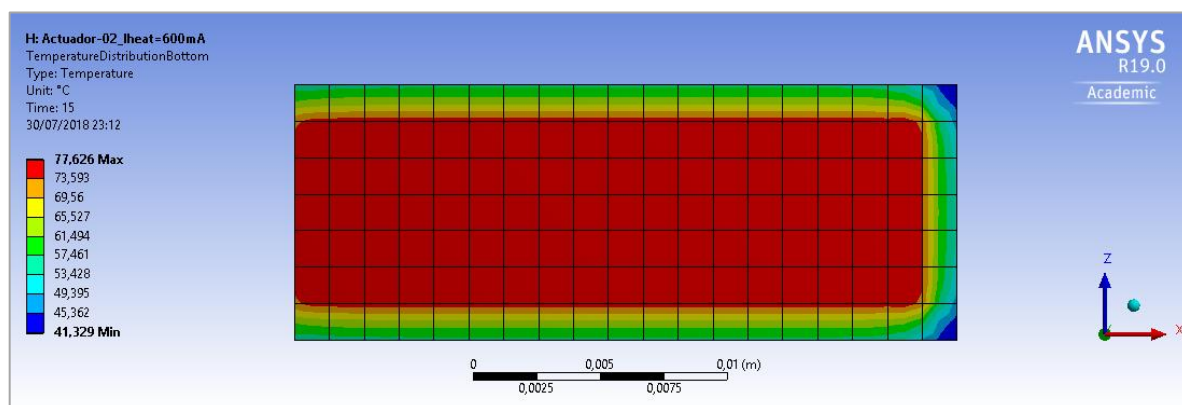


Figura A52. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$.

En la *Figura A53*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

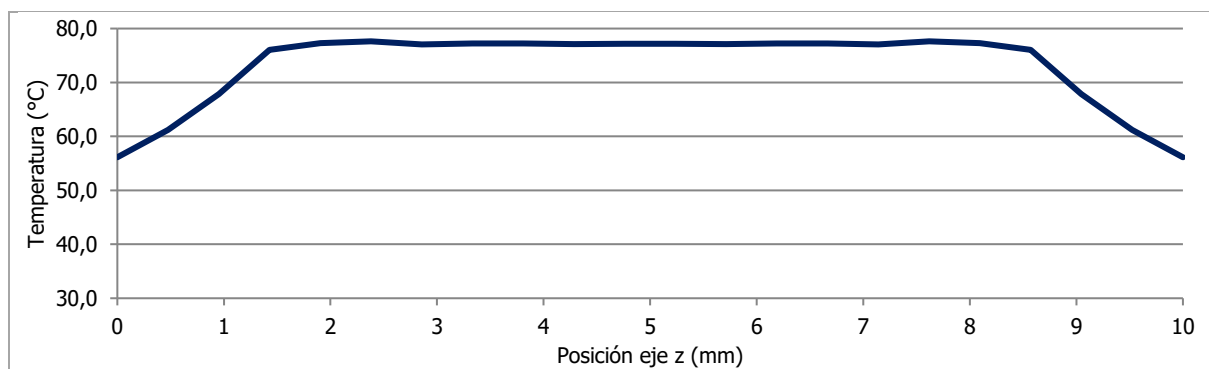


Figura A53. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$.

En la *Figura A54*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

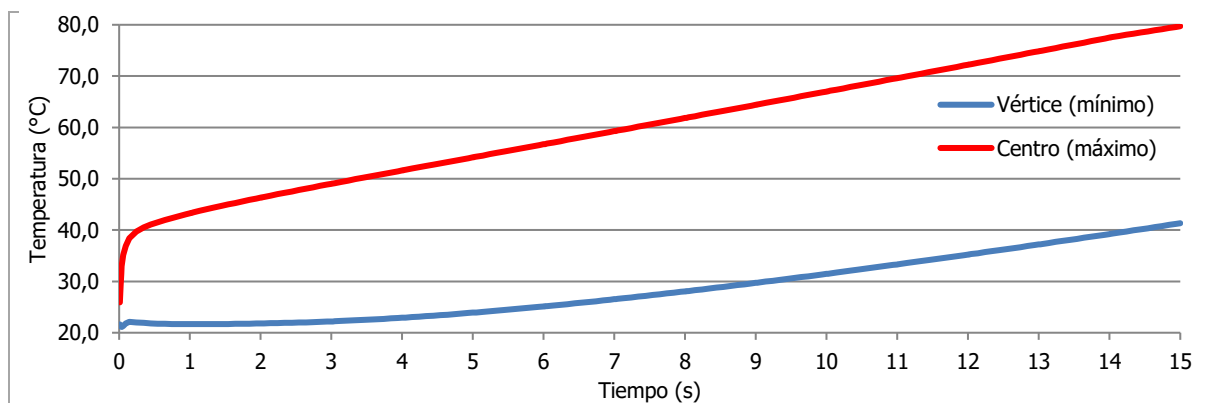


Figura A54. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 600\text{ mA}$.

10.2.2.7 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 700\text{ mA}$

En la *Figura A55*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

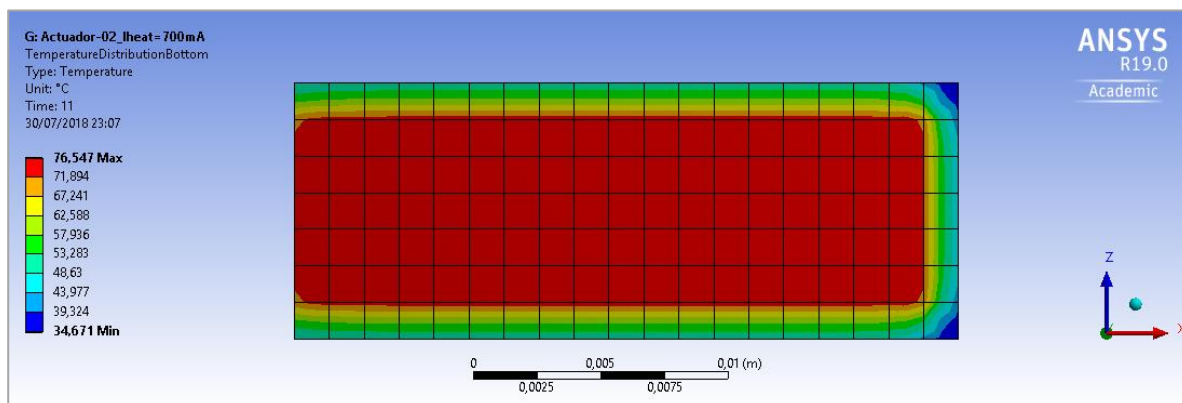


Figura A55. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 700\text{ mA}$.

En la *Figura A56*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

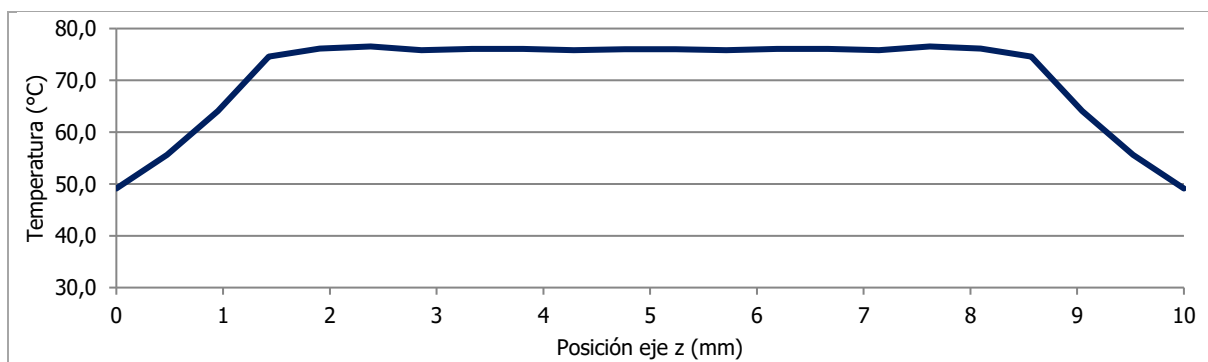


Figura A56. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 700\text{ mA}$.

En la *Figura A57*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

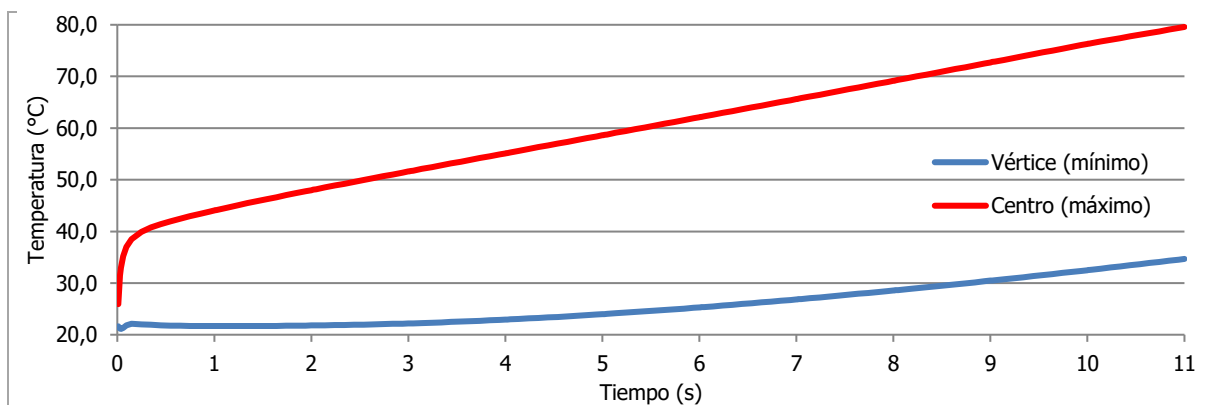


Figura A57. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 700\text{ mA}$.

10.2.2.8 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 800 \text{ mA}$

En la *Figura A58*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

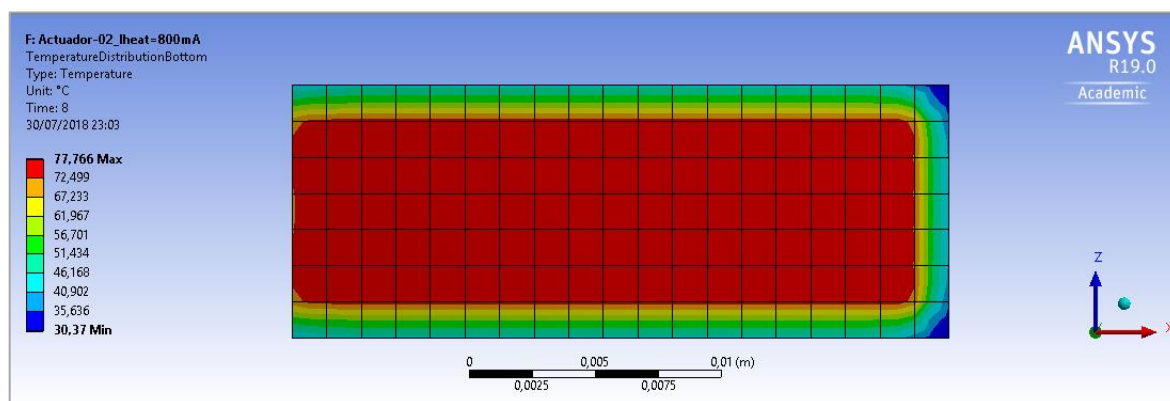


Figura A58. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 800 \text{ mA}$.

En la *Figura A59*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

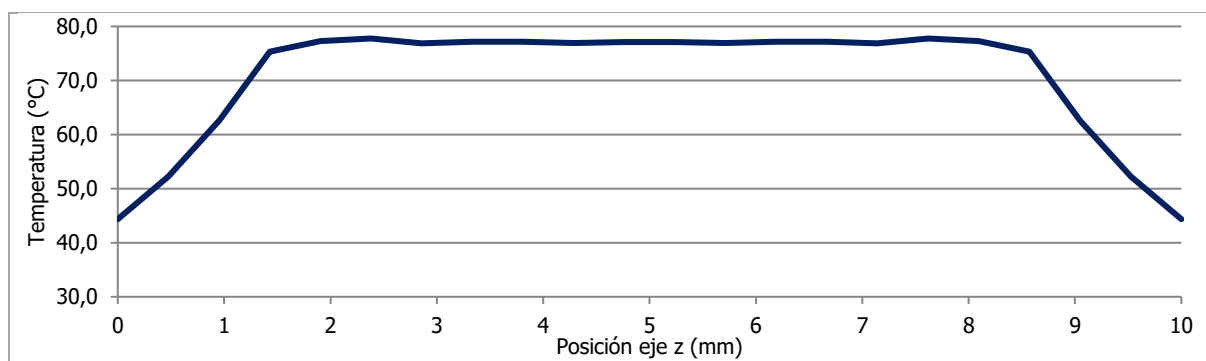


Figura A59. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 800 \text{ mA}$.

En la *Figura A60*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

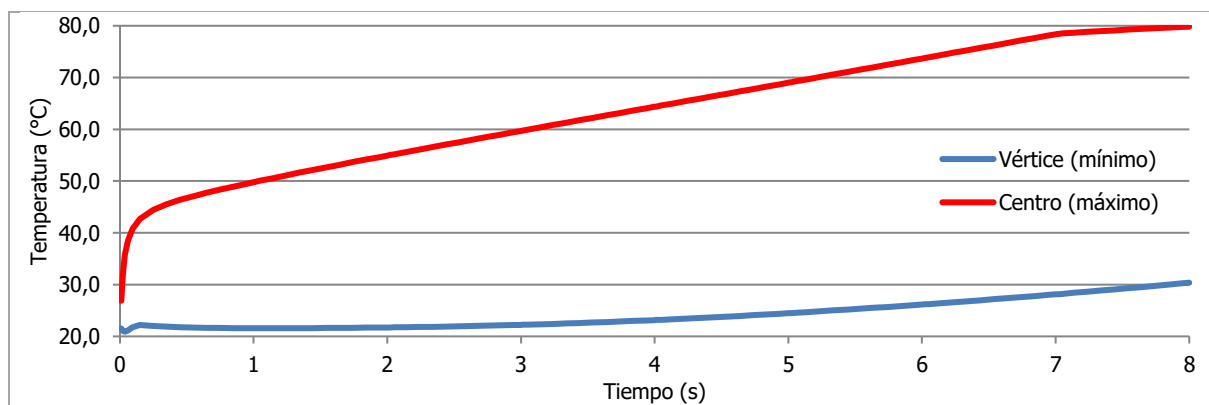


Figura A60. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 800 \text{ mA}$.

