



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

DISEÑO DE PINZA CMI ACTUADA MEDIANTE CABLES SMA CON REALIMENTACIÓN DE FUERZA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

Autor: Cibrán Rodríguez Álvarez
Director: Miguel Almonacid Kroeger
Codirector: Julio Ibarrola Lacalle

Cartagena, 04 de Octubre de 2.016



Universidad
Politécnica
de Cartagena



En agradecimiento a todas aquellas personas que han estado presentes a lo largo de estos años y que han contribuido con su apoyo a que haya podido lograr esta meta. Gracias Madre por siempre ser comprensiva y brindarme tu apoyo incondicional. Gracias Padre por darme fuerza. Gracias Hermanos por complementarme y abrirme camino en esta vida. Gracias Compañeros por lograr hacerme sentir como en casa y en familia.

Cibrán Rodríguez Álvarez







INDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 0.	11
Introducción.....	11
0 Introducción	13
0.1 Motivaciones del proyecto	13
0.2 Objetivos	13
0.3 Antecedentes.....	13
0.4 Resultados esperados	14
Capítulo 1.....	15
Estado del arte	15
1 Estado del Arte	17
1.1 Pinzas de cirugía de mínima invasión (CMI)	17
1.1.1 Historia.....	17
1.1.2 Morfología de las pinzas según su aplicación	18
1.2 Aleaciones de memoria de forma en la industria.....	19
1.2.1 Aplicaciones de los SMA	20
1.3 Estudios documentados.....	22
Capítulo 2.....	23
Software y Hardware empleados	23
2 Software y Hardware empleados	25
2.1 MultiSim NI	25
2.2 MatLab	26
2.3 Solid Works	27
2.4 Arduino	28
2.5 Impresora 3D Prusa Mendel I3.	29
Capítulo 3.....	33
Introducción a las aleaciones con memoria de forma	33
3 Introducción a las aleaciones con memoria de forma	35
3.1 Introducción.....	35
3.2 Propiedades físicas.....	35
3.2.1 Fases estructurales	35
3.2.2 Efectos de forma.....	38



3.3	Tipos de aleaciones.....	41
3.4	Selección de materiales.	42
	Capítulo 4.....	45
	Sensores de fuerza. Galgas extensiométricas	45
4	Sensores de fuerza. Galgas extensiométricas.	47
4.1	Introducción.....	47
4.1.1	Transductor.	47
4.1.2	Acondicionamiento eléctrico.....	48
4.1.3	Tipos de sensores de fuerza.	48
4.2	Sensores de fuerza basados en galgas extensiométricas.	48
4.2.1	Fundamentos físicos.	48
4.3	Parámetros de una galga.	51
4.4	Tipos de Galgas extensiométricas.....	51
4.5	Selección de tipo de galgas.....	53
4.6	Construcción del sensor.....	53
4.6.1	Circuitos de acondicionamiento de señal.	53
4.6.2	Corrección de la señal de offset del sensor.....	55
4.7	Construcción del experimento de calibración.....	56
	Capítulo 5.....	57
	Diseño mecánico de la piza CMI	57
5	Diseño mecánico de la pinza CMI.....	59
5.1	Introducción.....	59
5.2	Cálculos matemáticos para el modelo mecánico de las mandíbulas.	60
	Capítulo 6.....	63
	Iniciación al control de actuadores basados en SMA	63
6	Iniciación al control de actuadores basados en SMA.....	65
6.1	Introducción.....	65
6.2	Activación de los actuadores de movimiento angular	66
6.2.1	Entrada escalón para el servo-motor	66
6.2.2	Entrada escalón para el actuador SMA 1.	67
6.3	Activación de los actuadores de movimiento lineal	67
6.3.1	Entrada escalón para el motor DC2.....	68
6.3.2	Entrada escalón para el SMA2.....	68



6.4	Control de posición de los actuadores de movimiento angular.....	69
6.5	Control de posición los actuadores de movimiento lineal	69
	Capítulo 7.....	71
	Experimento inicial para el control con realimentación de fuerza de actuadores SMA	71
7	Experimentos iniciales para el control con realimentación de fuerza de actuadores SMA.....	73
7.1	Introducción.....	73
7.2	Fabricación de la pseudo-pinza	73
7.3	Implantación del sensor de fuerza de cuarto puente.....	75
7.3.1	Pegado de la galga	78
7.3.2	Calibración del sensor de fuerza de cuarto de puente	78
7.4	Experimentos de control con realimentación de fuerza. Sensor de cuarto de puente.....	81
7.5	Implantación de sensor de fuerza de medio puente.....	83
7.5.1	Pegado de la galga	83
7.5.2	Calibración del sensor de fuerza de medio puente.....	83
7.6	Experimentos de control con realimentación de fuerza. Sensor de medio puente.....	85
7.7	Detección y corrección de problemas de sensorización	86
7.7.1	Calibración	87
7.8	Experimentos de control con realimentación de fuerza tras la corrección de errores.	88
7.8.1	Control PID.....	89
7.9	Análisis de resultados	94
	Capítulo 8.....	95
	Experimentos con el prototipo final de la pinza CMI	95
8	Experimentos con el prototipo final de pinza CMI.....	97
8.1	Introducción.....	97
8.2	Diseño y Fabricación del prototipo final.....	97
8.2.1	Caracterización del prototipo.....	99
8.2.2	Dimensionamiento de los cables SMA	100
8.2.3	Acondicionamiento eléctrico del actuador SMA.....	101
8.3	Implantación del sensor de fuerza de cuarto de puente.....	102
8.3.1	Calibración del sensor de fuerza de cuarto de puente	103



8.3.2 Control en lazo abierto con visualización de fuerza.....	104
Capítulo 9.....	105
Conclusiones y disposiciones finales	105
9 Conclusiones y disposiciones finales	107
9.1 Valoración de los resultados obtenidos.	107
9.2 Conclusiones.....	107
9.3 Futuros estudios y disposiciones finales.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	109
Anexos.....	111
Anexo I. Códigos desarrollados para el control de los actuadores a través de Matlab	113
Anexo II. Hojas de características de los componentes electrónicos empleados ...	139
Anexo III. Pegado de galgas extensiométricas.....	141



INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de mandíbulas según su morfología	19
Figura 2.1. Software MultiSim NI	25
Figura 2.2. Software de cálculo matemático MatLab.	26
Figura 2.3. Software SolidWorks.....	27
Figura 2.4. Tarjeta Arduino UNO.	28
Figura 2.5. Tecnología de impresión 3D FDM.....	29
Figura 2.6. Impresora 3D Pursa Mendel I3	30
Figura 2.7. Software de laminado CURA.....	31
Figura 3.1. Cizalladura sobre el plano de hábito	37
Figura 3.2. Gráfico explicativo de la presencia de un sobreenfriamiento respecto a la temperatura de equilibrio en la transformación martensítica.....	37
Figura 3.3. Histéresis transformación Martensítica-Austenítica	38
Figura 3.4. Efecto memoria simple	39
Figura 3.5. Efecto de memoria doble	40
Figura 3.6. Super-elasticidad	40
Figura 4.1. Diagrama de bloque de un transductor.....	47
Figura 4.2. Lamina conductora sometida a tracción	49
Figura 4.3. Galga extensiométrica uniaxial. Cortesía de National Instruments	52
Figura 4.4. Puente de Wheatstone con un transductor.	54
Figura 4.5. Topologías de Medio Puente (izquierda) y Puente Completo (derecha) 54	
Figura 4.6. Esquema electrónico para la amplificación de señal.....	55
Figura 4.7. Esquema para la compensación de Offset Hardware. Medio Puente y Cuarto de puente.	56
Figura 4.8. Experimentos de calibración.....	56
Figura 5.1. Tipos de pinzas CMI	59
Figura 5.2. Esquema simplificado de la mecánica de las mandíbulas	60
Figura 5.3. Detalle hueco oblicuo.	61
Figura 5.4. Detalle de movimiento de la pinza	61
Figura 5.5. Esquema de distribución de fuerzas.....	62
Figura 6.1. Vista superior de la maqueta de experimentación	65
Figura 6.2. Respuesta a entrada escalón servo-motor obtenida	66



Figura 6.3. Respuesta entrada escalón servo-motor supuesta	66
Figura 6.4. Respuesta entrada escalón servo-motor obtenida	66
Figura 6.5. Respuesta escalón SMA1 obtenida.....	67
Figura 6.7. Respuesta escalón SMA1 obtenida.....	67
Figura 6.8. Respuesta a escalón obtenida	68
Figura 6.9. Respuesta a escalón esperada.....	68
Figura 6.11. Respuesta a ecalón esperada	68
Figura 6.11. Control PID sistema SMA1	69
Figura 6.12. Control PID sistema SMA2	69
Figura 7.1. Modelo 3D de la Pseudo-pinza	74
Figura 7.2. Sistema implementado	74
Figura 7.3. Parte fija de la Pseudo-pinza	75
Figura 7.4. Situación de la galga del sensor de cuarto de puente.....	76
Figura 7.5. Vista superior del INA 131	77
Figura 7.6. Esquema de adaptación electrónica del sensor	78
Figura 7.7. Circuito de adaptación electrónica del sensor	78
Figura 7.8. Esquema para el experimento de calibración	79
Figura 7.9. Experimento de calibración real.....	79
Figura 7.10. Recta de calibración del sensor	80
Figura 7.11. Experimento Pseudo-pinza capturando una esponja.....	81
Figura 7.12. Respuesta ante entrada escalón.....	82
Figura 7.13. Control PID con realimentación de fuerza.....	82
Figura 7.14. Esquemas de topología de medio puente	83
Figura 7.15. Recta de calibración para el sensor de medio puente	84
Figura 7.16. Respuesta a escalón con sensor de medio puente.....	85
Figura 7.17. Control con el sensor de medio puente	86
Figura 7.18. Recta de calibración del sensor de medio puente con $G = 2183$	88
Figura 7.19. Respuesta a escalón.....	89
Figura 7.20. Sintoníz por el Método Ziegler Nichols de lazo abierto	89
Figura 7.21. Control PI para entradas escalón.....	90
Figura 7.22. Control PI para entradas escalón con mayor tasa de cambio	91
Figura 7.23. Resupuesta para el control PI con entrada senoidal	92
Figura 7.24. Respuesta para control PI con entrada senoidal	92



Figura 7.25. Respuesta para el control PI con entrada senoidal	93
Figura 7.26. Respuesta para el control PI ante entradas rampa	93
Figura 7.27. Respuesta para el control PI ante entradas rampa	94
Figura 8.1. Mandíbula de la pinza prototipo	97
Figura 8.2. Pieza pivotante.....	98
Figura 8.3. Tirador.....	98
Figura 8.4. Carcasa del prototipo de pinza	98
Figura 8.5. Ensamblaje de la pinza prototipo	99
Figura 8.6. Modelo esquemático del prototipo de pinza	99
Figura 8.7. Piezas fabricadas del prototipo	100
Figura 8.8. Esquema del circuito de potencia para el actuador SMA.....	102
Figura 8.9. Galga extensiométrica adherirá en la cara anversa de la mandíbula....	103
Figura 8.10. Posición de la mandíbula para la calibración del sensor	103
Figura 8.11. Esquema de calibración del sensor para el prototipo	104





INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 – Aleaciones comerciales con memoria de forma	41
Tabla 3.2 – Ventajas y desventajas aleaciones NiTi.....	42
Tabla 3.3. Propiedades físicas Flexinol®	42
Tabla 3.4 Propiedades del Flexinol® según diámetros	43
Tabla 4.1. Materiales de soporte para galgas extensiométricas	52
Tabla 4.2. Tipo de galgas según la dirección del esfuerzo	52
Tabla 7.1. Experimentos de calibración.....	80
Tabla 7.2. Valores medios de calibración	80
Tabla 7.3. Resultados de la calibración del sensor de medio puente	84
Tabla 7.4. Valores medio de la calibración	84
Tabla 7.5. Resultados de la calibración del sensor medio puente con $G=2183$	87
Tabla 7.6. Valores medios de calibración del sensor de medio puente con $G=2183$	87
Tabla 7.6. Valores para sintonía PID	90
Tabla 7.7. Valores para las constantes PID	90





Capítulo 0.

Introducción



0 Introducción

0.1 Motivaciones del proyecto

Tras una sucesión de proyectos enfocados en la investigación de las aplicaciones de las aleaciones de memoria de forma como actuadores, dentro del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena ha surgido la iniciativa de continuar dentro de esta línea de investigación, ahondando en las aptitudes intrínsecas de este tipo de materiales para cumplir con las tareas específicas como actuadores.

En continuidad con los estudios anteriores, se ha pensado en la introducción de los actuadores basados en aleaciones de memoria de forma dentro de la industria médica, tratando de aprovechar sus cualidades de alto ratio fuerza-masa y bajo consumo.

De esta forma, nace la motivación para renovar una herramienta básica dentro del ámbito de la medicina como son las pinzas para cirugía de mínima invasión. Tratando de aportar un control electrónico con realimentación de fuerza para así dotar de un aspecto de control muy relevante en este tipo de herramienta médica.

0.2 Objetivos

El objetivo del presente trabajo es lograr diseñar una pinza CMI. Para ello este estudio tratará de aportar toda la información relativa a los aspectos característicos de los actuadores basados en aleaciones de memoria de forma aplicados de forma directa a la actuación electrónica de las pinzas CMI. Características como son respuesta ante el control con realimentación de fuerza, tiempo de respuesta, frecuencia de respuesta, etc.

También son objetivos directos el desarrollo de sensores de fuerza específicos para lograr la realimentación de fuerza necesaria para ejercer el control sobre la actuación de la pinza; así como el desarrollo e implementación de los acondicionamientos electrónicos necesarios para la correcta excitación de los actuadores basados en aleaciones de memoria de forma.

Además, también se toma como objetivo el desarrollo e implementación mecánico de un prototipo de pinza CMI actuada mediante cables basados en aleaciones de memoria de forma.

0.3 Antecedentes

El presente estudio nace hace ya varios años cuando se comienza con la investigación de los actuadores basados en aleaciones de memoria de forma dentro del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Siendo el primer estudio realizado por Guillermo Ramírez[1]. En este primer estudio fueron representadas las bases de la tecnología empleada para la creación de actuadores basados en



aleaciones de memoria de forma, mostrando además un primer experimento comparativo entre las bondades que ofrecen los actuadores basados en aleaciones de memoria de forma frente a los motores de corriente continua.

Prosiguiendo los estudios de Guillermo Ramírez, se sucedió el estudio llevado a cabo por Ginés Moreno[2]. Este segundo estudio en la línea de los actuadores basados en las aleaciones de memoria de forma ofrece una extensa y clara comparativa de funcionamiento entre los motores de corriente continua y los actuadores basados en aleaciones de memoria de forma. En él se muestran las diferencias de control y potencia requerida, ofreciendo una serie de conclusiones finales concluyentes en favor de poder continuar con la línea de investigación comenzada.

0.4 Resultados esperados

Dentro del presente estudio se espera alcanzar el conocimiento necesario para proceder con el diseño de actuadores basados en aleaciones de memoria de forma, así como adquirir y afianzar los conocimientos relativos a la instrumentación electrónica que acompaña el diseño de los sensores de fuerza necesarios para obtener el control basado en la realimentación de fuerza. Además también se espera adquirir destreza en el diseño mecánico industrial y en el diseño gráfico con herramientas de diseño asistido por ordenador como AutoCAD® y SolidWorks®.

En el ámbito de la experimentación, se espera lograr un prototipo de pinza CMI funcional actuada con cables basados en aleaciones con memoria de forma con realimentación de fuerza. Comprobando la idoneidad de este tipo de actuadores dentro de la aplicación a estudio.



Capítulo 1.

Estado del arte





1 Estado del Arte

1.1 Pinzas de cirugía de mínima invasión (CMI)

1.1.1 Historia

Las pinzas de cirugía de mínima invasión son un instrumento diseñado para asir, agarrar o manipular con seguridad los delicados tejidos de cavidades internas del organismo sin necesidad de la apertura de canales para las manos del cirujano u otros instrumentos. Pueden ser empleadas en multitud de cirugías, aunque los ejemplos más típicos son la cirugía cardiovascular o las laparoscopias intestinales. La función que desempeñan dentro de estas cirugías consiste en facilitar un adecuado acceso a la zona quirúrgica mediante la sujeción de los tejidos colindantes para facilitar una visión clara del campo de operación.

Existen evidencias de que versiones primitivas de herramientas quirúrgicas como visores, trócares y escalpelos ya eran empleadas antes del descubrimiento del metal, con ejemplos registrados de instrumentos formados a partir de piedra, madera, cañas, fragmentos de hueso y otros materiales orgánicos. Sin embargo, se cree que los primeros instrumentos articulados de los que las modernas pinzas CMI son descendientes no se desarrollaron hasta después del descubrimiento del cobre y del bronce, ya que los materiales orgánicos no habían sido adecuados. Uno de los primeros ejemplos de pinzas quirúrgicas, que consiste en un par de piezas de bronce unidas por una correa de cuero para formar un pivote, se encontró en Grecia, en una fecha aproximada de 1450-1400 A.C. Las evidencias arqueológicas de las ruinas de Pompeya sugieren que los cirujanos romanos utilizaban instrumentos de bronce hacia el año 79, y en los tiempos del cirujano y enciclopedista árabe[3], estas herramientas habían evolucionado hasta convertirse en una serie de tipos diferentes, diseñados para aplicaciones específicas. Los instrumentos modernos se fabrican típicamente de acero quirúrgico inoxidable, y también pueden incorporar otros materiales incluyendo titanio, carburo de wolframio y diversos plásticos.

Las pinzas laparoscópicas intestinales forman parte de una serie de herramientas laparoscópicas estandarizadas que difieren de sus homólogos convencionales quirúrgicos en que tienen un eje o tubo extendido a fin de que se pueda maniobrar a través de incisiones que por lo general no son mayores de 5 mm durante procedimientos mínimamente invasivos.

Los instrumentos están disponibles con varios factores de forma, y puede ser reutilizables o desechables. Típicamente comprenden un mango, un eje aislado, y un inserto que forma la punta; algunas versiones también incluyen puestos de cauterización para unirse a cables electroquirúrgicos monopolares. Estos dispositivos están diseñados con precisión, y contienen pocas partes móviles ya que están diseñados para su uso en espacios muy limitados alrededor de los delicados órganos internos. Los modelos con diámetros dentro del rango de 1,8 mm a 12 mm están disponibles, pero la mayoría de los instrumentos están diseñados para su uso dentro



de las aberturas de 5 mm o 10 mm. Las longitudes de aproximadamente 300 a 350 mm son típicas para los procedimientos de muchos adultos, pero instrumentos más largos o más cortos pueden ser necesarios en determinadas circunstancias.

En situaciones en las que la posición del tejido sujetado debe ser mantenida durante períodos prolongados, la capacidad de bloqueo de las mordazas del instrumento puede ayudar a reducir la fatiga de la mano, por lo tanto, la mayoría de las pinzas intestinales están equipados con algún tipo de mecanismo de bloqueo, generalmente operado por medio de una palanca situada en el mango del instrumento. Los mecanismos de trinquete, que permiten que las mordazas se puedan bloquear en una gama de posiciones diferentes, dependiendo de la cantidad de presión requerida, son los más comunes, aunque otros diseños están disponibles. Algunos diseños de instrumentos permiten 360° rotación de la punta de agarre a través de una rueda o un botón situado en el mango. Este generalmente se coloca en la parte superior del instrumento, donde el mango se une al eje, de manera que puede ser manipulada por el pulgar. Un puerto de lavado para la limpieza accesible del hueco interno del eje también se puede incorporar en la parte superior del mango.

Manejar las pinzas intestinales requiere práctica y habilidad, porque las puntas de las pinzas son pequeñas y la presión en las puntas es magnífica, la presión excesiva puede conducir a daños en los tejidos y una presión excesivamente baja puede causar que el tejido se deslice fuera de la pinza. Las técnicas mínimamente invasivas pueden privar a los cirujanos de la retroalimentación táctil, percepción de la profundidad y de la coordinación mano-ojo a su disposición durante los procedimientos abiertos, por lo que es mucho más difícil determinar la cantidad de fuerza a aplicar.

1.1.2 Morfología de las pinzas según su aplicación

Como ya se ha mencionado, las pinzas CMI pueden ser empleadas en diversos campos quirúrgicos, siendo los más relevantes en cuanto a su responsabilidad las cirugías laparoscópica y cardiovascular. Aunque también son ampliamente empleadas en otras cirugías como son las artroscopias o endoscopias.

Se considera que el tejido intestinal es una de los más delicados del cuerpo humano, por lo que es esencial que la punta de agarre es capaz de ofrecer un agarre seguro, sin ejercer una presión excesiva. Varios tipos de mordazas o mandíbulas están disponibles, incluyendo tipos rectos o acampanados, traumáticos o no traumáticos, simples o de doble acción, y fenestrados o sólidos. Las pinzas intestinales siempre deben ser de diseño atraumático, es decir, con acabados romos en lugar de extremos puntiagudos, diseñados para ejercer una sujeción firme pero suave en el tejido intestinal. Los de tipo simple, con una mordaza fija y otra móvil, pueden ofrecer una mayor presión que las mandíbulas de doble acción, pero ofrecen una abertura más pequeña en la que pinzar el tejido. Los diseños no fenestrados tienen mandíbulas sólidas, basándose en la fricción para mantener el tejido en su lugar. Los diseños fenestrados incorporan un área abierta o ventana en una o ambas

mordazas, haciéndolos más ligeros, y, teóricamente, ofreciendo un agarre más seguro que la fricción por sí solo, atrapando una porción de tejido dentro de la ventana. En ambos casos, las grandes mordazas ofrecen una mayor fricción, y por lo tanto un mejor agarre. Las superficies interiores de las mordazas pueden ser perfiladas con ondas, dientes, los hemisferios salientes o nervaduras transversales de sierra, con el fin de mejorar aún más las características de agarre. Las de nervaduras dentadas ofrecen la ventaja de trabajar en una gama de planos, mientras que un perfil ondulado es efectivo sólo en el plano perpendicular a la dirección de las ondas.

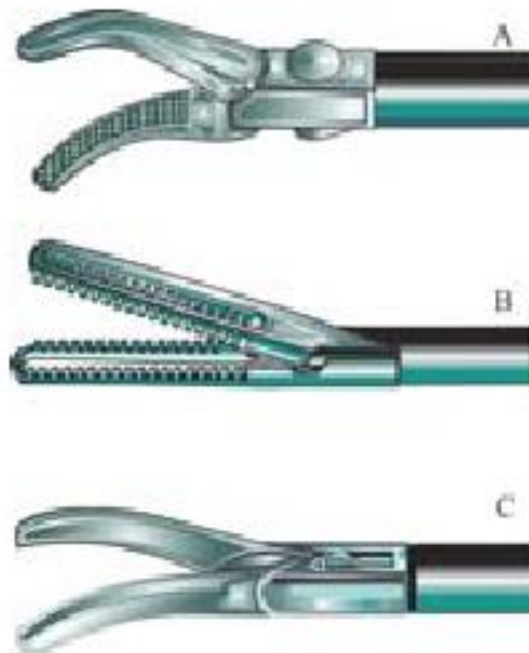


Figura 1.1. Tipos de mandíbulas según su morfología

1.2 Aleaciones de memoria de forma en la industria

Fue en 1970 cuando se realizó la primera demostración de un acoplamiento de un tubo “Cryofit” mediante SMA en un avión de combate F-14. Esta demostración de la fiabilidad del dispositivo de memoria de forma dentro de un sistema hidráulico de alta presión lleva a la producción de millones de acoplamientos en los años posteriores.

Tras este comienzo se sucedieron miles de patentes alrededor de todas las posibles aplicaciones concebibles para las aleaciones de memoria de forma, aunque de hecho, la lista de productos comerciales a día de hoy es muy corta. Ciertamente la mayor parte de la producción comercial de las aleaciones de memoria de forma está dirigida al campo de la medicina y la odontología, con otras pocas áreas significantes como las monturas de gafas, antenas de telefonía móvil, sostenes para mujer o dispositivos para la automoción.

Mientras la atención permanece centrada en los dispositivos médicos debido al alto valor de negocio, el consumo de los materiales basados en SMA en el sector



industrial supera al consumo en el campo médico. De hecho el ritmo de crecimiento de nuevas aplicaciones comerciales es muy rápido.

1.2.1 Aplicaciones de los SMA

A continuación vamos a comentar las aplicaciones tanto potenciales como reales de estas aleaciones, algunas de ellas ya se están comercializando y otras aún están en fase de estudio. Existen múltiples artículos divulgados sobre estas aleaciones donde se hablan de las aplicaciones en las que se han utilizado resultando algunas muy viables, sobre todo en el campo de la medicina. Las causas de que las aplicaciones de las propiedades que estas aleaciones presentan no hayan sido implementadas de forma tan intensa como cabría esperar son diversas. En primer lugar porque durante mucho tiempo se ha solapado el desarrollo de estas aleaciones con la introducción en el mercado y por tanto los precios eran excesivamente elevados y prohibitivos en muchos casos. En segundo lugar porque se pretendía la sustitución de otros elementos y, dado el precio de los materiales basados en aleaciones con memoria de forma, era complicado su fructificación. Otro factor a considerar es que no ha habido gran cooperación entre el marketing de estas aleaciones con los productores. Este último factor cada vez se va resolviendo mejor. Es difícil también promocionar un producto si no se tiene definido un mercado sobre el cual recaer. En general, los potenciales usuarios de estas aleaciones las desconocen, con lo que han de confiar de pleno en los productores de las SMA y esto no es una práctica común.

Antes de proceder con la clasificación de estas aleaciones, es conveniente comenzar por conocer para qué pueden ser empleadas: el efecto de memoria de forma puede ser usado para generar movimiento o fuerza, mientras que la superelasticidad puede almacenar energía de deformación. Se puede aplicar el elemento utilizando su recuperación libre, es decir, a temperatura ambiente y estando en fase martensita¹, deformamos el elemento y calentamos, aprovechando la recuperación de forma. Esto puede ser empleado, por ejemplo, en acoplamientos. Si por el contrario, a temperatura ambiente estiramos pero fijamos el elemento antes de calentar (impidiendo que recupere su forma), estaremos ante la recuperación impedida, produciendo fuerza en el calentamiento. Si la fuerza opositor puede ser vencida por el SMA generará desplazamiento frente a una fuerza, es decir, trabajo. Por ejemplo, al calentar se contraerá y levantará un peso. En el enfriamiento, la misma carga alargará de nuevo el alambre volviendo al inicio del ciclo. En condiciones óptimas y sin presencia de carga, la deformación recuperable puede llegar a ser de hasta el 8%, pero en el uso de aplicaciones cíclicas la deformación admitida suele ser mucho menor. Lo mismo en tensión: para una sola aplicación, la tensión de cadencia de la ausentita es mucho mayor que en aplicaciones cíclicas.

¹ La fase martensítica de las aleaciones con memoria de forma será estudiada en el capítulo siguiente.



1.2.1.1 Aplicaciones superelásticas

Las aplicaciones más extendidas en los últimos años son en el campo de la superelasticidad: antenas de móviles, monturas de gafas o como alambres dentales. La gran ventaja en esta última aplicación es que generan una fuerza relativamente constante en la descarga en un rango de deformación. Pero, donde realmente están dando resultados revolucionarios es en el campo de la biomedicina. Se están aplicando en el guiado de alambres en cirugía por su flexibilidad y torsionalidad, así como en stents auto-expandibles, localizadores de tumores, herramientas de cirugía, placas intracraneales o en aplicaciones ginecológicas.

1.2.1.2 Aplicaciones como actuadores

El primer éxito en la aplicación como actuador fue empleando el efecto de la recuperación impedida para usos de uniones y cierres. La casa Raychem Corp. desarrolló a principios de los años 70 uniones de tubos para aplicaciones aéreas y marinas[4]. El concepto era sencillo: se mecaniza un acoplamiento con un diámetro interior de un 3% menos que el diámetro del tubo al que será unido. Se enfría hasta estado martensítico, se expande radialmente en torno a un 8% y, ya colocado, se calienta hasta el contacto, desarrollando una enorme fuerza de unión. Muchas de estas uniones eran criogénicas y debían ser almacenadas en nitrógeno líquido, problema que se solventó con la aparición de las aleaciones NiTiNb el cual puede ser almacenado a temperatura ambiente y calentado a 150°C para la instalación. Estas uniones permanecían inalterables aun enfriando por debajo de 20°C. Sus grandes ventajas eran la ligereza, la facilidad de instalación, las propiedades mecánicas y su resistencia a ciclos térmicos. Como inconvenientes están el alto coste y la temperatura de operación relativamente corta (-20°C, 200°C).

En las aplicaciones como actuadores su función consiste en un cambio de forma al cambiar la temperatura. Este cambio de temperatura puede ser causado por un cambio en la temperatura ambiente o por haber calefactado el material. En el primer caso, el actuador actúa como sensor y actuador térmico mientras que en el segundo caso es sólo un actuador eléctrico. Ambos actuadores combinan gran movimiento, pequeñas dimensiones y una fuerza relativamente elevada. Pese a que este campo supuso de forma originaria la aplicación más importante de los SMA, no ha sido la que más éxitos ha cosechado. Los diseños de actuadores SMA son bastante complejos al requerir: temperatura de transformación al calentar, temperatura de reposo, fuerza, desplazamiento, estabilidad cíclica, tiempo de respuesta al calentar y enfriar, dimensiones, tolerancias a sobretensiones y sobrecorrientes, etc. Uno de los pocos actuadores de éxito fue una válvula de control de presión que Mercedes-Benz desarrolló para sus transmisiones automáticas y para el control de los cierres de protección de las luces antiniebla.

Los actuadores SMA han intentado sustituir a motores eléctricos y solenoides. Controlando la potencia durante la actuación eléctrica, pueden mantenerse posiciones específicas o niveles de fuerza específicos. Se han usado en válvulas y, últimamente integrados en composites para atenuar ruidos en estructuras y control



de vibraciones. Las mayores limitaciones son las temperaturas de transformación y la falta de control en el tiempo de enfriado. Para trabajar adecuadamente, se necesita que M_f sea mucho más alta que la temperatura operativa. Los actuadores que más se han comercializado con éxito tienen una M_f de 70°C.

La aplicación de los SMA como microactuadores térmicos en mecanismos de actuación ofrecen grandes ventajas: no requieren otro elemento más que el propio SMA, gran versatilidad en el diseño a tracción, compresión o flexión, limpios, con posibilidad de trabajar en ambientes inflamables, etc. Sin embargo, ofrecen una eficiencia energética baja, su frecuencia de trabajo es muy limitada debido a las restricciones de calentamiento y enfriamiento, y pueden sufrir degradación y fatiga. Las aplicaciones donde se han empleado estos microactuadores son: cafeteras, válvulas termostáticas...

1.3 Estudios documentados

Aunque pueda parecer que existe una gran extensión de aplicaciones para los SMA, muchos de ellas solo están en fase experimental y se dan a conocer a través de los estudios realizados en universidades alrededor de todo el mundo.

Centrando las aplicaciones posibles de los SMA en la industria médica, es posible encontrar multitud de estudios que revelan un gran interés por incorporar esta nueva tecnología dentro del campo de la instrumentación médica. Dentro del campo de estudio al que se refiere este texto, podemos encontrar diversos estudios de la aplicación de actuadores basados en SMA para pinzas quirúrgicas de mínima invasión en los cuales se reflejan comparativas entre el empleo entre el uso de micro servomotores y actuadores SMA, como es posible leer en [5], así como el control de pinzas actuadas con SMA a través de la realimentación táctil plasmado en el estudio [6].

De igual manera es relevante nombrar otros textos como [7], [8], [9], importantes dentro de la redacción del presente estudio, ya que al igual que los anteriores también han servido como soporte básico para profundizar en el conocimiento de las características y comportamientos de las aleaciones con memoria de forma.



Capítulo 2.

Software y Hardware empleados



2 Software y Hardware empleados

2.1 MultiSim NI

Para el diseño de componentes electrónicos se hace imprescindible el empleo de herramientas que nos permitan conocer el comportamiento teórico que tendrá la implementación diseñada para, de esta forma subsanar errores de diseño y a su vez poder comprobar que los resultados obtenidos son válidos en todo momento.

Para la realización de los diseños teóricos, su cálculo y su simulación se ha optado por trabajar con la herramienta de diseño asistido por ordenador MultiSim, perteneciente a la Compañía National Instruments.

MultiSim es un completo Software de modelado de circuitos electrónicos que permite su simulación en tiempo real. Además también cuenta con herramientas asociadas que permiten trasladar nuestros diseños de circuitos electrónicos a diseño de tarjetas de circuitos impresos (PCB) que resultan muy útiles a la hora de realizar los prototipos de nuestros diseños.

En definitiva, MultiSim es un entorno de simulación SPICE estándar en la industria electrónica.

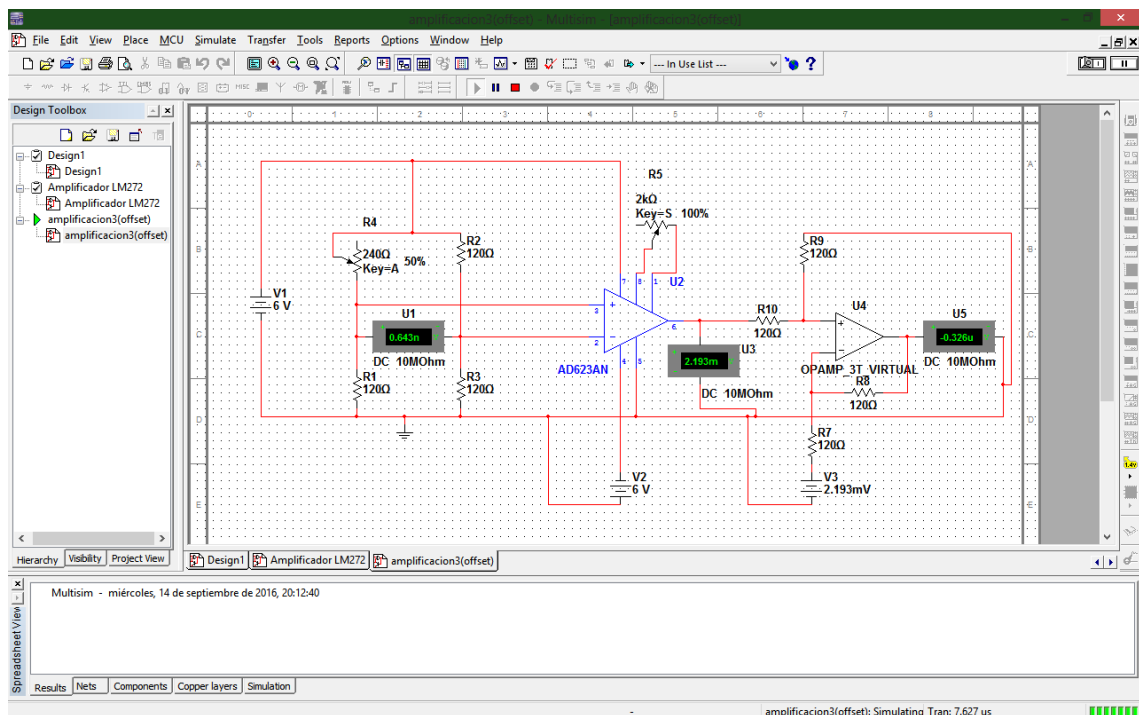


Figura 2.1. Software MultiSim NI

2.2 MatLab

La resolución de cálculos matemáticos fue una de las primeras si no la primera tarea implementada en un ordenador. Desde los primeros softwares primitivos los cuales eran desarrollados para realizar el cálculo único y exclusivo de un problema o ecuación, se han sucedido multitud de plataformas que han venidos sustituyéndose y mejorándose unas a otras. MatLab, acrónimo de Matrix Laboratory, es un software que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje propio de programación como es el lenguaje M.

El lenguaje M se define como el lenguaje del cálculo técnico, ya que es empleado por ingenieros y científicos tanto a nivel académico como profesional para analizar y diseñar los sistemas y productos que transforman nuestro mundo. MatLab ofrece una plataforma optimizada para resolver todo tipo de problemas, integrando además diferentes herramientas denominadas “toolboxes” que permiten un análisis complejo así como la programación gráfica mediante sistemas de bloques.

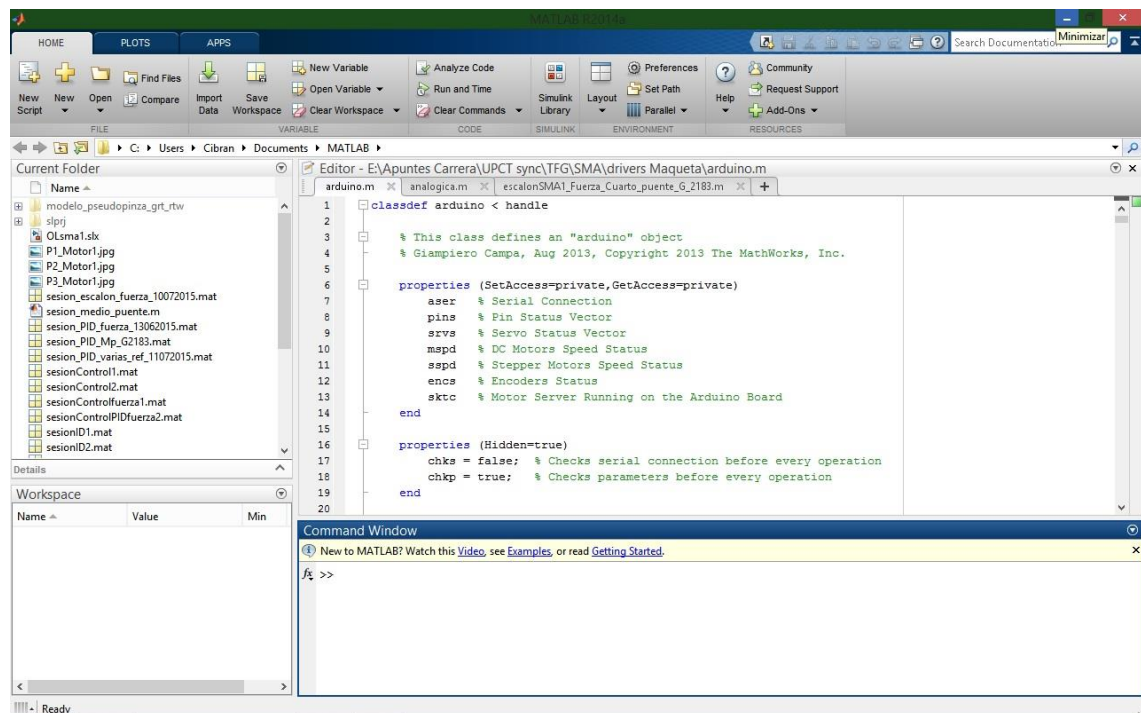


Figura 2.2. Software de cálculo matemático MatLab.

Para nuestro proyecto, MatLab resulta esencial a la hora de interpretar las señales recogidas por la tarjeta de adquisición de datos (Tarjeta Arduino UNO), así como para poder programar las rutinas de excitación y control necesarias para realizar nuestros experimentos.

Así pues, MatLab nos ofrece las herramientas necesarias para realizar los experimentos requeridos, visualizar la información en forma de gráficos y realizar análisis de los resultados obtenidos.

2.3 Solid Works

Desde hace ya muchos años se ha hecho imprescindible en todo diseño de fabricación la obtención de modelos gráficos bien definidos que ayuden a lograr un producto final fiel al diseño creado. Estos modelos se vienen realizando mediante diseño asistido por ordenador (CAD), o lo que es igual, se emplean aplicaciones y software informático que ayudan a que las descripciones gráficas de los modelos diseñados resulten de gran calidad, más rápidos y fáciles de realizar y también más sencillos de comprender.

Como parte de este proyecto se realizará el diseño y fabricación de varios prototipos funcionales de pinza, por lo que se hace imprescindible el manejo de este tipo de aplicaciones de diseño.

Además, basándonos en el concepto CAD/CAM, que engloba las dos partes esenciales de todo proceso de fabricación como son el diseño y la fabricación, se hace necesario emplear un software específico que nos permita generar los modelos gráficos en sólidos de 3 dimensiones y que integre las tecnologías CAM.

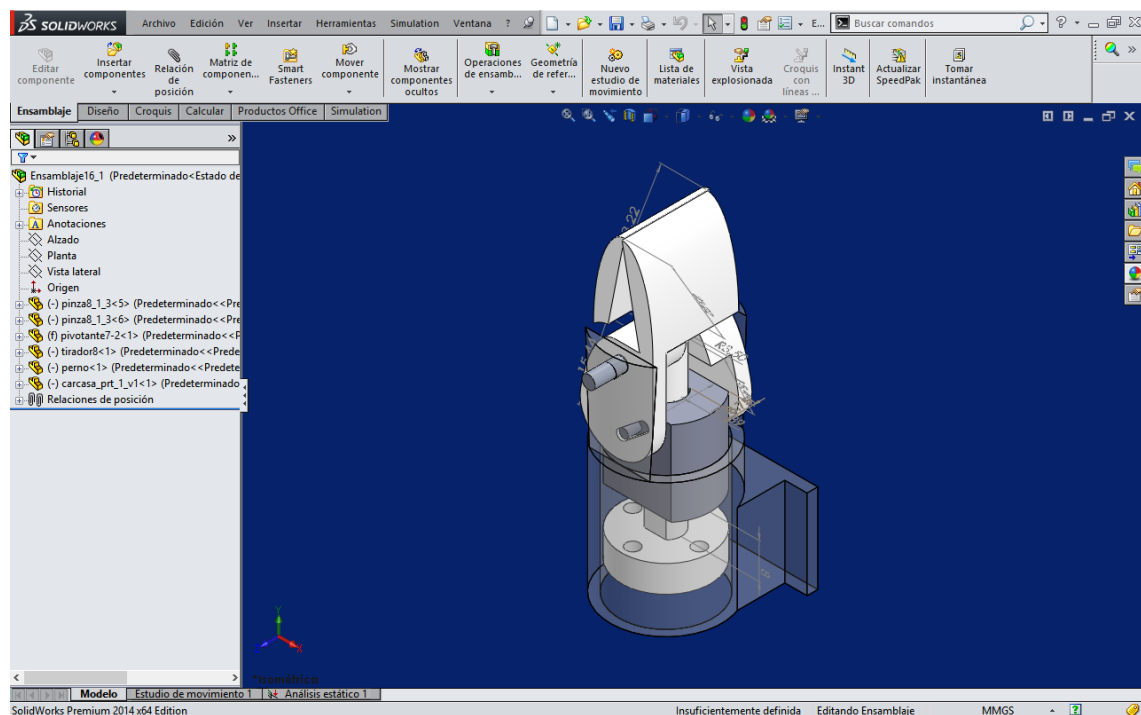


Figura 2.3. Software SolidWorks

Para llevar a cabo estas tareas se ha seleccionado el software de modelado en 3 dimensiones Solid Works®, ya que además de ofrecer las herramientas necesarias para la realización de tareas CAD/CAM, nos permite generar estudios de movimiento que resultan esenciales para lograr unos diseños mecánicos óptimos (eliminando en la fase de diseño) antes de comenzar con los procesos de fabricación y así obtener un ahorro de tiempo considerable.

Solid Works® es un software de CAD/CAM desarrollado por la compañía Dassault Systems y enfocado de forma directa al mundo de la ingeniería. Con él es posible generar modelos en 3 dimensiones que posteriormente pueden ensamblarse para generar un conjunto con relaciones de posición y grados de libertad que posibilitan la simulación de movimiento y comportamiento de la pieza, aparato o producto diseñado.

2.4 Arduino

Todo proceso de captación de señales electrónicas, así como todo proceso de control electrónico necesita de una interfase la cual sea capaz de recibir y enviar los impulsos eléctricos deseados para posteriormente traducirlos y visualizarlos según sea conveniente. Esta tarea ha sido tradicionalmente por microcontroladores, los cuales es necesario ensamblar en su placa de circuito impreso y realizar su acondicionamiento electrónico para poder comenzar a programarlos y trabajar con ellos.

Desde la llegada de las tarjetas de desarrollo electrónico Arduino, con Arduino UNO en 2.005, la tendencia de la comunidad tanto profesional como estudiantil empezó a trasladar sus investigaciones a las tarjetas Arduino ya que resultaba mucho más sencillo y en ocasiones hasta más económico que el ensamblaje y adecuación de microcontroladores de forma clásica.

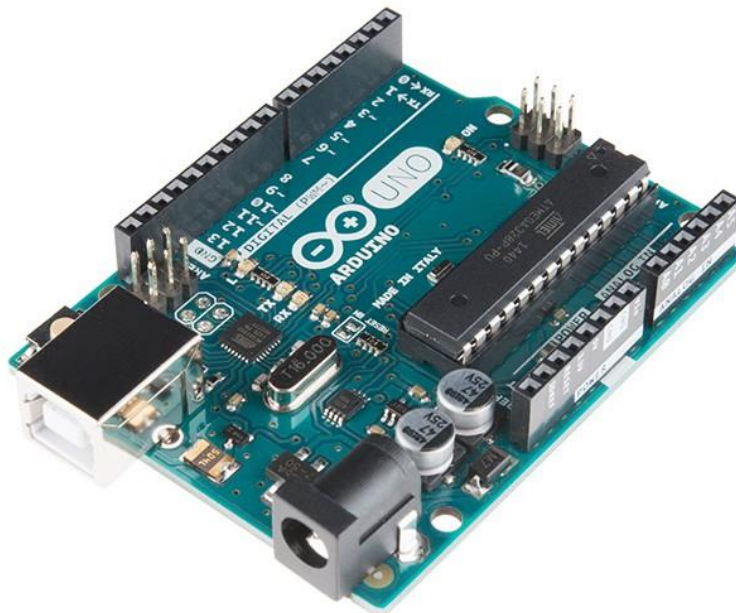


Figura 2.4. Tarjeta Arduino UNO.

La gran ventaja que presentan las tarjetas Arduino es su sencillez y rapidez de funcionamiento. Basadas en el concepto Plug&Play, una tarjeta Arduino puede ser

puesta en marcha en cuestión de minutos ya que cuenta con un entorno de desarrollo integrado (IDE) muy sencillo de emplear y la descarga de los códigos de programa sobre la tarjeta se realizan de forma intuitiva. En adición, las tarjetas de entrenamiento Arduino están preparadas para que simplemente sea necesario conectar la alimentación, las entradas y las salidas configuradas para su utilización y ya podrá ponerse en marcha.

Dentro del proyecto Arduino existen multitud de placas de entrenamiento entre las cuales se han empleado dos versiones, la versión Arduino UNO y la versión Arduino NANO.

La tarjeta Arduino UNO ha sido empleada en esencia para ejercer de tarjeta de adquisición de datos conectada a PC para así poder realizar los experimentos de control y realimentación de fuerza junto con el software MatLab.

Por otro lado, la tarjeta Arduino NANO ha sido empleada para su uso autónomo sin conexión a PC, para el control en circuito abierto y circuito cerrado mediante la manipulación de un joystick.

2.5 Impresora 3D Prusa Mendel I3.

La fabricación de prototipos de la pinza es una parte esencial de este proyecto. Por lo que se ha planteado emplear alguna de las múltiples tecnologías CAM disponibles. Gracias al uso del software Solid Works, el cual integra las técnicas CAD con las tecnologías CAM, ha sido posible la fabricación de los diferentes prototipos de estudio mediante la fabricación CNC por impresión 3D.

La máquina empleada para realizar el prototipado rápido de las diferentes piezas diseñadas es una Prusa Mendel I3, que emplea la tecnología de modelado por deposición de filamento fundido (MDF) para crear los elementos 3D deseados. Sus materias primas de trabajo son plásticos de bajo punto de fusión como el ABS, el PLA, el Nylon y Polipropileno, Polietileno y otros plásticos de desarrollo específico para su impresión en tres dimensiones.

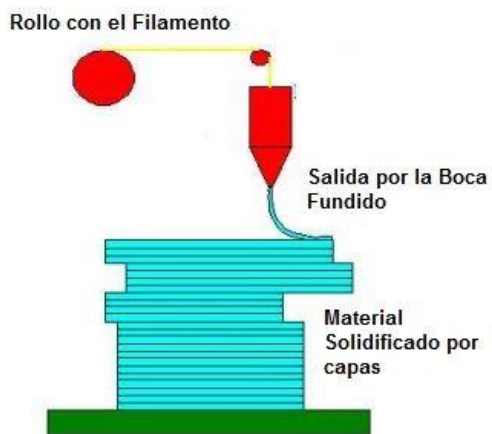


Figura 2.5. Tecnología de impresión 3D FDM

El funcionamiento de la tecnología MDF puede ser explicado de forma muy escueta como la extrusión de la materia prima a través de un cabezal caliente el cual funde el material y lo deposita sobre una base, en ocasiones caliente, donde la materia prima se solidifica formando finas capas que adquieren la forma deseada.

Para realizar esta labor la máquina Prusa Mendel I3 está basada en un sistema de control numérico de 3 ejes móviles en el cual el extrusor se mueve en dos ejes, ejes X y Z, mientras que la base de deposición únicamente se mueve en un eje, el eje Y.

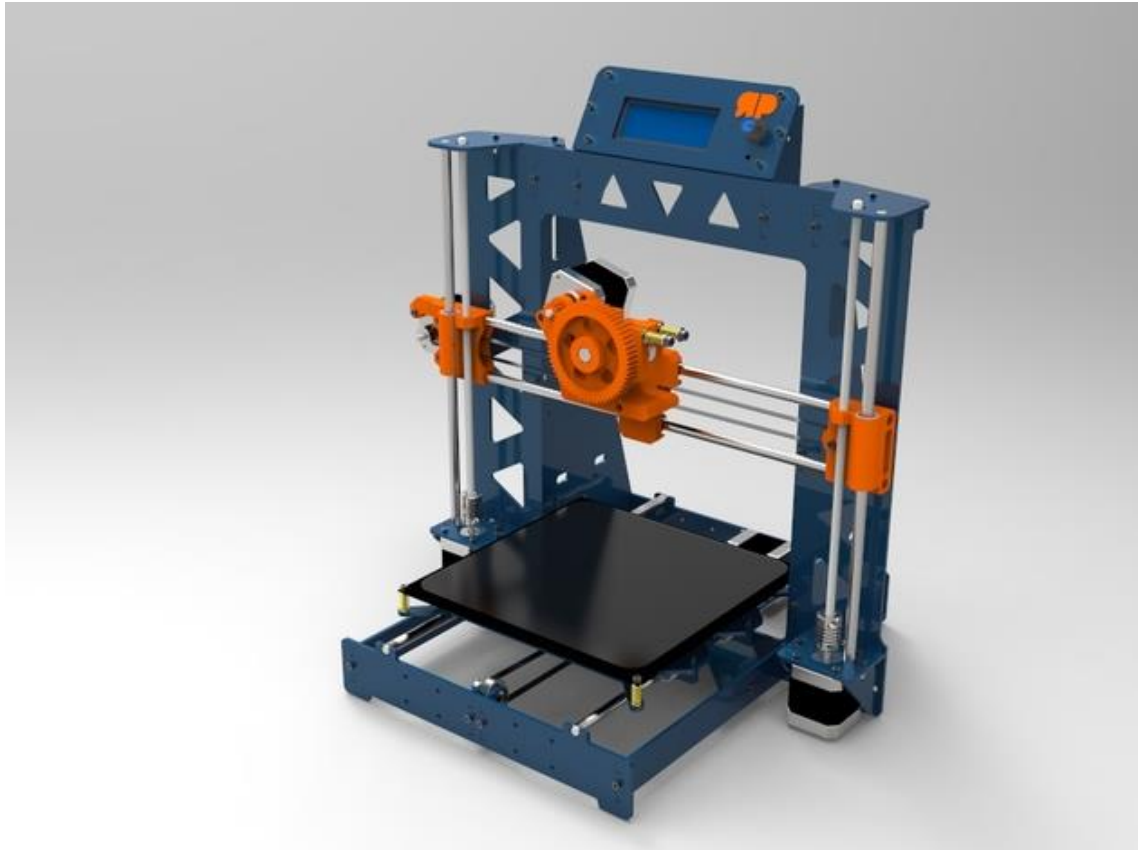


Figura 2.6. Impresora 3D Prusa Mendel I3

El proceso CAD/CAM está completamente integrado en esta plataforma, ya que tan solo es necesario tener el modelo CAD tridimensional de la pieza a fabricar para generar (a través de un segundo software de laminado) el código CNC necesario para que la máquina comience a trabajar. El software de laminado es parte del proceso de fabricación asistida por ordenador, por lo cual no procede una explicación extensa de este. En nuestro caso, se ha empleado un software abierto e intuitivo denominado CURA que facilita el proceso de generación de código CNC.

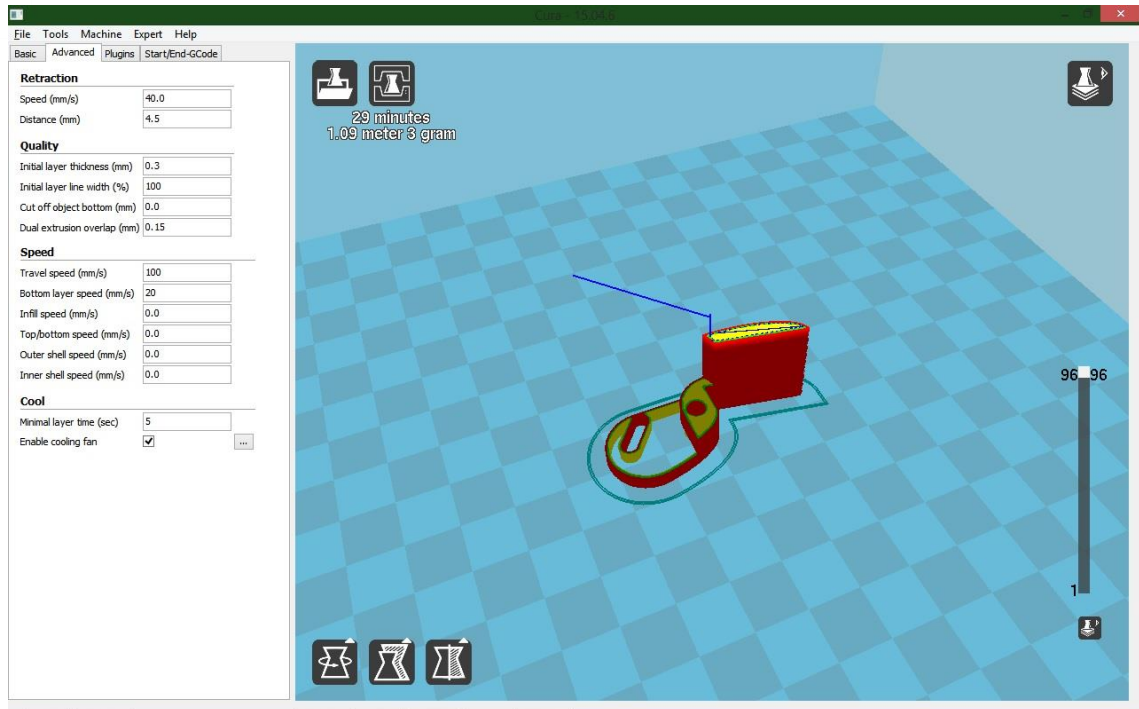


Figura 2.7. Software de laminado CURA





Capítulo 3.

Introducción a las aleaciones con memoria de forma





3 Introducción a las aleaciones con memoria de forma

3.1 Introducción.

Las propiedades de las aleaciones con memoria fueron descubiertas por Chang y Read en 1932[7]. En sus trabajos con aleaciones Au-Cd notaron la reversibilidad de transformación a través de observaciones metalográficas y cambios de resistencia.

Aunque en años siguientes se fueron datando “efectos de memoria de forma” en diversas aleaciones, pero no fue hasta 1962 cuando Bühler, en el Naval Ordnance Laboratory, descubrió esta propiedad en equiatómico formado por la aleación de Ni-Ti. A partir de entonces, la aleación Ni-Ti es denominada como Nitinol en favor de Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory. Su descubrimiento supuso el punto de partida para la investigación metalúrgica y la investigación de las posibles utilidades de esta propiedad.

Pese al descubrimiento de multitud de nuevas aleaciones con propiedades de memoria de forma como son las Cu-Zn, Cu-Ti o Cu-Ni-Al, el Nitinol se consagra como la aleación de memoria de forma más comercializada. Este hecho es debido a que presenta ciertas ventajas frente a sus competidores como son: bio-compatibilidad, resistencia a la corrosión, recuperación de grandes deformaciones (súper-elasticidad) y estabilidad al ciclado.

3.2 Propiedades físicas

La propiedad de memoria de forma de los “Shape Memory Alloys” está basada en la transformación reversible de estado sólido – sólido, entre las fases austenítica y martensítica. Esta transición también se conoce como transformación martensítica.

Pueden ser diferenciadas dos transformaciones martensíticas: una termoelástica y otra no termoelástica. Siendo la principal diferencia entre ellas el ciclo de histéresis que producen.

En los “Shape Memory Alloys”, la transformación martensítica que se produce es la termoelástica, lo que implica una serie de condiciones:

- *La transformación puede ser inducida por cambio de temperatura (calentamiento o enfriamiento) del material o por esfuerzos, modificando su energía libre.*
- *Una vez hayan nucleado los cristales, estos crecen en una relación proporcional a la tasa de enfriamiento o calentamiento, según corresponda.*

3.2.1 Fases estructurales

A efectos prácticos, las SMA pueden transitar a través de tres fases diferenciadas, en cuanto a su estructura cristalina se refiere. Estas son la fase martensítica, la fase austenítica y la fase martensítica inducida por el sometimiento del material a estrés.



A baja temperatura la aleación se encuentra en su fase martensítica. En esta fase el material es blando y maleable, pudiendo ser deformado fácilmente. A alta temperatura se encuentra en su fase Austenítica, donde la aleación se contrae y comienza su endurecimiento, ganando una gran rigidez. En el caso de someter la aleación en fase martensítica a un esfuerzo, se induce la fase austenítica. Si el esfuerzo aplicado desaparece la aleación retornará a su fase martensítica, siendo este fenómeno el conocido como superelasticidad.

3.2.1.1 *Transición Martensítica-Austenítica*

Originariamente el término martensita describía un duro microconstituyente encontrado en los aceros tras un proceso de templado, de forma que una fase cúbica centrada en las caras (fcc) denominada austenita, pasaba a una fase tetragonal centrada, llamada martensita, mediante una transformación de estado sólido llamada transformación martensítica. Posteriormente se generalizó el término para incluir a otras transformaciones de fase que poseen ciertas características típicas de la transformación de los aceros pero que tienen lugar en otro tipo de materiales, como SMA, aleaciones no férricas, metales puros, cerámicos, minerales, compuestos inorgánicos, etc.

Así, actualmente, se dice que una transformación en estado sólido es martensítica si es displaciva (sin difusión atómica), de primer orden y está acompañada por una deformación homogénea de la red que conduce a un cambio de estructura cristalina, provocada principalmente por una cizalladura cuya energía de deformación domina la cinética y morfología de la transformación.

La peculiaridad de ser una transformación no difusiva implica que, mediante pequeños desplazamientos coordinados de los átomos (en distancias inferiores a las interatómicas), se llega a la constitución de la nueva fase. Al no necesitar la difusión de átomos a larga distancia, no sólo se puede observar a temperaturas altas, sino que también puede tener lugar, de manera casi instantánea, a temperaturas como 100 K donde los movimientos difusivos de los átomos son insignificantes. Otra consecuencia del carácter displacivo es que dos átomos inicialmente vecinos siguen siéndolo después de que la transformación haya ocurrido. De esta manera la nueva fase mantiene la misma composición y orden atómico de la fase inicial.

La transformación se produce mediante un proceso de nucleación heterogénea, ya que ésta tiene lugar preferencialmente en bordes de grano y/o defectos, y un posterior crecimiento de la fase previamente nucleada. La fase de alta temperatura, o fase matriz, tiene una simetría mayor (generalmente cúbica) que la fase de baja temperatura, lo que provoca que varias orientaciones (variantes) de ésta última sean compatibles con una sola de la fase matriz. Además del cambio en la simetría del cristal, la transformación lleva asociados una deformación del material (cizalladura sobre el plano de hábito) y un cambio de volumen.

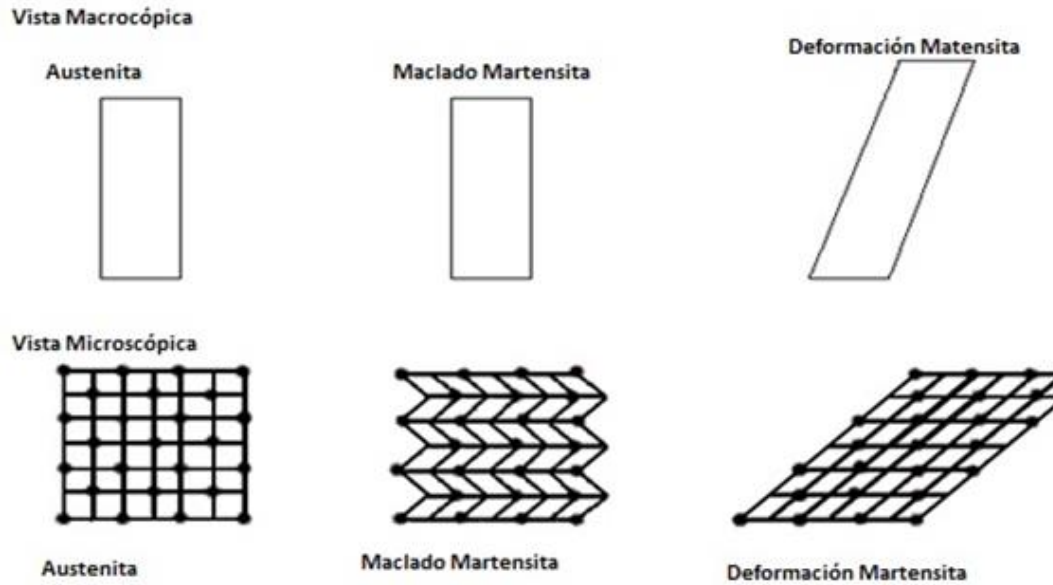


Figura 3.1. Cizalladura sobre el plano de hábito

Esto produce un almacenamiento de energía elástica en el entorno de la zona transformada, que finalmente será la que controle la transformación, requiriéndose un sobre-enfriamiento por debajo de la temperatura de equilibrio T_0 para producir y completar la transformación (figura 1).

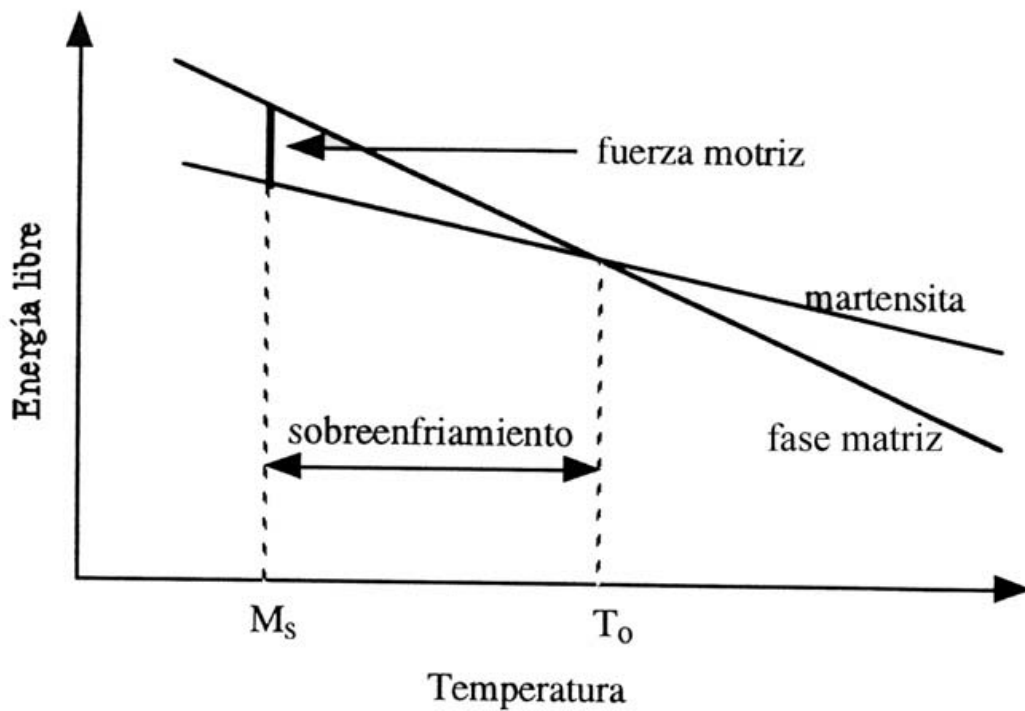


Figura 3.2. Gráfico explicativo de la presencia de un sobreenfriamiento respecto la temperatura de equilibrio en la transformación martensítica

Las transformaciones martensíticas tienen lugar en un intervalo finito de temperaturas durante el cual existe una coexistencia de las dos fases: austenita, o fase matriz, y martensita. La transformación directa, se induce al enfriar y la temperatura a la cual comienza el proceso se le conoce habitualmente como M_s (*martensite start*), mientras que M_f (*martensite finish*) es la temperatura a la cual finaliza. Si el material está totalmente en martensita ($T < M_f$), al calentarlo se produce la transformación inversa o retransformación, denominándose de manera análoga A_s (*austenite start*) a la temperatura a la cual empieza la formación de la austenita y A_f (*austenite finish*) a la que termina el proceso.