10.2.2.9 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$

En la *Figura A61*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

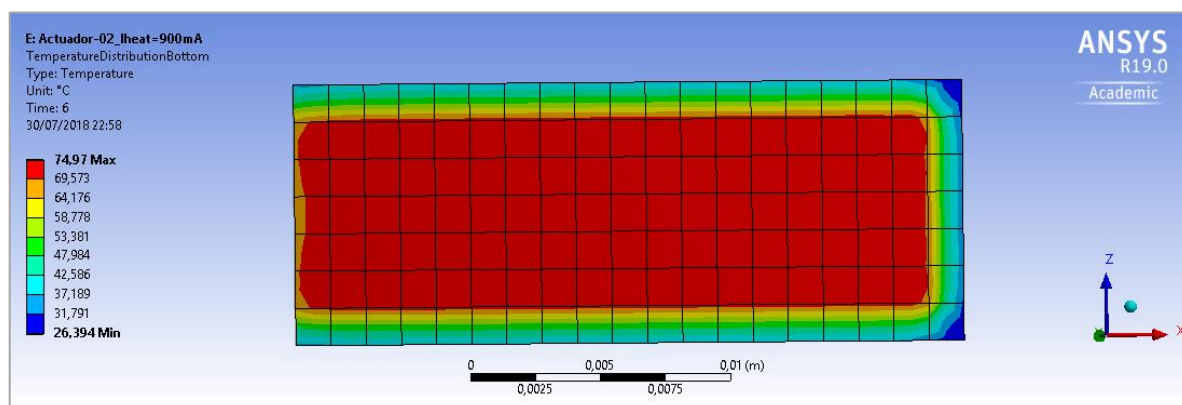


Figura A61. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$.

En la *Figura A62*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

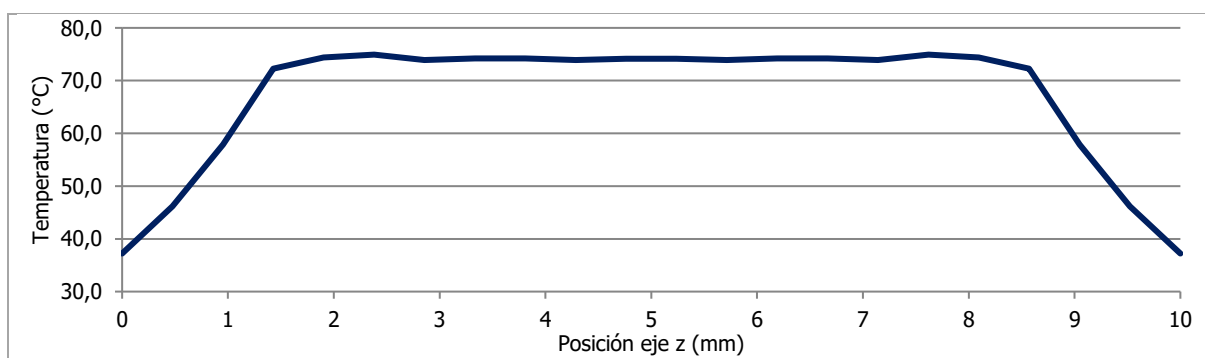


Figura A62. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$.

En la *Figura A63*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

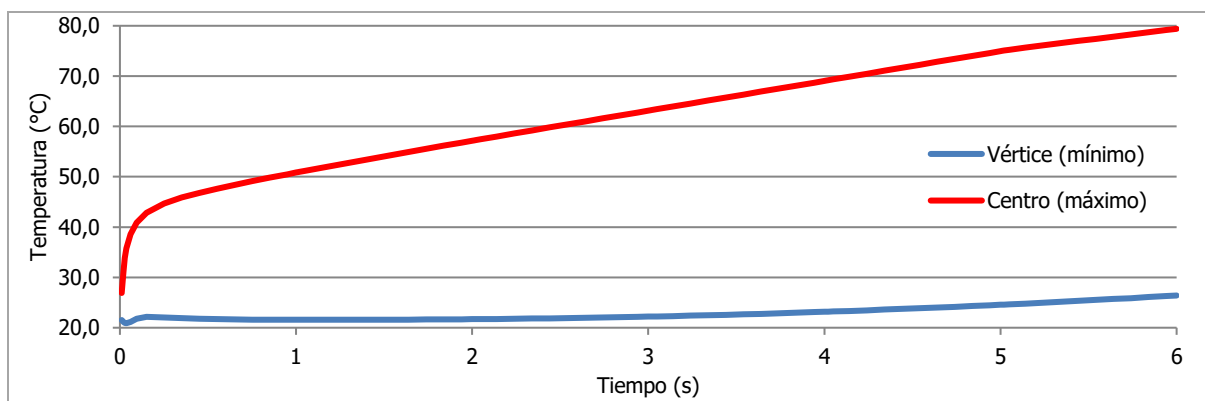


Figura A63. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 900\text{ mA}$.

10.2.2.10 Simulaciones térmicas del Actuador-02 para $I_{HEAT} = 1 A$

En la *Figura A64*, se presenta la distribución de temperatura del dispositivo en la capa *bottom* constituida de material epoxi:

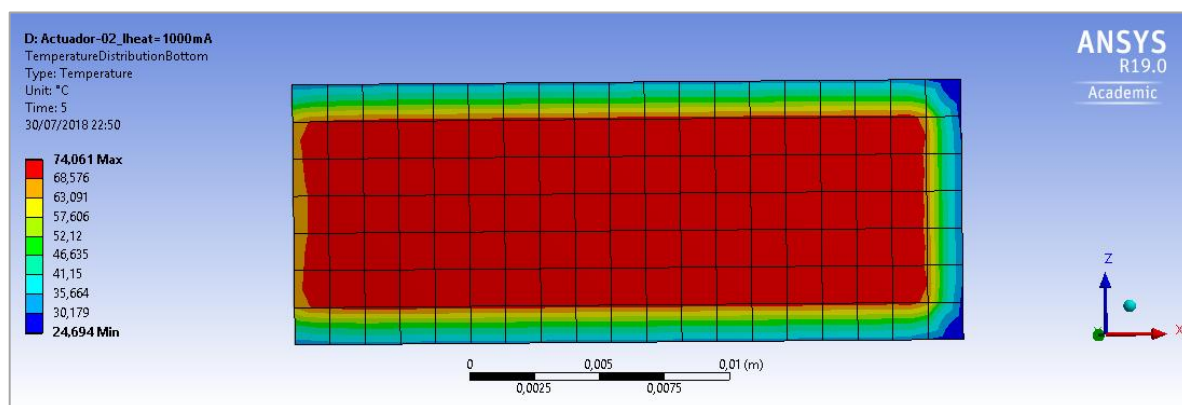


Figura A64. Distribución de temperatura del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 1000 mA$.

En la *Figura A65*, se muestra el perfil de temperatura sobre el eje z en la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

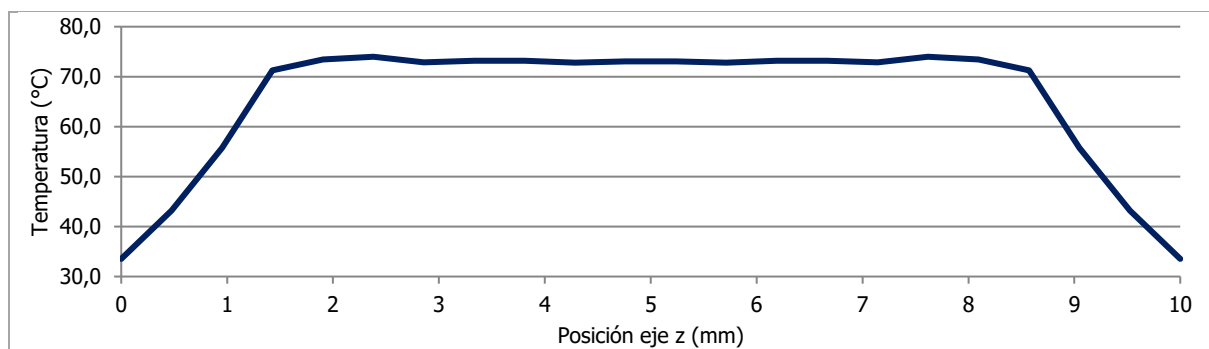


Figura A65. Perfil de temperatura en el eje z del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 1000 mA$.

En la *Figura A66*, se representa la respuesta dinámica en el centro de la superficie interior y en uno de los vértices de la superficie exterior del actuador constituida de material epoxi:

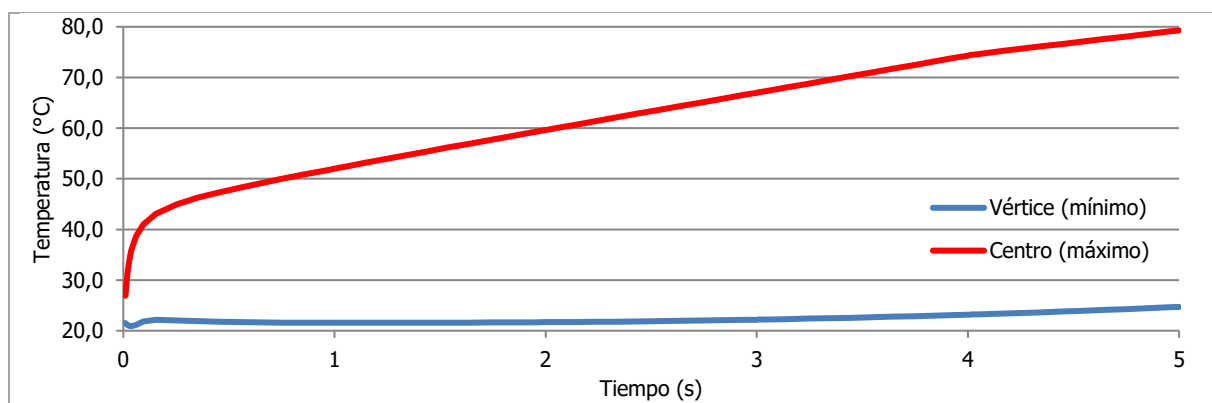


Figura A66. Respuesta dinámica simulada del Actuador-02 para una corriente $I_{HEAT} = 1000 mA$.

10.3 Anexo 3: Resultados experimentales preliminares

A continuación, se presentan las tablas con los valores presentados en el apartado 6.2.6 *Pruebas experimentales preliminares del actuador mecánico polimérico* del Documento Básico *Memoria*, donde se muestran los resultados obtenidos de las pruebas experimentales preliminares para los modelos de Actuador-01 (serpentín rectangular) y Actuador-02 (serpentín rectangular reducido).

10.3.1 Resultados experimentales Actuador-01 (Serpentín rectangular)

En la *Tabla A1*, se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del Test-01, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $I_{HEAT} = 250 \text{ mA}$:

PreTest-01: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
-	0,0394	0,01	3,9400	0,000	28,00
Test-01: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 250 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
0:00	1,0174	0,25	4,0696	14,891	42,89
0:05	1,0240	0,25	4,0960	17,924	45,92
0:10	1,0288	0,25	4,1152	20,130	48,13
0:15	1,0324	0,25	4,1296	21,784	49,78
0:20	1,0356	0,25	4,1424	23,255	51,26
0:25	1,0393	0,25	4,1572	24,956	52,96
0:30	1,0422	0,25	4,1688	26,288	54,29
0:35	1,0454	0,25	4,1816	27,759	55,76
0:40	1,0487	0,25	4,1948	29,276	57,28
0:45	1,0519	0,25	4,2076	30,746	58,75
0:50	1,0549	0,25	4,2196	32,125	60,13
0:55	1,0576	0,25	4,2304	33,366	61,37
1:00	1,0599	0,25	4,2396	34,423	62,42
1:05	1,0619	0,25	4,2476	35,342	63,34
1:10	1,0640	0,25	4,2560	36,307	64,31
1:15	1,0659	0,25	4,2636	37,181	65,18
1:20	1,0676	0,25	4,2704	37,962	65,96
1:25	1,0691	0,25	4,2764	38,651	66,65
1:30	1,0704	0,25	4,2816	39,249	67,25
1:35	1,0715	0,25	4,2860	39,754	67,75
1:40	1,0728	0,25	4,2912	40,352	68,35
1:45	1,0738	0,25	4,2952	40,811	68,81
1:50	1,0747	0,25	4,2988	41,225	69,22
1:55	1,0754	0,25	4,3016	41,547	69,55
2:00	1,0762	0,25	4,3048	41,914	69,91
2:05	1,0767	0,25	4,3068	42,144	70,14
2:10	1,0773	0,25	4,3092	42,420	70,42
2:15	1,0775	0,25	4,3100	42,512	70,51
2:20	1,0778	0,25	4,3112	42,650	70,65
2:25	1,0785	0,25	4,3140	42,971	70,97
2:30	1,0787	0,25	4,3148	43,063	71,06
2:35	1,0788	0,25	4,3152	43,109	71,11
2:40	1,0791	0,25	4,3164	43,247	71,25
2:45	1,0792	0,25	4,3168	43,293	71,29
2:50	1,0796	0,25	4,3184	43,477	71,48

2:55	1,0795	0,25	4,3180	43,431	71,43
3:00	1,0799	0,25	4,3196	43,615	71,61
3:05	1,0799	0,25	4,3196	43,615	71,61
3:10	1,0809	0,25	4,3236	44,074	72,07
3:15	1,0810	0,25	4,3240	44,120	72,12
3:20	1,0803	0,25	4,3212	43,799	71,80
3:25	1,0811	0,25	4,3244	44,166	72,17
3:30	1,0814	0,25	4,3256	44,304	72,30
3:35	1,0811	0,25	4,3244	44,166	72,17
3:40	1,0811	0,25	4,3244	44,166	72,17
3:45	1,0812	0,25	4,3248	44,212	72,21
3:50	1,0812	0,25	4,3248	44,212	72,21
3:55	1,0815	0,25	4,3260	44,350	72,35
4:00	1,0807	0,25	4,3228	43,983	71,98
4:05	1,0807	0,25	4,3228	43,983	71,98
4:10	1,0810	0,25	4,3240	44,120	72,12
4:15	1,0810	0,25	4,3240	44,120	72,12
4:20	1,0811	0,25	4,3244	44,166	72,17
4:25	1,0809	0,25	4,3236	44,074	72,07
4:30	1,0812	0,25	4,3248	44,212	72,21
4:35	1,0815	0,25	4,3260	44,350	72,35
4:40	1,0812	0,25	4,3248	44,212	72,21
4:45	1,0816	0,25	4,3264	44,396	72,40
4:50	1,0816	0,25	4,3264	44,396	72,40
4:55	1,0819	0,25	4,3276	44,534	72,53
5:00	1,0818	0,25	4,3272	44,488	72,49

Tabla A1. Resultados experimentales preliminares en el Test-01 ($I_{HEAT} = 250 \text{ mA}$ para Actuador-01).