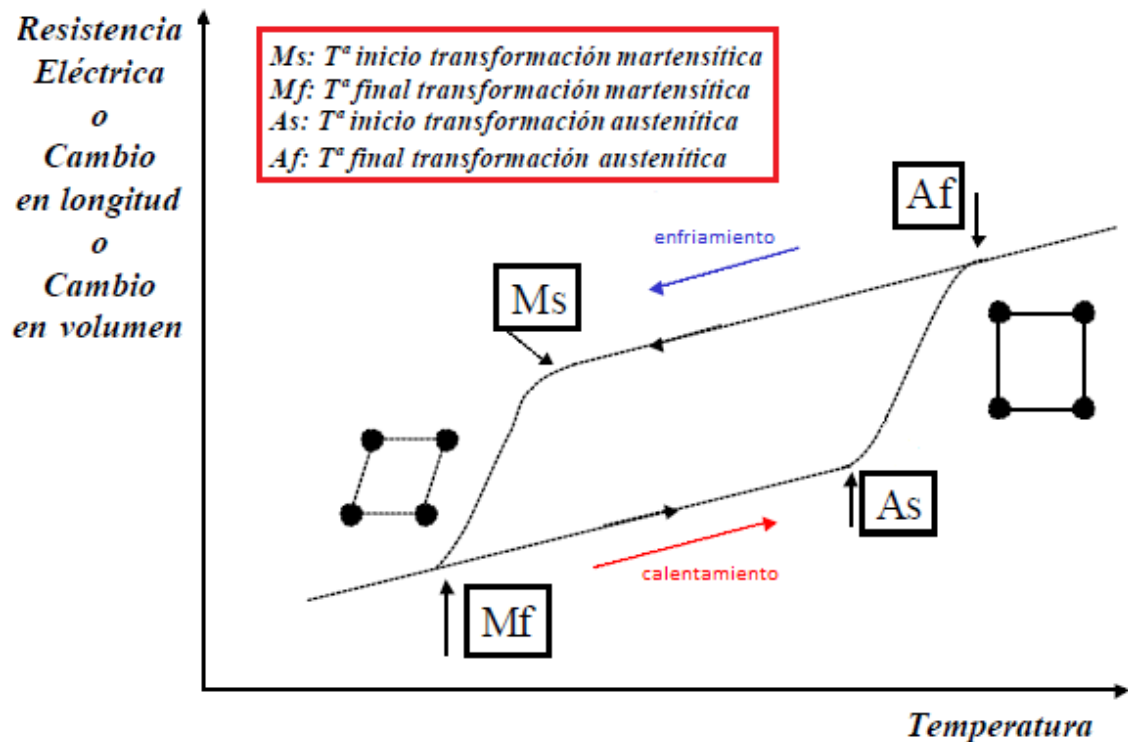


Figura 3.3. Histéresis transformación Martensítica-Austenítica

Siempre se cumple que $A_s > M_f$ y $A_f > M_s$, lo que dicho de otra manera significa que existe histéresis térmica. Las temperaturas de transformación, entre otros factores, dependen de la composición de la aleación, lo que hace necesario la producción de aleaciones con elevada precisión en la composición, si se quiere obtener una transformación controlada en temperatura.

3.2.2 Efectos de forma

3.2.2.1 Efecto de forma simple

El efecto memoria de forma simple es la capacidad que tiene el material para deformarse mediante un esfuerzo aplicado y recuperar posteriormente su forma original con la aplicación de calor sobre el material, el cual puede llevarse a cabo de diferentes formas.

Este proceso tiene la capacidad de generar fuerza o movimiento y es la base de los actuadores SMA. La recuperación de la forma y las altas fuerzas generadas como resultado de la transformación de la fase austenítica pueden ser usadas para realizar un trabajo o como actuador. Este efecto memoria lo podemos ver y explicar en la siguiente

figura, usando un modelo de estructura cristalina de 2 dimensiones y una curva que refleje la tensión, la deformación y la temperatura.

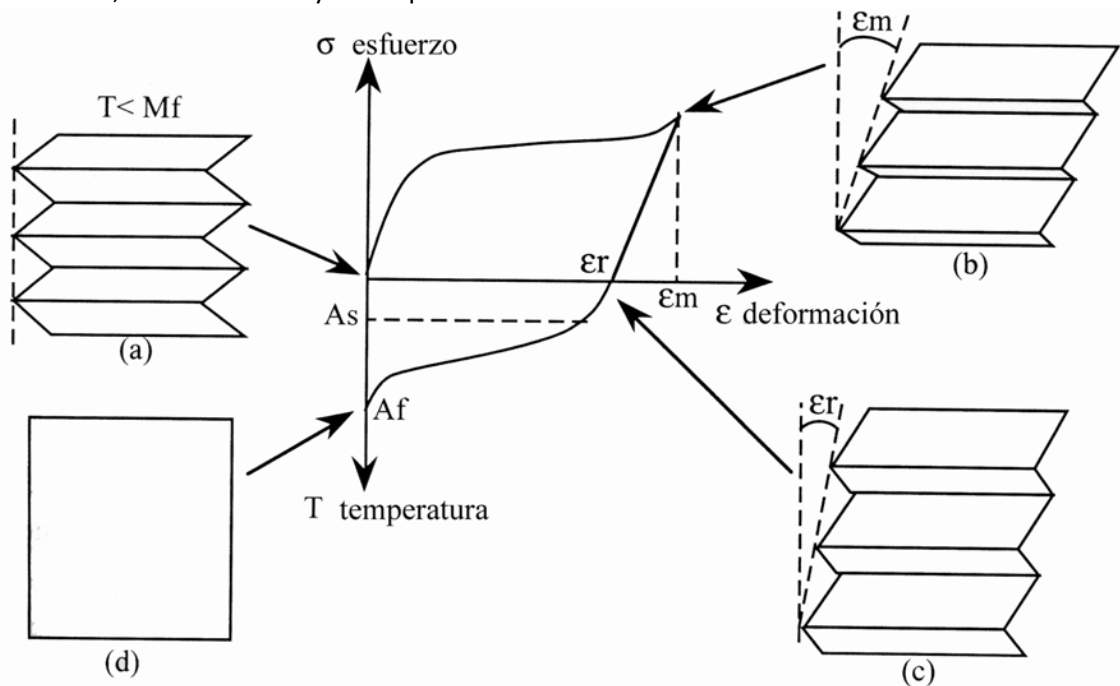


Figura 3.4. Efecto memoria simple

Viendo la figura, es posible observar que al partir de la fase inicial austenítica es posible disminuir la temperatura por debajo de M_f (transición d-a), sin existencia de tensiones externas, para producir una transformación martensítica completa sin deformación macroscópica. En este estado se obtiene un material altamente maleable y con un límite elástico muy bajo.

Continuando el estudio de la figura, es posible ver que al aplicar una tensión externa sobre el material, se consigue una deformación plástica (transición a-b). Eliminando la tensión externa aplicada al material, el material recalca sobre un estado totalmente martensítico en el cual se tiene una deformación pseudoplástica recuperable. Es importante tener en cuenta que, si la tensión externa aplicada sobre el material es demasiado elevada se podría provocar la fractura del material.

Por último, calentando el material hasta llegar a la temperatura A_s , se comienza con la formación de la fase austenítica y el material recupera su forma inicial (transición c-a), obteniéndose la recuperación de forma completa cuando se supera la temperatura A_f donde el material se encuentra por completo en la fase austenítica.

Este proceso es denominado de memoria de forma simple debido a que el material tan solo puede recuperar la forma en estado austenítico. Esto es, no existirá un cambio de forma enfriando el material por debajo de M_f . Además, existe la necesidad de deformar el material en el estado martensítico para reactivar el ciclo del efecto de forma.

3.2.2.2 Efecto de forma doble

Éste es un efecto que se consigue mediante un proceso de educación o entrenamiento en el que material no sólo recuerda la forma en el estado austenítico, sino también la que tenía en el martensítico, la cual comienza a adoptar por debajo de M_s hasta M_f . La deformación del material (o parte de ella) se consigue de manera

espontánea en el enfriamiento, y la recuperación de la forma inicial, al igual que en el caso del efecto de memoria simple, se realiza mediante el calentamiento.

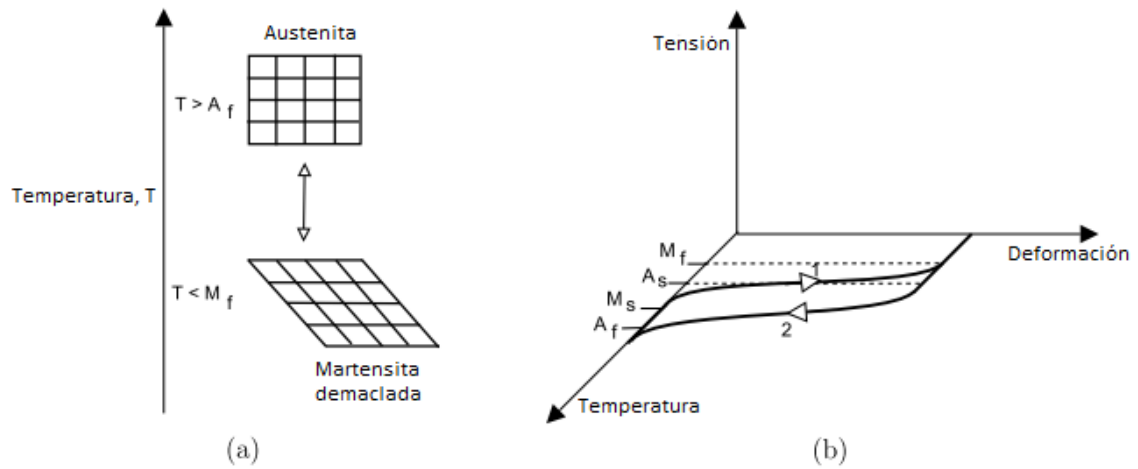


Figura 3.5. Efecto de memoria doble

Existen diversos procedimientos para conseguir la educación del material, los cuales se pueden dividir en procesos de educación con o sin difusión atómica.

3.2.2.3 Superelasticidad

Es posible inducir la transformación martensítica por esfuerzo cuando el material está en austenita, a una temperatura mayor que A_f . Aunque el mecanismo de la deformación es también la transformación martensítica termoelástica, habitualmente se consiguen deformaciones macroscópicamente apreciables mediante este proceso (que pueden llegar hasta un 10 % en monocristales), ya que las variantes de martensita inducidas preferencialmente son aquellas que deforman el material en la dirección más próxima a la del esfuerzo externo aplicado.

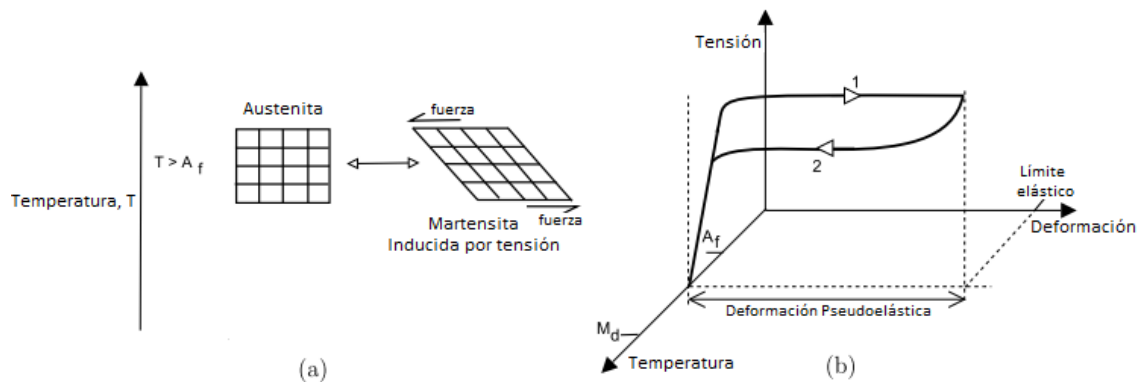


Figura 3.6. Super-elasticidad

Al aplicar este esfuerzo el material, inicialmente en austenita, se deforma elásticamente hasta llegar al valor $\sigma_{p \rightarrow m}$, a partir del cual se inicia la transformación. El esfuerzo realiza el aporte energético suficiente como para que la transformación tenga lugar a temperaturas por encima de la M_s de la transformación inducida por temperatura. Cuando se retira el esfuerzo externo tiene lugar la



transformación inversa, existiendo también histéresis (figura 2.b). Este efecto se define como superelasticidad. A pesar de que la transformación es inducida de manera mecánica, la temperatura juega un papel muy importante. Así por ejemplo, si la temperatura no es suficientemente alta (sólo ligeramente superior a M_s) puede darse el caso de que la martensita inducida por esfuerzo no retransforme. En algún caso particular esta deformación puede ser incrementada, una vez completamente formada la primera martensita, si se sigue aumentando el esfuerzo externo. En caso de producirse, se obtiene deformaciones aún mayores (hasta un 18 % para monocristales de Cu-Al-Ni [Ots98]), gracias a nuevas transformaciones martensita-martensita que, eventualmente, pueden tener lugar en el material y que, a su vez, son reversibles al relajar el esfuerzo aplicado.

3.3 Tipos de aleaciones

De las aleaciones con memoria de forma, sólo unas pocas han sido desarrolladas comercialmente, como las de Ni-Ti, Ni-Ti-X (donde X es un elemento ternario) y Cu-Zn-Al. En la actualidad, el 90% de las nuevas aplicaciones se basan en Ni-Ti, Ni-Ti-Cu o Ni-Ti-Nb. Otras aleaciones como CuAlNi o FeMnSi han comenzado a introducirse en el mercado. En la tabla 2.1 se muestra una comparación entre algunas de las principales aleaciones SMA:

Aleación	Composición	Temperaturas de trabajo	Ciclo de hstéresis
	%	°C	°C
AgCd	44-49 Cd	desde -190 hasta -50	15
AuCd	46,5-48 Cd, 49-50 Cd	desde 30 hasta 100	15
CuAlNi	28-29 Al, 3-4,5 Ni	desde -140 hasta 100	35
CuZn	38,5-41 Zn	desde -180 hasta -10	10
InTi	18-23 Ti	desde 60 hasta 100	4
NiAl	36-38 Al	desde -180 hasta 100	10
NiTi	49-51 Ni	desde -50 hasta 110	30
MnCd	5-35 Cd	desde -250 hasta 180	24

Tabla 3.1 – Aleaciones comerciales con memoria de forma

Al añadir nuevos elementos o variar la composición de estos, en las aleaciones, podemos conseguir nuevas propiedades que dependerán de nuestras necesidades. Propiedades que nos pueden interesar variar serían:

- **1. Mejorar el rango de temperatura que soportan las aleaciones. Por ejemplo, las aleaciones de Ni-Ti soportan unos 110°C, algunas aleaciones con Pt podrían soportar hasta 1000°C.**
- **2. Variar el ancho de histéresis. Por ejemplo, las aleaciones binarias Ni-Ti tienen un ancho de histéresis de entre 25°C y 40°C. Si se añade Niobio y un determinado tratamiento termomecánico, podemos conseguir ensanchar el ancho de histéresis hasta 150°C.**



A pesar de todas las investigaciones en busca de nuevas aleaciones con memoria de forma, las únicas aleaciones comerciales en la actualidad siguen siendo las Ni-Ti y las de base Cu. Las más usadas, las de Ni-Ti, presentan las siguientes ventajas e inconvenientes comparadas con las aleaciones de base Cu:

Ventajas	Mayor capacidad de memoria. Mientras que las aleaciones en base Cu presentan un 5%, las base Ni presentan un 8%
	Mayor resistividad eléctrica. Lo que permite una activación eléctrica mas sencilla.
	Mejor resistencia a la corrosión
	Mayor estabilidad térmica
	Mayor rango de temperaturas de transformación
Desventajas	Mayor precio
	Mayor dificultad de mecanizado
	Ciclo de hitéresis muy pronunciado, lo que dificulta su control.

Tabla 3.2 – Ventajas y desventajas aleaciones NiTi

3.4 Selección de materiales.

Tal y como ya se ha comentado, las aleaciones comerciales más extendidas son aquellas basadas en NiTi. Por tanto, es lógico y prudente trabajar con alguna aleación de este tipo para obtener unos resultados fiables.

Dentro de la multitud de opciones dentro de las aleaciones NiTi se ha seleccionado la marca comercial Flexinol® de la casa comercial Dinalloy Inc. Esta selección viene condicionada a seguir en la misma línea de investigación que ya iniciaron los compañeros investigadores de proyectos anteriores para la determinación de la idoneidad de las SMA como actuadores.

Será importante conocer las propiedades físicas de las aleaciones NiTi de Flexinol®. Las más importantes se recogen en la siguiente tabla:

Densidad		6,45	g/cm ³
Calor específico		0,2	cal/g*°C
Punto de fusión		1300	°C
Calor latente de transformación		5,78	cal/g
Conductividad térmica		0,18	W/cm*°C
Coeficiente de expansión térmica	Austenita	6,60E-06	1/°C
	Martensita	1,10E-05	1/°C
Coeficiente de Poisson		0,33	
Resistividad Eléctrica	Austenita	80	micro-Ohms*cm
	Martensita	80	micro-Ohms*cm

Tabla 3.3. Propiedades físicas Flexinol®

La carrera o movimiento de los cables actuadores Flexinol® es medido como un porcentaje de la longitud total del cable empleado y es determinado, en parte, por el



nivel de tensión utilizado para pretensar el cable. En la mayor parte de las aplicaciones, la fuerza de pretensión es ejercida de forma constante sobre el cable, y en cada ciclo cuando el cable se enfría, esta fuerza se emplea para recuperar la forma inicial del cable. Si no existe esta fuerza de pretensión del cable, cuando el cable se enfría se obtendrá una pequeña deformación remanente.

Existen diferentes topologías de montaje para la aplicación de la fuerza de pretensión sobre los cables y según cada topología es posible alcanzar una carrera o movimiento de contracción variable entre un 3% hasta un 110%. Las topologías más comunes son las de peso muerto y la fuerza de pretensión de resorte, en las cuales se puede alcanzar entre un 3% y un 5% de carrera.

La fuerza del cable es una función de la sección transversal del cable y puede ser medida en mega pascales (MPa).

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran las propiedades de los cables Flexinol® según su diámetro.

Diámetro	Resistencia	Fuerza de tiro	Fuerza de enfriamiento	Corriente necesaria para la contracción en 1s	Tiempo de enfriamiento	
					LT wire	HT wire
mm	Ohm/m	gramos		mA	segundos	
0,025	1425	8,9	3,6	45	0,18	0,15
0,05	500	36	14	85	0,4	0,3
0,1	126	143	57	200	1,1	0,9
0,15	55	321	128	410	2	1,7
0,2	29	570	228	660	3,2	2,7
0,25	18,5	891	356	1050	5,4	4,5
0,51	4,3	3560	1424	4000	16,8	14

Tabla 3.4 Propiedades del Flexinol® según diámetros

Cabe tener en cuenta que los cables empleados en la maqueta de experimentación de la cual partiremos para realizar nuestros primeros experimentos está montada con cables Flexinol® de 0,1mm de diámetro.

En capítulos posteriores, se documentará la selección de tamaño para la construcción del actuador para la pinza de mínima invasión argumentando las necesidades requeridas y las limitaciones impuestas por el diseño.





Capítulo 4.

Sensores de fuerza. Galgas extensiométricas



4 Sensores de fuerza. Galgas extensiométricas.

4.1 Introducción.

Todo sensor está formado por uno o varios transductores y un acondicionamiento eléctrico de señal necesario para lograr un valor final de señal que sea medible. A continuación se ofrecen los conceptos básicos de transductor y acondicionamiento eléctrico de señal necesarios para comprender el funcionamiento de cualquier sensor.

4.1.1 Transductor.

Son elementos físicos que relacionan una señal mecánica, ya sea velocidad, presión, posición, etc.; con una señal eléctrica, como puede ser tensión, intensidad o impedancia.



Figura 4.1. Diagrama de bloque de un transductor.

Todo transductor consta de una serie de características o parámetros que lo definen los cuales son fundamentales para conocer su funcionamiento. Se definen a continuación[10].

- *Rango: ofrece los valores límite que puede tomar la variable medible. Ofrecen un rango de entrada referido a la señal mecánica, y otro de salida referido a la señal eléctrica.*
- *Curva de calibración: se entiende como la ecuación que relaciona la señal mecánica de entrada con la señal eléctrica de salida. Esta es obtenida a partir de una calibración estática, esto es a frecuencia constante, para cada transductor particular.*
- *Sensibilidad: nos ofrece la relación existente entre la variación en la señal de entrada y la que se obtiene en la señal de salida. Se entiende como la pendiente de la curva de calibración.*
- *Resolución: se entiende como la mayor variación que puede suceder en la señal de entrada sin que la señal de salida sufra variación alguna.*
- *Umbral: se define como el valor mínimo a partir del cual el transductor puede generar una señal estable.*
- *Estabilidad: se entiende como la capacidad del transductor para mantener su curva de calibración constante a lo largo del tiempo.*



4.1.2 Acondicionamiento eléctrico.

En multitud de ocasiones, la señal eléctrica de salida del transductor es de una magnitud tan pequeña y ofrece variaciones tan pequeñas que no es posible realizar una lectura de la misma, o las lecturas realizadas pueden ser perturbadas debido a factores externos como pueden ser las señales de ruido. Debido a ello, es necesario formar un sistema que mejore la calidad de la señal eléctrica de salida del transductor.

Existen multitud de circuitos de acondicionamiento de señal, aunque la gran mayoría se basa en los principios de estabilidad y amplificación.

4.1.3 Tipos de sensores de fuerza.

Es posible encontrar dos clases de sensores de fuerza electrónicos a día de hoy: las galgas extensiométricas y los basados en materiales piezoeléctricos.

Los sensores basados en materiales piezoeléctricos basan su funcionamiento en el principio piezoeléctrico, esto es, al someter el material sensor a una tensión mecánica este genera una polarización eléctrica en su estructura cristalina lo que produce una diferencia de potencial en su superficie. Tienen la principal ventaja de generar una señal de salida lo suficientemente elevada como para poder ser leída de forma directa, aunque se caracterizan por tener una respuesta no lineal.

Las galgas extensiométricas basan su principio de funcionamiento en la variación de resistencia del material debido a una deformación causada por la tensión a la que es sometido. Este tipo de sensores necesita de una adaptación electrónica para poder obtener una señal de lectura aceptable, aunque tiene la gran ventaja de tener una respuesta altamente línea.

4.2 Sensores de fuerza basados en galgas extensiométricas.

4.2.1 Fundamentos físicos.

Antes de comenzar explicando los principios teóricos en los cuales se fundamenta el funcionamiento de este tipo de transductores, es imprescindible el conocimiento de los conceptos físicos básicos los cuales se definen en [11] como:

- *Resistividad: se entiende como la oposición que ejerce cualquier material al paso de la corriente eléctrica. Viene definida por la ecuación $\rho = R \cdot \frac{S}{l}$, donde $S[m^2]$ es la sección del material, $l[m]$ la longitud y R la resistencia $[\Omega]$*
- *Esfuerzo: se entiende como la relación entre la fuerza aplicada sobre un material y la superficie del mismo. Viene definido por la ecuación $\sigma = \frac{F}{A}$, donde $F [N]$ es la fuerza y $A[m^2]$ el área.*
- *Deformación: se entiende como la variación en longitud por unidad de longitud que sufre un cuerpo sometido a un esfuerzo. Viene definida por la ecuación $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$.*

- *Módulo de elasticidad o de Young: se entiende como la relación entre el esfuerzo sufrido por un material y el cambio correspondiente a la deformación unitaria acaecida. Viene definido por la ecuación $E = \sigma/\epsilon$.*
- *Módulo de Poisson: es la constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de la sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a las de estiramiento.*

Las galgas extensiométricas se basan en el efecto piezoresistivo, el cual fue descubierto por Lord Kelvin en 1856 [10]. Este efecto se define como la variación de la resistencia de un conductor o un semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico y gracias a él es posible la medición de fuerzas que provoquen pequeñas deformaciones.

Considerando una lámina conductora sometida a un esfuerzo de tracción, su longitud se incrementará y su sección transversal disminuirá, provocando un aumento del valor de resistencia. Además, en los metales se modificará su distancia interatómica y en los semiconductores variará la concentración de portadores de carga, modificándose así también la resistividad del material.

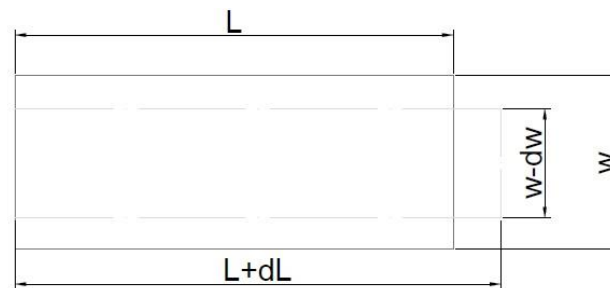


Figura 4.2. Lámina conductora sometida a tracción

Dado que el volumen, dentro de ciertos límites, permanece constante, el alargamiento en el sentido del esfuerzo se ve acompañado de una reducción de la sección transversal. La deformación transversal (w) está relacionada con la deformación longitudinal a través del factor de proporcionalidad del módulo de Poisson.

La variación de resistencia se expresa de modo que:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} \cdot d\rho + \frac{\partial R}{\partial L} \cdot dL + \frac{\partial R}{\partial A} \cdot dA = \frac{L}{A} \cdot d\rho + \frac{\rho}{A} \cdot dL - \frac{\rho \cdot A}{A^2} \cdot dA$$

Resultando la variación relativa:

$$dR = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A}$$

El cambio de longitud resultante de aplicar una fuerza F sobre una pieza unidimensional, siempre y cuando no sea superado su límite elástico, viene definido por la ley de Hook.



$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\partial L}{L}$$

Sabiendo que E se corresponde con el módulo de elasticidad del material, σ se corresponde con el esfuerzo uniaxial y ε con la deformación unitaria.

De esta forma, cuando el material se estira en la dirección axial, el área de la sección transversal disminuye cumpliendo las leyes de conservación de masa.

La relación entre la deformación axial y la deformación lateral viene dada por el módulo de Poisson como:

$$\frac{\partial \omega}{\omega} = \mu \cdot \frac{\partial L}{L}$$

El valor del coeficiente de Poisson varía entre 0 y 0'5, siendo un valor típico 0'3.

Si ahora suponemos que la sección del material al que se le ha aplicado el esfuerzo mecánico poseía de forma inicial una anchura " ω " y una longitud " L ". Se puede deducir:

$$A_0 = \omega \cdot L$$

$$A_1 = \omega(1 - \mu \cdot \varepsilon) \cdot L(1 - \mu \cdot \varepsilon) = \omega \cdot L(1 - 2\mu \cdot \varepsilon + \mu^2 \cdot \varepsilon^2)$$

Notando que: $\mu^2 \cdot \varepsilon^2 \ll$

$$A_1 = \omega \cdot L(1 - 2\mu \cdot \varepsilon)$$

Por lo que:

$$\Delta A = A_1 - A_0$$

Resulta:

$$\Delta A = -2\omega \cdot L \cdot \mu \cdot \varepsilon$$

Tomado la expresión de forma diferencial, esto es cuando el incremento de área tiende a cero, se obtiene una expresión diferencial. Si además tomamos la variación relativa del área transversal, se tiene:

$$\frac{dA}{A} = -2\mu \cdot \varepsilon$$

Retomando la expresión de la variación relativa de resistencia, tendremos:

$$dR = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} + 2\mu \cdot \varepsilon = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \cdot \frac{dL}{L}$$

Expresión que define la variación relativa de resistencia en función del esfuerzo axial. Podemos definir el primer sumando ($\frac{d\rho}{\rho}$) como el coeficiente piezorresistivo del material, el cual (generalmente)* es despreciable. Por tanto, se puede considerar que



la variación relativa de resistencia es únicamente dependiente de la deformación física del material.

*Nota: Solamente para determinados sustratos cristalinos, el coeficiente piezorresistivo es el término dominante.

4.3 Parámetros de una galga.

Aunque de forma ideal, las galgas debería ser puntuales para poder medir los esfuerzos en un punto concreto, tienen unas dimensiones para nada despreciables. A nivel práctico, se considerará que el punto de medida es el centro geométrico de la galga.

El principal parámetro a considerar a la hora de seleccionar una galga es su sensibilidad.

La sensibilidad de la galga se especifica mediante el denominado factor de galga (K), el cual viene definido como la relación entre la variación relativa de resistencia y la deformación.

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dL}{L}} = \frac{dR}{R \cdot \varepsilon}$$

Pudiendo obtener:

$$\frac{dR}{R} = K \cdot \varepsilon$$

Otros dos parámetros importantes son el ancho y la longitud de la galga, ya que estos deben ser adecuados a las dimensiones del material de soporte.

4.4 Tipos de Galgas extensiométricas.

Podemos clasificar los tipos de galgas extensiométricas existentes atendiendo a varios factores como pueden ser el material empleado para su construcción, el material empleado como soporte o según su arquitectura.

Así, atendiendo al material empleado para su construcción podemos encontrar galgas metálicas o semiconductoras. A día de hoy las más extendidas son las de base metálica ya que ofrecen ciertas ventajas como son:

- *La deposición del metal sobre soportes flexibles es muy sencilla, lo que proporciona láminas flexibles de fácil manejo y bajo coste.*
- *Son menos sensibles a la temperatura que las semiconductoras.*
- *El coste es entre 10 y 20 veces menor que el de las semiconductoras.*

Si atendemos al material empleado como soporte, podemos diferenciar entre galgas con soporte de poliamida, de resina epoxy o de fibra de vidrio. En la siguiente

tabla se puede comprobar las características y aplicaciones más destacadas para cada material de soporte.

Materiales para el soporte		
Material	Características	Aplicaciones
Poliamida	Es el soporte estándar No soporta condiciones extremas de trabajo. Espesor habitual de 25 μm	Medidas estáticas Aplicaciones no críticas.
Resina Epoxy	Minimiza el error introducido por el soporte Instalación delicada Requiere mano de obra especializada	Medidas precisas
Fibra de vidrio reforzada con epoxy	Soporta temperaturas moderadas Soporta muy bien el trabajo a fatiga	Medidas cíclicas y de fatiga

Tabla 4.1. Materiales de soporte para galgas extensiométricas

Por último, se clasifican las galgas por la arquitectura de fabricación. De esta forma, se pueden encontrar galgas uniaxiales o multiaxiales, dividiéndose la arquitectura multiaxial en rosetas de 2 elementos, rosetas de 3 elementos y tangenciales. En la siguiente tabla se puede ver los usos típicos según la arquitectura empleada.

Uniaxiales	Miden deformación axial Casi insensibles a las deformaciones transversales
Rosetas de dos elementos	Miden de forma simultánea en dos direcciones
Rosetas de tres elementos	Pueden determinar la dirección y magnitud de las tensiones que resulta de cargas complejas
Tangenciales	Se emplean cuando no hay direcciones principales en los esfuerzos sufridos

Tabla 4.2. Tipo de galgas según la dirección del esfuerzo

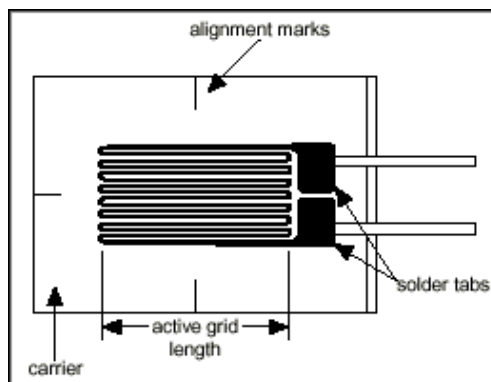


Figura 4.3. Galga extensiométrica uniaxial. Cortesía de National Instruments



4.5 Selección de tipo de galgas.

Una vez estudiados todos los factores determinantes en el comportamiento de las galgas extensiométrica, ya se está en disposición de la selección del transductor para la posterior construcción del sensor de fuerza.

Atendiendo a las necesidades existentes en nuestro caso particular, definiremos los parámetros influyentes en el proceso de selección para encontrar de esta forma el transductor que más se adecue a las exigencias expuestas.

- *Tipo de esfuerzo: uniaxial.*
- *Rango de temperatura a soportar: 35 ~ 40 grados Celsius.*
- *Tipo de medida: medidas dinámicas.*
- *Precisión: medidas de alta precisión.*
- *Tamaño de material de soporte: 4-12 mm*

4.6 Construcción del sensor.

Como ya se ha mencionado, el sensor de fuerza estará compuesto por dos partes bien diferenciadas como son el transductor de fuerza (galga extensiométrica) y el circuito acondicionador de señal.

En los siguientes apartados serán definidos todos los elementos necesarios para la construcción completa de un sensor de fuerza, partiendo de la topología de montaje del transductor hasta la eliminación de errores por señales de ruido o señales de offset.

4.6.1 Circuitos de acondicionamiento de señal.

Ya se ha explicado que dentro de los circuitos de acondicionamiento existen dos partes bien diferenciadas como son la parte de estabilización o captura de señal y la parte de amplificación.

4.6.1.1 Captura de la señal de salida del transductor. Puente de Wheatstone.

La captura de la señal eléctrica de salida de un transductor se puede hacer por medio de dos topologías de medida, por deflexión o por comparación. Para el caso de los transductores de fuerza formados por galgas extensiométricas, la topología empleada es la medición por comparación.

La medida por comparación emplea la topología denominada Puente de Wheatstone, la cual permite la lectura de pequeñas variaciones de resistencia [12]. Esta topología se conforma por dos divisores de tensión, donde como mínimo, en uno de los divisores está insertado un transductor de fuerza. A esta topología con un transductor incrustado en el puente se la denomina "Cuarto de Puente".

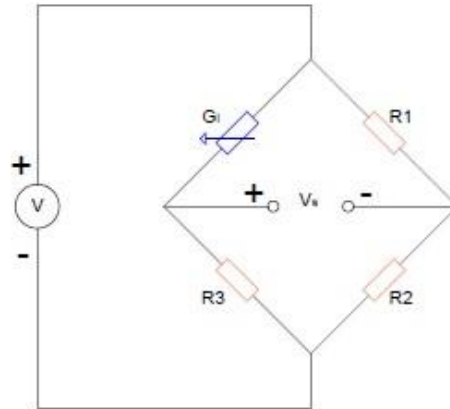


Figura 4.4. Puente de Wheatstone con un transductor.

En ocasiones, con la finalidad de incrementar la sensibilidad del sensor, se pueden añadir más transductores en las ramas del Puente de Wheatstone formando las topologías de “Medio Puente” o “Puente completo” según incrusten dos transductores o cuatro respectivamente.