En la *Tabla A2*, se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del Test-02, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $I_{HEAT} = 300 \text{ mA}$:

PreTest-02: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} (V)$	$I_{HEAT} (A)$	$R_{HEAT} (\Omega)$	$\Delta T (^\circ C)$	$T_{HEAT}(^\circ C)$
-	0,0524	0,01	5,2400	0,000	28,00
Test-02: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 300 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} (V)$	$I_{HEAT} (A)$	$R_{HEAT} (\Omega)$	$\Delta T (^\circ C)$	$T_{HEAT}(^\circ C)$
0:00	1,6282	0,30	5,4273	16,184	44,18
0:05	1,6402	0,30	5,4673	19,640	47,64
0:10	1,6479	0,30	5,4930	21,857	49,86
0:15	1,6552	0,30	5,5173	23,959	51,96
0:20	1,6630	0,30	5,5433	26,206	54,21
0:25	1,6742	0,30	5,5807	29,431	57,43
0:30	1,6708	0,30	5,5693	28,452	56,45
0:35	1,6794	0,30	5,5980	30,928	58,93
0:40	1,6872	0,30	5,6240	33,174	61,17
0:45	1,6943	0,30	5,6477	35,219	63,22
0:50	1,7011	0,30	5,6703	37,177	65,18
0:55	1,7054	0,30	5,6847	38,416	66,42
1:00	1,7096	0,30	5,6987	39,625	67,63
1:05	1,7131	0,30	5,7103	40,633	68,63
1:10	1,7164	0,30	5,7213	41,583	69,58
1:15	1,7196	0,30	5,7320	42,505	70,50

1:20	1,7225	0,30	5,7417	43,340	71,34
1:25	1,7266	0,30	5,7553	44,521	72,52
1:30	1,7297	0,30	5,7657	45,413	73,41
1:35	1,7320	0,30	5,7733	46,076	74,08
1:40	1,7345	0,30	5,7817	46,796	74,80
1:45	1,7364	0,30	5,7880	47,343	75,34
1:50	1,7391	0,30	5,7970	48,120	76,12
1:55	1,7423	0,30	5,8077	49,042	77,04
2:00	1,7485	0,30	5,8283	50,827	78,83
2:05	1,7480	0,30	5,8267	50,683	78,68
2:10	1,7479	0,30	5,8263	50,654	78,65
2:15	1,7484	0,30	5,8280	50,798	78,80
2:20	1,7471	0,30	5,8237	50,424	78,42
2:25	1,7465	0,30	5,8217	50,251	78,25
2:30	1,7465	0,30	5,8217	50,251	78,25

Tabla A2. Resultados experimentales preliminares en el Test-02 ($I_{HEAT} = 300 \text{ mA}$ para Actuador-01).

En la *Tabla A3*, se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del Test-03, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $730 \text{ mA} \leq I_{HEAT} \leq 980 \text{ mA}$:

PreTest-03: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} (V)$	$I_{HEAT} (A)$	$R_{HEAT} (\Omega)$	$\Delta T (^{\circ}C)$	$T_{HEAT}(^{\circ}C)$
Pre Test-03	0,0438	0,01	4,3800	0,000	28,00
Test-03: Alimentación del heater con un nivel de corriente $730 \text{ mA} \leq I_{HEAT} \leq 980 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} (V)$	$I_{HEAT} (A)$	$R_{HEAT} (\Omega)$	$\Delta T (^{\circ}C)$	$T_{HEAT}(^{\circ}C)$
0:00	3,4	0,73	4,6575	28,684	56,68
0:05	3,5	0,73	4,7945	42,843	70,84
0:10	3,9	0,80	4,8750	51,161	79,16
0:15	4,3	0,87	4,9425	58,140	86,14
0:20	4,6	0,92	5,0000	64,080	92,08
0:25	4,7	0,92	5,1087	75,314	103,31
0:30	4,7	0,91	5,1648	81,116	109,12
0:35	4,7	0,91	5,1648	81,116	109,12
0:40	4,8	0,89	5,3933	104,725	132,73
0:45	4,8	0,91	5,2747	92,474	120,47
0:50	5,0	0,93	5,3763	102,977	130,98
0:55	5,3	0,96	5,5208	117,910	145,91
1:00	5,4	0,98	5,5102	116,812	144,81
1:05	5,3	0,98	5,4082	106,265	134,27

Tabla A3. Resultados experimentales preliminares en el Test-03 ($730 \text{ mA} \leq I_{HEAT} \leq 980 \text{ mA}$ para Actuador-01).

10.3.2 Resultados experimentales Actuador-02 (Serpentín rectangular reducido)

En la *Tabla A4*, se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del Test-04, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$:

PreTest-04: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
Pre Test-04	0,02243	0,01	2,2430	0,000	29,00
Test-04: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
0:00	0,23476	0,10	2,3476	21,111	50,11
0:05	0,23494	0,10	2,3494	21,474	50,47
0:10	0,23529	0,10	2,3529	22,181	51,18
0:15	0,23547	0,10	2,3547	22,544	51,54
0:20	0,23569	0,10	2,3569	22,988	51,99
0:25	0,23576	0,10	2,3576	23,129	52,13
0:30	0,23584	0,10	2,3584	23,291	52,29
0:35	0,23598	0,10	2,3598	23,573	52,57
0:40	0,23613	0,10	2,3613	23,876	52,88
0:45	0,23616	0,10	2,3616	23,936	52,94
0:50	0,23621	0,10	2,3621	24,037	53,04
0:55	0,23625	0,10	2,3625	24,118	53,12
1:00	0,23631	0,10	2,3631	24,239	53,24

Tabla A4. Resultados experimentales preliminares en el Test-04 ($I_{HEAT} = 100 \text{ mA}$ para Actuador-02).

En la *Tabla A5*, se presentan los resultados obtenidos del desarrollo del Test-05, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $I_{HEAT} = 200 \text{ mA}$:

PreTest-05: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
Pre Test-05	0,02243	0,01	2,2430	0,000	29,00
Test-05: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 200 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
0:00	0,46984	0,20	2,3492	21,434	50,43
0:05	0,47124	0,20	2,3562	22,847	51,85
0:10	0,47247	0,20	2,3624	24,088	53,09
0:15	0,47363	0,20	2,3682	25,258	54,26
0:20	0,47439	0,20	2,3720	26,025	55,03
0:25	0,47509	0,20	2,3755	26,732	55,73
0:30	0,47540	0,20	2,3770	27,045	56,04
0:35	0,47555	0,20	2,3778	27,196	56,20
0:40	0,47580	0,20	2,3790	27,448	56,45
0:45	0,47613	0,20	2,3807	27,781	56,78
0:50	0,47644	0,20	2,3822	28,094	57,09
0:55	0,47694	0,20	2,3847	28,599	57,60
1:00	0,47748	0,20	2,3874	29,144	58,14
1:05	0,47837	0,20	2,3919	30,042	59,04
1:10	0,47988	0,20	2,3994	31,565	60,57
1:15	0,48159	0,20	2,4080	33,291	62,29
1:20	0,48348	0,20	2,4174	35,198	64,20
1:25	0,48531	0,20	2,4266	37,045	66,04
1:30	0,48741	0,20	2,4371	39,164	68,16
1:35	0,49073	0,20	2,4537	42,514	71,51

1:40	0,49231	0,20	2,4616	44,109	73,11
1:45	0,49512	0,20	2,4756	46,945	75,94
1:50	0,49634	0,20	2,4817	48,176	77,18
1:55	0,49875	0,20	2,4938	50,608	79,61
2:00	0,50028	0,20	2,5014	52,152	81,15
2:05	0,50097	0,20	2,5049	52,848	81,85

Tabla A5. Resultados experimentales preliminares en el Test-05 ($I_{HEAT} = 200 \text{ mA}$ para Actuador-02).

En la *Tabla A6*, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del Test-06, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$:

PreTest-06: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
Pre Test-06	0,0311	0,01	3,1100	0,000	28,00
Test-06: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
0:00	1,63033	0,5	3,2607	21,930	49,93
0:05	1,67956	0,5	3,3591	36,262	64,26
0:10	1,74367	0,5	3,4873	54,926	82,93
0:15	1,75469	0,5	3,5094	58,134	86,13
0:20	1,74611	0,5	3,4922	55,636	83,64
0:25	1,74753	0,5	3,4951	56,050	84,05
0:30	1,75502	0,5	3,5100	58,230	86,23
0:35	1,75792	0,5	3,5158	59,074	87,07
0:40	1,76263	0,5	3,5253	60,446	88,45
0:45	1,76558	0,5	3,5312	61,304	89,30

Tabla A6. Resultados experimentales preliminares en el Test-06 ($I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$ para Actuador-02).

En la *Tabla A7*, se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo del Test-07, para un valor de corriente eléctrica de calefacción de $I_{HEAT} = 750 \text{ mA}$:

PreTest-07: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 10 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
Pre Test-07	0,022	0,01	2,2000	0,000	28,00
Test-07: Alimentación del heater con un nivel de corriente $I_{HEAT} = 750 \text{ mA}$					
Tiempo	$V_{HEAT,IN} \text{ (V)}$	$I_{HEAT} \text{ (A)}$	$R_{HEAT} \text{ (}\Omega\text{)}$	$\Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{HEAT} \text{ (}^\circ\text{C)}$
0:00	1,75744	0,75	2,3433	29,477	57,48
0:05	1,8529	0,75	2,4705	55,668	83,67
0:10	1,92611	0,75	2,5681	75,753	103,75
0:15	1,97629	0,75	2,6351	89,521	117,52
0:20	2,01529	0,75	2,6871	100,221	128,22
0:25	2,04753	0,75	2,7300	109,066	137,07
0:30	2,07574	0,75	2,7677	116,806	144,81
0:35	2,09796	0,75	2,7973	122,902	150,90
0:40	2,10021	0,75	2,8003	123,519	151,52

Tabla A7. Resultados experimentales preliminares en el Test-07 ($I_{HEAT} = 750 \text{ mA}$ para Actuador-02).

10.4 Anexo 4: Simulaciones eléctricas para la Propuesta-I (*Boost-Buck*)

En el presente apartado se muestran las simulaciones eléctricas efectuadas mediante el software *PSIM* para validar el comportamiento de la etapa de control *Boost-Buck*, presentada en el apartado 6.3.1.1 *Propuesta-I: Boost-Buck* del Documento Básico *Memoria*. La propuesta consiste en una etapa *PFC* (*Power Factor Correction*) activa *DC/DC* y una etapa reductora en cascada, donde la etapa de corrección del factor de potencia presenta un comportamiento de resistor libre de pérdidas, transmitiendo idealmente la totalidad de la potencia de entrada a su salida. Ambas etapas de conmutación se efectúan a través de controles analógicos independientes de corriente por histéresis mediante la técnica de control *SMC* (*Sliding Mode Control*).

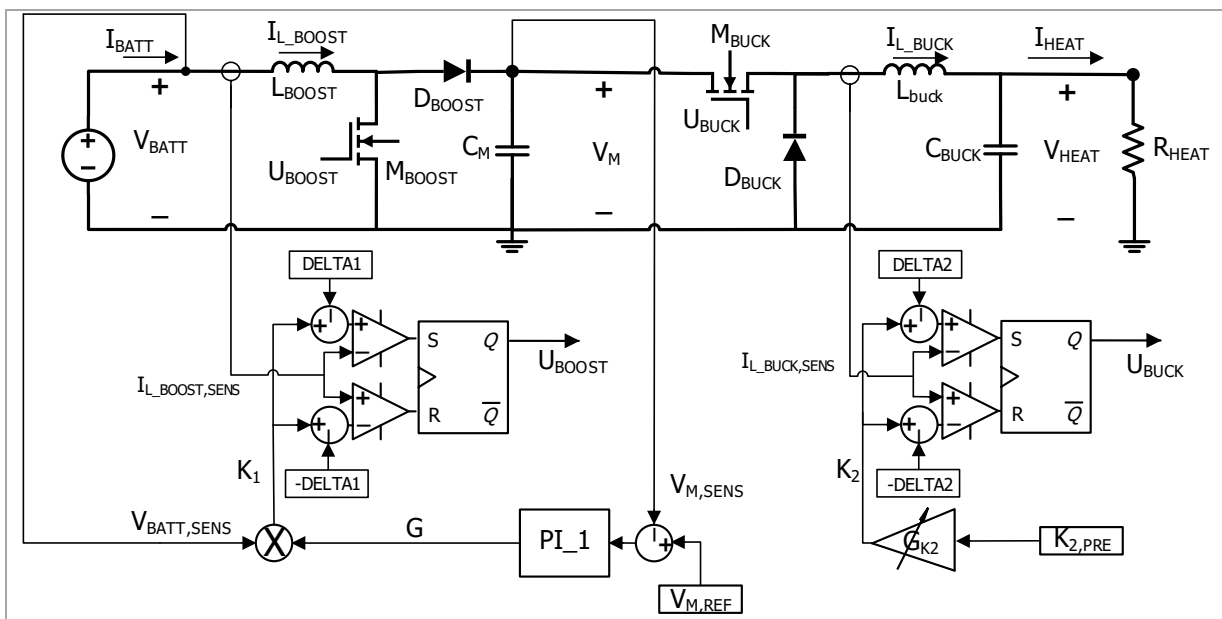


Figura A67. Esquema propuesto para la *Propuesta-I* (*Boost-Buck*).

Por un lado, en la *Figura A68*, se visualiza el circuito implementado para efectuar las simulaciones. Por otro lado, en la *Figura A69*, la *Figura A70* y la *Figura A71* se valida el análisis teórico realizado, mostrando que las leyes de control de ambos convertidores funcionan acorde a las previsiones.

En las gráficas que se presentan a continuación, se observa la evolución temporal de las señales en la entrada del dispositivo de corriente I_{BATT} y tensión V_{BATT} , así como la conductancia emulada G , con el propósito de demostrar el correcto funcionamiento del *Boost* como *LFR*, a través del factor de proporcionalidad $1/G$ que se establece entre la tensión y la corriente de entrada. Añadir que debido al comportamiento natural elevador que exhibe la primera etapa (*Boost*), la tensión de salida de la etapa *PFC* (V_M), que se regula en torno a los 30 V, no puede ser nunca inferior a la tensión de entrada (V_{BATT}), asegurando así que el control funciona correctamente. Finalmente, se muestra la corriente I_{HEAT} y la tensión V_{HEAT} que se entrega al actuador polimérico, demostrando que el control propuesto para la etapa reductora permite la regulación de la corriente de calefacción del *heater* en el rango pretendido.