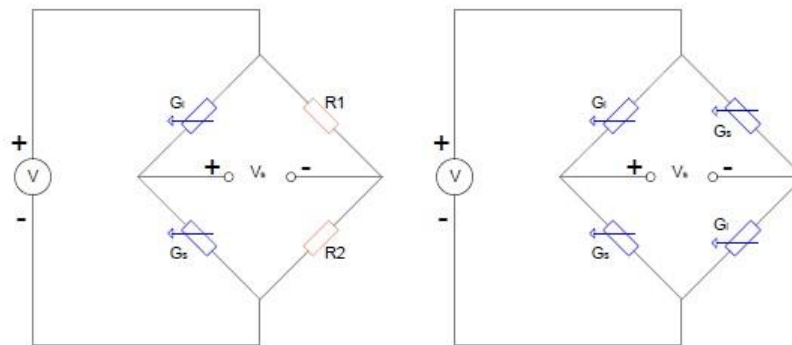


Figura 4.5. Topologías de Medio Puente (izquierda) y Puente Completo (derecha)

De vital importancia es la situación de los transductores dentro de las ramas del puente, ya que ha de situarse consecuentemente con el tipo de esfuerzo sufrido por la galga extensiométrica. En este orden, tomando como ejemplo el circuito de acondicionamiento de la imagen 3.X., la galga situada en esa posición dentro de la topología del “Puente de Wheatstone” debe estar sometida a un esfuerzo de compresión. Del mismo modo, para el circuito correspondiente a la topología de medio puente, la galga “G1” de soportar esfuerzos de compresión, mientras que la galga “G2” debe soportar esfuerzos de tracción.

4.6.1.2 Amplificación de señal.

La magnitud de la señal de salida del “Puente de Wheatstone” es tan pequeña que para poder trabajar con ella se hace necesaria una amplificación previa a la salida del sensor.

La amplificación deberá ser necesariamente realizada a través de un amplificador operacional de instrumentación para evitar la problemática intrínseca de la medida

a la salida del “Puente de Wheatston” en modo diferencial, como son la disminución del CMRR y la disminución de la ganancia en modo diferencial.

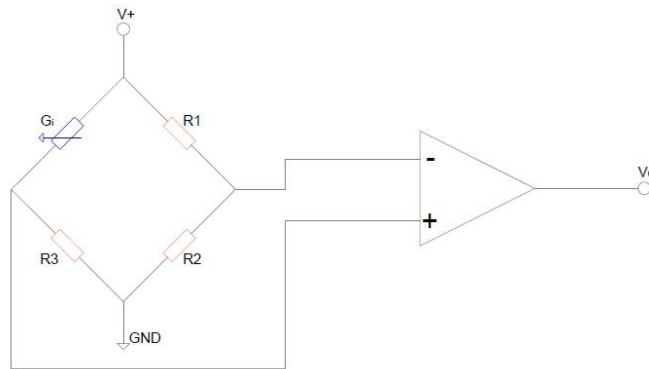


Figura 4.6. Esquema electrónico para la amplificación de señal

El circuito de amplificación variará según el amplificador operacional de instrumentación elegido en cada caso. De la misma forma, la ganancia necesaria para el correcto funcionamiento del sensor de fuerza variará según el rango de trabajo en el que se sitúe el sensor.

4.6.2 Corrección de la señal de offset del sensor.

Cuando se construye un sensor de fuerza a partir de galgas extensiométricas es muy complejo lograr que su salida resulte cero voltios en situaciones de reposo. Esto es debido a que a diferencia del caso ideal, en la realidad tanto las resistencias como las galgas extensiométricas constan de pequeñas tolerancias en sus valores nominales de resistencia.

La señal que se obtiene a la salida del sensor en las situaciones de reposo se denomina señal de offset. Esta señal puede ser eliminada o compensada a través del hardware o a través del software (en caso de existir).

4.6.2.1 Compensación Software.

Este método se basa en tomar el valor de la señal de offset antes de ser aplicada la carga, empleando el valor medido en las ecuaciones de calibración para compensar la señal incorrecta. Es importante notar que realmente la señal de offset no es eliminada mediante este método, por lo que si el offset es muy grande puede llevar a limitar la ganancia del amplificador operacional lo que conlleva a la limitación del rango dinámico de medición.

4.6.2.2 Compensación Hardware.

Este método si elimina la señal de offset de forma que se puede obtener un valor real de cero voltios a la salida del sensor en las situaciones de reposo. La compensación por hardware emplea un potenciómetro para controlar el nivel de tensión a la salida del “Puente de Wheatstone” de forma que se puedan obtener cero voltios.

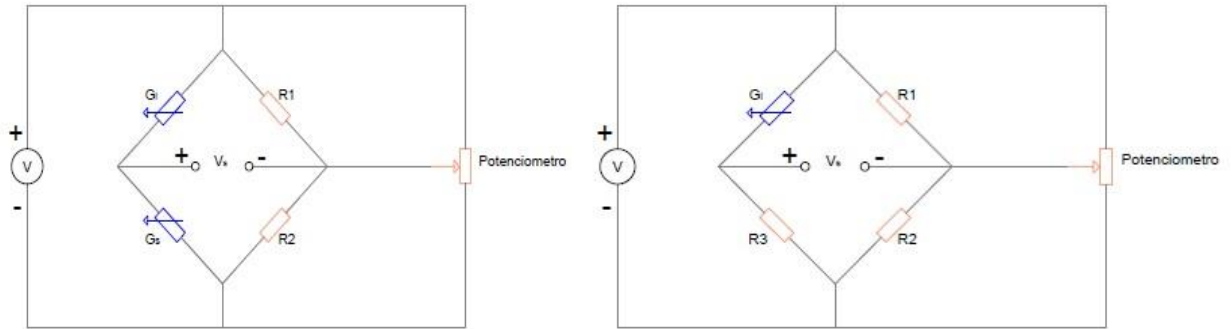


Figura 4.7. Esquema para la compensación de Offset Hardware. Medio Puente y Cuarto de puente.

4.7 Construcción del experimento de calibración.

Para la calibración de los sensores de fuerza será necesario la aplicación de una serie de fuerzas sobre unas condiciones estables que aseguren la repetitividad del experimento. Las fuerzas serán aplicadas por un conjunto de pesas de precisión de 50, 100, 200, y 1000 gramos.

Para poder asegurar la repetitividad del experimento se emplearán las pesas como cargas verticales, aprovechando la aceleración gravitacional y colgando masas de precisión en el punto de medida.

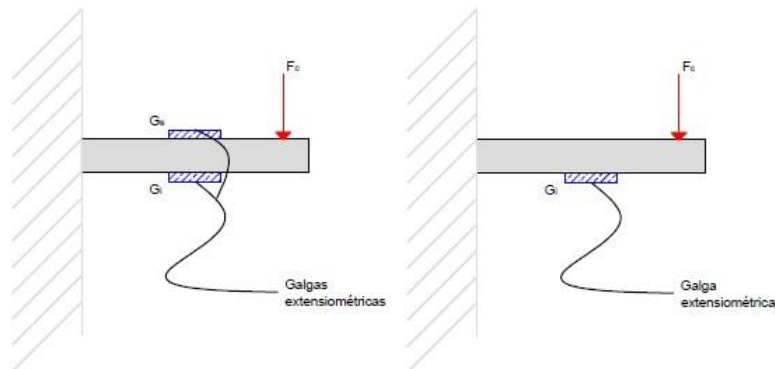


Figura 4.8. Experimentos de calibración.

De esta forma podremos obtener la recta de carga propia de cada sensor, lo cual nos permitirá obtener su ecuación de calibración.



Capítulo 5.

Diseño mecánico de la piza CMI



5 Diseño mecánico de la pinza CMI

5.1 Introducción.

Las pinzas de mínima invasión son herramientas quirúrgicas de delicada importancia, ya que se convierten en una extremidad más del cirujano a la hora de llevar a cabo una operación. Debido a esto, son herramientas que cuentan con unas restricciones de precisión, fuerza, seguridad, ergonomía, geometría y tamaño que en ningún caso será posible descuidar.

Para realizar nuestro diseño se ha tomado como base el diseño mecánico de una pinza laparoscópica de mano ya existente, modificando los aspectos necesarios para incluir los actuadores SMA diseñados.



Figura 5.1. Tipos de pinzas CMI

Este tipo de pinzas están basadas en un accionamiento mecánico por el cual, a través del accionamiento del gatillo de la pinza, es ejercida una acción de tiro sobre el cable alojado en el canal o conducto que une el mango con las mandíbulas. De esta forma se convierte el movimiento angular del gatillo en un movimiento lineal. Dicho movimiento lineal ha de ser transformado nuevamente para lograr el movimiento final de obturación de las mandíbulas

Para realizar esta conversión de movimiento, el extremo del cable que se halla alojado en el lado de las mandíbulas se une a estas dos mediante un pequeño perno que se aloja en dos cavidades, una por mandíbula, orientadas en sentido oblicuo al movimiento del propio cable. De esta forma, al encontrarse las dos garras unidas a través de un eje de pivote, se convierte el movimiento lineal del cable en un nuevo movimiento angular que se corresponde con la acción de mordida.

5.2 Cálculos matemáticos para el modelo mecánico de las mandíbulas.

A efectos de estudio se puede despreciar una de las mandíbulas y basar los cálculos trigonométricos sobre una sola mitad de la pinza, teniendo en cuenta que el ángulo de apertura final y la fuerza ejercida resultará el doble. A continuación podemos ver un esquema ilustrativo donde se representan las magnitudes relevantes en cuestiones de comportamiento dinámico.

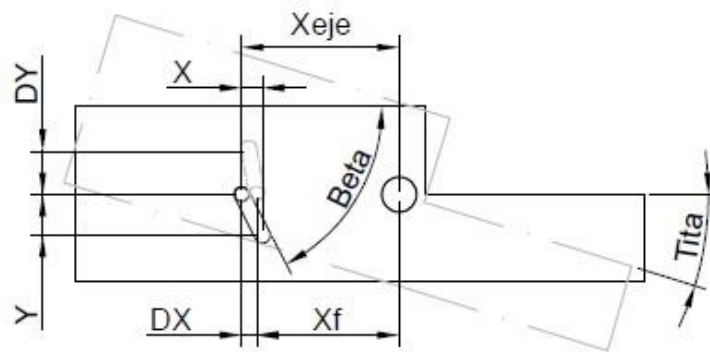


Figura 5.2. Esquema simplificado de la mecánica de las mandíbulas

La primera magnitud que debemos determinar será el ángulo de apertura máximo deseado (θ_{\max}). Para ello, deberemos tener en cuenta que, para asegurar una buena relación de movimiento, se ha de cumplir:

$$\varphi = \theta + \beta < 90^\circ$$

Además, para obtener una buena relación de movimiento también se ha de cumplir

$$\beta > 45^\circ$$

ya que para ángulos menores existirá una gran pérdida en la fuerza ejercida por el perno del tirador.

Por tanto, podemos fijar un ángulo de apertura máximo para una hoja igual a 30° , lo que supone un rango total de apertura para la pinza de hasta 60° .

Una vez seleccionado θ_{\max} , podemos determinar el rango para β . Puesto que:

$$\varphi = \theta + \beta < 90^\circ$$

$$\beta < 90^\circ - (\varphi + \theta) = 60^\circ$$

$$45^\circ < \beta < 60^\circ$$

Partiendo de este rango de β , podemos determinar las dimensiones del hueco oblicuo, ya que se cumple la relación:

$$\tan(\beta) = \frac{Y}{X}$$

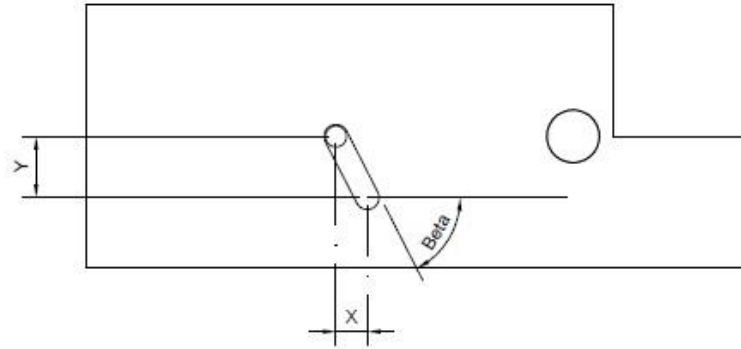


Figura 5.3. Detalle hueco oblicuo.

Por último, determinaremos el parámetro X_{eje} , que se refiere a la distancia entre la articulación de la pinza y el origen del hueco oblicuo.

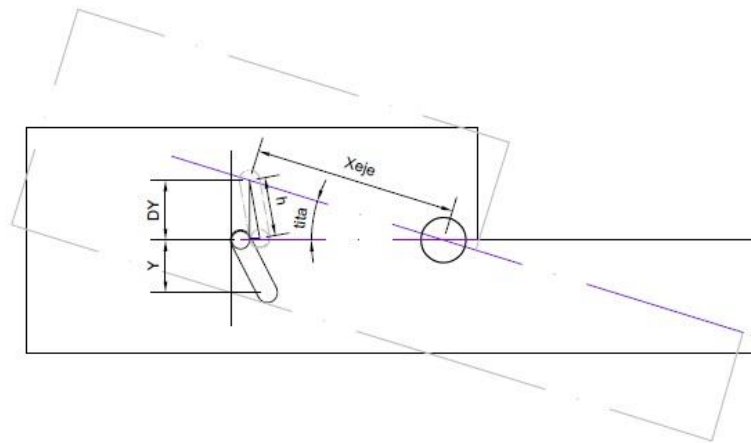


Figura 5.4. Detalle de movimiento de la pinza

Tomando las siguientes relaciones trigonométricas:

$$\Delta Y = h \cdot \text{sen}(\beta + \theta) \quad (1)$$

$$h = \frac{Y}{\text{sen}(\beta)} \quad (2)$$

Siendo X_{eje} correspondiente con:

$$X_{eje} = \frac{\Delta Y}{\text{sen}(\theta)} \quad (3)$$

Sustituyendo (1) en (2) y posteriormente en (3):

$$X_{eje} = Y \cdot \frac{\text{sen}(\beta + \theta)}{\text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\theta)} \quad (4)$$

Tras aplicar relaciones trigonométricas podemos escribir:

$$X_{eje} = Y \cdot \left(\frac{1}{\tan(\beta)} + \frac{1}{\tan(\theta)} \right) \quad (5)$$

Tras estos cálculos queda reflejado el comportamiento cinemático de la pinza, pero no el comportamiento dinámico. Para determinar su comportamiento dinámico tendremos que realizar un estudio de la transmisión de fuerzas dentro de la pinza. Este estudio comienza determinando la relación de palanca existente, tal que:

$$F_{grip} = \tan(\beta + \theta) \cdot F_{SMA} \cdot \frac{X_f}{X_{grip}}$$

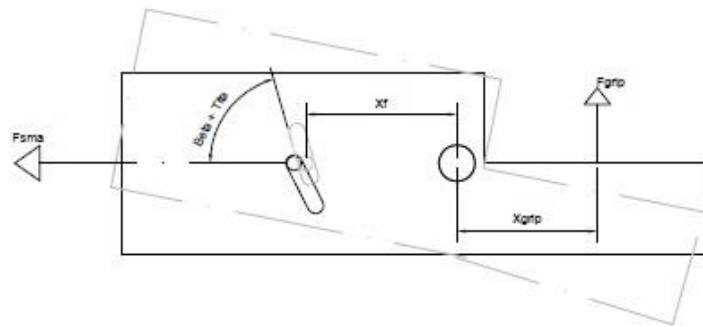


Figura 5.5. Esquema de distribución de fuerzas.

Donde deberemos determinar el valor de X_f en función del ángulo de cierre de la pinza. Para ello definiremos:

$$\Delta Y = X_{eje} \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$X_{eje} = Y \cdot \left(\frac{1}{\tan(\beta)} + \frac{1}{\tan(\theta)} \right)$$

$$\Delta X = \frac{\Delta Y}{\tan\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)}$$

Sabiendo que X_f corresponde con:

$$X_f = X_{eje} - \Delta X$$

$$X_f = Y \cdot \left(\frac{1}{\tan(\beta)} + \frac{1}{\tan(\theta)} \right) - \frac{\Delta Y}{\tan\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)}$$

$$X_f = X_{eje} - \frac{X_{eje} \cdot \text{sen}(\theta)}{\tan\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)}$$

$$X_f = X_{eje} \cdot \left(1 - \frac{\text{sen}(\theta)}{\tan\left(\beta + \frac{\theta}{2}\right)} \right)$$



Capítulo 6.

Iniciación al control de actuadores basados en SMA



6 Iniciación al control de actuadores basados en SMA

6.1 Introducción

Tal y como ya se ha explicado, este proyecto sigue la línea de investigación acerca del empleo de SMA como actuadores, iniciada por Ginés Moreno. Tal es así, que se ha empleado la maqueta de experimentación que él desarrolló en el transcurso de su Proyecto Fin de Carrera como punto de partida para el estudio del comportamiento de los cables basados en aleaciones de memoria de forma, así como para una primera aproximación al control por realimentación de fuerza.

La maqueta de experimentación consta de dos secciones diferenciadas en las se implementan actuadores de movimiento angular y actuadores de movimiento lineal. Cada sección se encuentra habilitada para poder ejercer control de posición de los actuadores. Además también dispone de sensorización para el control por realimentación de temperatura y corriente, así como un sensor de voltaje para la lectura del estado de la batería.

Como experimentos de iniciación para el entendimiento del comportamiento y accionamiento de los cables basados en SMA, se realizarán una serie de experimentos de activación y control de los actuadores de la maqueta de experimentación, comparando los resultados obtenidos con los que se reflejan en el estudio realizado por Ginés Moreno en su “PFC”. De esta forma se asegurará una buena preparación para los posteriores experimentos de activación y control mediante realimentación de fuerza.

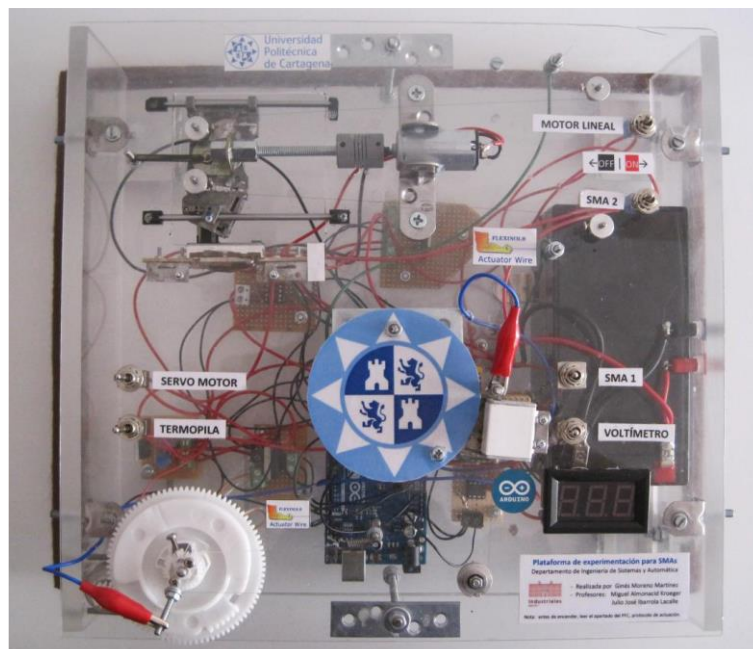


Figura 6.1. Vista superior de la maqueta de experimentación

6.2 Activación de los actuadores de movimiento angular

A continuación se realizarán una serie de experimentos en los cuales se introducirá una entrada escalón para los actuadores de movimiento angular, primero para el servo-motor y posteriormente para el sistema SMA. Los resultados obtenidos serán comparados con los que se obtuvieron en el “PFC” de Ginés Moreno para confirmar la correcta realización de los experimentos.

Los experimentos fueron realizados en sobre los actuadores servo-motor y SMA1, los cuales hace girar un juego de engranajes como parte del sistema para su posterior lectura de posición angular.

6.2.1 Entrada escalón para el servo-motor

Tratando de cumplir las mismas condiciones de experimentación, es aplicado un escalón de 3,92 V durante 0,3 segundos. Este experimento es realizado en dos ocasiones para comprobar la repetitividad del sistema. Los resultados obtenidos fueron:

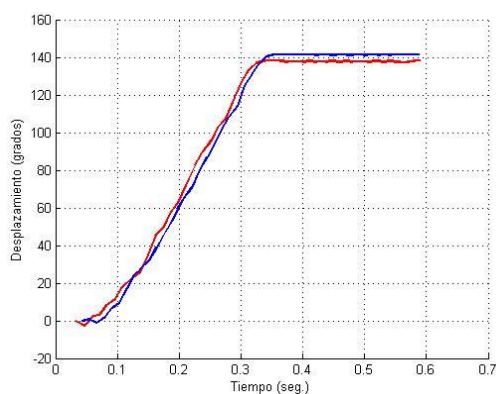


Figura 6.2. Respuesta a entrada escalón servo-motor obtenida

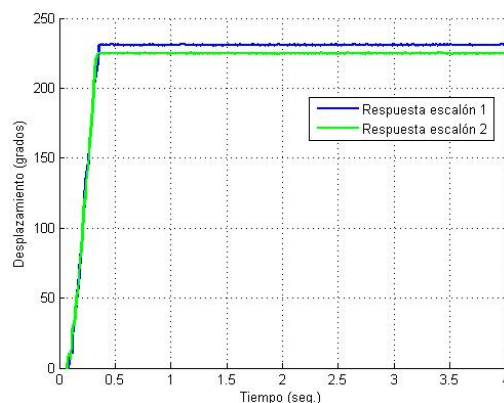


Figura 6.3. Respuesta entrada escalón servo-motor supuesta

Tras comprobar que los resultados obtenidos no concordaban con los esperados, se eliminó el muelle de pretensión para el SMA del sistema y se volvieron a realizar los experimentos, obteniendo el valor deseado de 230º aproximadamente.

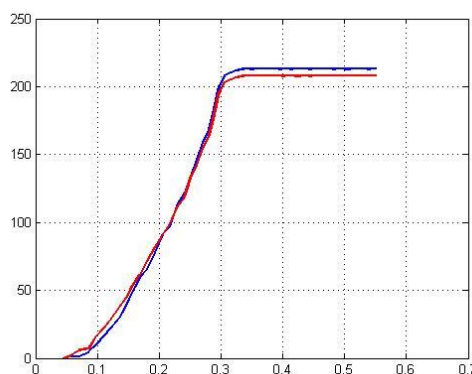


Figura 6.4. Respuesta entrada escalón servo-motor obtenida

6.2.2 Entrada escalón para el actuador SMA 1.

De la misma forma, trataremos de cumplir las condiciones del experimento para lograr los resultados obtenidos por Ginés en su “PFC”. En este caso, aplicaremos una entrada en escalón de 6,5V para la activación del actuador SMA1. Se han realizado diversos experimentos para comprobar la repetitividad del sistema y los resultados obtenidos fueron:

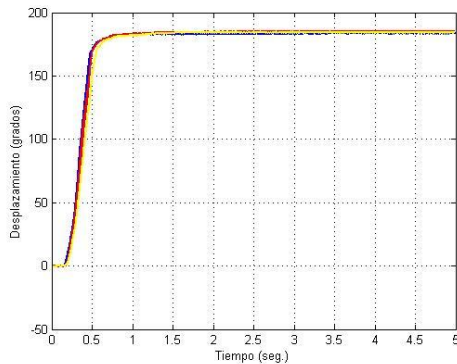


Figura 6.5. Respuesta escalón SMA1 obtenida

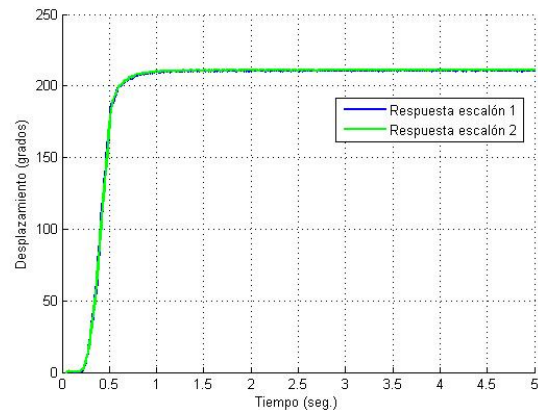


Figura 6.6. Respuesta escalón SM1 deseada

Es inmediato comprobar que no se corresponden con los resultados esperados. Tras una inspección del sistema, nos percatamos de que el resorte pretensor no recupera la posición inicial del engranaje, dejando un pequeño offset de posición. Recuperando la posición inicial de forma manual se puede observar que si se obtienen los resultados esperados.

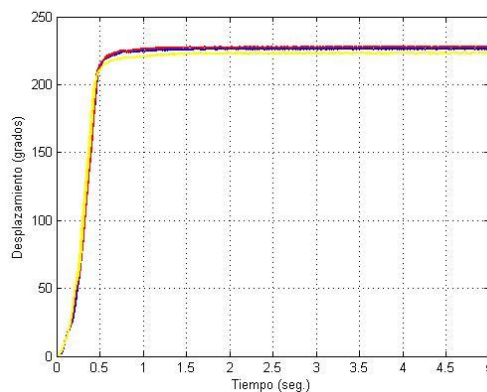


Figura 6.7. Respuesta escalón SMA1 obtenida

6.3 Activación de los actuadores de movimiento lineal

Al igual que hemos hecho con los actuadores angulares, ahora procederemos a los experimentos con los actuadores lineales motor DC2 y SMA2. El motor DC2 convertirá su movimiento angular en movimiento lineal a través de un husillo, mientras que el SMA2 hará esta transformación a través de una serie de poleas dispuestas de forma estratégica.

6.3.1 Entrada escalón para el motor DC2

Tratando de cumplir las mismas condiciones de experimentación, es aplicado un escalón de 1,32 V durante 1 segundos. Este experimento es realizado en dos ocasiones para comprobar la repetitividad del sistema. Los resultados obtenidos fueron:

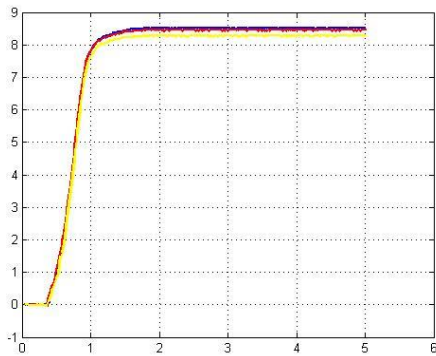


Figura 6.8. Respuesta a escalón obtenida

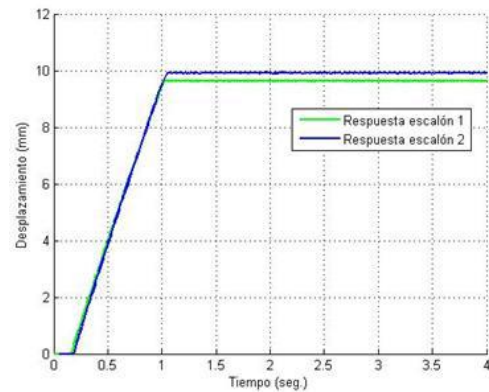


Figura 6.9. Respuesta a escalón esperada

Es posible comprobar cómo se obtienen los resultados cercanos a los esperados, teniendo en cuenta que el resorte pretensor para el sistema SMA2 ha sido desacoplado del carro.

6.3.2 Entrada escalón para el SMA2

De la misma forma, tras volver a acoplar el resorte pretensor del sistema SMA2, aplicamos una entrada escalón de 5 voltios durante 5 segundos obteniendo el siguiente resultado.

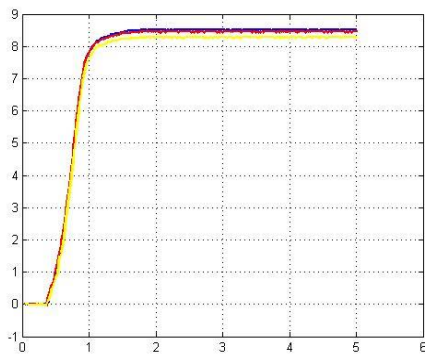


Figura 6.10. Respuesta a escalón obtenida

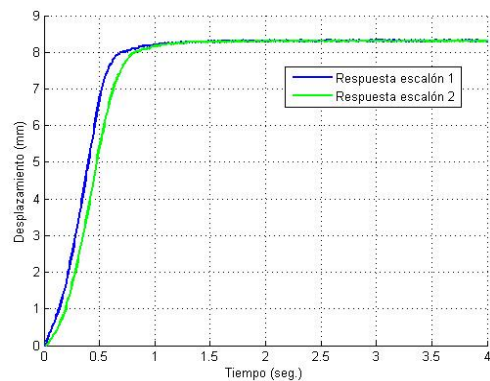


Figura 6.11. Respuesta a escalón esperada

Se vuelve a observar que logramos un valor de posición aproximado al esperado, apareciendo un pequeño offset que volvemos a adjudicar al resorte pretensor el cual no realiza perfectamente su trabajo.

6.4 Control de posición de los actuadores de movimiento angular

Una vez dominado el funcionamiento básico de la maqueta, ya podemos proceder a trabajar con el control de los actuadores. Comenzaremos por el control de posición angular del sistema SMA1.

Para realizar el control de posición se ha escrito el código de programación software para MatLab que se muestra en el Anexo I. A través de la ejecución de este código se han obtenido, tras buscar los ajustes PID óptimos, los siguientes resultados.

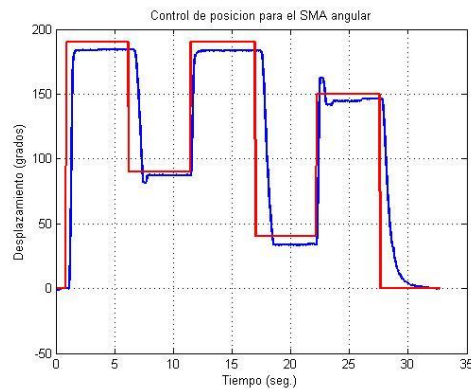


Figura 6.11. Control PID sistema SMA1

Puede observarse como se obtiene una respuesta próxima a la real, aunque no perfectamente igual. Al no ser objetivo del presente proyecto el control de posición, no se ha querido ahondar en la sintonía del controlador PID dando por suficiente el aprendizaje realizado para obtener un control medio como el obtenido.

6.5 Control de posición los actuadores de movimiento lineal

De la misma forma que para el actuador de movimiento angular formado por el sistema SMA1, se tratará de ejercer control de posición lineal mediante el sistema SMA2. Para ello se ha variado el código de programación de MatLab empleado en el sistema SMA1 tal y como se indica en el Anexo I. Tras ejecutar el código se obtuvieron los siguientes resultados.

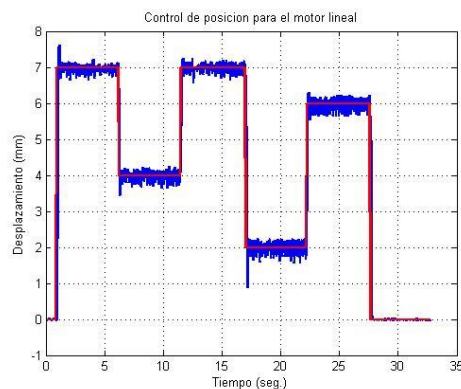


Figura 6.12. Control PID sistema SMA2





Capítulo 7.

Experimento inicial para el control con realimentación de fuerza de actuadores SMA





7 Experimentos iniciales para el control con realimentación de fuerza de actuadores SMA

7.1 Introducción

Tras los estudios previos realizados en el capítulo anterior, ya nos encontramos en disposición del conocimiento suficiente para comenzar a trabajar con actuadores basados en SMA. Sin embargo, los experimentos realizados hasta ahora han sido mediante la realimentación de posición lo cual se supone una gran diferencia con respecto a la realimentación de fuerza que deseamos implementar.

Para tener una primera toma de contacto en el control con realimentación de fuerza se ha diseñado un experimento que se ha considerado análogo a la pinza de mínima invasión. Este experimento tiene la ventaja principal de poder emplear la maqueta de pruebas ya diseñada como base, evitando así implementar un nuevo sistema SMA para las primeras pruebas. Con esto se pretende ahorrar tiempo en diseños de adaptaciones electrónicas, soportes, sistemas mecánicos, etc.

Este nuevo sistema será denominado pseudo-pinza debido a que se tratará de imitar el comportamiento mecánico de una pinza.

7.2 Fabricación de la pseudo-pinza

Tras diversos estudios tratando de obtener la solución más adecuada para crear el experimento de la pseudo-pinza, se llega a la conclusión de emplear como base del experimento el sistema SMA1. Este está formado por el cable SMA, dos engranajes, un potenciómetro y un resorte pretensor para el SMA.

La idea radica en emplear uno de los engranajes como apoyo para una de las mandíbulas de la pinza, de tal forma que con su giro (el del engranaje) se mueva angularmente dicha pieza, cerrándose sobre otra pieza exterior fija.

De esta forma podremos simular el comportamiento de una pinza de una forma aproximada y casi inmediata.

Sobre la pieza móvil, que se apoya en el engranaje, situaremos un sensor de fuerza necesario para medir la fuerza de obturación y así poder ejercer el control con realimentación de fuerza objeto del estudio. Dicha pieza ha sido diseñada mediante modelado en 3 dimensiones de forma específica para encajar a la perfección en el engranaje y lograr un acople firme e inmediato entre ambas piezas. La unión entre el lado móvil de la mandíbula y el engranaje se ha realizado mediante un tornillo para lograr una fijación firme.

La fabricación se realizará mediante una máquina de prototipado rápido, esto es una impresora 3D. De esta forma, este experimento inicial también servirá como iniciación al uso de las nuevas tecnologías de fabricación mediante impresión 3D.