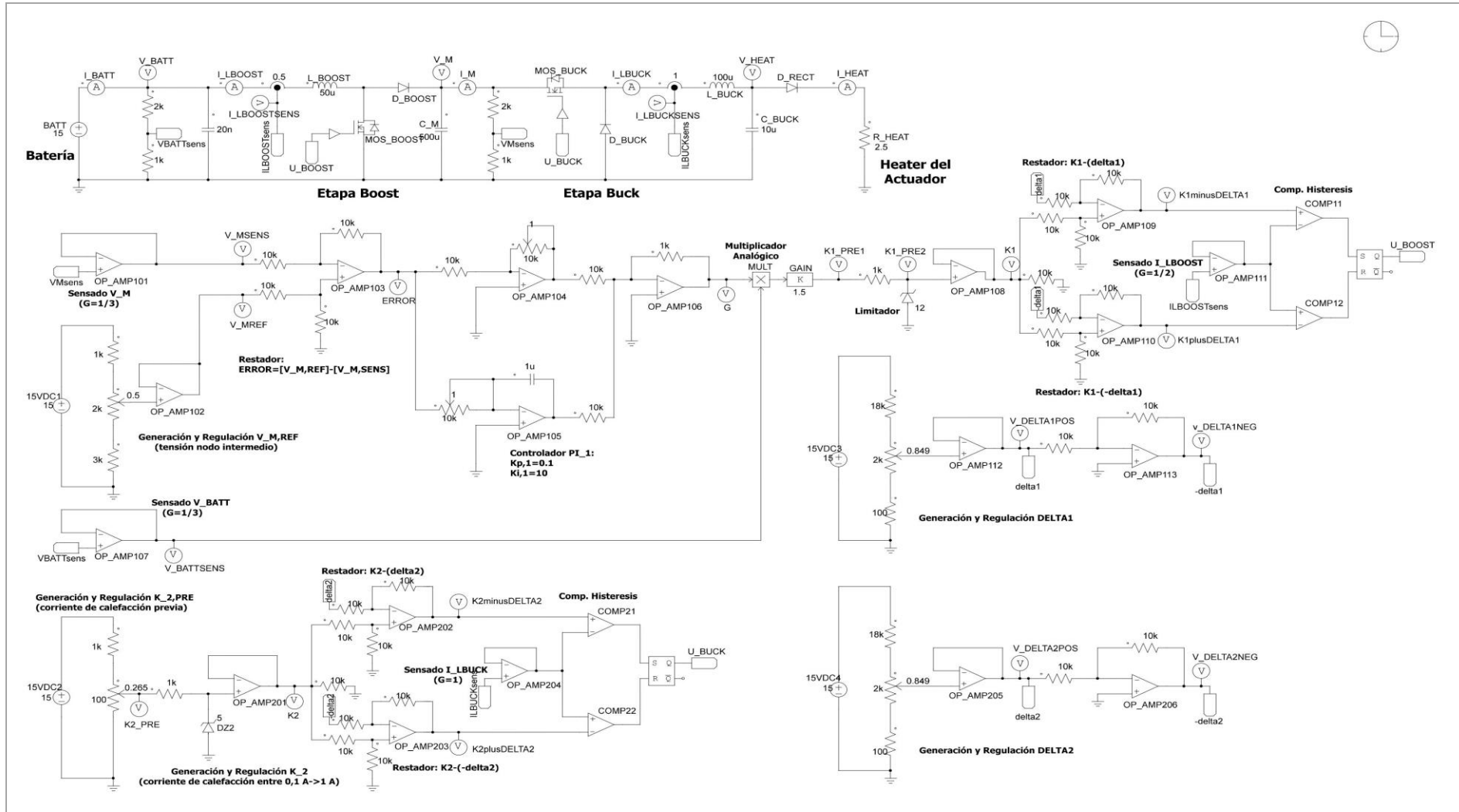


Figura A68. Esquema general implementado en PSIM para la Propuesta-I (Boost-Buck).

En la *Figura A69a* y la *Figura A69b* se representan los resultados obtenidos para una corriente de calefacción del actuador polimérico $I_{HEAT} = 250 \text{ mA}$:

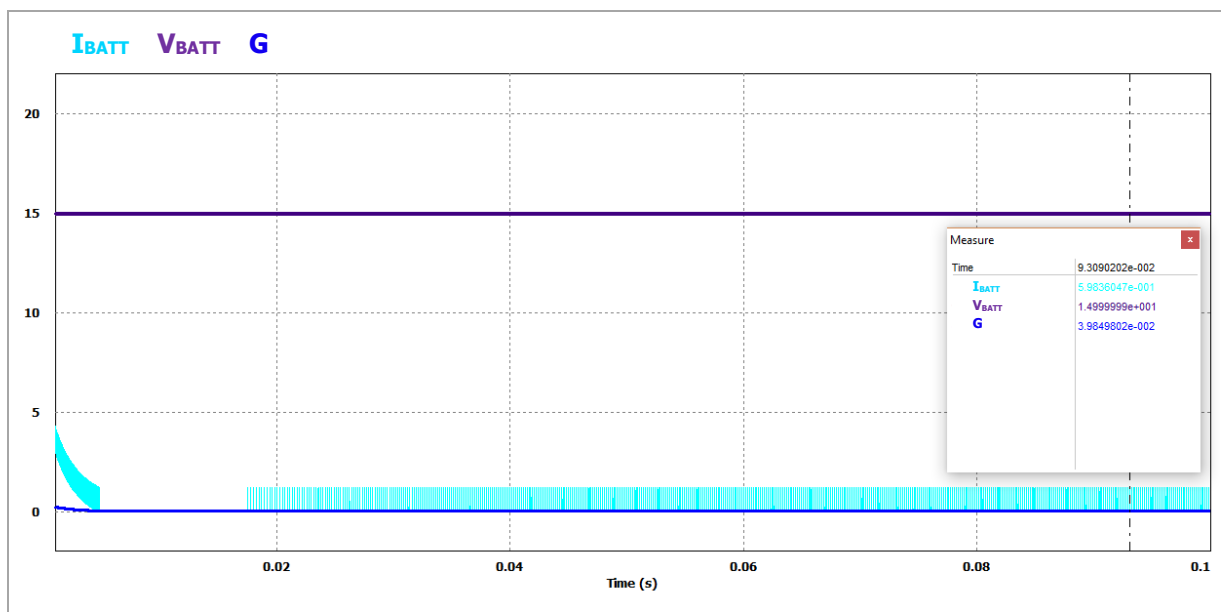


Figura A69a. Evolución temporal de las señales I_{BATT} , V_{BATT} y G para $I_{HEAT} = 250 \text{ mA}$.

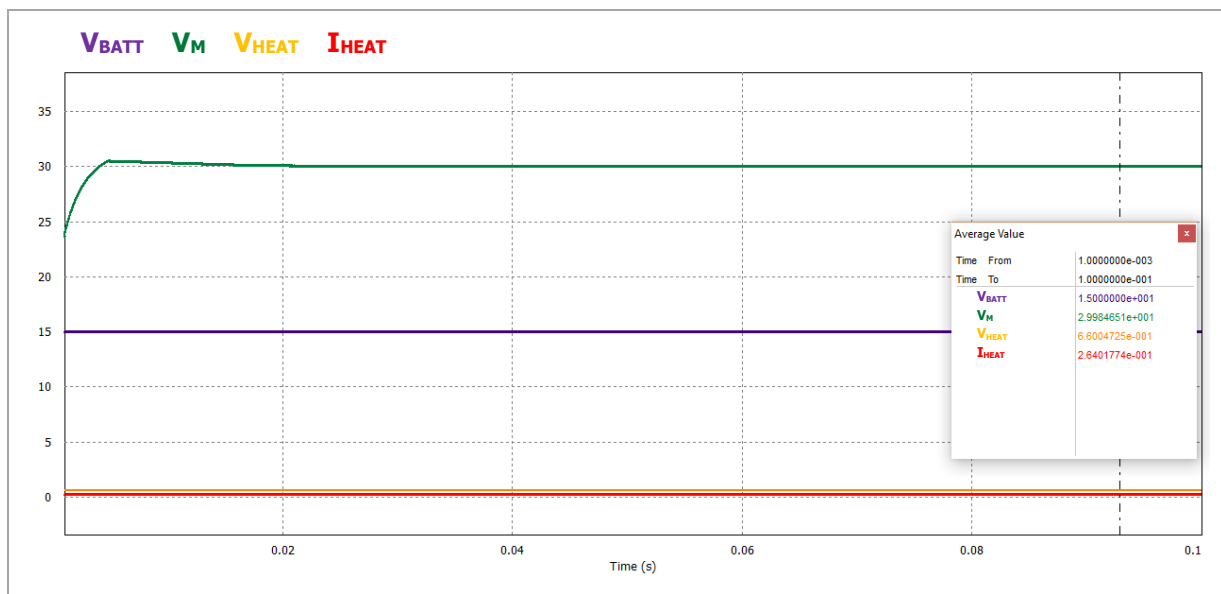


Figura A69b. Evolución temporal de las señales V_{BATT} , V_M y V_{HEAT} para $I_{HEAT} = 250 \text{ mA}$.

En la *Figura A70a* y la *Figura A70b* se representan los resultados obtenidos para una corriente de calefacción del actuador polimérico $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$:

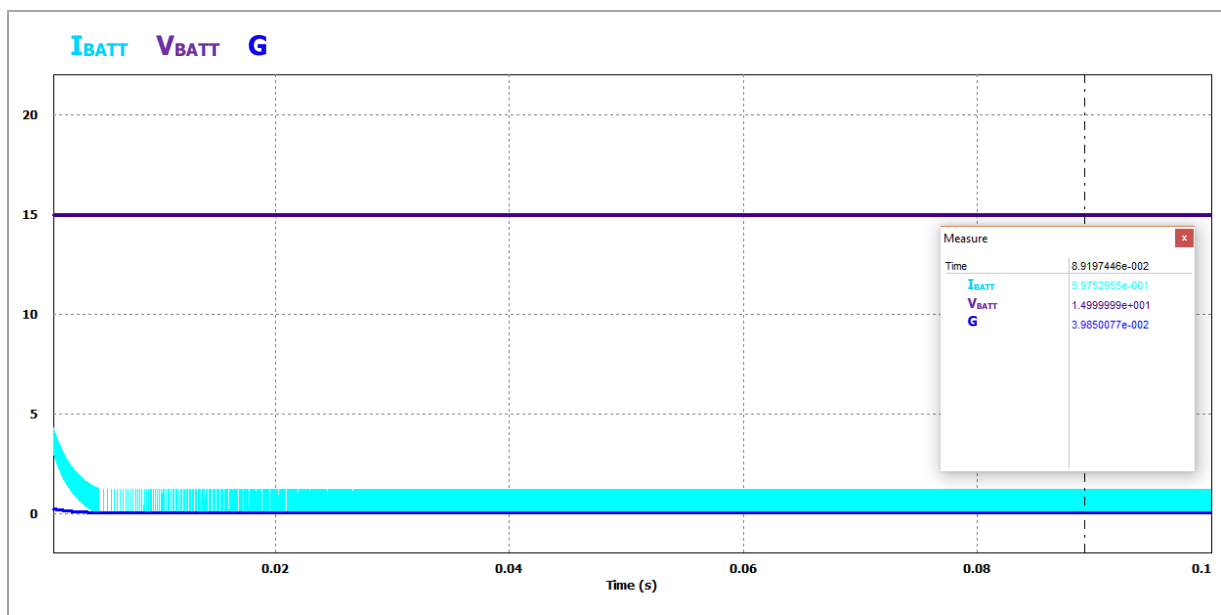


Figura A70a. Evolución temporal de las señales I_{BATT} , V_{BATT} y G para $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

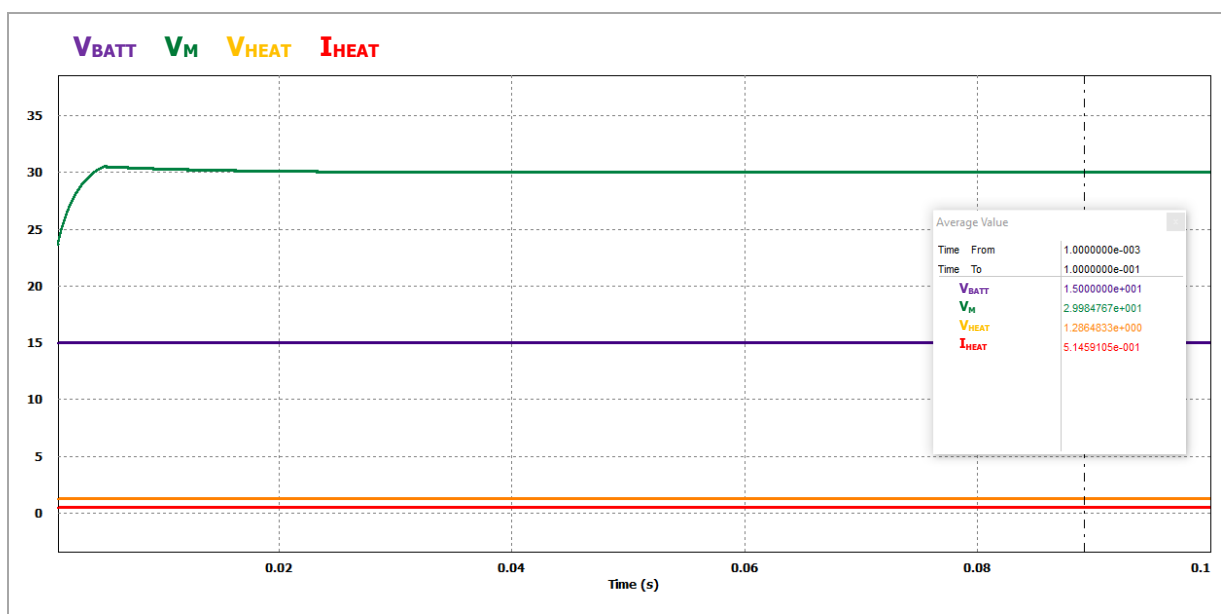


Figura A70b. Evolución temporal de las señales las señales V_{BATT} , V_M y V_{HEAT} para $I_{HEAT} = 500 \text{ mA}$.

En la *Figura A71a* y *Figura A71b* se representan los resultados obtenidos para una corriente de calefacción del actuador polimérico $I_{HEAT} = 1 A$:

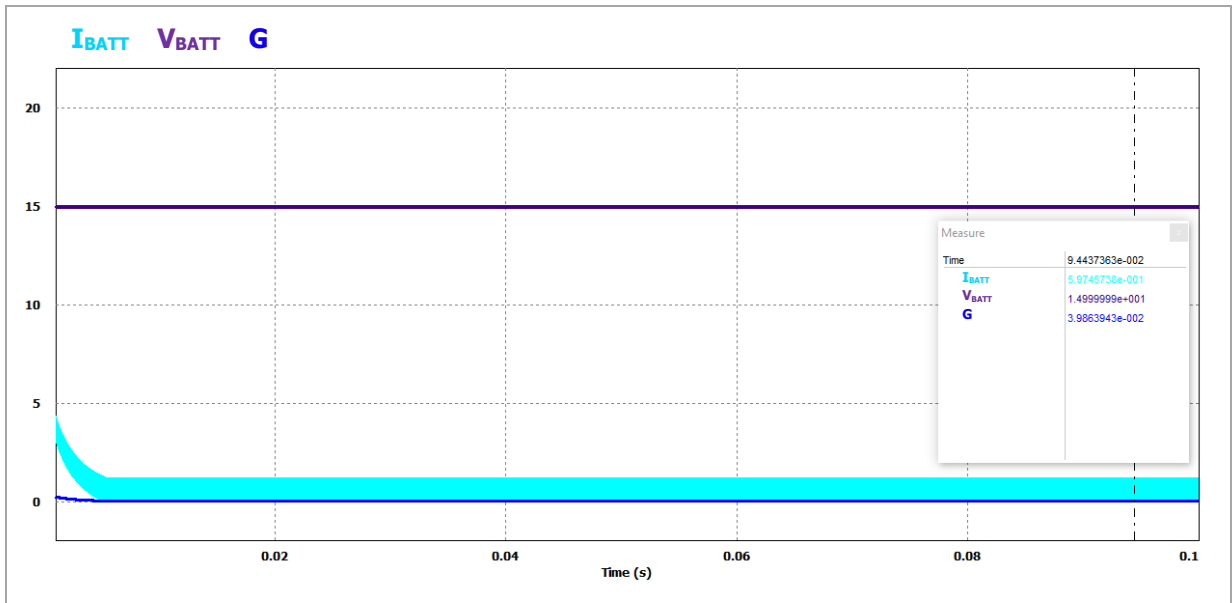


Figura A71a. Evolución temporal de las señales I_{BATT} , V_{BATT} y G para $I_{HEAT} = 1 A$.

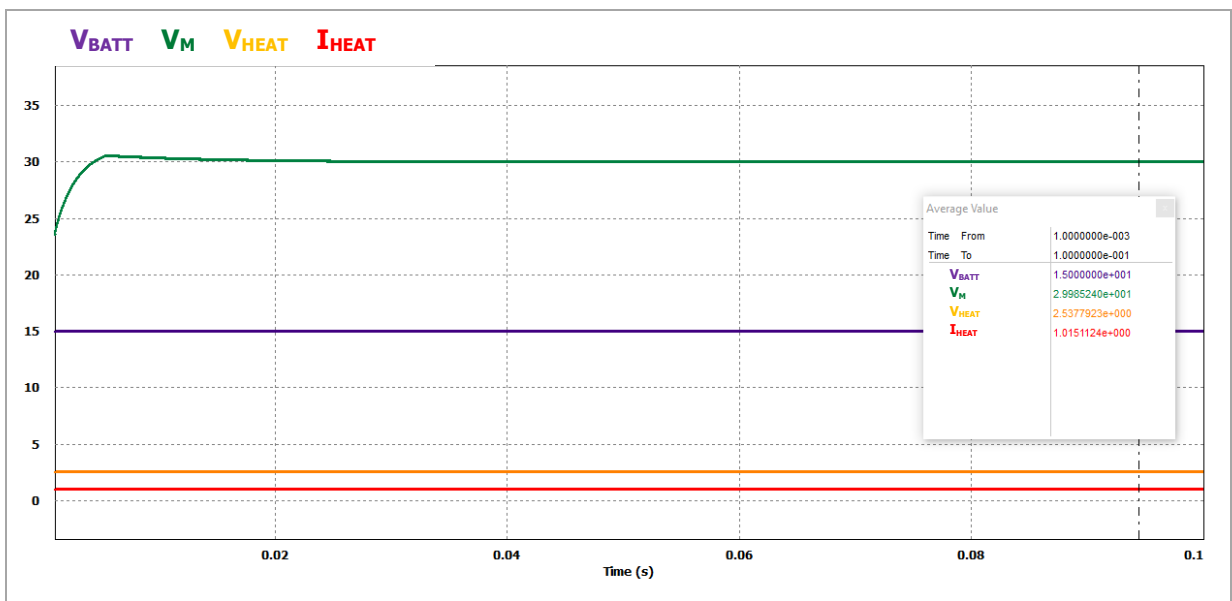


Figura A71b. Evolución temporal de las señales las señales V_{BATT} , V_M y V_{HEAT} para $I_{HEAT} = 1 A$.

10.5 Anexo 5: Simulaciones eléctricas para la Propuesta-II (*Load switch*)

En el presente apartado se muestran las simulaciones eléctricas efectuadas mediante el *software PSIM* para validar el comportamiento de la etapa de control basada en el *load switch*, presentada en el apartado 6.3.1.2 *Propuesta-II: Load switch* del Documento Básico *Memoria*. La propuesta consiste en una arquitectura de gran simplicidad conformada por un *Arduino Nano* que controla a través de una salida digital por modulación por ancho de pulsos un *load switch*. Este segundo componente actúa como un relé electrónico permitiendo el paso de la corriente eléctrica al actuador en función de la modalidad de control seleccionada.

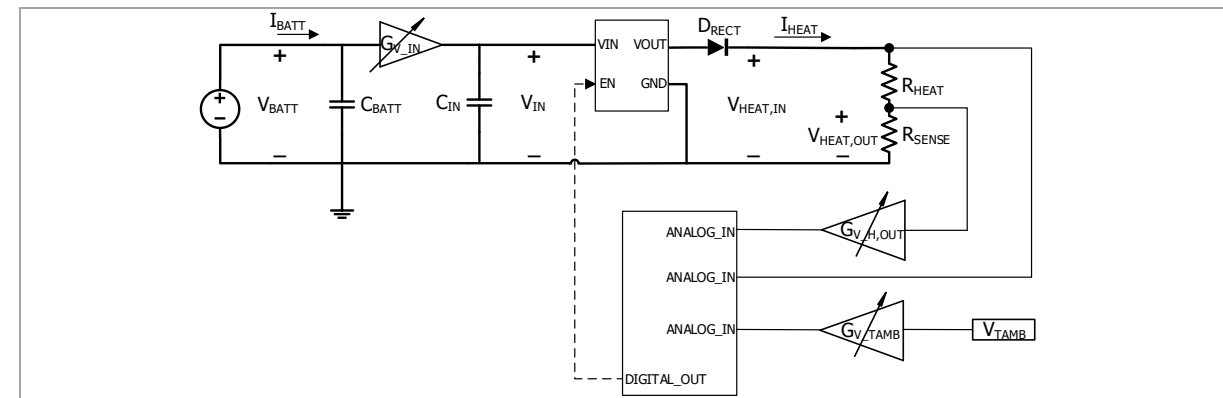


Figura A72. Esquema propuesto para la Propuesta-II (*load switch*).

Por un lado, en la *Figura A73* se visualiza el circuito implementado para efectuar las simulaciones. Por otro lado, en la *Figura A74*, la *Figura A75* y la *Figura A76* se valida el análisis teórico realizado.

En las gráficas que se presentan a continuación se observa la evolución temporal de las señales de corriente (I_{BATT}) y tensión (V_{BATT}) provenientes de la fuente de alimentación, así como las señales de corriente (I_{HEAT}) y tensión ($V_{HEAT,IN}$) en bornes del *heater* del actuador, demostrando que el control propuesto permite la regulación de la corriente de calefacción en el rango pretendido.

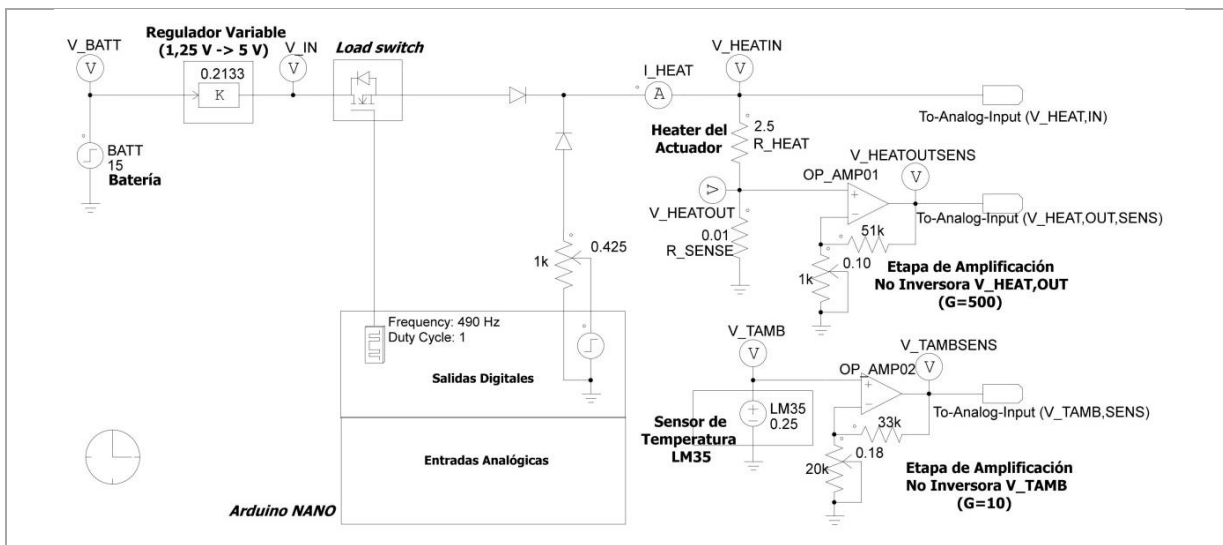


Figura A73. Esquema implementado en *PSIM* para la Propuesta-II (*Load switch*).

En las siguientes *figuras* se representan los resultados obtenidos para una corriente de calefacción $I_{HEAT} = 250\text{ mA}$, $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$ y $I_{HEAT} = 1\text{ A}$, respectivamente:

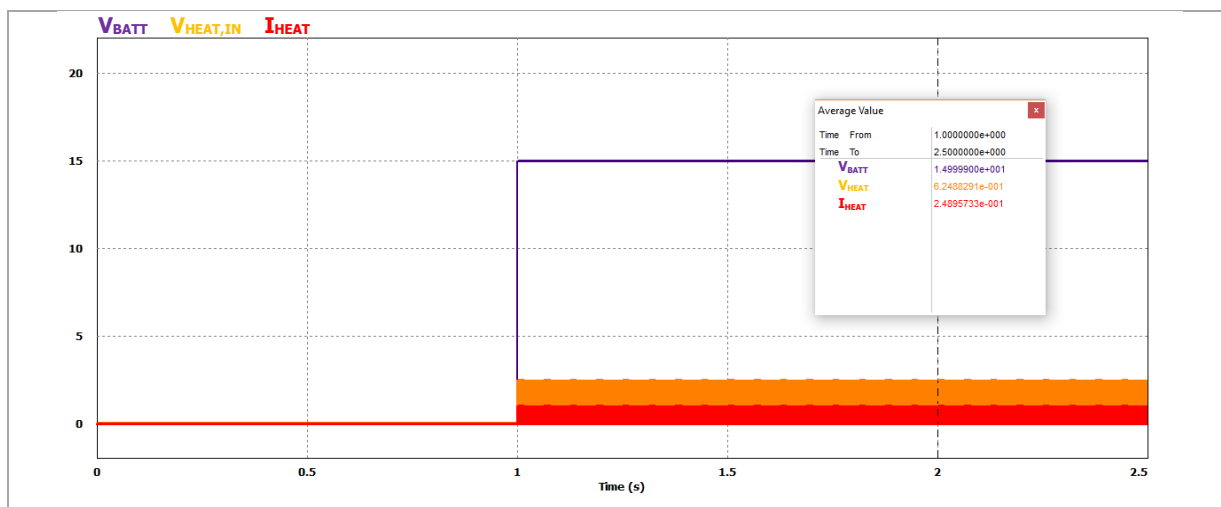


Figura A74. Evolución temporal de las señales V_{BATT} y $V_{HEAT,IN}$ para $I_{HEAT} = 250\text{ mA}$.

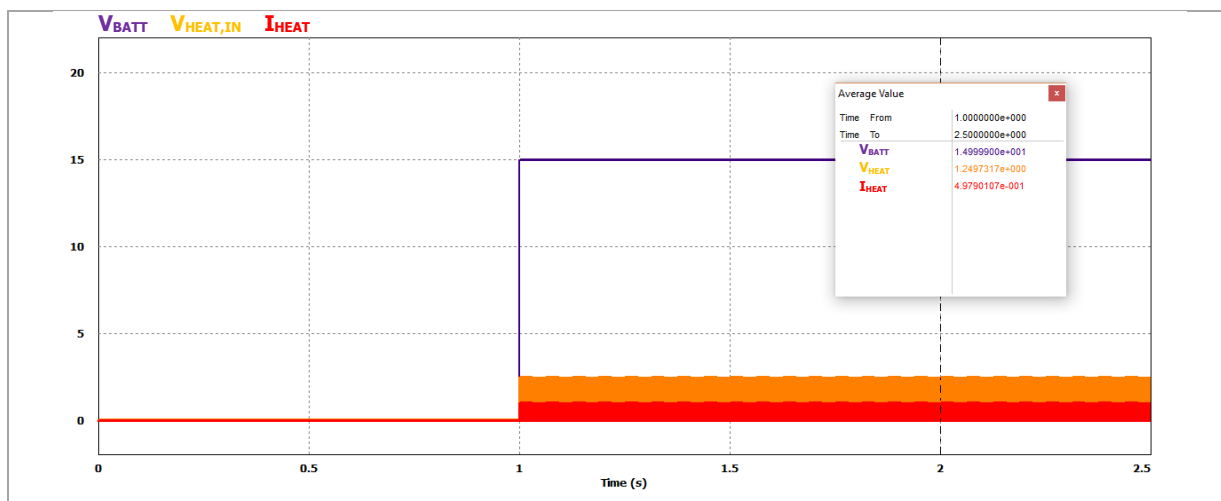


Figura A75. Evolución de las señales V_{BATT} y $V_{HEAT,IN}$ para $I_{HEAT} = 500\text{ mA}$.