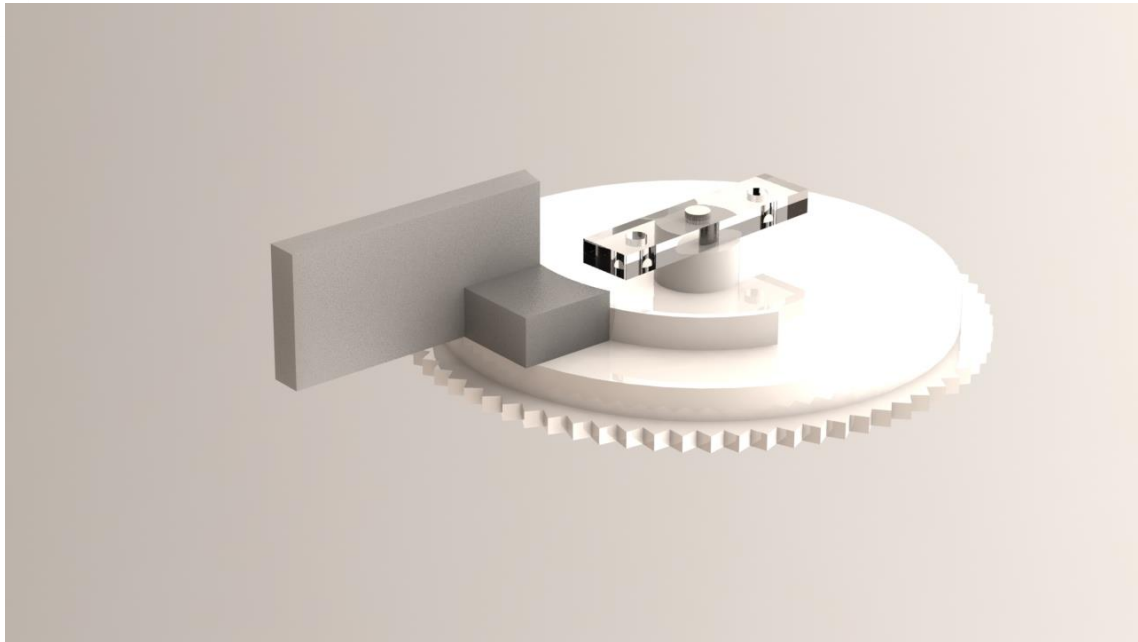


Figura 7.1. Modelo 3D de la Pseudo-pinza

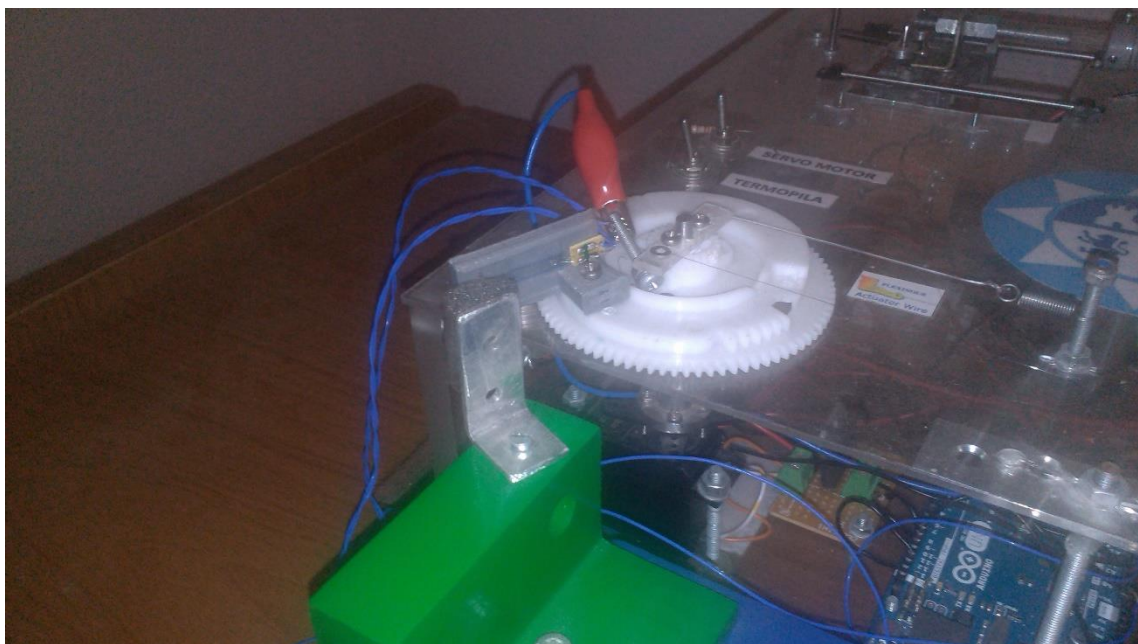


Figura 7.2. Sistema implementado

La parte fija de la pseudo-pinza ha sido creada mediante el aprovechamiento de material disponible en el laboratorio, haciendo uso de partes de aluminio desechadas en proyectos anteriores.

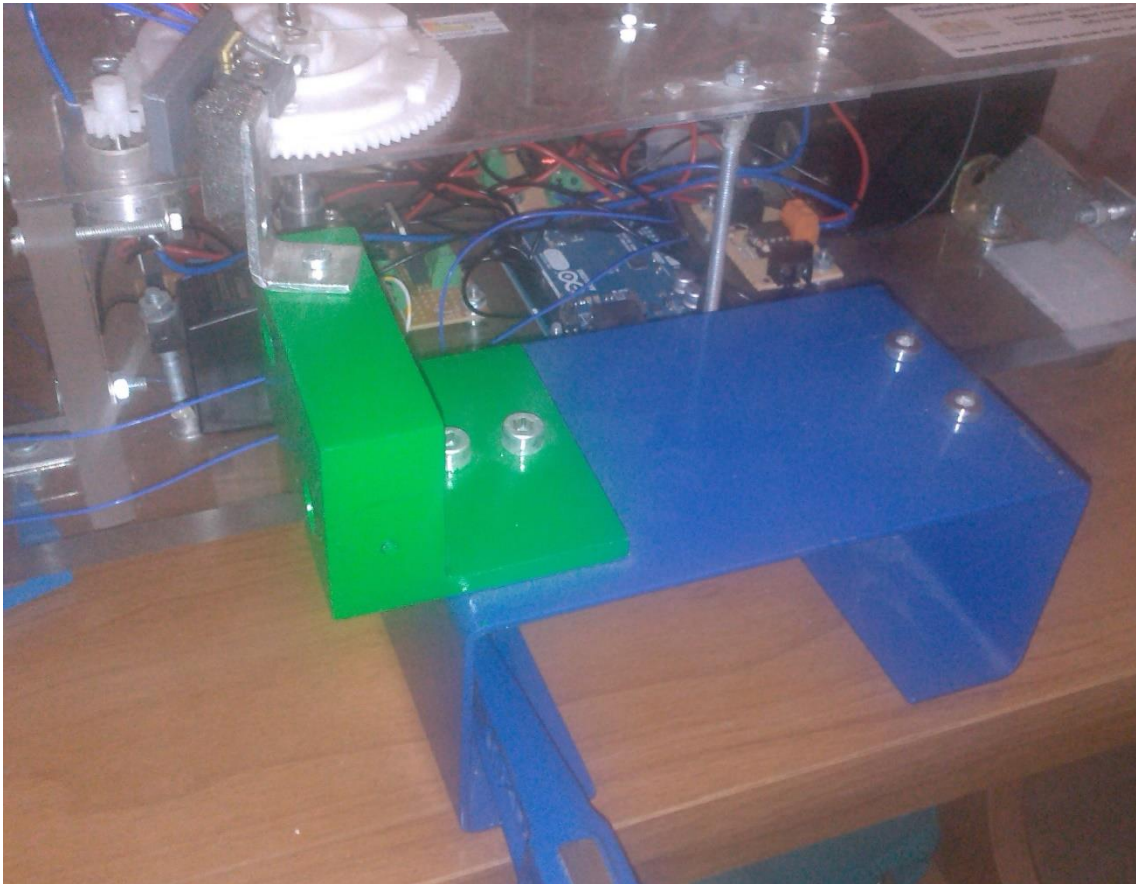


Figura 7.3. Parte fija de la Pseudo-pinza

De esta forma se ha logrado la fabricación de un experimento análogo para simular el comportamiento de una pinza y poder iniciar los estudios de control mediante la realimentación de fuerza de forma rápida y sencilla.

7.3 Implantación del sensor de fuerza de cuarto puente

Tal y como se ha explicado en el Capítulo 3, existen diferentes formas de implementar un sensor de fuerza basado en galgas extensiométricas. Se ha tenido a bien comenzar implementando el sensor más sencillo posible y comprobar los resultados que se suceden para, posteriormente, evaluar la necesidad de añadir complejidad al diseño.

Para la implementación del sensor de cuarto de puente fueron seguidas las directrices marcadas en el Capítulo 3. En este caso se ha elegido comenzar por implementar una galga sometida a esfuerzo de compresión, esto es situarla en la cara anterior de la pseudo-pinza.



Figura 7.4. Situación de la galga del sensor de cuarto de puente

Contamos con una galga extensiométrica de 8mm con referencia “RS 308-118 N11-FA8-120-23 8mm”. La referencia nos aporta la información más importante de las características de la galga, que se resumen en la siguiente tabla:

- *Patrón básico: línea axial*
- *Material de la base: polyester*
- *Material de la bobina: aleación Cu-Ni*
- *Longitud de la galga: 8mm*
- *Resistencia nominal: 120 Ω*
- *Factor de expansión lineal: 16,2 x 10⁻⁶ / °C*

Todos los datos referentes a las galgas extensiométricas pueden ser estudiados con más detenimiento en las hojas de características que se encuentran adjuntas en el Anexo II.

En cuanto al acondicionamiento electrónico, se ha construido sobre una “protoboard” debido al carácter temporal del experimento. Los componentes electrónicos empleados fueron tres resistencias con un valor nominal de 120 Ω con un 5% de tolerancia y un amplificador operacional de instrumentación INA 131. Las características del amplificador operacional de instrumentación pueden ser vistas de forma detallada en el ANEXO II, aunque a continuación se reseñan las más relevantes para la aplicación que nos atañe:

- *Voltaje de offset reducido: 50 μ V máximo*
- *Alto nivel de rechazo a modo común (CMRR): 110dB mínimo*
- *Ganancia mínima: 100*

- *Protección a sobretensiones de entrada: ± 40 V*
- *Amplio rango de alimentación: desde $\pm 2,15$ a ± 18 V*

Es esquema de montaje de la adaptación electrónica ya ha sido explicado en el Capítulo 3, sin embargo ahora procederemos a explicar el conexionado del puente de Wheatstone con el INA 131 así como su conexión con la tarjeta de adquisición de datos que en este caso está formada por un arduino UNO.

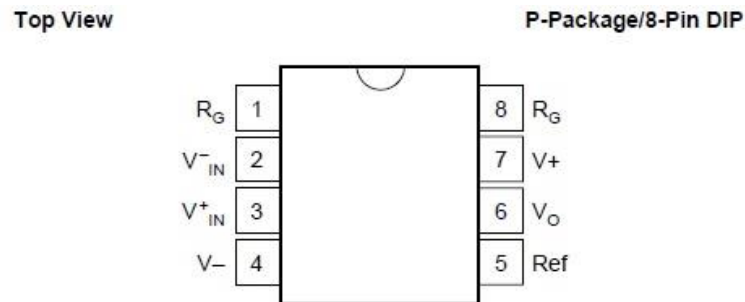


Figura 7.5. Vista superior del INA 131

Como se puede apreciar en la figura, el amplificador de instrumentación INA 131 consta de 8 patas las cuales todas necesitan una correcta conexión. A continuación se relata la forma de conexionado:

- *Las patillas 1 y 8 serán las de conexión de la resistencia de ganancia R_G , la cual tiene la utilidad de aumentar la ganancia del amplificador operacional de instrumentación. En este caso se decide no incluir inicialmente ninguna resistencia ya que el INA 131 ofrece una ganancia de 100 con estas patillas al aire y de inicio se prevé como suficiente.*
- *Las patillas 2 y 3 pertenecen a la entrada de lectura, correspondiéndose la patilla 2 con la entrada negativa y la 3 con la entrada positiva. En este caso la patilla 2 se conectó con el brazo del puente de dos resistencias, mientras que la patilla 3 se conectó con el brazo del puente con la galga extensiométrica.*
- *Las patillas 4 y 7 pertenecen a la entrada de alimentación, correspondiéndose la 4 con la entrada de alimentación negativa y la 7 con la entrada de alimentación positiva. En este caso, la alimentación dual del INA 131 se realizó con ± 5 V.*
- *La patilla 6 pertenece a la salida amplificada. Esta patilla fue conectada con una de las entradas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos, en concreto fue conectada con la entrada 0 de nuestro Arduino Uno.*
- *La patilla 5 es la patilla de referencia común, la cual debe ser conectada con la masa de la tarjeta de adquisición de datos para su correcto funcionamiento.*

De este modo se puede pasar del esquema electrónico inicial, al circuito montado en la “protoboard” que se muestra en las figuras siguientes.

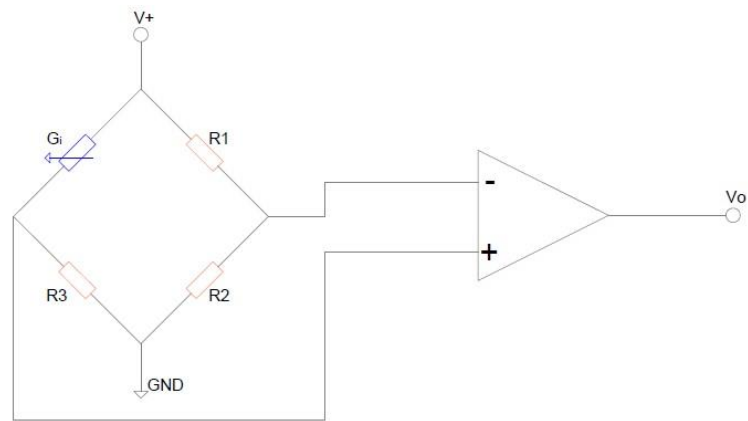


Figura 7.6. Esquema de adaptación electrónica del sensor

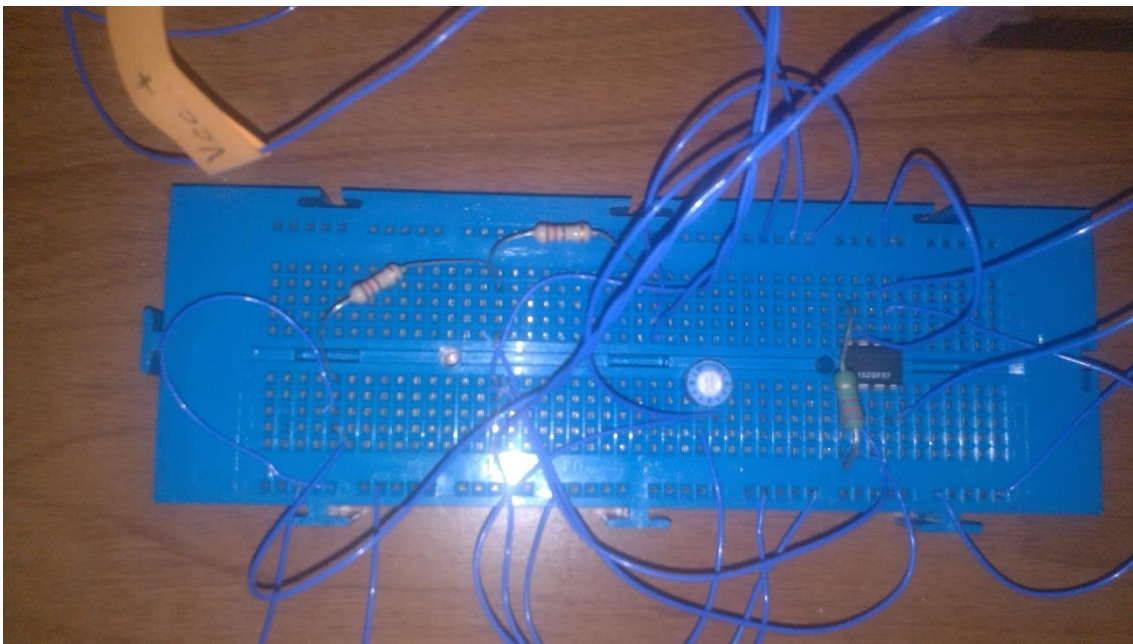


Figura 7.7. Circuito de adaptación electrónica del sensor

7.3.1 Pegado de la galga

El pegado de la galga es un proceso muy delicado y de precisión que determina en gran medida la calidad del sensor. Se ha tenido especial cuidado en cumplir todas las exigencias marcadas por el fabricante del transductor durante el proceso de pegado para obtener lecturas fiables y de calidad.

Debido a que no es una competencia directa del proyecto y a que este proceso será repetido en diversas ocasiones, el procedimiento de pegado puede ser estudiado en el [Anexo III](#) del presente documento.

7.3.2 Calibración del sensor de fuerza de cuarto de puente

La calibración del sensor se realiza según el experimento diseñado y explicado en el Capítulo 3.

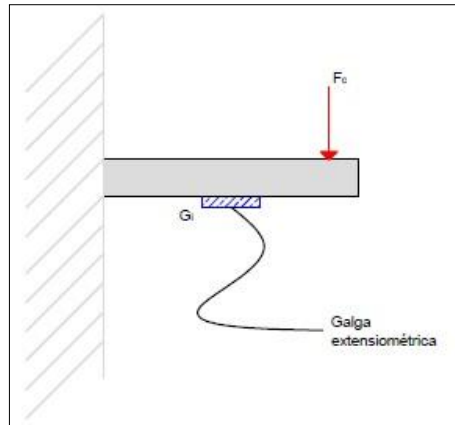


Figura 7.8. Esquema para el experimento de calibración

En este caso, el material de soporte de la galga extensiométrica será la pieza móvil de la pseudo-pinza fabricada en ABS mediante técnicas de prototipado rápido.



Figura 7.9. Experimento de calibración real

Para tratar de eliminar posibles errores en la calibración, se ha procedido a realizar tres calibraciones consecutivas para posteriormente tomar los valores medios como resultado final.

Los resultados obtenidos se reflejan en la siguiente tabla:

Resultados de la calibración					
Calibración 1		Calibración 2		Calibración 3	
Fuerza (N)	Tensión (mV)	Fuerza (N)	Tensión (mV)	Fuerza (N)	Tensión (mV)
0	6	0	11	0	3
0,4905	23	0,4905	23	0,4905	21
0,981	37	0,981	33	0,981	45
1,962	58	1,962	47	1,962	60
2,943	73	2,943	77	2,943	85
3,924	113	3,924	111	3,924	114
9,81	320	9,81	312	9,81	329

Tabla 7.1. Experimentos de calibración

A partir de los valores medios ha sido posible obtener la recta de calibración que define el sensor implementado.

Tensión (V)	0,006	0,022	0,038	0,055	0,078	0,112	0,320
Fuerza (N)	0	0,49	0,981	1,962	2,943	3,924	9,81

Tabla 7.2. Valores medios de calibración

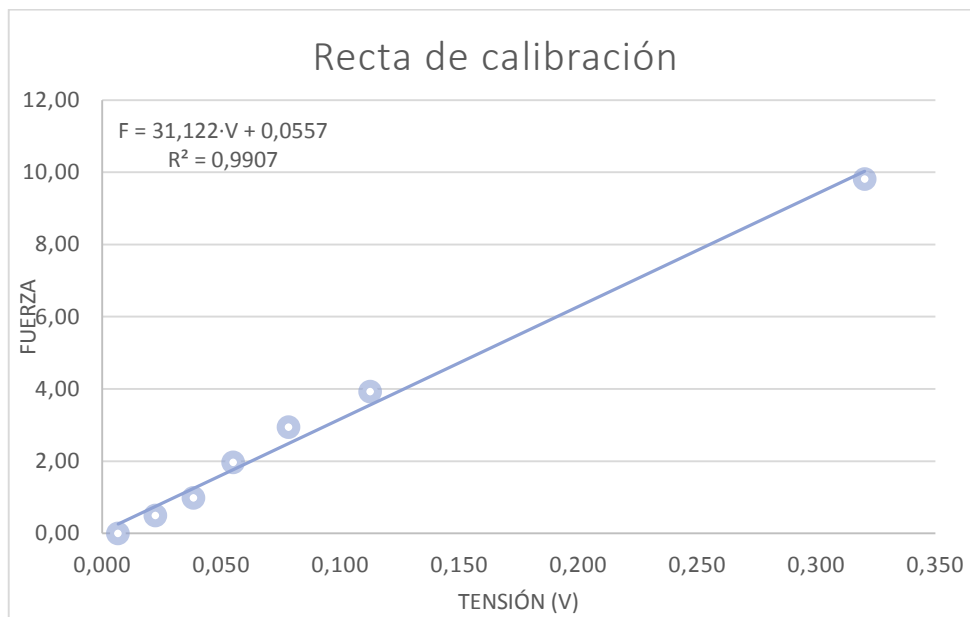


Figura 7.10. Recta de calibración del sensor

De tal forma que se ha obtenido la ecuación que lo modela

$$F = 31,22 \cdot V + 0,0557$$

Siendo F la fuerza que se ejerce sobre el sensor y V la tensión de salida que genera.

7.4 Experimentos de control con realimentación de fuerza. Sensor de cuarto de puente

Una vez calibrado el sensor, ya es posible introducir la ecuación que lo modela en el código que se ha generado para el control del actuador SMA para la pseudo-pinza y de esta forma lograr ejercer control mediante la realimentación de fuerza. El código generado puede ser estudiado en el Anexo I del presente documento.

Como primer paso lógico antes de abordar el control mediante la realimentación de fuerza, se han realizado una serie de experimentos de activación mediante entradas en escalón para comprobar el correcto funcionamiento tanto del experimento diseñado como el correcto funcionamiento del sensor de fuerza implementado.

Tal y como se realizó en el Capítulo 5, se ha introducido una entrada escalón para el sisma SMA1 con valor de 6,5 V. A partir de este experimento podremos determinar el modelo del nuevo sistema SMA1-pseudopinza lo cual es fundamental para la posterior sintonía del controlador PID.

Para hacer visible la fuerza ejercida por la pseudo-pinza, se ha anclado a la parte fija una esponja que hará las veces de tejido blando propio de una operación de cirugía de mínima invasión. De esta forma se trata de recrear de forma muy aproximada una situación de agarre.

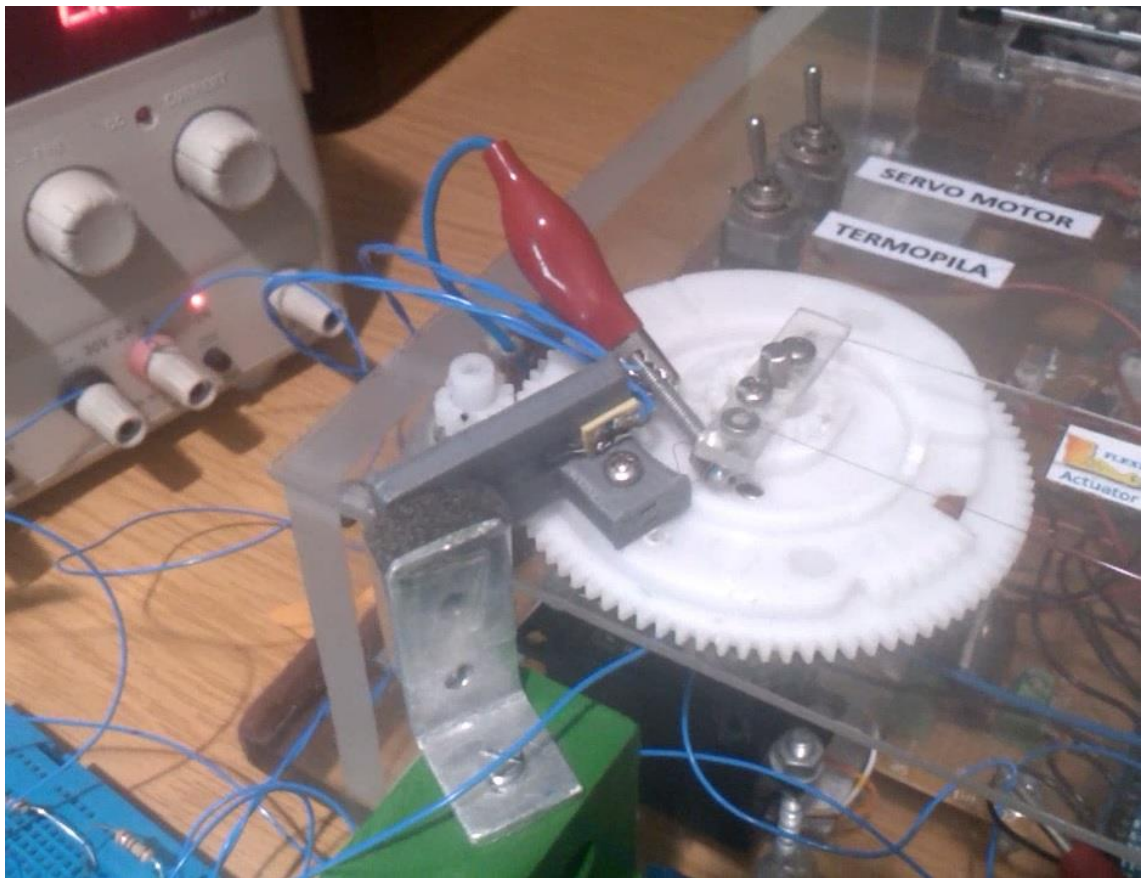


Figura 7.11. Experimento Pseudo-pinza capturando una esponja

El resultado que se obtuvo tras aplicar la entrada en escalón se puede observar en la siguiente figura

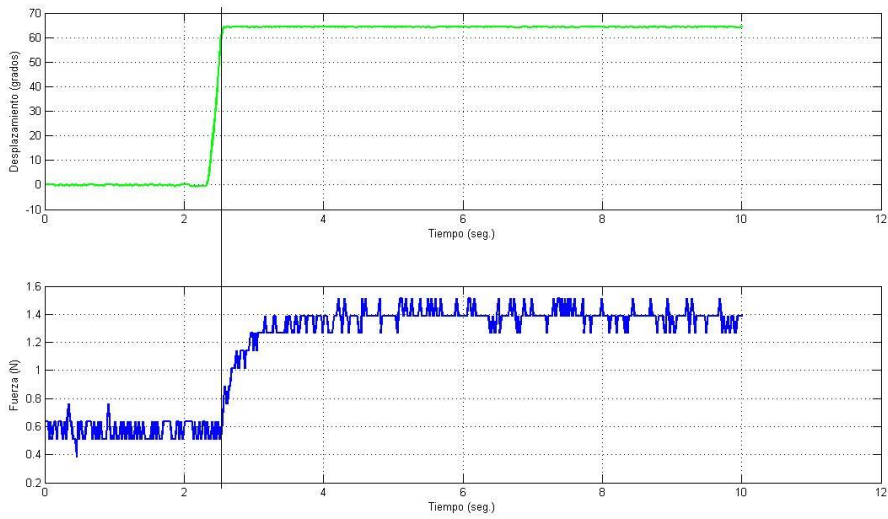


Figura 7.12. Respuesta ante entrada escalón

Es inmediato observar que la lectura que ofrece el sensor no es de gran calidad, ya que se aprecia como la señal captada por el sensor de fuerza ofrece una resolución de valores muy pequeña, lo que hace que existan variaciones de señal grandes.

A pesar de este hecho se ha tratado de ejercer un primer control PID con realimentación de fuerza con la finalidad de comprobar el comportamiento del sistema SMA1-Pseudo-pinza. Los resultados obtenidos, aunque se ve que se sigue la señal de consigna, son obviamente malos ya que la señal de control necesaria para conseguir el seguimiento de la consigna se asimila más a un control todo-nada que a un controlador PID.

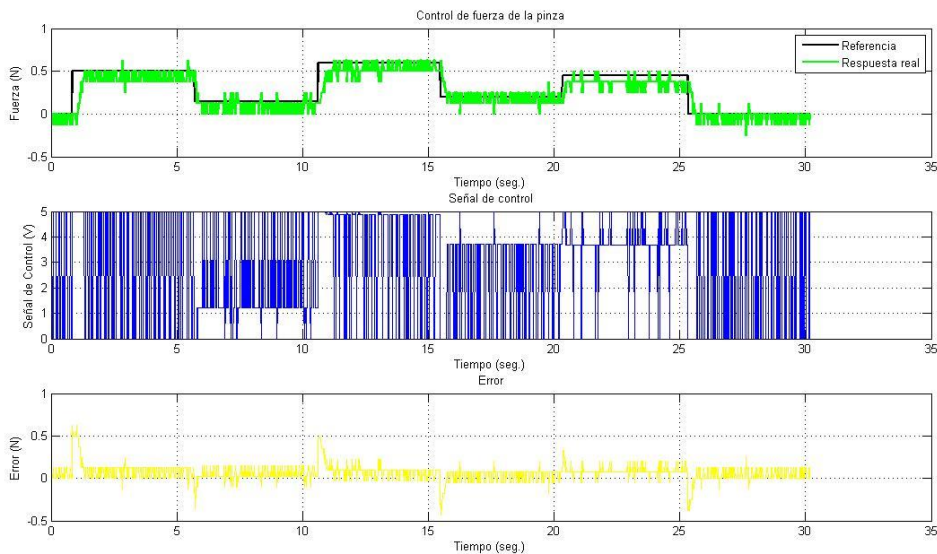


Figura 7.13. Control PID con realimentación de fuerza

7.5 Implantación de sensor de fuerza de medio puente

Como posible solución para los problemas encontrados con el sensor de cuarto de puente se plantea la construcción de un sensor de medio puente, ya que el sensor de medio puente ofrece el doble de sensibilidad y puede mejorar la resolución que presenta el sensor de cuarto de puente.

La implantación del sensor de medio puente es muy sencilla, ya que tan solo es necesario incluir una nueva galga al puente de Wheatstone sustituyendo una de las resistencias de 120Ω .

La topología elegida para este nuevo sensor será de una galga sometida a esfuerzo de compresión y otra a esfuerzo de tracción. De esta forma, ambas galgas se encontrarán situadas en el mismo brazo del puente de Wheatstone tal y como se muestra en el Capítulo 3.

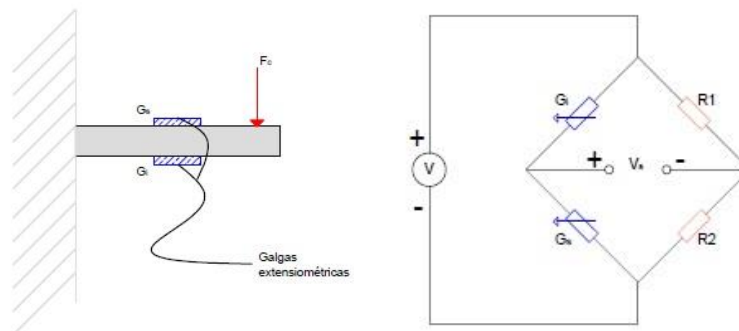


Figura 7.14. Esquemas de topología de medio puente

Se ha seleccionado esta topología debido a que permite reutilizar todos los elementos empleados hasta el momento sin ejercer modificaciones que puedan repercutir sobre el funcionamiento del sensor de cuarto de puente que ya tenemos. De esta forma, cambiando el circuito de acondicionamiento de señal, será posible trabajar con el sensor de cuarto de puente o el sensor de medio puente a conveniencia.

7.5.1 Pegado de la galga

De forma análoga al sensor de medio puente será necesario pegar la galga sobre la superficie de la pseudo-pinza, aunque en esta ocasión la superficie será la que se encuentre sometida al esfuerzo de tracción.

El procedimiento de pegado es exactamente igual, y puede ser estudiado en el Anexo III del presente documento.

7.5.2 Calibración del sensor de fuerza de medio puente

El procedimiento de calibración realizado para el sensor de medio puente es en efecto el mismo que el que se ha realizado para el sensor de cuarto de puente, por lo que sería redundante repetir la explicación.



De la misma forma se han obtenido los resultados de tres calibraciones para, posteriormente, realizar su media aritmética y tomar estos valores como resultados finales para generar la recta de calibración.

Resultados de la calibración					
Calibración 1		Calibración 2		Calibración 3	
Fuerza (N)	Tensión (mV)	Fuerza (N)	Tensión (mV)	Fuerza (N)	Tensión (mV)
0	5	0	2,9	0	8,3
0,4905	38	0,4905	46	0,4905	44,4
0,981	66,7	0,981	80,2	0,981	81,6
1,4715	102	1,4715	119,3	1,4715	134,8
1,962	131,5	1,962	149,9	1,962	173
2,943	236	2,943	244	2,943	225
3,924	328	3,924	321	3,924	303
9,81	794	9,81	779	9,81	794

Tabla 7.3. Resultados de la calibración del sensor de medio puente

A partir de los valores medios ha sido posible obtener la recta de calibración que define el sensor implementado.

Tensión (V)	0,005	0,042	0,076	0,118	0,151	0,235	0,317
Fuerza (N)	0	0,49	0,981	1,962	2,943	3,924	9,81

Tabla 7.4. Valores medio de la calibración

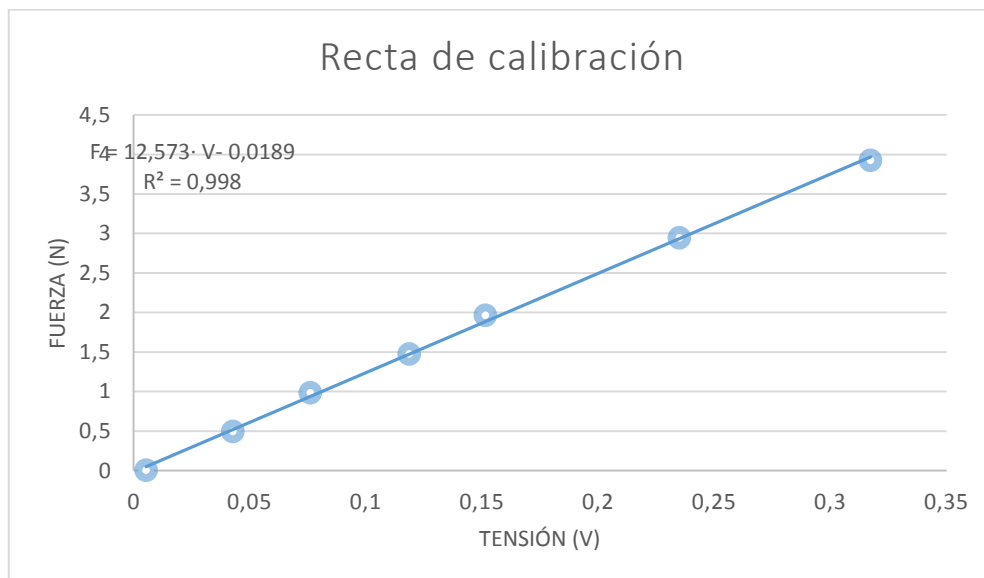


Figura 7.15. Recta de calibración para el sensor de medio puente

De tal forma que se ha obtenido la ecuación que lo modela

$$F = 12,573 \cdot V + 0,0189$$

Siendo F la fuerza que se ejerce sobre el sensor y V la tensión de salida que genera.

7.6 Experimentos de control con realimentación de fuerza. Sensor de medio puente

Una vez calibrado el sensor de medio puente procedemos a comprobar su funcionamiento mediante la excitación del sistema con una entrada escalón. En este caso se espera obtener una diferencia sustancial en cuanto a la calidad de la señal y de esta forma poder realizar los experimentos de control con realimentación de fuerza de forma concluyente.

Tal y como se ha realizado anteriormente, se ha introducido una entrada escalón para el sisma SMA1 con valor de 6,5 V y se han obtenido los siguientes resultados:

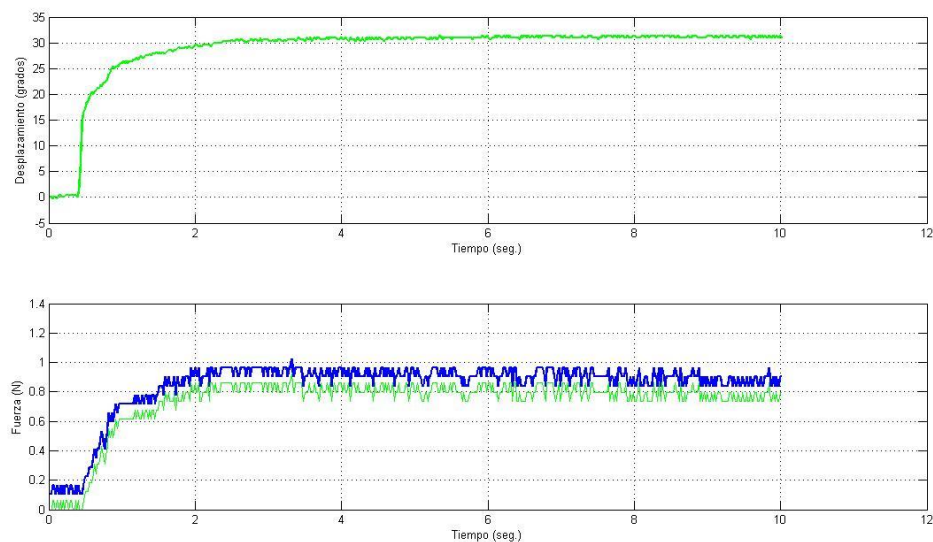


Figura 7.16. Respuesta a escalón con sensor de medio puente

Se observa que a pesar de aumentar la sensibilidad del sensor, la calidad de la señal no mejora de forma notable, por lo que se hace necesario buscar otra forma para mejorar la resolución de nuestro sensor.

A pesar de obtener un resultado inesperado, se plantea el control con realimentación de fuerza para el sistema con el sensor de medio puente. Queriendo comprobar que aun añadiendo esta variación es posible controlar el actuador.

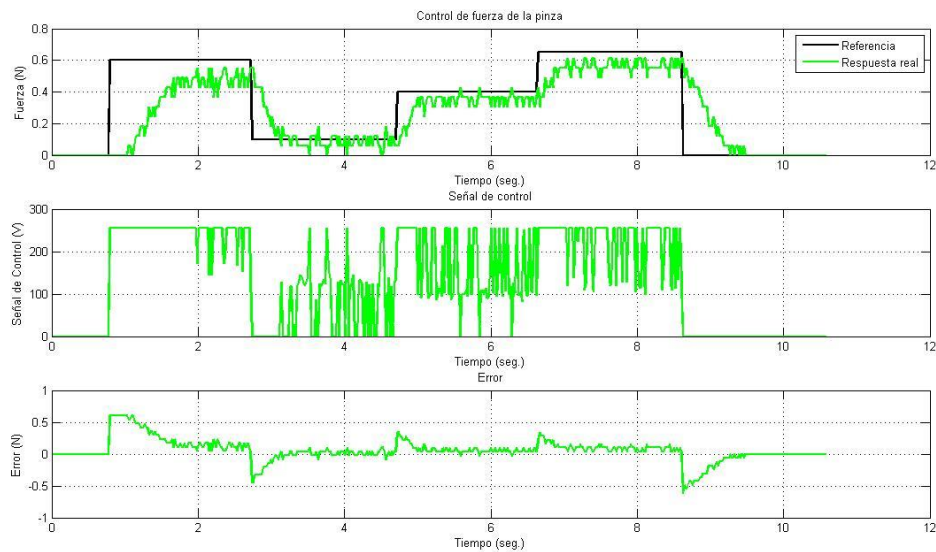


Figura 7.17. Control con el sensor de medio puente

Al igual que sucedía en el caso anterior con la implementación del sensor de cuarto de puente, se obtiene un seguimiento de la señal de consigna aceptable. Aunque la calidad del control no se puede tachar como buena ya que la señal de control generada se asemeja más a un control todo-nada que a la señal propia de un controlador PID.

7.7 Detección y corrección de problemas de sensorización

Una vez comprobado que los resultados no han variado implementando un sensor de medio puente con mayor sensibilidad, recapitamos sobre los posibles errores cometidos en el diseño del sensor de fuerza buscando los motivos de obtener una resolución tan pequeña en nuestro sensor. Tras un pequeño estudio de los resultados obtenidos hasta ahora se comprueba como la máxima magnitud de fuerza alcanzada por el sistema SMA1-pseudo-pinza apenas alcanza 1 Newton, además se puede ver en las tablas de datos de las calibraciones que el rango de tensión de salida del sensor dentro del rango de trabajo de 1 Newton es de 38 mV para el sensor de cuarto de puente y de 76 mV para el sensor de medio puente. Esto nos indica que realmente el problema se encuentra en una incorrecta selección de la ganancia del amplificador operacional de instrumentación perteneciente a la adaptación electrónica del sensor. Puesto que se había previsto unos márgenes de trabajo mayores, la ganancia del INA 131 se diseñó como $G = 100$, lo cual es totalmente insuficiente para el rango de trabajo que se tiene realmente.

Como solución se propone aumentar la ganancia del INA 131 añadiendo una resistencia entre las patillas 1 y 8 de forma que para un valor de 2,5 Newton se obtenga la tensión de saturación del operacional (4,3V aproximadamente). De esta forma podemos determinar la ganancia como:



$$G = \frac{4,3 \cdot 100}{0,197} = 2.183$$

Acudiendo a la hoja de características del INA 131 (ver Anexo II) se puede encontrar la definición de la ganancia como:

$$G = 100 + \frac{250 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

De esta forma se tiene que:

$$R_G = 120\Omega$$

Tras estas modificaciones, se ha procedido a realizar nuevamente la serie de experimentos anteriores con el fin de comprobar si los cambios introducidos producen una mejora significativa en la calidad de la señal. Es importante notar que tras este cambio en el acondicionamiento electrónico, la recta de calibración se verá modificada. Por tanto será necesario volver a obtenerla nuevamente.

7.7.1 Calibración

Siguiendo la dinámica de los experimentos de calibración que se ha llevado hasta ahora, se han realizado tres calibraciones diferentes para posteriormente realizar la media aritmética de los resultados obtenidos y así obtener una recta de calibración con menor error.

Resultados de la calibración					
Calibración 1		Calibración 2		Calibración 3	
Fuerza (N)	Tensión (mV)	Fuerza (N)	Tensión (mV)	Fuerza (N)	Tensión (mV)
0	335	0	520	0	445
0,4905	1178	0,4905	1389	0,4905	1346
0,981	2332	0,981	2511	0,981	2097
1,4715	3080	1,4715	3203	1,4715	3080
1,962	4299	1,962	4121	1,962	4023

Tabla 7.5. Resultados de la calibración del sensor medio puente con G=2183

Obteniéndose la recta de calibración a partir de los valores medios

Tensión (V)	0,433	1,304	2,313	3,121
Fuerza (N)	0	0,49	0,981	1,962

Tabla 7.6. Valores medios de calibración del sensor de medio puente con G=2183

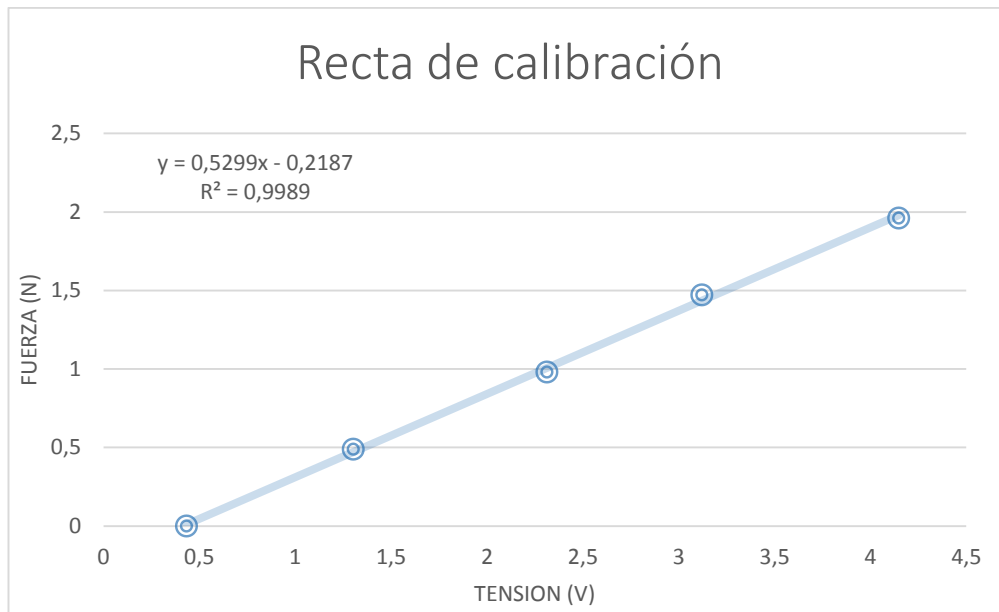


Figura 7.18. Recta de calibración del sensor de medio puente con $G = 2183$

De tal forma que se ha obtenido la ecuación que lo modela

$$F = 0,5299 \cdot V + 0,2187$$

Siendo F la fuerza que se ejerce sobre el sensor y V la tensión de salida que genera.

7.8 Experimentos de control con realimentación de fuerza tras la corrección de errores.

Tras aplicar los cambios en la adaptación electrónica del sensor de medio puente se ha procedido a realizar la misma secuencia de experimentos que se realizaron para los casos anteriores tratando de obtener un marco de comparación entre resultados fiable.

Como experimento inicial se introduce una entrada escalón para la excitación del actuador y poder observar la respuesta que nos ofrece el sistema. Los resultados obtenidos son reflejados en la siguiente figura.

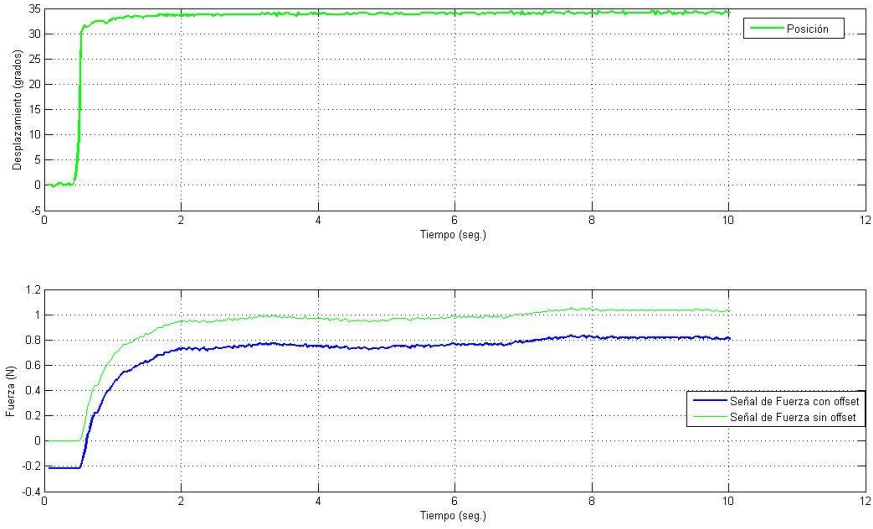


Figura 7.19. Respuesta a escalón

Es posible comprobar que al fin se obtiene una señal procedente del sensor de fuerza de una calidad aceptable, aunque existe una pequeña señal de offset que será necesario corregir. La corrección de la señal de offset se ha llevado a cabo mediante la combinación de dos de los métodos descritos en el Capítulo 2, ya que se ha realizado una corrección hardware para estabilizar la señal y mantenerla en valores positivos, pero debido a la sensibilidad del sistema montado en la protoboard (ruido, conexiones inestables, etc) existe una pequeña variación de offset que es eliminada mediante la implementación software.

7.8.1 Control PID

Se ha procedido a ejercer el control PID del sistema y para ello se ha aplicado el método de sintonía PID de Ziegler Nichols de lazo abierto. Para ello se aplica una entrada en escalón en el sistema y se estudia la respuesta.

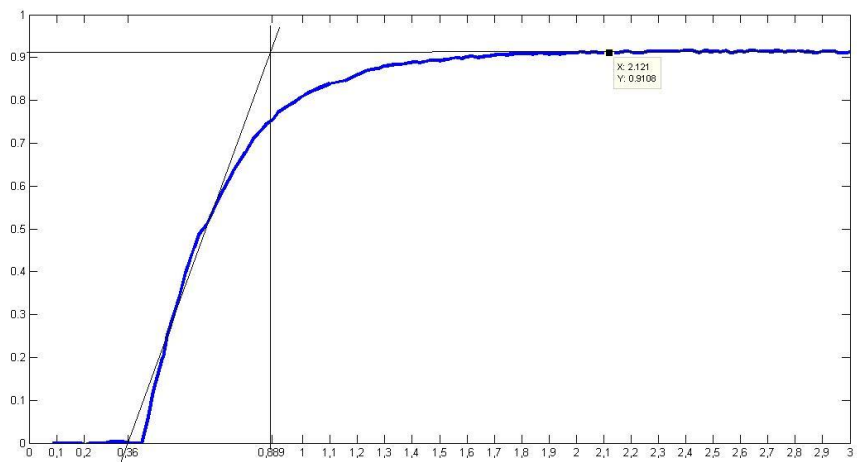


Figura 7.20. Sintoniz por el Método Ziegler Nichols de lazo abierto



A través del estudio de la figura anterior es posible determinar unos valores PID que se suponen cercanos o al menos un buen inicio para la sintonía del controlador necesario para el sistema.

Se obtienen los valores

T	L
0,889	0,36

Tabla 7.6. Valores para sintonía PID

De los cuales es posible obtener los controladores PID siguientes:

	Kp	Ti	Td
P	2,469444		
Pi	2,2225	1,188	
PID	2,963333	0,72	0,18

Tabla 7.7. Valores para las constantes PID

Aplicando estos valores sobre la programación para el control PID con realimentación de fuerza, sobre una consigna de entradas en escalón, se obtiene el siguiente resultado.

Tras comprobar que los resultados iniciales distan mucho de ser un gran control, se ha decidido comenzar con la sintonía manual probando con ligeras modificaciones en los parámetros del controlador. Tras multitud de intentos, se ha logrado ejercer un control PID con realimentación de fuerza bastante aceptable a pesar de las limitaciones propias de los cables SMA. A continuación se muestran dos experimentos en los cuales se varía la frecuencia de las entradas escalón para comprobar la rapidez de respuesta del sistema.

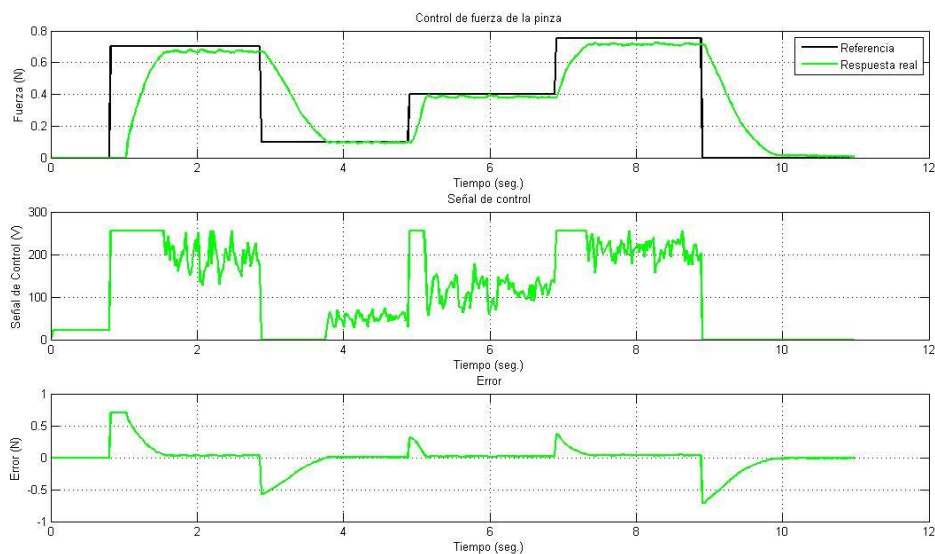


Figura 7.21. Control PI para entradas escalón

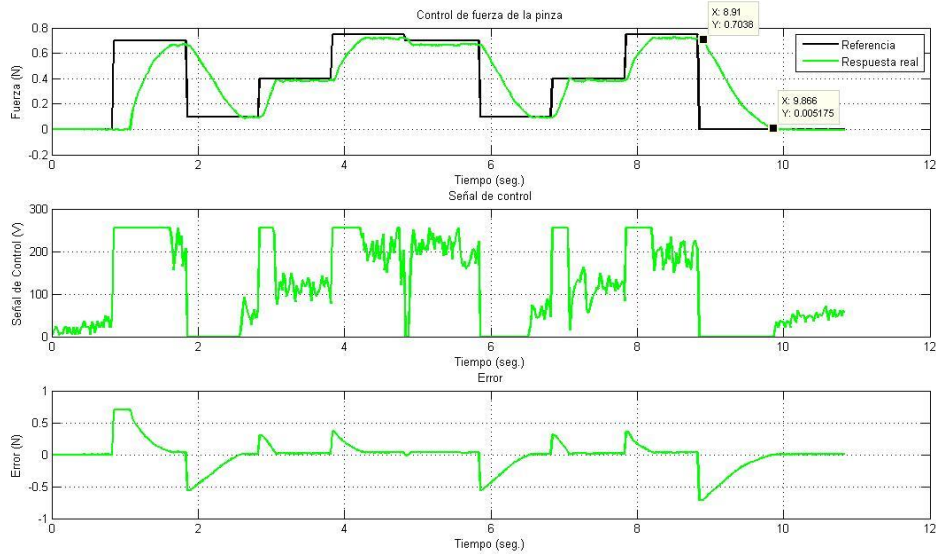


Figura 7.22. Control PI para entradas escalón con mayor tasa de cambio

Existen varias características reseñables en ambas gráficas que se explican a continuación:

1. En ambas existe un tiempo de retraso entre la primera entrada escalón y el tiempo de respuesta del sistema. Esto es debido a que en el instante cero la parte móvil de la Pseudo-pinza no se encuentra en contacto con la parte fija y por tanto no existe lectura de fuerza, por lo que existe un tiempo de retraso hasta que la parte móvil entra en contacto con la parte fija y comienza a ejercer fuerza.
2. El tiempo de recuperación del SMA, esto es el tiempo que tarda en enfriarse, es considerable. Esto produce que en los saltos de un mayor nivel de fuerza a un menor nivel exista un mayor error.
3. El tiempo de actuación del SMA puede ser considerado aceptable, aunque a mayor frecuencia se hace notar su limitación en cuanto a velocidad de actuación.

Aunque este experimento nos arroja cierta información relevante respecto al comportamiento del sistema SMA controlado mediante la realimentación de fuerza, es lógico llevar a cabo otro tipo de experimentos que se asemejen más al comportamiento real del sistema. Pueden considerarse como entradas más fieles a un entorno para el uso de la pinza las entradas en forma de rampa e incluso las entradas senoidales ya que la fuerza se ejerce de forma progresiva.

Al igual que en el caso del experimento del control para entradas en escalón, se ha realizado el experimento para entradas senoidales en diferentes frecuencias, obteniéndose los resultados

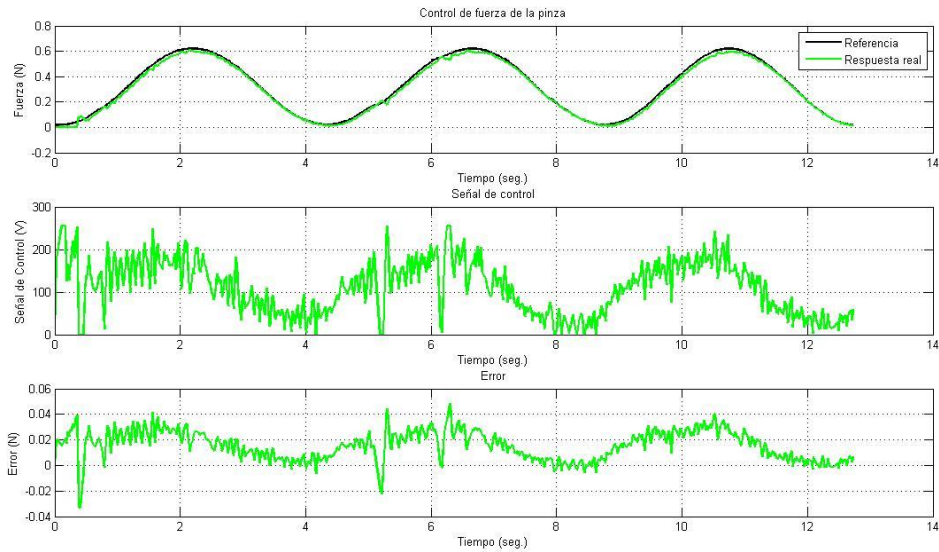


Figura 7.23. Resupuesta para el control PI con entrada senoidal

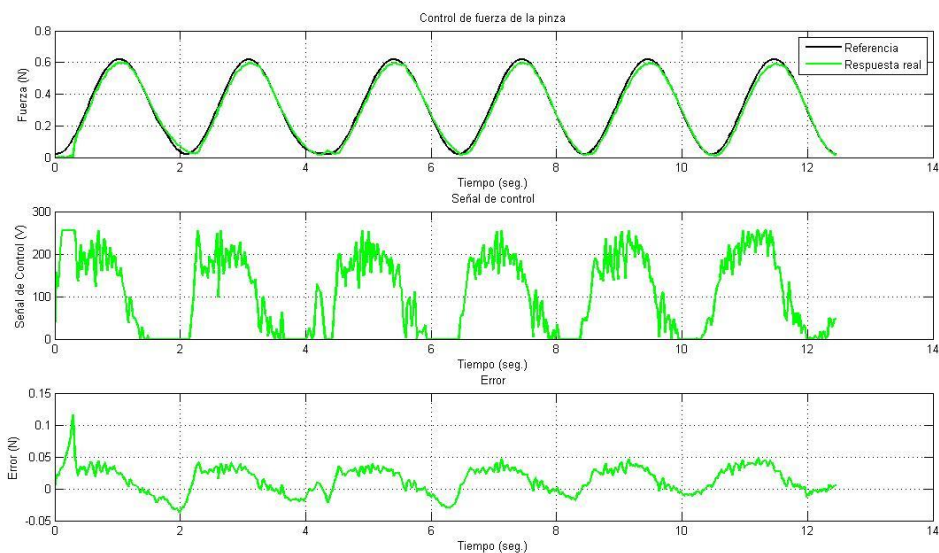


Figura 7.24. Respuesta para control PI con entrada senoidal

Se comprueba cómo se obtiene un control bastante fiel y que, aun aumentando la frecuencia prácticamente al doble, se mantiene la calidad del control.

Sin embargo, podemos apreciar que si se sigue aumentando la frecuencia la pérdida en la calidad del control se hace palpable.

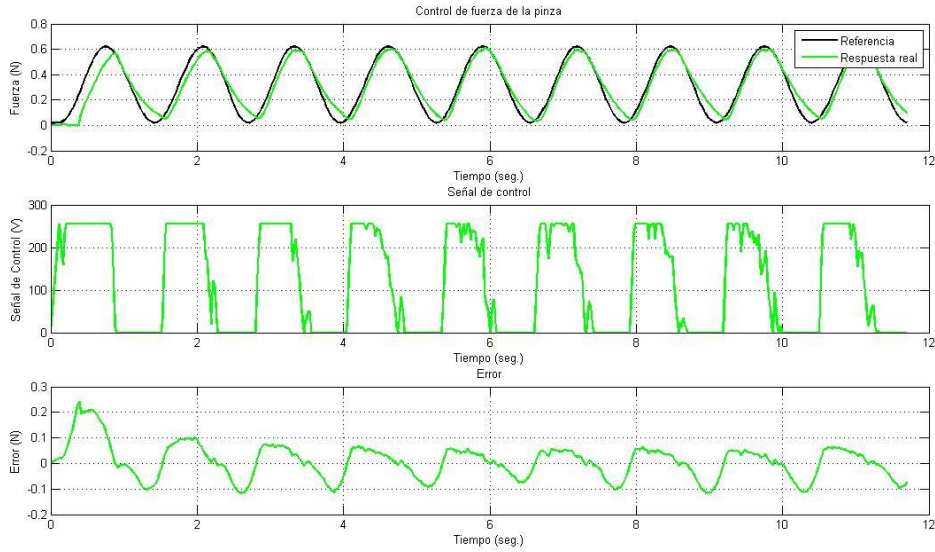


Figura 7.25. Respuesta para el control PI con entrada senoidal

Tras diversos experimentos, se ha hecho evidente que para periodos menores de 2 segundos el control comienza a perder calidad debido a la velocidad del SMA como actuador, esto es debido al tiempo necesario para su enfriamiento y recuperación de forma.

En el caso del control PID con realimentación de fuerza para las entradas en forma de rampa se obtienen resultados muy similares ya que el control ejercido es de gran calidad siempre y cuando el periodo de trabajo se encuentre por encima de los 2 segundos.

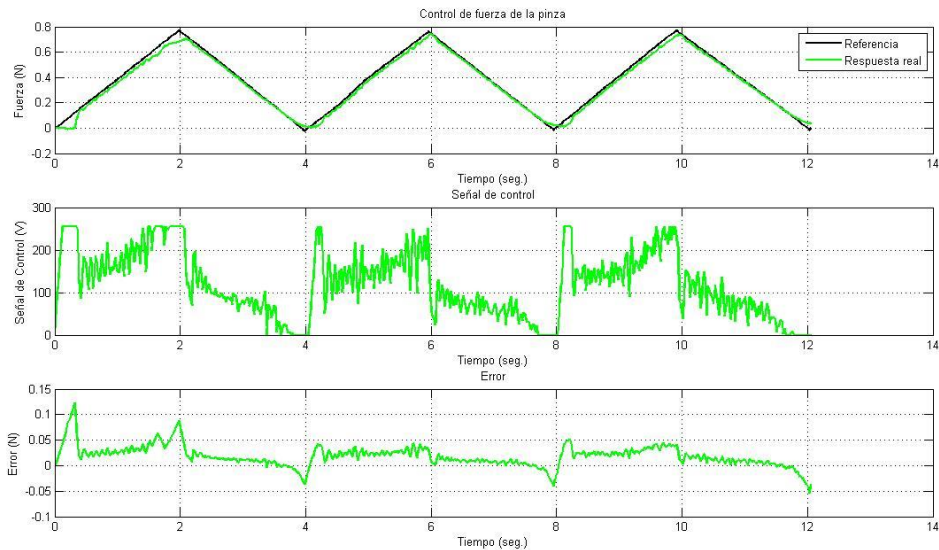


Figura 7.26. Respuesta para el control PI ante entradas rampa

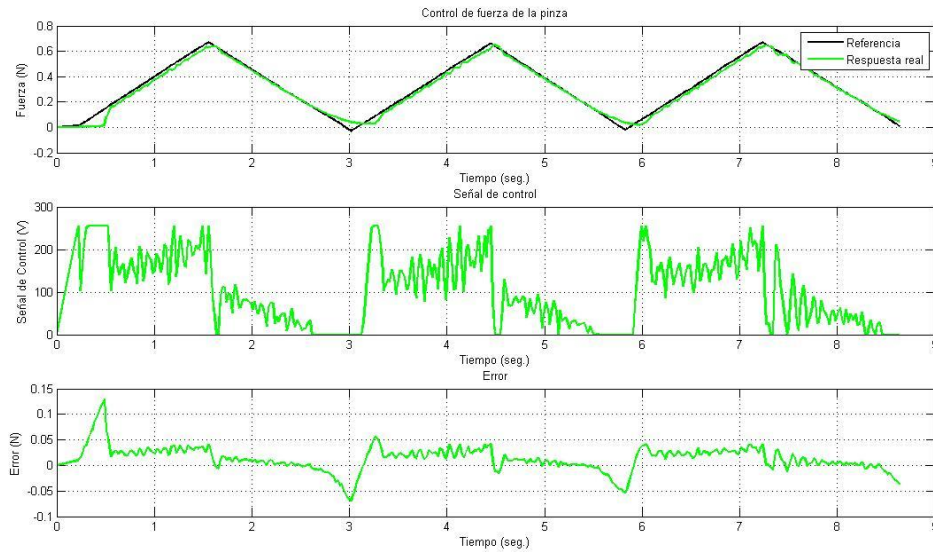


Figura 7.27. Respuesta para el control PI ante entradas rampa

7.9 Análisis de resultados

Una vez finalizadas todas las pruebas programadas, se hace necesario hacer una recapitulación de los resultados obtenidos para posteriormente ejercer una valoración de los mismos. En este caso, solo tendremos en cuenta los resultados obtenidos tras solucionar la problemática asociada a la calidad de la señal ofrecida por el sensor de fuerza, ya que se considera que los resultados anteriores aunque ayudaron a comprender y dominar el experimento diseñado, no ofrecen valor alguno a vistas de evaluar las posibilidades de implementar un control mediante realimentación de fuerza sobre un actuador SMA.

En definitiva, se han evaluado los resultados pertenecientes a las pruebas de control para el sistema de la Pseudo-pinza con sensor de fuerza de medio puente. A las vistas de los resultados obtenidos, el control con realimentación de fuerza que es posible ejercer sobre un actuador SMA tiene resultados muy aceptables en cuanto a calidad, obteniendo unas señales de error de seguimiento de consigna bastante atenuadas.

Aunque se han realizado pruebas con entradas en escalón, en la práctica será más común encontrar entradas con tiempos de subida mayores más similares a entradas en rampa o senoidales. Se ha podido comprobar que el seguimiento de consigna logrado para estos dos últimos casos es realmente bueno siempre que el periodo de las señales no sea inferior a 2 segundos.

Como conclusión en cuanto a la realización de este experimento es posible afirmar que el control con realimentación de fuerza para un actuador SMA es factible, aunque hay que tener en cuenta las limitaciones expuestas.



Capítulo 8.

Experimentos con el prototipo final de la pinza CMI



8 Experimentos con el prototipo final de pinza CMI

8.1 Introducción

Tras los buenos resultados obtenidos en el control con realimentación de fuerza del experimento anterior, se hace necesario avanzar en la investigación con la implementación de un diseño de pinza de mínima invasión que sea más próximo a la realidad. Para ello se ha diseñado, en base al estudio mecánico realizado en el capítulo 4, un sistema de pinza que puede ser actuado mediante la integración de los actuadores SMA.

8.2 Diseño y Fabricación del prototipo final

En base al estudio mecánico ya realizado, se ha sobredimensionado el prototipo con respecto al tamaño propio de una pinza CMI para, de esta forma, poder trabajar sin las restricciones propias de la miniaturización ya que convertiría la labor de fabricación del prototipo en una tarea compleja en exceso. De esta forma será posible seguir empleando las técnicas de prototipado rápido que nos ofrece la impresión 3D, acelerando y simplificando el proceso de fabricación de prototipos.