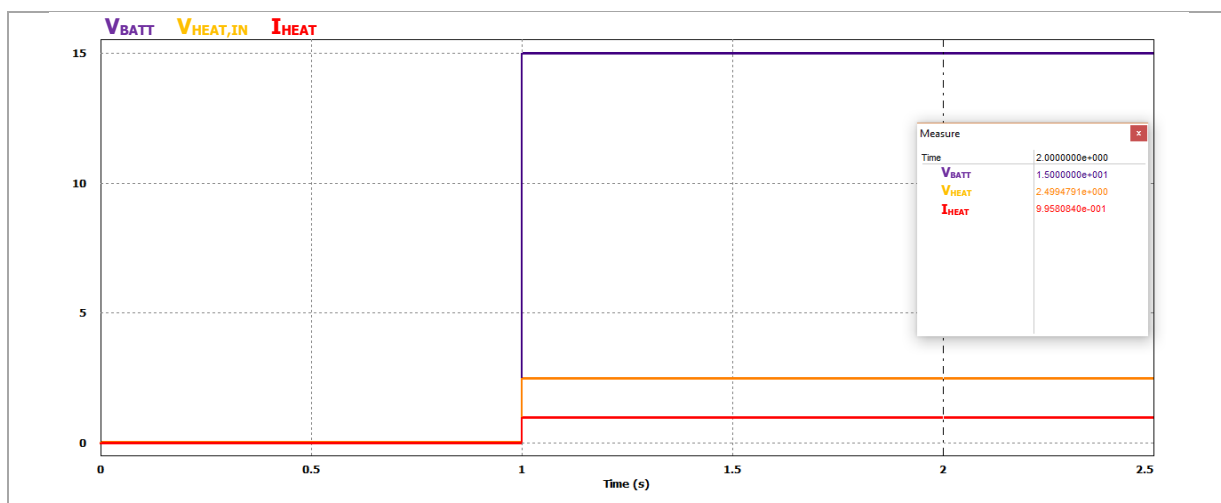


Figura A76. Evolución de las señales V_{BATT} y $V_{HEAT,IN}$ para $I_{HEAT} = 1\text{ A}$.

10.6 Anexo 6: Código *Arduino*

En el presente apartado se muestra el código implementado en el dispositivo termoeléctrico para el control del actuador mecánico polimérico (véase apartado 6.3.2.4 *Bloque de computación y control* del Documento Básico *Memoria*):

```
//SELECCIÓN ESTRATEGIA DE CONTROL
//Siendo 0 modo de actuación rápido y 1 modo de activación lento
int estrategia=0;

//DEFINICIÓN PINES E/S ARDUINO NANO
int pinTamb = 0; //Entrada analógica (A0) sensado tensión temp. ambiente
int pinLM35 = 2; //Salida digital (D2) alimentación sensor de temperatura LM35
int pinVHin = 1; //Entrada analógica (A1) sensado tensión entrada heater
int pinVHout = 2; //Entrada analógica (A2) sensado tensión salida heater
int pinRHo = 4; //Salida digital (D4) alimentación heater controlada
int pinEN = 3; //Salida digital PWM (D3) conexión enable load switch
int pinled = 6; //Salida digital (D6) alimentación led aviso visual
int pinpulsador = 5; //Entrada digital (D5) estado pulsador
//DEFINICIÓN VARIABLES
float VTamb; //Variable sensado tensión temp. ambiente (0 a 1023)
float Tamb; //Variable temperatura ambiente (°C)
float Tambprom; //Variable temperatura ambiente promediada (°C)
float VHin; //Variable sensado tensión entrada heater (0 a 1023)
float VHout; //Variable sensado tensión salida heater (0 a 1023)
float RHo; //Variable resistencia inicial heater (ohm)
float RHoprom; //Variable resistencia inicial heater promediada (ohm)
float RH; //Variable resistencia heater (ohm)
float RHprom; //Variable resistencia heater promediada (ohm)
float T; //Variable temperatura heater (°C)
float deltaT; //Variable incremento temperatura heater (°C)
float VHinref; //Variable referencia VHin para cálculo de RH (0 a 1023)
float VHoutref; //Variable referencia VHout para cálculo de RH (0 a 1023)
float pulsador; //Variable estado pulsador
bool fin = false; //Booleano final proceso de calentamiento
//DEFINICIÓN CONSTANTES
const float GVTamb=10; //Ganancia sensado tensión temp. ambiente
const float GVHout=500; //Ganancia sensado tensión salida heater
const float Rsense=0.01; //Constante resistencia sensado (ohm)
const float Toffset=0; //Constante corrección temperatura (°C)
const float alfa = 0.002209; //Constante coeficiente de temperatura (1/°C)
//DEFINICIÓN CONTADORES
int nmTamb; //Contador muestras cálculo temp. ambiente
int nmTambmax = 10; //Número máximo muestras cálculo temp. ambiente
int nmRHo; //Contador muestras cálculo resistencia inicial heater
int nmRHomax = 50; //Número máximo muestras cálculo resistencia inicial heater
int nmRH; //Contador muestras cálculo resistencia heater
int nmRHmax = 20; //Número máximo muestras cálculo resistencia heater
int nmRHok; //Contador muestras correctas cálculo resistencia heater
int nmled; //Contador intermitencias led aviso visual previo calentamiento
int nmledmax1 = 5; //Núm. Máx. intermitencias led aviso visual previo calentamiento

void setup() {
  analogWrite(pinEN,0); //Deshabilitación enable load switch
  Serial.begin(9600); //Configuración del puerto serial a 9600
}

//BIENVENIDA USUARIO
Serial.print("Hola! Se está preparando el entorno... \n\n");
delay(1000);

//CÁLCULO TEMPERATURA AMBIENTE
pinMode(pinLM35, OUTPUT);
digitalWrite(pinLM35, HIGH);
for (nmTamb=1; nmTamb<=nmTambmax; nmTamb++) {
  VTamb = analogRead(pinTamb);
  Tamb = VTamb*(0.48828125/ GVTamb);
  Tambprom= (Tamb+Tambprom*(nmTamb-1))/nmTamb;
}
digitalWrite(pinLM35, LOW);
Serial.print("La temperatura ambiente es de ");
Serial.print(Tambprom);
Serial.print("°C. \n");
```

```

    delay(1000);
//CÁLCULO RESISTENCIA INICIAL DEL HEATER
pinMode(pinRHo, OUTPUT);
digitalWrite(pinRHo, HIGH);
for (nmRHo=1; nmRHo<=nmRHomax; nmRHo++) {
    VHin=analogRead(pinVHin);
    VHout=analogRead(pinVHout);
    VHinref=((VHin+VHinref*(nmRHo-1))/nmRHo);
    VHoutref=((VHout+VHoutref*(nmRHo-1))/nmRHo);
    VHin=VHin*(0.0048828125);
    VHout=VHout*(0.0048828125/GVHout);
    RHo=Rsense*(VHin/VHout-1);
    RHoprom=((RHo+RHoprom*(nmRHo-1))/nmRHo);
}
digitalWrite(pinRHo, LOW);
Serial.print("La resistencia inicial del heater es de ");
Serial.print(RHoprom);
Serial.print(" ohm. \n\n");
delay(1000);
//PREVIO CICLO CALENTAMIENTO (AVISO VISUAL, CONTROL DE INICIO Y CARGA DE VARIABLES)
//Aviso visual previo ciclo calentamiento
for (nmled=0; led<=nmledmax1; nmled++){
    pinMode(pinled, OUTPUT);
    digitalWrite(pinled, HIGH);
    delay(200);
    digitalWrite(pinled, LOW);
    delay(200);
}
Serial.print("Etapa de Control preparada para el calentamiento del actuador.\n");
delay(1000);
//Control inicio ciclo calentamiento
Serial.print("Active el pulsador para iniciar el proceso.\n\n");
while (digitalRead(pinpulsador) == LOW) {
}
Serial.print("Iniciando...\n\n");
//Carga variables ciclo calentamiento (Tamb, Rho y ciclo de trabajo pinEN)
Tamb=Tambprom+Toffset;
RHo=RHoprom;
if (estrategia = 0) {
    analogWrite(pinEN,255);
    Serial.print("Ha seleccionado la estrategia de activación rápida. \n");
}
if (estrategia = 1) {
    analogWrite(pinEN,192);
    Serial.print("Ha seleccionado la estrategia de activación lenta. \n");
}
if (estrategia != 0 && estrategia != 1) {
    analogWrite(pinEN,0);
    Serial.print("No ha seleccionado ninguna estrategia de activación disponible. \n");
    fin=true;
    Serial.print("Para reiniciar el proceso, pulse RESET.\n\n\n");
    while (fin=true){}
}
}
//CICLO DE CALENTAMIENTO
void loop() {
    nmRHok = 0;
    for (nmRH=1; nmRH<=nmRHmax; i++) {
        VHin=analogRead(pinVHin);
        VHout=analogRead(pinVHout);
        if (VHin>=VHinref && VHout>=VHoutref){
            nmRHok= nmRHok+1;
            VHin=VHin*(0.0048828125);
            VHout=VHout*(0.0048828125/GVHout);
            RH=Rsense*(VHin/VHout-1);
            RHprom=((RH+RHprom*(nmRHok-1))/nmRHok);
        }
    }
    deltaT=((RH/RHo-1)/alfa);
    T=deltaT+Tamb;
    if (estrategia = 0) {