Como ya se ha explicado en el capítulo 4, el prototipo de pinza CMI constará de 6 elementos diferenciados que se enuncian a continuación:

- **Mandíbulas.** La pinza constará de dos mandíbulas móviles que rotaran sobre un mismo eje. El hecho de ser las dos móviles otorga un mayor ángulo de apertura. Las mandíbulas tendrán dos partes diferenciadas separadas por el eje de pivote, una será la parte de trabajo que entrará en contacto con los tejidos a agarrar y la otra será la parte

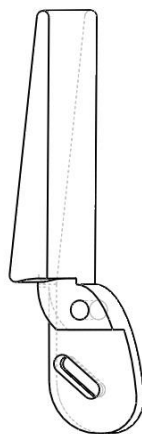


Figura 8.1. Mandíbula de la pinza prototipo

- **Pivotante.** Será la pieza que se ofrezca como punto de pivote para las mandíbulas. Además, también servirá como guía sobre la cual se deslizará el tirador.

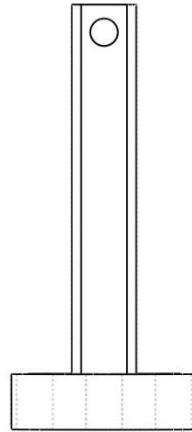


Figura 8.2. Pieza pivotante

- **Tirador.** Esta pieza tiene la labor de transmitir la fuerza ejercida por los cables SMA hacia las mandíbulas. Esta fuerza será transmitida a través de unos tetones laterales que se deslizarán por las aperturas oblicuas laterales de las mandíbulas.

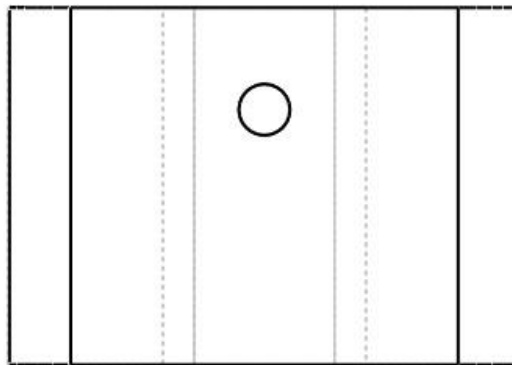


Figura 8.3. Tirador

- **Carcasa.** Servirá como soporte para todo el conjunto, ofreciendo estabilidad a la pinza.

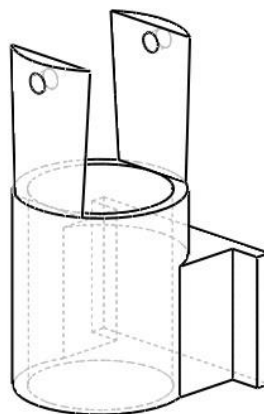


Figura 8.4. Carcasa del prototipo de pinza

- **Pasador.** Cilindro metálico que ejercerá de eje de unión entre las mandíbulas y el pivotante.
- **Resorte pretensor.** Muelle que ejerce la fuerza de pretensión sobre los cables SMA, la cual es necesaria para la recuperación de la posición inicial de la pinza así como recuperar la tensión de los cables SMA.

Una vez montado, el conjunto toma la siguiente forma:

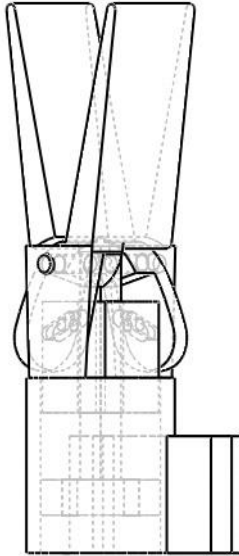


Figura 8.5. Ensamblaje de la pinza prototipo

8.2.1 Caracterización del prototipo

A raíz del modelado matemático expuesto en el capítulo 4, se procede a caracterizar las dimensiones finales del prototipo. Rememorando los cálculos realizados, se tiene que las dimensiones críticas serán: X_{eje} , X e Y , así como el ángulo de apertura máximo deseado.

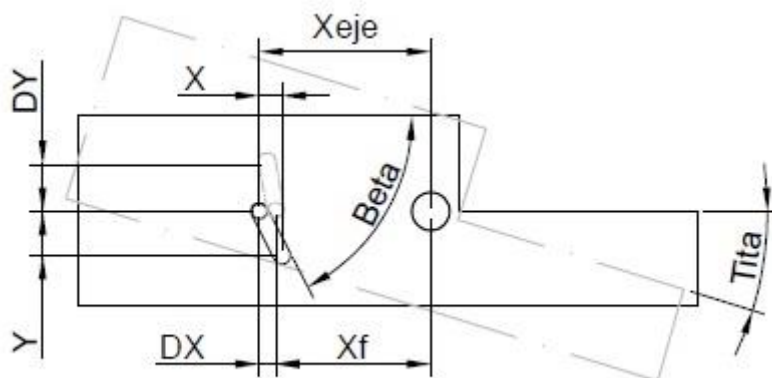


Figura 8.6. Modelo esquemático del prototipo de pinza

Prefijando un ángulo de apertura máximo $\theta=30^\circ$, resulta que estaremos obligados a fijar un ángulo $\beta < 60^\circ$. Para asegurar un comportamiento dinámico fluido seleccionaremos un valor sustancialmente inferior, tal que $\beta = 50^\circ$.

Sabiendo que se cumple:

$$\tan(\beta) = \frac{Y}{X} = \tan(50) \cong \frac{6}{5}$$

Fijando el valor de $X = 4 \text{ mm}$ se obtiene:

$$Y = \frac{24}{5} \text{ mm}$$

Pudiendo obtener definitivamente:

$$X_{eje} = Y \cdot \left(\frac{1}{\tan(\beta)} + \frac{1}{\tan(\theta)} \right) = 12,3 \text{ mm}$$

Tomando estos parámetros se han diseñado y fabricado, mediante tecnologías de prototipado rápido, el conjunto de piezas que componen el prototipo, resultando de la siguiente forma:

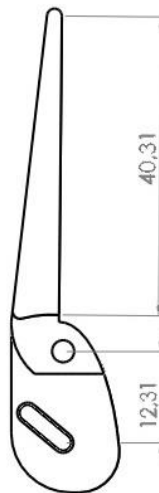


Figura 8.7. Piezas fabricadas del prototipo

8.2.2 Dimensionamiento de los cables SMA

Una vez determinadas las dimensiones que definen el prototipo de la pinza CMI, procede determinar las dimensiones del actuador SMA. Para esta labor tendremos que tener en cuenta en primer lugar la carrera que debe vencer el cable SMA, en segundo lugar el porcentaje de contracción esperado por el cable SMA y en tercer lugar la fuerza requerida para nuestro prototipo.

En cuanto al primer término, se tiene que:

$$\Delta X = Y \cdot \sin(\beta) \cdot (\cos(\beta) \cdot \sin(\theta) + \sin(\beta) \cdot \cos(\theta))$$

$$\Delta X = 4,8 \cdot \sin(50) \cdot \cos(50) = 2,36 \text{ mm}$$



Para determinar la longitud del cable, será necesario acudir a la hoja de características de fabricante, el cual nos dice que los cables SMA tienen una contracción de hasta un 5% de la longitud nominal del cable. Tomando el caso menos favorable tenemos una longitud del cable:

$$L_{SMA} = \frac{\Delta X}{\%strain} \cdot 100 = \frac{2,36mm}{0,03} = 79 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta una tolerancia a la hora de realizar el prototipo, se ha decidido incrementar la longitud un 20% con tal de asegurar el comportamiento deseado. De esta forma se obtiene una longitud:

$$L_{SMA} = 100mm = 0,1m$$

Otro parámetro a determinar en el actuador SMA es el relativo al diámetro del cable, definiendo este parámetro características tan importantes como la fuerza ejercida o los tiempos de activación y recuperación. En este caso se ha seleccionado un cable de 150 μ m de diámetro, ya que tras los experimentos realizados con la Pseudo-pinza se pudo comprobar que la fuerza ejercida por un cable SMA de 100 μ m podría resultar un tanto insuficiente.

Definitivamente, se puede recopilar la información del actuador SMA diseñado remarcando sus dos características dimensionadas.

- **Longitud del cable : 100mm**
- **Diámetro del cable: 150 μ m**

8.2.3 Acondicionamiento eléctrico del actuador SMA

El control del actuador será ejercido con una tarjeta de adquisición de datos Arduino UNO, lo que nos conduce a la necesidad de una adaptación de la etapa de potencia del actuador SMA para obtener un funcionamiento correcto. Comenzaremos por determinar las necesidades eléctricas del actuador para definir el o los circuitos electrónicos más convenientes después.

Por el propio diseño del sistema de tiro de la pinza CMI, será necesario activar dos tramos de cable. En este caso se ha seleccionado una disposición en serie de los cables SMA, lo que resulta en la equivalencia a dos resistencias en serie por lo cual simplemente se han de sumar sus valores. Siendo el valor de resistividad del cable SMA de 150 μ m igual a **55 Ω /m, se tiene:**

$$R_{SMA1} = 55 \frac{\Omega}{m} \cdot 0,1m = 5,5 \Omega$$

$$R_{SMA2} = 55 \frac{\Omega}{m} \cdot 0,1m = 5,5 \Omega$$

$$R_{SMA} = R_{SMA1} + R_{SMA2} = 11 \Omega$$

Teniendo en cuenta que, según los datos del fabricante, la corriente para una contracción máxima en 2 segundos resulta de **410 mA**, podemos deducir la tensión máxima necesaria como:

$$V_{\max(SMA)} = R_{SMA} \cdot I_{\max} = 11 \cdot 0,4 = 4,4 \text{ V}$$

Ahora será posible determinar el circuito de potencia más adecuado para la excitación del actuador SMA.

Puesto que la potencia demandada por el SMA no es muy elevada, tan solo 1,76W. Es posible realizar la adaptación de potencia empleando amplificadores operacionales. De esta forma se ha diseñado un circuito de potencia en dos etapas, siendo la primera una adaptación de impedancias entre la salida de nuestra tarjeta de adquisición de datos y la etapa de amplificación, y la segunda un amplificador inversor que delimitará la tensión de salida máxima según $V_{\max(SMA)}$. Cabe notar que aun empleando un amplificador inversor, al ser nuestro actuador en base una resistencia, no interferirá en el resultado final.

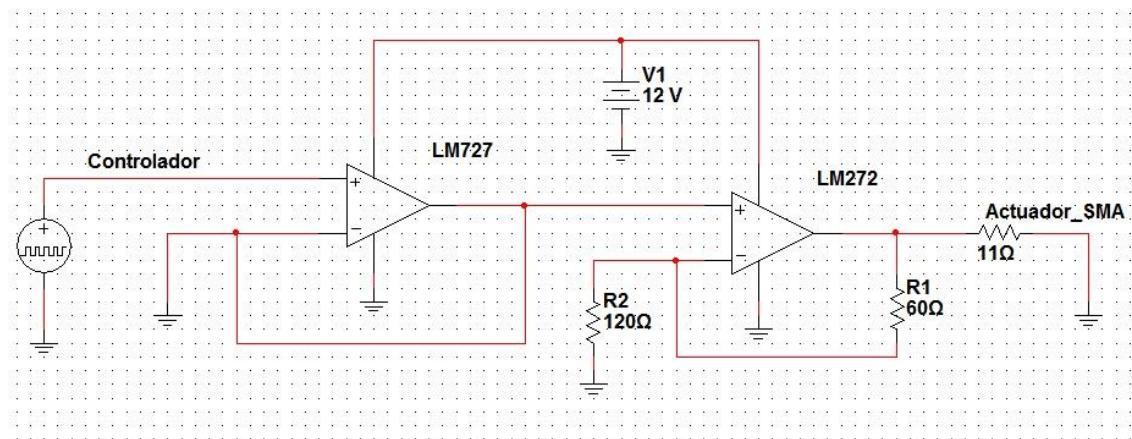


Figura 8.8. Esquema del circuito de potencia para el actuador SMA

8.3 Implantación del sensor de fuerza de cuarto de puente

Tras los estudios previos y haber comprobado las ventajas y desventajas de la implantación de sensores de fuerza de medio puente y cuarto de puente, se ha valorado que un sensor de cuarto de puente es suficiente para realizar las tareas necesarias en nuestro prototipo. Si Bien es necesario tener en cuenta que será necesario tener una etapa de amplificación de señal lo suficientemente potente como para no volver a obtener los errores de experimentos pasados. Para evitar este tipo de errores tendremos en cuenta el punto de funcionamiento de nuestro sensor y posteriormente valoraremos la amplificación necesaria.

En este caso hemos determinado que la galga extensiométrica será sometida a esfuerzos de compresión y para ello será pegada en el dorso de la mandíbula, esto es, en su cara exterior. El proceso de pegado está perfectamente definido en el Anexo III.

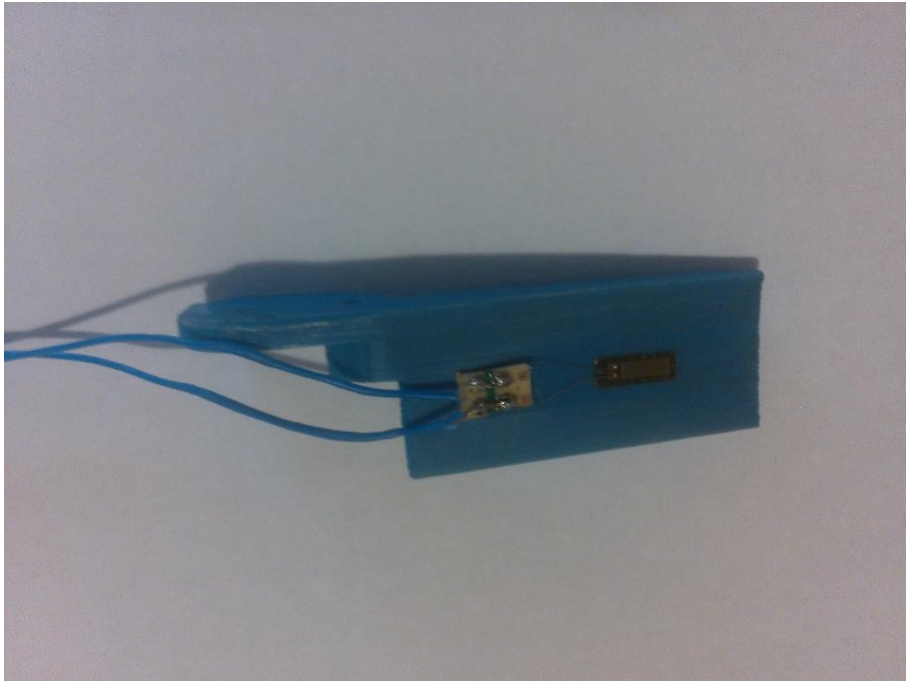


Figura 8.9. Galga extensiométrica adherirá en la cara anversa de la mandíbula

8.3.1 Calibración del sensor de fuerza de cuarto de puente

En esencia el experimento de calibración es el mismo que el realizado en el capítulo 6 para el sistema de la Pseudo-pinza. Aunque en este caso surge una complicación añadida al no contar con una superficie de apoyo sobre la cual ejercer la sujeción de la mandíbula ya que (tal y como se puede observar en la imagen) en su parte inferior no existe apenas superficie de contacto para la sujeción.

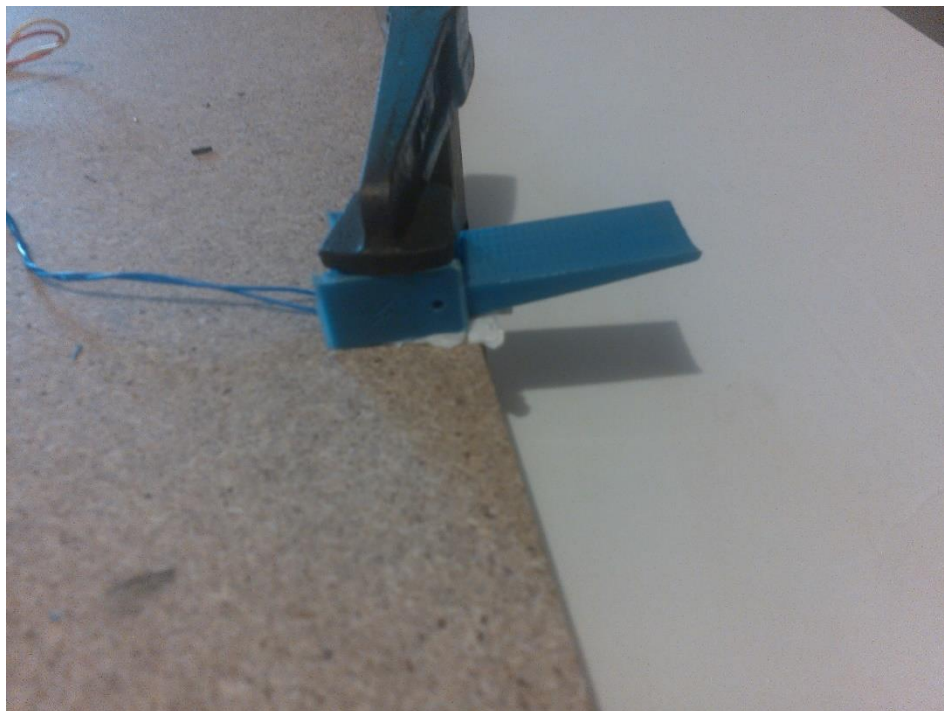


Figura 8.10. Posición de la mandíbula para la calibración del sensor

Debido a esto se ha diseñado una estructura de apoyo que ayudará en el experimento de calibración. Esta estructura es simple, ya que se reduce a dos placas “encajables” que ayudarán a aportar estabilidad.

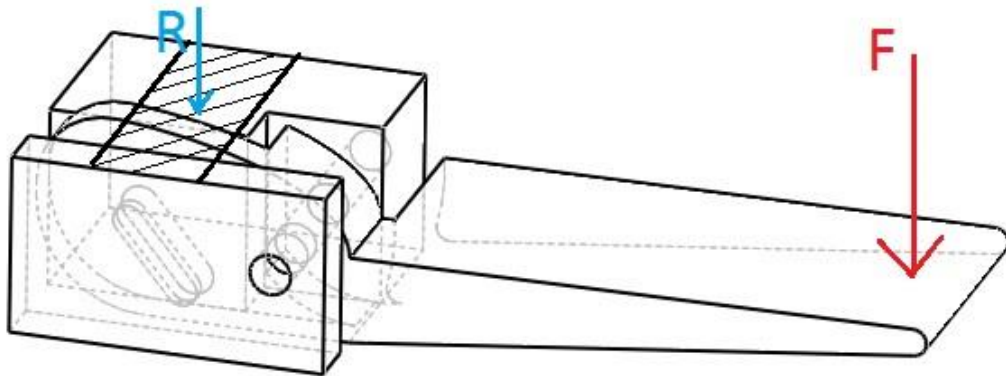


Figura 8.11. Esquema de calibración del sensor para el prototipo

Al igual que en el anterior experimento de calibración, colgaremos una serie de masas de precisión del punto determinado como punto de aplicación de la carga y tomaremos las lecturas de tensión de salida del sensor de fuerza. Repetiremos 3 veces el proceso y se tomarán como resultado final los valores medios obtenidos.

Al intentar realizar esta calibración se ha sucedido un problema inesperado que no nos permite continuar. Por motivos que no se han logrado solucionar, la adaptación electrónica del sensor no funciona correctamente, arrojando unos valores de tensión a la salida del amplificador operacional de instrumentación que no se corresponden con la señal medida antes del integrado INA131. A pesar de haber cambiado el circuito integrado hasta en tres ocasiones y a pesar de haber desmontado y vuelto a montar todo el circuito en otras dos ocasiones, por falta de más tiempo ha sido imposible resolver el problema surgido.

De esta forma nos resulta imposible comprobar el funcionamiento con realimentación de fuerza del modelo mecánico de pinza CMI propuesto y avanzar en la consecución de los objetivos marcados.

8.3.2 Control en lazo abierto con visualización de fuerza.

Para tratar de sustituir el objetivo perdido, se decide implementar el modelo prototipo de pinza CMI para su control en lazo abierto mediante la actuación de un potenciómetro y además mediante la visualización de la fuerza ejercida con la pinza mediante la iluminación de una serie de diodos LED. A pesar de distar en sobremanera de los objetivos primeros, este desarrollo se ha implementado para poder tener una visualización gráfica del modelo mecánico propuesto.



Capítulo 9.

Conclusiones y disposiciones finales





9 Conclusiones y disposiciones finales

9.1 Valoración de los resultados obtenidos.

Tras todo el trabajo realizado, donde hemos desarrollado sensores de fuerza, hemos desarrollado sistemas mecánicos para la simulación de una pinza y hemos realizado gran cantidad de experimentos de control con realimentación de fuerza, ha sido posible observar a lo largo del Capítulo 7 como es viable el seguimiento de las consignas de fuerza establecidas por un sensor implementado en una pseudopinza, obteniendo una respuesta de gran calidad y a toda vista aceptable.

Aunque por otro lado se han hecho patentes ciertas limitaciones inherentes a los actuadores basados en SMA como son la fuerza aplicada y la velocidad o frecuencia límite de trabajo.

En vistas de mejorar el primer factor, se trató de realizar un nuevo experimento con un nuevo diseño mecánico que fuera semejante al de una pinza CMI real y además se optó por implementar nuevos actuadores SMA de mayor diámetro que aportaran mayor esfuerzo de trabajo. Estos cambios han quedado sin poder ser comprobado, tal y como ya se ha explicado en el capítulo anterior, a causa de serios problemas con la implementación electrónica del sensor de fuerza y por tanto quedan emplazados a futuros estudios.

Es posible estimar que la frecuencia de trabajo no debería resultar un problema a la hora de una actuación real puesto que las actuaciones de cirugía se basan en movimientos suaves y precisos en los que la velocidad no es un factor primordial.

En definitiva, es posible aseverar que los actuadores basados en SMA son totalmente válidos para la realización de las tareas demandadas y por tanto resultan especialmente adecuados para su implementación en las pinzas CMI.

9.2 Conclusiones.

Teniendo en cuenta los objetivos marcados desde un principio, los cuales hacían referencia a lograr un aprendizaje de mayor calado de las características de los actuadores basados en SMA en aplicación directa a la actuación electrónica de pinzas CMI, así como el desarrollo su adaptación electrónica, el diseño mecánico de la pinza y el diseño de los sensores de fuerza necesarios para obtener una realimentación de la presión ejercida en la obturación de la pinza; es posible afirmar de forma rotunda que han cumplido la totalidad de los objetivos propuestos.

Si bien es verdad que el último prototipo de pinza actuado electrónicamente con realimentación de fuerza no ha resultado ser funcional debido a problemas con la adaptación electrónica del sensor de fuerza, si se han realizado todos los estudios necesarios con el primer prototipo para confirmar que es posible controlar los actuadores SMA mediante consignas de fuerza tomadas en tiempo real por un sensor implementado en la propia pinza.



En adición, se han realizado modelos y estudios mecánicos de posibles pinzas actuadas con aleaciones con memoria de forma. Quedando pendiente su ensayo para confirmar su viabilidad.

Por último, cabe resaltar como gracias a las diferentes disciplinas que confluyen en la realización de este trabajo ha sido posible desarrollar un profundo aprendizaje de un software de ingeniería como es SolidWorks, lo cual me permite extender mis conocimientos desde los más específicos de electrónica, instrumentación y control hasta el diseño, modelado y análisis mecánico.

9.3 Futuros estudios y disposiciones finales.

Este trabajo no plantea un punto y final en lo que se refiere a investigación acerca de los cables SMA como actuadores, si no que deja muchas puertas abiertas para que puedan ser realizados muchos más trabajos dentro de este campo.

En consecuencia directa de este trabajo sería posible seguir realizando experimentos para comprobar la viabilidad técnica del diseño mecánico defendido en el capítulo anterior. Por su parte, también podrían ser propuestos nuevos modelos de pinza para realizar un estudio comparativo entre los diferentes modelos y de esta forma encontrar el modelo de óptimo funcionamiento.

También consecuencia directa del presente, queda abierta la posibilidad de experimentar con cables SMA de mayor diámetro que puedan aportar mayores fuerzas de obturación, aunque en principio es de suponer que su actuación será más lenta. Por tanto sería interesante poder obtener una relación entre la fuerza de obturación y el diámetro del cable enfrentado con los tiempos de respuesta y las frecuencias máximas de trabajo.

A raíz de la investigación realizada acerca de las pinzas CMI, así como los estudios realizados sobre sensores de fuerza basados en galgas extensiométricas, se ha podido constatar que la viabilidad de la implementación real de este tipo de sensores dentro de las pinzas CMI puede llegar a ser muy compleja ya que las múltiples formas y diseños de las pinzas hacen compleja la implementación de galgas extensiométricas debido sobre todo a su tamaño. Como parte de la investigación de los sensores de fuerza existentes, se ha percibido que los sensores basados en el efecto piezoeléctrico como poliméricos PVDF.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Estudio comparativo de Actuadores SMA vs Motor DC. Diseño y construcción de una plataforma de pruebas. Guillermo Ramírez, 2.012.
- [2] Control de posición usando “Shape Memory Alloy” (SMA): diseño y construcción de una plataforma de experimentación para comparativa con motores DC. Ginés Moreno, 2.014.
- [3] At-Tasrif (La prescripción). Abul Quasim al-Zaharawi
- [4] Estudio e implementación de actuadores basados en aleaciones SMA. Andrés González-Quijano Álvarez, 2.010
- [5] Surgery grippers for Minimally invasive Heart Surgery. Damien Sallé et all, 2.004.
- [6] A self-Sensing Microgripper Module With Wide Handling Ranges. Chao-Chen Lan et all, 2.010.
- [7] Aleaciones con Memoria de Forma. Silvia de la Flor, 2.005.
- [8] Embedded SMA wire actuated biomimetic Fin. ZhenlongWang et all,
- [9] Tactile feedback control for a gripper driven by SMA springs. Chao-Chieh Lan et all, 2.012.
- [10] Apuntes de instrumentación electrónica. F.J. Ortiz, 2.015.
- [11] Instrumentación electrónica. M.A. Pérez Garcia et all, 2.004.
- [12] Sensores y acondicionadores de señal. Ramón Pallás Areny, 1.998.





Anexos





Anexo I. Códigos desarrollados para el control de los actuadores a través de Matlab





Escalón para los sistemas SMA1-SMA2

% Este programa da un escalón desde arduino al SMA1 o SMA2 y ...

% representa su posición o velocidad en función del tiempo.

%Se declaran como variables globales tiempo y salida.

`global` tiempo;

`global` salida;

tiempo=[];

salida=[];

poten=[];

vel=[];

tic; % Empiezo a contar tiempo

`while` toc <= 5 % Mientras toc sea menor que ese valor en segundos, se...

 % seguirá entregando intensidad al SMA

 a.analogWrite(10,255); % Se activa a 5V la salida 10(SMA1) o 5(SMA2)

 av=(a.analogRead(0)); % Se lee el valor del potenciómetro

 % Valor 0 para el SMA1 y 3 para el SMA2

 poten=[poten av]; % En poten se guardan los valores leídos.

 pos=(av-poten(1))/-2.84167; % Pasa la resolución del potenciómetro...

 %pos=(av-poten(1))/-51.15; % a grados o mm (segunda ecuación),...

 % según estemos con el SMA1 o SMA2

 salida=[salida pos]; % En salida guarda la posición en grados o mm

 tiempo=[tiempo toc]; % En tiempo se guarda el tiempo de cada muestra



```
end
```

```
a.analogWrite(10,0); % Ponemos a 0V la salida 10(SMA1) o 5(SMA2)
```

```
% Muestra la gráfica Tiempo / Posición
```

```
salidaSMA2g=salida;
```

```
timepog=tiempo;
```

```
hold on
```

```
plot(tiempo,salida,'y','Linewidth',2), grid on,
```

```
xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Desplazamiento (grados)')
```

Para cambiar el sistema a excitar es necesario variar el direccionamiento de la salida y el de la entrada. Además también será necesario cambiar la ecuación de calibración del sensor de posición. Estas acciones se llevan a cabo descomentando las líneas de código necesarias.



Escalón para los sistemas motorDC1 y motorDC2

% Este programa da un escalón al motor1 DC o motor2 DC y representa su
% posición o velocidad en función del tiempo.

global tiempo; %Se declaran como variables globales tiempo y salida.

global salida;

tiempo=[];

salida=[];

poten=[];

vel=[];

tic; % Se empieza a contar tiempo

a.digitalWrite(12,0) % Pin 12 a cero (sentido contrario agujas reloj)

while toc < 4 % Mientras toc sea menor que ese valor en segundos, % se seguirán
recogiendo datos

if toc <= 0.3

 a.analogWrite(11,200); % Se aporta el valor de voltaje % establecido, a la salida
11 (motor1 DC)

else % o a la 6 (motor2 DC)

 a.analogWrite(11,0); % Ponemos a 0V la salida 11(motor1 DC) o 6(motor2 DC)

end

 av=(a.analogRead(0)); % Se lee el valor del potenciómetro, 0 para el motor1 DC y 3
para el motor2 DC

 poten=[poten av]; % En poten se guardan los valores leídos.

 gra=(av-poten(1))/-2.84167; %Pasa la resolución del potenciómetro

 %gra=(av-poten(1))/-51.15; %a grados (primera ecuación)o mm según estemos con
motor1 o motor2 DC

 salida=[salida gra]; % En salida guarda la posición en % grados o mm

 tiempo=[tiempo toc]; % En tiempo se guarda el tiempo de % cada muestra

end



```

% Se realizan los incrementos de posición:
incdat=salida(2:length(salida))-salida(1:length(salida)-1);

% Se realizan los incrementos de tiempo:
inct=tiempo(2:length(tiempo))-tiempo(1:length(tiempo)-1);

vel=incdat./inct; % Se obtiene la velocidad

% Para velocidad, quito a tiempo y salida un valor para que sean del mismo tamaño
que el vector "vel"

tiempo=tiempo(1:length(tiempo)-1);
salidaDC8=salida(1:length(salida)-1);

% Muestra la gráfica Tiempo / Posición
hold on
plot(tiempo,salidaDC8,'y','Linewidth',2), grid on,
xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Desplazamiento (grados)')
%xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Desplazamiento (mm)')

```

Al igual que antes, será necesario descomentar las líneas de código oportunas para cambiar entre los sistemas.

Control PID de posición sistemas SMA1 y SMA2

% Programa para realizar el control en lazo cerrado de los cables

% SMA1 o SMA2 mediante un controlador PID, con diferentes variables

% para la realimentación y ante distintas señales de entrada.

`global` tiempo; %declaro las variables globales

`global` salida;

`global` control;

`global` temperatura;

`global` intensidad;

eacum=0; %igualo constantes a cero

eant=0;

e=0;



```

v=0;

tiempo=[]; %digo que las variables son un vector cero

salida=[];

control=[];

temperatura=[];

intensidad=[];

error=[];

poten=[];

potencia=[];

resistencia=[];

media100=[];

media100=0;

tiempo1=0;

% REFERENCIA DE ESCALONES.

% Para movimiento angular:

refer=[zeros(1,100) 190*ones(1,600) 90*ones(1,600) 190*ones(1,600)
40*ones(1,600) 150*ones(1,600) zeros(1,600)];

% Para movimiento lineal:

%refer=[zeros(1,100) 7*ones(1,600) 4*ones(1,600) 7*ones(1,600)...
%2*ones(1,600) 6*ones(1,600) zeros(1,600)];

% REFERENCIA DE RAMPAS.

% Para movimiento angular:

% refer=[zeros(1,100)];

% for r=1:350

% if r<1800

% grad=(190/1800)*r;

% refer=[refer grad];

% elseif r>=1800 && r<3500

% grad=-((190/1700)*r+391.17647);
    
```



```

% refer=[refer grad];

% end

% end

%refer=[refer zeros(1,101)];

%Para movimiento lineal:

%refer=[zeros(1,100)];

%for r=1:3500

% if r<1800

% grad=(7/1800)*r;

% refer=[refer grad];

%elseif r>=1800 && r<3500

% grad=- (7/1700)*r+14.41176;

% refer=[refer grad];

%end

%end

%refer=[refer zeros(1,101)];

%REFERENCIA SENOIDAL

% Para movimiento angular:

%refer=[zeros(1,100)];

%rad=[0:0.054:6*pi];

%refer =[refer 60*sin(rad)+120];

%refer=[refer zeros(1,109)];

% Para movimiento lineal:

%Entrada senoidal

%refer=[zeros(1,100)];

%rad=[0:0.0054:6*pi];

%refer =[refer 3*sin(rad)+4];

%refer=[refer zeros(1,109)];

```



tic; %comienzo a contar tiempo

for i=1:3700

av=a.analogRead(0); %Lee potenciómetro y pasa a grados o mm

poten=[poten av];

%avolt=(5*av)/1024;

pos=(av-poten(1))/-2.84167; % Pasa la resolución del potenciómetro

%pos=(av-poten(1))/-51.15; % a grados o mm (segunda ecuación),...