```

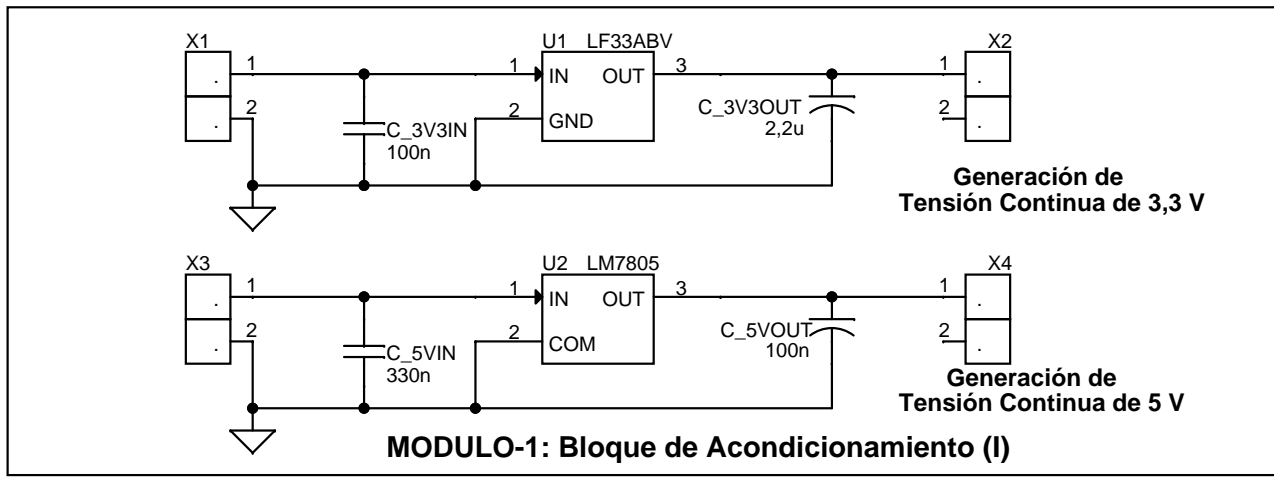
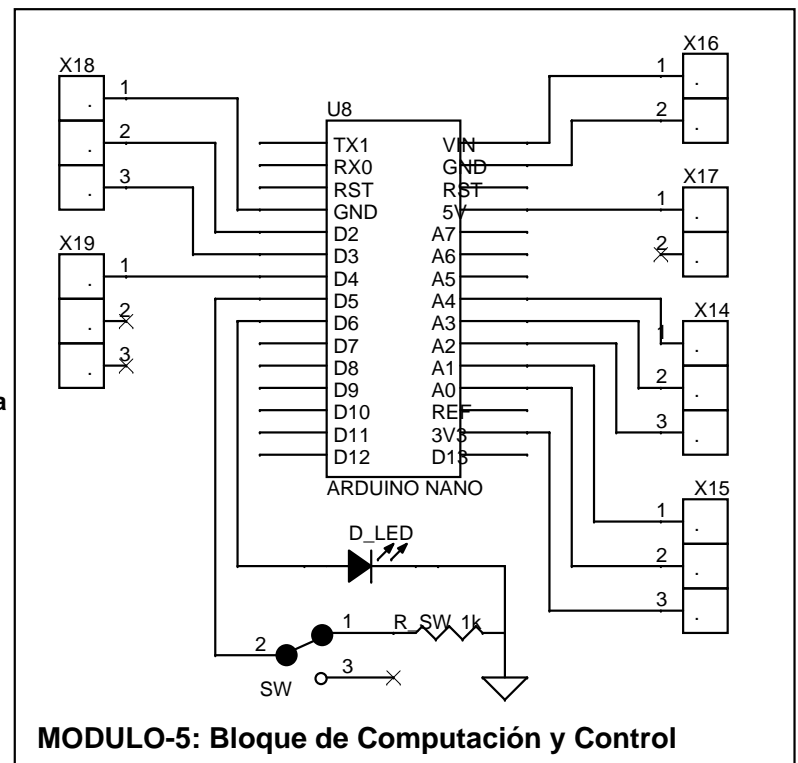
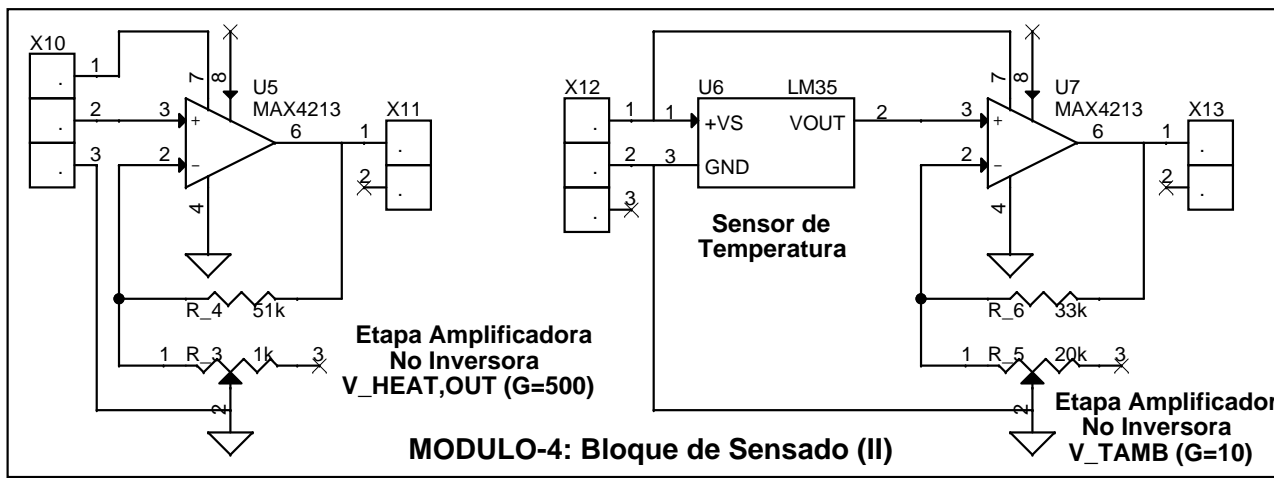
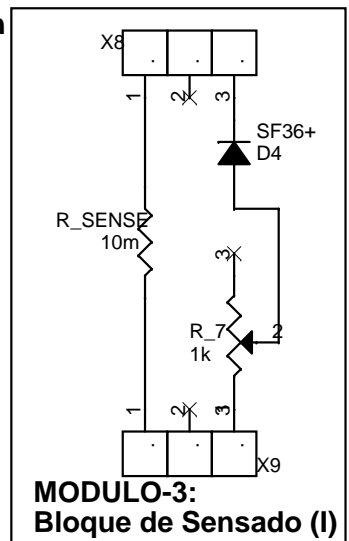
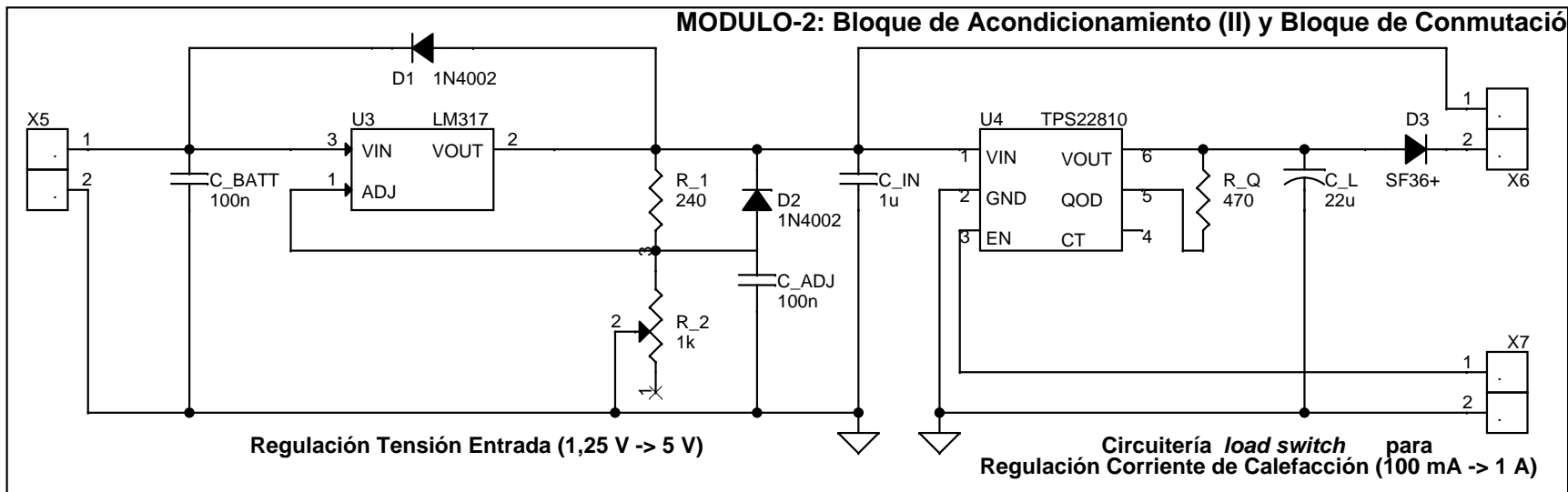
```

    if (T<90) {
        analogWrite(pinEN,255);
        Serial.print("La temperatura del heater es de ");
        Serial.print(T);
    }
    if (T>90) {
        analogWrite(pinEN,0);
        Serial.print("El heater ha alcanzado una temperatura superior a los 90°C.\n\n");
        pinMode(pinled, OUTPUT);
        digitalWrite(pinled, HIGH);
        delay(10000);
        digitalWrite(pinled, LOW);
        fin=true;
        Serial.print("Para reiniciar el proceso, pulse RESET.\n\n\n");
        while(fin=true){}
    }
}
if (estrategia = 1) {
    if (T<70) {
        analogWrite(pinEN,192);
        Serial.print("La temperatura del heater es de ");
        Serial.print(T);
    }
    if (T>70 && T<80) {
        analogWrite(pinEN,128);
        Serial.print("La temperatura del heater es de ");
        Serial.print(T);
    }
    if (T>80 && T<90) {
        analogWrite(pinEN,64);
        Serial.print("La temperatura del heater es de ");
        Serial.print(T);
    }
    if (T>90) {
        analogWrite(pinEN,0);
        Serial.print("El heater ha alcanzado una temperatura superior a los 90°C.\n\n");
        pinMode(pinled, OUTPUT);
        digitalWrite(pinled, HIGH);
        delay(10000);
        digitalWrite(pinled, LOW);
        fin=true;
        Serial.print("Para reiniciar el proceso, pulse RESET.\n\n\n");
        while(fin=true){}
    }
}
}
}

```

DOCUMENTO BÁSICO 4: PLANOS

**[DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO
TERMOELÉCTRICO PARA EL CONTROL DE ACTUADORES
MECÁNICOS POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA]**



DOCUMENTO 5: MEDICIONES

**[DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO
TERMOELÉCTRICO PARA EL CONTROL DE ACTUADORES
MECÁNICOS POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA]**

12 Mediciones

Código	Descripción	Uds	Longitud	Ancho	Altura	Parciales	Cantidad
GNRL001	ud Placa de Prototipos, Tira RBP, Papel Epoxi, 100mmx220mm Placa matriz de circuito impreso.	1				1,000	1,00
GNRL002	m Cable para Equipos RS Pro, Sección.Transv. 0,22mm², 1000V, 1,4A Cable para conexiones entre módulos.	30	0,25			7,500	7,50
GNRL003	ud Conector Macho PCB, Montaje Vertical, 2-Vías, 5mm Conectores del bloque de acondicionamiento. (X1), (X2), (X3), (X4), (X5) Conectores del bloque de conmutación. (X6), (X7) Conectores del bloque de sensado. (X11), (X13) Conectores del bloque de computación y control. (X16), (X17)	11				11,000	11,00
GNRL004	ud Conector Macho PCB, Montaje Vertical, 3-Vías, 5mm Conectores del bloque de sensado. (X8), (X9), (X10), (X12) Conectores del bloque de computación y control. (X14), (X15), (X18), (X19)	8				8,000	8,00
GNRL005	ud Zócalo DIL Winslow, 5A, 2,54mm, Anchura 7,62mm, 8-Contactos, Orificio Pasante, Pin de Torneado Zócalos para los AOs y el <i>load switch</i> .	3				3,000	3,00
GNRL006	ud Zócalo DIL Winslow, 5A, 2,54mm, Anchura 7,62mm, 28-Contactos, Orificio Pasante, Pin de Torneado Zócalo para <i>Arduino Nano</i> .	1				1,000	1,00

Código	Descripción	Uds	Longitud	Ancho	Altura	Parciales	Cantidad
GNRL007	ud Módulo Adaptador DIP, Encapsulados SOIC-8 / TSSOP-8 / MSOP-8 / SOT23-6 / SC70-6 / SOT563-6 Adaptador para <i>load switch</i> y AOs.	1				1,000	1,00
CTRL001	ud Regulador de Tensión LF33ABV, 3,3V, 0,5A, TO-220, 3-Pines Regulador de tensión lineal del bloque de acondicionamiento para la generación de $+3,3V_{DC}$. (U1)	1				1,000	1,00
CTRL002	ud Regulador de Tensión LM7805, 5V, 1,5A, TO-220, 3-Pines Regulador de tensión lineal del bloque de acondicionamiento para la generación de $+5V_{DC}$. (U2)	1				1,000	1,00
CTRL003	ud Regulador de Tensión LM317T/NOPB, Ajustable, 1,5A, 1,2→37V, TO-220, 3-Pines Regulador de tensión lineal variable del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (U3)	1				1,000	1,00
CTRL004	ud Interruptor de Carga de Potencia, Lado Alto, 1-Salida, 2A, 79mΩ, SOT-23-6 <i>Load switch</i> para la gestión del encendido y apagado de la fuente de alimentación. (U4)	1				1,000	1,00
CTRL005	ud Amplificador Operacional MAX4213ESA+, Alta Velocidad, Alimentación +3,3V→5V, 300MHz, SOIC, 8-Pines Amplificador operacional del bloque de sensado para la amplificación del valor sensado de tensión de salida de la malla conductora y tensión proporcional a la temperatura ambiente. (U5), (U7)	2				2,000	2,00

Código	Descripción	Uds	Longitud	Ancho	Altura	Parciales	Cantidad
CTRL006	ud Sensor Temperatura LM35DZ/NOPB, Interfaz Analógico, Alimentación +4V→30V, TO-92, 3-Pines Sensor de temperatura del bloque de sensado para la monitorización de la temperatura ambiente. (U6)	1				1,000	1,00
CTRL007	ud Placa Desarrollo Arduino Nano, Versión 3.0, MCU ATmega328, 14 E/S, 6 Salidas PWM, Alimentación +7V→15V, 30-Pines Placa de desarrollo del bloque de computación y control para la ejecución de la estrategia de activación del actuador requerida. (U8)	1				1,000	1,00
RESF001	ud Resistencia Fija Película Metálica, 240Ω, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (R₁)	1				1,000	1,00
RESF002	ud Resistencia Fija Película Metálica, 470Ω, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de conmutación. (R₀)	1				1,000	1,00
RESF003	ud Resistencia Fija Película Metálica, 51kΩ, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de sensado para la amplificación del valor sensado de tensión de salida de la malla conductora. (R₄)	1				1,000	1,00
RESF004	ud Resistencia Fija Película Metálica, 33kΩ, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de sensado para la amplificación del valor de tensión proporcional a la temperatura ambiente. (R₆)	1				1,000	1,00

Código	Descripción	Uds	Longitud	Ancho	Altura	Parciales	Cantidad
RESF005	ud Resistencia Fija Metálica, 10mΩ, ±5%, 5W, Radial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de sensado para el sensado de la tensión de salida de la malla conductora. (R _{SENSE})	1				1,000	1,00
RESF006	ud Resistencia Fija Película Metálica, 1kΩ, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de computación y control para la gestión del inicio del proceso de calentamiento del actuador. (R _{SW})	1				1,000	1,00
RESV001	ud Resistencia Variable, 1kΩ, ±10%, 0,5W, ±100ppm/°C, 25Vueltas, Orificio Pasante Resistencia variable del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (R ₂) Resistencia variable del bloque de sensado. (R ₃), (R ₇)	3				3,000	3,00
RESV002	ud Resistencia Variable, 20kΩ, ±10%, 0,5W, ±100ppm/°C, 25Vueltas, Orificio Pasante Resistencia variable del bloque de sensado. (R ₅)	1				1,000	1,00
CAPF001	ud Condensador Película Poliéster, 100nF, ±5%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante Condensador de entrada del bloque de acondicionamiento para la generación de +3,3V _{DC} . (C _{3V3IN}) Condensador de salida del bloque de acondicionamiento para la generación de +5V _{DC} . (C _{5VOUT}) Condensador de entrada del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (C _{BATT}) Condensador de ajuste del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (C _{ADJ})	4				4,000	4,00

Código	Descripción	Uds	Longitud	Ancho	Altura	Parciales	Cantidad
CAPF002	ud Condensador Película Poliéster, 330nF, ±5%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante Condensador de entrada del bloque de acondicionamiento para la generación de $+5V_{DC}$. (C_{5VIN})	1				1,000	1,00
CAPF003	ud Condensador Electrolítico Aluminio, 2,2µF, ±20%, 35Vdc, Orificio Pasante Condensador de salida del bloque de acondicionamiento para la generación de $+3,3V_{DC}$. (C_{3V3OUT})	1				1,000	1,00
CAPF004	ud Condensador Película Poliéster, 1µF, ±10%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante Condensador de salida del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (C_{IN})	1				1,000	1,00
CAPF005	ud Condensador Electrolítico Aluminio, 22µF, ±25%, 25Vdc, Orificio Pasante Condensador de salida del bloque de conmutación. (C_L)	1				1,000	1,00
DIOD001	ud Diodo Recuperación Estándar 1N4002, 100V, 1A, Orificio Pasante, DO-41, 2-Pines Diodo del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (D_1), (D_2)	2				2,000	2,00
DIOD002	ud Diodo Ultrarápido SF36+, 400V, 3A, Orificio Pasante, DO-201AA, 2-Pines Diodo del bloque de conmutación y del bloque de sensado. (D_3), (D_4)	2				2,000	2,00

Código	Descripción	Uds	Longitud	Ancho	Altura	Parciales	Cantidad
DLED001	ud Diodo LED Rojo, Baja Potencia, 5V, 13mA, Orificio Pasante Diodo LED del bloque de computación y control. (D _{LED})	1				1,000	
							1,00
SWTC001	ud Interruptor SPDT, On-On, 3A, Orificio Pasante <i>Switch</i> del bloque de computación y control para el control del inicio del proceso de calentamiento del actuador. (D _{LED})	1				1,000	
							1,00

DOCUMENTO BÁSICO 6: PRESUPUESTO

[DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO TERMOELÉCTRICO PARA EL CONTROL DE ACTUADORES MECÁNICOS POLIMÉRICOS CON MEMORIA DE FORMA]

13 Presupuesto

13.1 Listado de precios unitarios

Código	Ud	Descripción	Precio [€]	
GNRL001	u	Placa de Prototipos, Tira RBP, Papel Epoxi, 100mmx220mm	9,68	NUEVE EUROS con SESENTA Y OCHO CÉNTIMOS
GNRL002	m	Cable para Equipos RS Pro, Sección.Transv. 0,22mm ² , 1000V, 1,4A	0,10	CERO EUROS con DIEZ CÉNTIMOS
GNRL003	u	Conector Macho PCB, Montaje Vertical, 2-Vías, 5mm	0,57	CERO EUROS con CINCUENTA Y SIETE CÉNTIMOS
GNRL004	u	Conector Macho PCB, Montaje Vertical, 3-Vías, 5mm	0,96	CERO EUROS con NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS
GNRL005	u	Zócalo DIL Winslow, 5A, 2,54mm, Anchura 7,62mm, 8-Contactos, Orificio Pasante, Pin de Torneado	0,57	CERO EUROS con CINCUENTA Y SIETE CÉNTIMOS
GNRL006	u	Zócalo DIL Winslow, 5A, 2,54mm, Anchura 7,62mm, 28-Contactos, Orificio Pasante, Pin de Torneado	1,11	UN EURO con ONCE CÉNTIMOS
GNRL007	u	Módulo Adaptador DIP, Encapsulados SOIC-8 / TSSOP-8 / MSOP-8 / SOT23-6 / SC70-6 / SOT563-6	13,92	TRECE EUROS con NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS
CTRL001	u	Regulador de Tensión LF33ABV, 3,3V, 0,5A, TO-220, 3-Pines	0,82	CERO EUROS con OCHENTA Y DOS CÉNTIMOS
CTRL002	u	Regulador de Tensión LM7805, 5V, 1,5A, TO-220, 3-Pines	0,31	CERO EUROS con TREINTA Y UN CÉNTIMOS
CTRL003	u	Regulador de Tensión LM317T/NOPB, Ajustable, 1,5A, 1,2→37V, TO-220, 3-Pines	1,38	UN EURO con TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS
CTRL004	u	Interruptor de Carga de Potencia, Lado Alto, 1-Salida, 2A, 79mΩ, SOT-23-6	0,54	CERO EUROS con CINCUENTA Y CUATRO CÉNTIMOS
CTRL005	u	Amplific.Operacional MAX4213ESA+, Alta Velocidad, Alimentación +3,3V→5V, 300MHz, SOIC, 8-Pines	3,10	TRES EUROS con DIEZ CÉNTIMOS
CTRL006	u	Sensor Temperatura LM35DZ/NOPB, Interfaz Analógico, Alimentación +4V→30V, TO-92, 3-Pines	1,35	UN EURO con TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS
CTRL007	u	Placa Desarrollo Arduino Nano, Versión 3.0, MCU ATmega328, 14 E/S, 6 Salidas PWM, Alimentación +7V→15V, 30-Pines	28,92	VEINTIOCHO EUROS con NOVENTA Y DOS CÉNTIMOS
RESF001	u	Resistencia Fija Película Metálica, 240Ω, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante	0,06	CERO EUROS con SEIS CÉNTIMOS
RESF002	u	Resistencia Fija Película Metálica, 470Ω, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante	0,02	CERO EUROS con DOS CÉNTIMOS
RESF003	u	Resistencia Fija Película Metálica, 51kΩ, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante	0,02	CERO EUROS con DOS CÉNTIMOS
RESF004	u	Resistencia Fija Película Metálica, 33kΩ, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante	0,02	CERO EUROS con DOS CÉNTIMOS
RESF005	u	Resistencia Fija Metálica, 10mΩ, ±5%, 5W, Radial, Orificio Pasante	1,47	UN EURO con CUARENTA Y SIETE CÉNTIMOS
RESF006	u	Resistencia Fija Película Metálica, 1kΩ, ±1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante	0,02	CERO EUROS con DOS CÉNTIMOS
RESV001	u	Resistencia Variable, 1kΩ, ±10%, 0,5W, ±100ppm/°C, 25Vueltas, Orificio Pasante	2,28	DOS EUROS con VEINTIOCHO EUROS
RESV002	u	Resistencia Variable, 20kΩ, ±10%, 0,5W, ±100ppm/°C, 25Vueltas, Orificio Pasante	2,00	DOS EUROS con CERO CÉNTIMOS
CAPF001	u	Condensador Película Poliéster, 100nF, ±5%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante	0,29	CERO EUROS con VEINTINUEVE CÉNTIMOS
CAPF002	u	Condensador Película Poliéster, 330nF, ±5%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante	0,52	CERO EUROS con CINCUENTA Y DOS CÉNTIMOS

Código	Ud	Descripción	Precio	
CAPF003	u	Condensador Electrolítico Aluminio, 2,2 μ F, \pm 20%, 35Vdc, Orificio Pasante	0,06	CERO EUROS con SEIS CÉNTIMOS
CAPF004	u	Condensador Película Poliéster, 1 μ F, \pm 10%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante	0,41	CERO EUROS con CUARENTA Y UN CÉNTIMOS
CAPF005	u	Condensador Electrolítico Aluminio, 22 μ F, \pm 25%, 25Vdc, Orificio Pasante	0,22	CERO EUROS con VEINTIDÓS CÉNTIMOS
DIOD001	u	Diodo Recuperación Estándar 1N4002, 100V, 1A, Orificio Pasante, DO-41, 2-Pines	0,04	CERO EUROS con CUATRO CÉNTIMOS
DIOD002	u	Diodo Ultrarápido SF36+, 400V, 3A, Orificio Pasante, DO-201AA, 2-Pines	0,32	CERO EUROS con TREINTA Y DOS CÉNTIMOS
DLED001	u	Diodo LED Rojo, Baja Potencia, 5V, 13mA, Orificio Pasante	0,25	CERO EUROS con VEINTICINCO CÉNTIMOS
SWTC001	u	Interruptor SPDT, On-On, 3A, Orificio Pasante	1,04	UN EURO con CUATRO CÉNTIMOS

13.2 Presupuesto

Código	Descripción	Cant.	Precio	Importe
GNRL001	ud Placa de Prototipos, Tira RBP, Papel Epoxi, 100mmx220mm Placa matriz de circuito impreso.	1,00	9,68 €	9,68 €
GNRL002	m Cable para Equipos RS Pro, Sección.Transv. 0,22mm², 1000V, 1,4A Cable para conexiones entre módulos.	7,50	0,10 €	0,75 €
GNRL003	ud Conector Macho PCB, Montaje Vertical, 2-Vías, 5mm Conectores del bloque de acondicionamiento. (X1), (X2), (X3), (X4), (X5) Conectores del bloque de conmutación. (X6), (X7) Conectores del bloque de sensado. (X11), (X13) Conectores del bloque de computación y control. (X16), (X17)	11,00	0,57 €	6,27 €
GNRL004	ud Conector Macho PCB, Montaje Vertical, 3-Vías, 5mm Conectores del bloque de sensado. (X8), (X9), (X10), (X12) Conectores del bloque de computación y control. (X14), (X15), (X18), (X19)	8,00	0,96 €	7,68 €
GNRL005	ud Zócalo DIL Winslow, 5A, 2,54mm, Anchura 7,62mm, 8-Contactos, Orificio Pasante, Pin de Torneado Zócalos para los AOs y el <i>load switch</i> .	3,00	0,57 €	1,71 €
GNRL006	ud Zócalo DIL Winslow, 5A, 2,54mm, Anchura 7,62mm, 28-Contactos, Orificio Pasante, Pin de Torneado Zócalo para <i>Arduino Nano</i> .	1,00	1,11 €	1,11 €
GNRL007	ud Módulo Adaptador DIP, Encapsulados SOIC-8 / TSSOP-8 / MSOP-8 / SOT23-6 / SC70-6 / SOT563-6 Adaptador para <i>load switch</i> y AOs.	1,00	13,92 €	13,92 €

Código	Descripción	Cant.	Precio	Importe
CTRL001	ud Regulador de Tensión LF33ABV, 3,3V, 0,5A, TO-220, 3-Pines Regulador de tensión lineal del bloque de acondicionamiento para la generación de $+3,3V_{DC}$. (U1)	1,00	0,82 €	0,82 €
CTRL002	ud Regulador de Tensión LM7805, 5V, 1,5A, TO-220, 3-Pines Regulador de tensión lineal del bloque de acondicionamiento para la generación de $+5V_{DC}$. (U2)	1,00	0,31 €	0,31 €
CTRL003	ud Regulador de Tensión LM317T/NOPB, Ajustable, 1,5A, 1,2→37V, TO-220, 3-Pines Regulador de tensión lineal variable del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (U3)	1,00	1,38 €	1,38 €
CTRL004	ud Interruptor de Carga de Potencia, Lado Alto, 1-Salida, 2A, 79mΩ, SOT-23-6 <i>Load switch</i> para la gestión del encendido y apagado de la fuente de alimentación. (U4)	1,00	0,54 €	0,54 €
CTRL005	ud Amplificador Operacional MAX4213ESA+, Alta Velocidad, Alimentación +3,3V→5V, 300MHz, SOIC, 8-Pines Amplificador operacional del bloque de sensado para la amplificación del valor sensado de tensión de salida de la malla conductora y tensión proporcional a la temperatura ambiente. (U5), (U7)	2,00	3,10 €	6,20 €
CTRL006	ud Sensor Temperatura LM35DZ/NOPB, Interfaz Analógico, Alimentación +4V→30V, TO-92, 3-Pines Sensor de temperatura del bloque de sensado para la monitorización de la temperatura ambiente. (U6)	1,00	1,35 €	1,35 €
CTRL007	ud Placa Desarrollo Arduino Nano, Versión 3.0, MCU ATmega328, 14 E/S, 6 Salidas PWM, Alimentación +7V→15V, 30-Pines Placa de desarrollo del bloque de computación y control para la ejecución de la estrategia de activación del actuador requerida. (U8)	1,00	28,92 €	28,92 €

Código	Descripción	Cant.	Precio	Importe
RESF001	ud Resistencia Fija Película Metálica, 240Ω, \pm1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (R ₁)	1,00	0,06 €	0,06 €
RESF002	ud Resistencia Fija Película Metálica, 470Ω, \pm1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de conmutación. (R _Q)	1,00	0,02 €	0,02 €
RESF003	ud Resistencia Fija Película Metálica, 51kΩ, \pm1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de sensado para la amplificación del valor sensado de tensión de salida de la malla conductora. (R ₄)	1,00	0,02 €	0,02 €
RESF004	ud Resistencia Fija Película Metálica, 33kΩ, \pm1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de sensado para la amplificación del valor de tensión proporcional a la temperatura ambiente. (R ₆)	1,00	0,02 €	0,02 €
RESF005	ud Resistencia Fija Metálica, 10mΩ, \pm5%, 5W, Radial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de sensado para el sensado de la tensión de salida de la malla conductora. (R _{SENSE})	1,00	1,47 €	1,47 €
RESF006	ud Resistencia Fija Película Metálica, 1kΩ, \pm1%, 0,6W, Axial, Orificio Pasante Resistencia del bloque de computación y control para la gestión del inicio del proceso de calentamiento del actuador. (R _{sw})	1,00	0,02 €	0,02 €
RESV001	ud Resistencia Variable, 1kΩ, \pm10%, 0,5W, \pm100ppm/$^{\circ}$C, 25Vueltas, Orificio Pasante Resistencia variable del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (R ₂) Resistencia variable del bloque de sensado. (R ₃), (R ₇)	3,00	2,28 €	6,84 €

Código	Descripción	Cant.	Precio	Importe
RESV002	<p>ud Resistencia Variable, 20kΩ, ±10%, 0,5W, ±100ppm/°C, 25Vueltas, Orificio Pasante</p> <p>Resistencia variable del bloque de sensado.</p> <p>(R_S)</p>	1,00	2,00 €	2,00 €
CAPF001	<p>ud Condensador Película Poliéster, 100nF, ±5%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante</p> <p>Condensador de entrada del bloque de acondicionamiento para la generación de +3,3V_{DC}.</p> <p>(C_{3V3IN})</p> <p>Condensador de salida del bloque de acondicionamiento para la generación de +5V_{DC}.</p> <p>(C_{5VOUT})</p> <p>Condensador de entrada del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada.</p> <p>(C_{BATT})</p> <p>Condensador de ajuste del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada.</p> <p>(C_{ADJ})</p>	4,00	0,29 €	1,16 €
CAPF002	<p>ud Condensador Película Poliéster, 330nF, ±5%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante</p> <p>Condensador de entrada del bloque de acondicionamiento para la generación de +5V_{DC}.</p> <p>(C_{5VIN})</p>	1,00	0,52 €	0,52 €
CAPF003	<p>ud Condensador Electrolítico Aluminio, 2,2μF, ±20%, 35Vdc, Orificio Pasante</p> <p>Condensador de salida del bloque de acondicionamiento para la generación de +3,3V_{DC}.</p> <p>(C_{3V3OUT})</p>	1,00	0,06 €	0,06 €
CAPF004	<p>ud Condensador Película Poliéster, 1μF, ±10%, 63Vdc, 40Vac, Orificio Pasante</p> <p>Condensador de salida del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada.</p> <p>(C_{IN})</p>	1,00	0,41 €	0,41 €
CAPF005	<p>ud Condensador Electrolítico Aluminio, 22μF, ±25%, 25Vdc, Orificio Pasante</p> <p>Condensador de salida del bloque de conmutación.</p> <p>(C_L)</p>	1,00	0,22 €	0,22 €

Código	Descripción	Cant.	Precio	Importe
DIOD001	ud Diodo Recuperación Estándar 1N4002, 100V, 1A, Orificio Pasante, DO-41, 2-Pines Diodo del bloque de acondicionamiento para la regulación de la tensión de entrada. (D₁), (D₂)	2,00	0,04 €	0,08 €
DIOD002	ud Diodo Ultrarápido SF36+, 400V, 3A, Orificio Pasante, DO-201AA, 2-Pines Diodo del bloque de conmutación y del bloque de sensado. (D₃), (D₄)	2,00	0,32 €	0,64 €
DLED001	ud Diodo LED Rojo, Baja Potencia, 5V, 13mA, Orificio Pasante Diodo LED del bloque de computación y control. (D_{LED})	1,00	0,25 €	0,25 €
SWTC001	ud Interruptor SPDT, On-On, 3A, Orificio Pasante <i>Switch</i> del bloque de computación y control para el control del inicio del proceso de calentamiento del actuador. (D_{LED})	1,00	1,04 €	1,04 €
TOTAL MATERIALES.....				95,47 €

13.3 Resumen del presupuesto

Resumen	Importe	%
MATERIALES.....	95,47 €	100,00
TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL		95,47 €
13,00% Gastos Generales.....	12,41 €	
6,00% Beneficio Industrial.....	5,73 €	
SUMA DE G.G. y B.I.		113,61 €
21,00% I.V.A.....	23,86 €	23,86 €
TOTAL PRESUPUESTO GENERAL		137,47 €

Sube el Presupuesto a:

CIENTO TRENTA Y SIETE EUROS con CUARENTA Y SIETE CÉNTIMOS



Firmado por ÁLVARO BACEIREDO RAMOS con fecha 03 de SEPTIEMBRE de 2018.