% según estemos con el SMA1 o SMA2

salida=[salida pos];

%ti=a.analogRead(1); %Medir Temperatura

%te=(5*ti)/1024;

%tem=69.23077*te-120.3846; %Pasar de V a grados centígrados

%temperatura = [temperatura tem];

%int=a.analogRead(2); %Medir Intensidad

%inten=(5*int)/1024;

%inten=(inten-2.46); %Paso de V a mA

%intensidad = [intensidad inten*1000];

%if length(intensidad)>100 %Realiza la media de cada 100 valores

% cont=i; %de la intensidad

% med=mean(intensidad(cont-100:cont));

% media100=[media100 med];

%end

%eant=e;

%Rel=212.766*te-472.34; %relación temperatura con grados de giro

%if length(intensidad)>100

% Rel= 1.538*med-69.231; %relación Intensidad con grados de giro

%else Rel=refer(i);



```

%end

eant=e;

e=(refer(i)-pos); %Obtengo la señal de error de cada punto
error=[error e];

%PID

%Control proporcional del cable

p=0.04*e;

%u=p;

% Control integral

eacum=eacum+e;

in=eacum*0.05*0.0085;

%u=p;

% Control derivativo

d=(e-eant)*0.008/0.0085;

u=p+in+d;

v=round(u*255/5);

if v>=255

    v=255;

elseif v<=0

    v=0;

end

a.analogWrite(10,v); %envío la señal de control

tiempo1=[tiempo1 toc];

tiempo=[0:0.0085:0.0085*3699]; %Tiempo fijo para comparativa

control=[control 5*v/255];

%resistencia=[resistencia control(i)/intensidad(i)]; %Resistencia SMA

potencia=[potencia abs(control(i)*intensidad(i))]; %Potencia SMA

end

```



```
media100=[zeros(1,99) media100]; %añado ceros que le faltan a media100
pmedia=sum(potencia)/3700; %Obtengo potencia media
a.analogWrite(10,0);
%refertemp=[30*ones(1,100) 95.13*ones(1,600) 62.59*ones(1,600)...
%95.13*ones(1,600) 46.32*ones(1,600) 82.115*ones(1,600) 30*ones(1,600)];
referinten=[0*ones(1,100) 168.55*ones(1,600) 103.53*ones(1,600)...
168.55*ones(1,600) 71.02*ones(1,600) 142.54*ones(1,600) 40*ones(1,600)];
```

%GRÁFICAS. Modifico, dependiendo que quiera mostrar

```
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,refer,'k','Linewidth',2)
grid on
title('Control de posición para el servo')
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Desplazamiento (grados)')
%axis([0 35 0 220])
hold on,plot(tiempo,salida,'g','Linewidth',2)
legend('Referencia','Respuesta real')
subplot(3,1,2)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
%axis([0 35 -5 5])
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de Control (V)')
subplot(3,1,3)
plot(tiempo,media100,'r','Linewidth',2)
grid on
%axis([0 35 -5 5])
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Intensidad (mA)')
```




```

hold on,plot(tiempo,referinten,'k','Linewidth',2)
figure(2 )
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,error,'g','Linewidth',2)
grid on
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Error (grados)')
%axis([0 35 0 220])
subplot(3,1,2)
plot(tiempo,intensidad,'b','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Intensidad (A)')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(tiempo,potencia,'g','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Potencia consumida (W)')
hold on, plot(tiempo,pmedia,'r','Linewidth',2)
grid on
Control PID de posición sistemas motorDC1 y motorDC2
% Programa para realizar el control en lazo cerrado de los motores DC
% motor1 DC o motor2 DC mediante un controlador PID, con diferentes

% variables para la realimentación y ante distintas señales de entrada.
global tiempo; %declaro las variables globales
global salida;
global control;
global intensidad;

tic;
eacum=0; %igualo constantes a cero

```



```
eant=0;
```

```
e=0;
```

```
v=0;
```

```
tiempo=[];
```

```
salida=[];
```

```
control=[];
```

```
intensidad=[];
```

```
poten=[];
```

```
potencia=[];
```

```
resistencia=[];
```

```
% REFERENCIA DE ESCALONES.
```

```
% Para movimiento angular:
```

```
refer=[zeros(1,40) 190*ones(1,240) 90*ones(1,240) 190*ones(1,240)
40*ones(1,240) 150*ones(1,240) zeros(1,240)];
```

```
% % Para movimiento lineal:
```

```
% refer=[zeros(1,100) 7*ones(1,600) 4*ones(1,600) 7*ones(1,600)...
```

```
% 2*ones(1,600) 6*ones(1,600) zeros(1,600)];
```

```
%REFERENCIA DE RAMPAS.
```

```
% Para movimiento angular:
```

```
% refer=[zeros(1,100)];
```

```
% for r=1:350
```

```
% if r<1800
```



```
%      grad=(190/1800)*r;
%      refer=[refer grad];
%      elseif r>=1800 && r<3500
%      grad=-(190/1700)*r+391.17647;
%      refer=[refer grad];
%      end
%      end
% refer=[refer zeros(1,101)];
```

%Para movimiento lineal:

```
% refer=[zeros(1,100)];
% for r=1:3500
%     if r<1800
%         grad=(7/1800)*r;
%         refer=[refer grad];
%     elseif r>=1800 && r<3500
%         grad=-(7/1700)*r+14.41176;
%         refer=[refer grad];
%     end
% end
% refer=[refer zeros(1,101)];
```

%REFERENCIA SENOIDAL

```
% % Para movimiento angular:
% refer=[zeros(1,100)];
% rad=[0:0.054:6*pi];
% refer =[refer 60*sin(rad)+120];
% refer=[refer zeros(1,109)];
```



```

%% Para movimiento lineal:
%
%% Entrada senoidal
% refer=zeros(1,100)];
% rad=[0:0.0054:6*pi];
% refer =[refer 3*sin(rad)+4];
% refer=[refer zeros(1,109)];
% tic; %comienzo a contar tiempo

for i=1:1480
    av=a.analogRead(0); %Leo potenciómetro y lo paso a grados o mm
    poten=[poten av];
    avolt=(5*av)/1024;
    pos=(av-poten(1))/-2.84167;% Pasa la resolución del potenciómetro...
    %pos=(av-poten(1))/-51.15; % a grados o mm (segunda ecuación),...
    % según estemos con motor1 DC o motor2 DC
    salida=[salida pos];
    int=a.analogRead(2); %Medida de Intensidad
    inten=(5*int)/1024;
    inten=(inten-2.46);
    intensidad = [intensidad inten];
    eant=e;
    e=(refer(i)-pos); %Saco la señal de error

%%end no se sabe a quien corresponde

%PID

```



```
%Control proporcional del cable
```

```
p=0.08*e;
```

```
%u=p;
```

```
% Control integral
```

```
% eacum=eacum+e;
```

```
% in=eacum*0.5*0.0085;
```

```
% u=p+in; %% depende de si se quiere integral o no
```

```
% Control derivativo
```

```
d=(e-eant)*0.1; %Meter el error anterior bien
```

```
u=p + d;
```

```
v=round(u*255/5);
```

```
if v>0
```

```
    if v>=135
```

```
        v=135;
```

```
    elseif v<=0
```

```
        v=0;
```

```
    end
```

```
    v=v+120;
```

```
    a.digitalWrite(12,0); %Sentido contrario a las agujas del reloj: 12 DC1, 7 DC2
```

```
    a.analogWrite(11,v); %Señal de control: 11 DC1, 6 DC2
```

```
elseif v<0
```

```
    v=-v;
```

```
    if v>=165
```

```
        v=165;
```

```
    elseif v<=0
```



```

v=0;

end

v=v+90;

a.digitalWrite(12,1); %Sentido igual a las agujas del reloj: 12 DC1, 7 DC2

a.analogWrite(11,v); %Señal de control: 11 DC1, 6 DC2

v=-v;

end

tiempo=[tiempo toc];

%tiempo=[0:0.0085:0.0085*3699];

control=[control 5*v/255];

resistencia=[resistencia control(i)/intensidad(i)]; %Resistencia Motor
potencia=[potencia abs(control(i)*intensidad(i))]; %Potencia Motor

end %% se supone que este es el de bucle for

pmedia=sum(potencia)/370; % Obtención de potencia media
a.analogWrite(11,0); %Señal de control: 11 DC1, 6 DC2

%GRÁFICAS. Dependiendo que queramos mostrar, han de modificarse
figure(1)
subplot(2,1,1)
plot(tiempo,refer,'k','Linewidth',2)
grid on
title('Control de posición para el servo')
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Desplazamiento (grados)')
%axis([0 9 0 250])

```



```
hold on,plot(tiempo,salida,'g','Linewidth',2)
legend('Referencia','Respuesta real')
subplot(2,1,2)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
%axis([0 9 -5 5])
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de Control (V)')
figure(2)
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de control(V)')
%axis([0 35 0 220])
subplot(3,1,2)
plot(tiempo,intensidad,'b','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Intensidad (A)')
grid on
subplot(3,1,3)
plot(tiempo,potencia,'g','Linewidth',2)
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Potencia consumida (W)')
hold on, plot(tiempo,pmedia,'r','Linewidth',2)
grid on
```



Escalón para el sistema de Pseudo-pinza

global tiempo;

global salidaPos;

global salidaF;

escalon=[];

tiempo=[];

salidaPos=[];

salidaF=[];

SalidaFiltrada=[];

salidaFuerzaoffset=[];

poten=[];

fuerzaAnalog=[];

vel=[];

tic; % Empiezo a contar tiempo

while toc <= 10 % Mientras toc sea menor que ese valor en segundos, se...

 % seguirá entregando intensidad al SMA

 a.analogWrite(10,255); % Se activa a 5V la salida 10(SMA1) o 5(SMA2)

 escalon= [escalon 0.5];

 av=(a.analogRead(0)); % Se lee el valor del potenciómetro del SMA1 (0)

 Fanalog=a.analogRead(4); % Se lee el valor del sensor de fuerza

 fuerzaAnalog=[fuerzaAnalog Fanalog]; %Se guardan los valores en el vector "fuerza"

 poten=[poten av]; % En poten se guardan los valores leídos.

 pos=(av-poten(1))/-2.84167; %Conversión a grados del potenciómetro

 fuerzaN=2*((Fanalog*5/1024)*0.5299)-0.2187; %%(ecuacion de calibracion)

 salidaF=[salidaF fuerzaN];

 salidaPos=[salidaPos pos]; % En salida guarda la posición en grados



```
tiempo=[tiempo toc]; % En tiempo se guarda el tiempo de cada muestra  
end
```

```
a.analogWrite(10,0); % Ponemos a 0V la salida 10(SMA1) o 5(SMA2)  
salidaFuerzaoffset=salidaF-salidaF(1);
```

```
figure  
subplot(2,1,1)  
plot(tiempo,salidaPos,'g','Linewidth',2), grid on,  
xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Desplazamiento (grados)')  
subplot(2,1,2)  
plot(tiempo,salidaF,'b','Linewidth',2), grid on,  
hold  
% plot(tiempo,escalon,'r')  
plot(tiempo,salidaFuerzaoffset,'g')  
xlabel('Tiempo (seg.)'), ylabel('Fuerza (N)')
```



Control PID con realimentación de posición para sistema de Pseudo-pinza

% Programa para realizar el control en lazo cerrado de los cables

% SMA1 mediante un controlador PID con realimentación de fuerza

%declaro las variables globales

`global` tiempo;

%inicializamos las variables en cero

ErrorAcum=0;

ErrorAnt=0;

Error=0;

v=0;

av=0;

avol=0;

pos=0;

Fv=0;

fuerza=0;

t1= 98;

t2=2*t1;

t3=3*t1;

t4=4*t1;

t5=5*t1;

t6=6*t1;

tfinal = 540*round(t1*6);

incr= 0.008;

%Inicilizamos las variables vector en cero

tiempo=zeros(1,tfinal);

salida_fuerza=zeros(1,tfinal);

salidaPos=zeros(1,tfinal);



```

control=zeros(1,tfinal);
fuerza_voltios =zeros(1,tfinal);
SalidaFiltrada=zeros(1,tfinal);
error_=zeros(1,tfinal);
potenciometro=zeros(1,tfinal);
salidaOffset=zeros(1,tfinal);
control_fuerza=zeros(1,tfinal);
fuerza_anlog=zeros(1,tfinal);
control_tension=zeros(1,tfinal);
u_c=zeros(1,tfinal);
%%% Determina las constantes del PID
% Kp=366/205;
Kp=2.3;
Tipi=1;
Td=0.205;
% REFERENCIA DE ESCALONES.
refer=[zeros(1,40)    0.7*ones(1,100)    0.1*ones(1,100)    0.4*ones(1,100)
0.75*ones(1,100) 0.3*ones(1,100)];
errorAnt=refer(1);

%% Referencia de rampa.
% refer=zeros(1,tfinal);
% for r=2:tfinal
%   if r<t1
%       refer(r)=refer(r-1)+incr;
%   elseif r>=t1 && r<=t2
%       refer(r)=refer(r-1)-incr;
%   elseif r >t2 && r<=t3
%       refer(r)=refer(r-1)+incr;
%   elseif r>t3 && r<t4

```



```

%   refer(r)=refer(r-1)-incr;

%   elseif r>=t4 && r <t5

%   refer(r)=refer(r-1)+incr;

%   elseif r>= t5 && r< t6

%   refer(r)=refer(r-1)-incr;

%   else

%   refer(r)=0;

%   end

% end

%Referencia senoidal

% t=0:6/tfinal:6-(6/tfinal);

% refer= 0.15*sin(2*pi*t/2-pi/2)+0.15;

tic; %comienzo a contar tiempo

for i=2:tfinal

    av=(a.analogRead(0)); % Se lee el valor del potenciómetro del SMA1 (0)

    potenciometro(i)=av; % En poten se guardan los valores leídos.

    avolt=(5*av)/1024; % cambio de la resolucion de arduino a voltios

    pos=(av-potenciometro(1))/-2.84167; % Pasa la resolución del potenciómetro

    Fv=a.analogRead(4); % Se lee el valor del sensor de fuerza

    fuerza_anlog(i) = Fv;

    fuerza_voltios(i)=Fv*5/1024; %Se guardan los valores de PWM en el vector
    "fuerza"

    fuerza=fuerza_voltios(i)*0.5299 -0.2187; %% Determinamos el valor instantaneo
    de fuerza en N

    salida_fuerza(i)=2*fuerza; %%% Se añade el valor de offset necesario ( hay algun
    error porque varia)

```



```

salidaPos(i)=pos; %% En salida guarda la posición en grados
salidaOffset(i)=salida_fuerza(i)-salida_fuerza(2);
tiempo(i)=toc; % guardamos el tiempo

%% Actualizamos los valores de error
Error=(refer(i)-salidaOffset(i)); %% Obtengo la señal de error de cada punto
ErrorAnt=Error;
ErrorAcum=Error+ErrorAcum;
error_(i)=Error;%% Creamos un vector con el error en cada instante
%%%% Sintonia del controlador PID
%% Control proporcional
Proporcional=Kp*Error;
%% Control integral
ErrorAcum=ErrorAcum+Error;
Integral=(Kp/Tipi)*Error*(tiempo(i)-tiempo(i-1));
%% Control derivativo
% Derivativo =Kp*Td*(Error-ErrorAnt)/0.2;
%%Señal de control
u=(1.23*(Proporcional)-0.1057);
u=(1.23*(Proporcional+Integral)-0.1057); %%% Convierte la señal de control de
Newton a voltios
u_c(i)=u;
% u=Proporcional+Derivativo;
%%%% Señal de control y saturación
v=round(u*255/5); %%% se traduce a la salida PWM de arduino mediante el
entero mas proximo (round())
if v>=255 %%% Se establece el nivel de saturacion superior en 5 voltios
    v=255;
elseif v<=0 %%% Se establece el nivel de saturacion inferior en 0 voltios
    v=0;

```



```
end
a.analogWrite(10,v); %envío la señal de control al SMA

control(i)=v; % guardamos la señal de control
control_tension(i)= u;
end
a.analogWrite(10,0);

%%% GRÁFICAS de resultados
figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(tiempo,refer,'k','Linewidth',2)
hold on
plot(tiempo,salidaOffset,'g','Linewidth',2)
grid on
title('Control de fuerza de la pinza')
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Fuerza (N)')
legend('Referencia','Respuesta real')

subplot(3,1,2)
plot(tiempo,control,'g','Linewidth',2)
grid on
title('Señal de control')
xlabel('Tiempo (seg.)'); ylabel('Señal de Control (V)')

subplot(3,1,3)
plot(tiempo,error_,'g','Linewidth',2)
grid on
```



```
title('Error')
xlabel('Tiempo (seg.); ylabel('Error (N)')

% figure
% plot(tiempo,salidaOffset)
```

Este código es válido tanto para el sensor de medio puente como para el de cuarto de puente, tan solo será necesario modificar la ecuación de calibración para una lectura de fuerza correcta. Además, está preparado para poder variar la señal de consigna según se desee una señal de escalones, de rampa o senoidal.



Anexo II. Hojas de características de los componentes electrónicos empleados

1. Flexinol actuator wires
2. Galgas extensiométricas
3. Amplificador operacional INA131
4. Amplificador operacional LM284
5. Arduino Uno





Technical Characteristics of



Actuator Wires

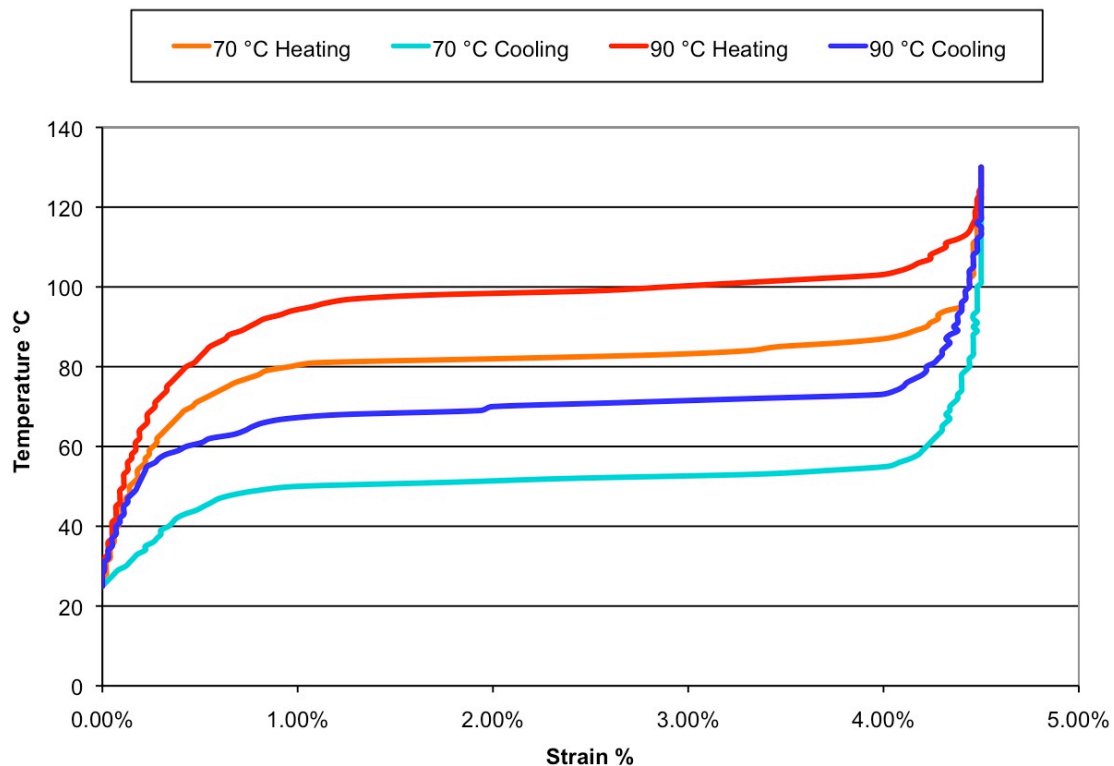
Flexinol® Actuator Wires are small diameter wires which contract like muscles when electrically driven. Smaller than motors or solenoids, cheaper and generally easier to use, these wires perform physical movement across an extremely wide variety of applications.

Table of Contents

Physical Properties Summary	2
Introduction	3
Section 1. Movement	4
Section 2. Electrical Guidelines	6
Section 3. Cycle Time	7
Section 4. Miscellaneous	9
Section 5. Underlying Technology	11

NICKEL - TITANIUM ALLOY PHYSICAL PROPERTIES

1. Density	0.235 lb/in ³ (6.45 g/cm ³)
2. Specific Heat	0.20 BTU/lb * °F (0.2 cal/g * °C)
3. Melting Point	2370 °F (1300 °C)
4. Latent Heat of Transformation	10.4 BTU/lb (5.78 cal/g)
5. Thermal Conductivity	10.4 BTU/hr * ft * °F (0.18 W/cm * °C)
6. Thermal Expansion Coefficient	
Martensite	3.67x10 ⁻⁶ /°F (6.6x10 ⁻⁶ /°C)
Austenite	6.11x10 ⁻⁶ /°F (11.0x 10 ⁻⁶ /°C)
7. Poisson Ratio	0.33
8. Electrical Resistivity (approx.)	
Martensite:	32 micro-ohms * in (80 micro-ohms * cm)
Austenite:	39 micro-ohms * in (100 micro-ohms * cm)



Typical Temperature vs. Strain Characteristics for Dynalloy's standard 158°F (70°C) "LT" and 194°F (90°C) "HT" Austenite start temperature alloys, at 172 MPa



Introduction

Flexinol® is a trade name for shape memory alloy actuator wires. Made of nickel-titanium these small diameter wires contract like muscles when electrically driven. This ability to flex or shorten is characteristic of certain alloys that dynamically change their internal structure at certain temperatures. The idea of reaching higher temperatures electrically came with the light bulb, but instead of producing light these alloys contract by several percent of their length when heated and can then be easily stretched out again as they cool back to room temperature. Like a light bulb both heating and cooling can occur quite quickly. The contraction of Flexinol® actuator wires when heated is opposite to ordinary thermal expansion, is larger by a hundredfold, and exerts tremendous force for its small size. The underlying technology that causes the effect is discussed in Section 5. The main point is that movement occurs through an internal "solid state" restructuring in the material that is silent, smooth, and powerful.

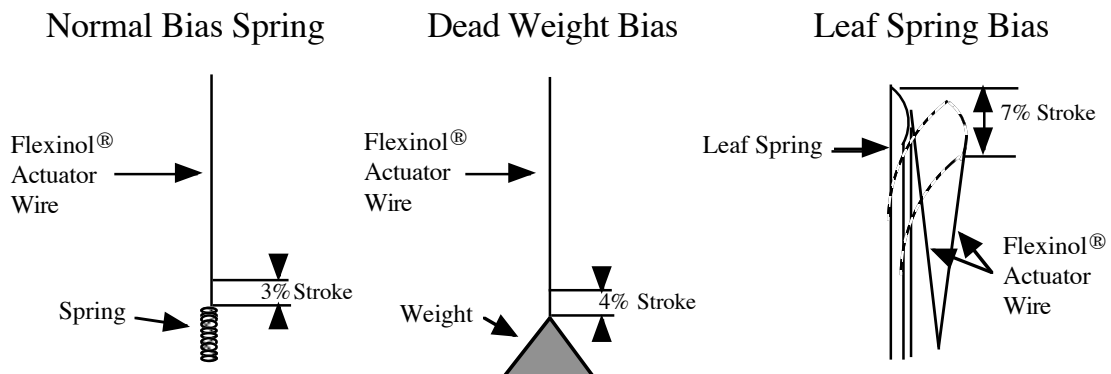
This effect can be used in many ways. The list of viable applications is too long for any single listing. A safe assumption is that any task requiring physical movement in a small space with low to moderate cycling speeds is something that most likely will be better done with actuator wires. Many of the tasks currently being done with small motors or solenoids can be done better and cheaper with Flexinol® actuator wires. Since the actuator wires are much smaller for the work they do a number of new products and improved designs on existing products are readily accomplished.

For new users of Flexinol® actuator wires, Dynalloy, Inc. strongly recommends that an overview of what can be done first be established. This can be done by obtaining one of the Dynalloy, Inc. kits, which is made for such familiarization. Secondly, new users should consider obtaining from Dynalloy, Inc. or other consultants a "Proof of Concept" working model. This is not only useful as an internal marketing and sales tool. It also helps the new user to see how those with more experience approach the specific task in hand. Knowing this provides immeasurable insight into how to proceed and helps reduce the redundancy of reinventing existing techniques. One can always improve on existing methods and sufficient legal and other safeguards can be readily employed to ensure protection of proprietary ideas.

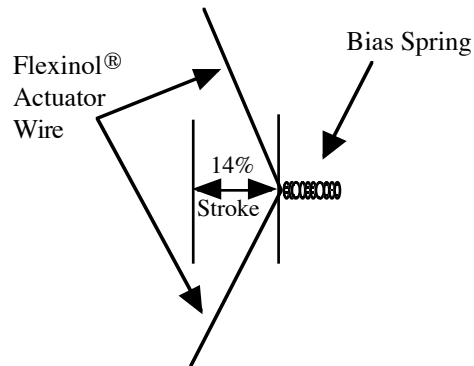
Section 1. Movement

The movement or stroke of Flexinol® actuator wire is measured as a percentage of the length of the wire being used and is determined, in part, by the level of stress one uses to reset the wire, or to stretch it in its low temperature phase. This opposing force, used to stretch the wire, is called the bias force. In most applications, the bias force is exerted on the wire constantly, and on each cycle as the wire cools, this force elongates it. If no force is exerted as the wire cools, very little deformation or stretch occurs in the cool, room temperature state and correspondingly very little contraction occurs upon heating. Up to a point the higher the load the higher the stroke. The strength of the wire, its pulling force and the bias force needed to stretch the wire back out are a function of the wire size or cross sectional area and can be measured in pounds per square inch or “psi”. If a load of 5,000 psi (34.5 MPa) is maintained during cooling, then about 3% memory strain will be obtained. At 10,000 psi (69 MPa), about 4% results, and with 15,000 psi (103 MPa) and above, nearly 5% is obtained. However, there is a limit to how much stress can be applied.

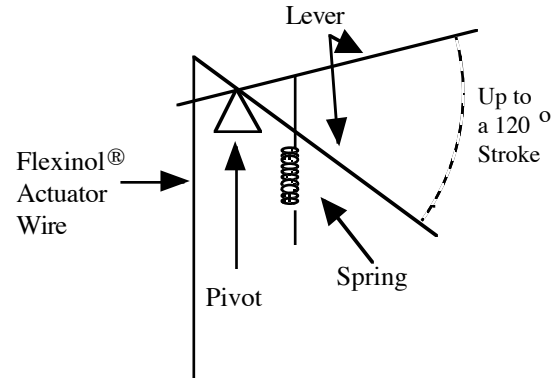
Far more important to stroke is how the wire is physically attached and made to operate. Dynamics in applied stress and leverage also vary how much the actuator wires move. While normal bias springs that increase their force as the Flexinol® actuators contract have only 3-4% stroke, reverse bias forces which decrease as the actuator wires contract can readily allow the wire to flex up to 7%. Mechanics of the device in which it is used can convert this small stroke into movements over 100% of the wires' length and at the same time provide a reverse bias force. The stress or force exerted by Flexinol® actuator wires is sufficient to be leveraged into significant movement and still be quite strong. Some basic structures, their percent of movement, and the approximate available force they offer in different wire sizes are as follows:



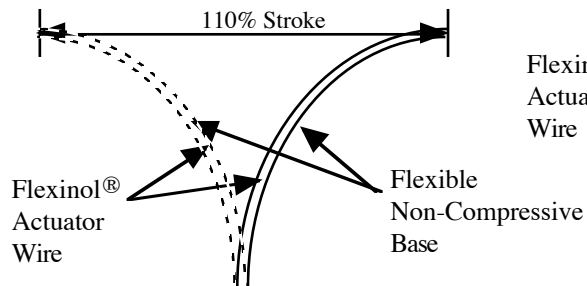
Right Angle Pull



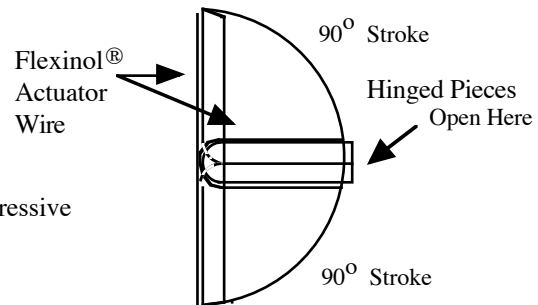
Simple Lever



Adjusting Curvature



Clam Shell



Stroke and Available Force Table

	Approx. Stroke	0.003" Wire (0.076 mm)	0.006" Wire (0.15 mm)	0.010" Wire (0.25 mm)
Normal Bias Spring	3%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Dead Weight Bias	4%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Leaf Spring Bias	7%	0.18 lb (80 g)	0.73 lb (330 g)	2.05 lb (930 g)
Right Angle Pull	14%	0.04 lb (20 g)	0.18 lb (83 g)	0.51 lb (232 g)
Simple Lever (6:1 ex)	30%	0.024lb (11 g)	0.10 lb (47 g)	0.29 lb (133 g)
Adjusting Curvature	110%	0.006 lb (3 g)	0.026 lb (12 g)	0.075 lb (34 g)
Clam Shell	100%	0.007 lb (3.2 g)	0.028 lb (13 g)	0.082 lb (37 g)

Section 2. Electrical Guidelines

If Flexinol® actuator wire is used in the appropriate conditions, then obtaining repeatable motion from the wire for tens of millions of cycles is reasonable. If higher stresses or strains are imposed, then the memory strain is likely to slowly decrease and good motion may be obtained for only hundreds or a few thousands of cycles. The permanent deformation that occurs in the wire during cycling is heavily a function of the stress imposed and the temperature under which the actuator wire is operating. Flexinol® wire has been specially processed to minimize this straining, but if the stress is too great or the temperature too high, some permanent strain will occur. Since temperature is directly related to current density passing through the wire, care should be taken to heat, but not overheat, the actuator wire. The following charts give rough guidelines as to how much current and force to expect with various wire sizes.

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Pull Force* pounds (grams)	Cooling Deformation Force* pounds (grams)	Approximate** Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158°F, 70°C “LT” Wire *** (seconds)	Cooling Time 194°F, 90°C “HT” Wire *** (seconds)
0.001 (0.025)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	0.008 (3.6)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.038)	22.6 (890)	0.04 (20)	0.016 (8)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	0.032 (14)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	0.07 (32)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	0.12 (57)	200	1.1	0.9
0.005, (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	0.20 (89)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	0.28 (128)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	0.50 (228)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	0.78 (356)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1.13 (512)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2004)	1.77 (802)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	3.14 (1424)	4000	16.8	14.0

* The Heating pull force is based on 25,000 psi (172 MPa), which for many applications is the maximum safe stress for the wire. However, many applications use higher and lower stress levels. This depends on the specific conditions of a given design. The cooling deformation force is based on 10,000 psi (70 MPa), which is a good starting point in a design. Nonetheless, this value can also vary depending on how the material is used.

** The contraction time is directly related to current input. The figures used here are only approximate since room temperatures, air currents, and heat sinking of specific devices vary. On small diameter wires (<= 0.006" diameter) currents that heat the wire in 1 second can typically be left on without over-heating it.

*** Approximate cooling time, at room temperature in static air, using a vertical wire. The last 0.5% of deformation is not used in these approximations.



Section 3. Cycle Time

The contraction of the Flexinol® actuator wire is due solely to heating and the relaxation solely to cooling. Both contraction and relaxation are virtually instantaneous with the temperature of the wire. As a result mechanical cycle speed is dependent on and directly related to temperature changes. Applying high currents for short periods of time can quickly heat the wire. It can be heated so fast in fact that the limiting factor is not the rate at which heating can occur but rather the stress created by such rapid movement. If the wire is made to contract too fast with a load, the inertia of the load can cause over stress to the wire. To perform high speed contractions inertia must be held low and the current applied in short high bursts. Naturally, current which will heat the wire from room temperature to over 212 °F (100 °C) in 1 millisecond, will also heat it much hotter if left on for any length of time.

While each device has quite different heat sinking and heating requirements, a simple rule of thumb test can be used to prevent overheating. Measuring the actual internal temperature of the wire across such short time periods is somewhat problematic, however, one can tell if the actuator wire is overheated simply by observing if the wire immediately begins to cool and relax when the current is shut off or not. If it does not begin to relax and elongate under a small load promptly, when the power is cut, then the wire has been needlessly overheated and could easily be damaged. Simple visual observation is all that is needed to design measured heating circuitry.

Flexinol® actuator wire has a high resistance compared to copper and other conductive materials but is still conductive enough to carry current easily. In fact one can immerse the wire in regular tap water and enough current will readily flow through it to heat it. All of the conventional rules for electrical heating apply to the wire, except that its resistance goes down as it is heated through its transformation temperature and contracts. This is contrary to the general rule of increased resistance with increased temperature. Part of this drop in resistance is due to the shortened wire, and part is due to the fact that the wire gets thicker as it shortens, roughly maintaining its same three-dimensional volume. It makes no difference to the wire whether alternating current, direct current, or pulse width modulated current is used.

Again relaxation time is the same as cooling time. Cooling is greatly affected by heat sinking and design features. The simplest way to improve the speed of cooling is to use smaller diameter wire. The smaller the diameter the more surface to mass the wire has and the faster it can cool. Additional wire, even multiple strands in parallel, can be used in order to exert whatever force is needed. The next factor in improving the relaxation or cooling time is to use higher temperature wire. This wire contracts and relaxes at higher temperatures. Accordingly the temperature differential between ambient or room temperature and the wire temperature is greater and correspondingly the wire will drop below the transition temperature faster in response to the faster rate of heat loss.

Other methods of improved cooling are to use: forced air, heat sinks, increased stress (this raises the transition temperature and effectively makes the alloy into a higher transition temperature wire), and liquid coolants. Combinations of these methods are also effective. Relaxation time can range from several minutes (i.e. delay switches) to fractions of milliseconds (i.e. miniature high speed pumps) by effective and proper heat sinking. The following page gives some idea of the effect these various methods have.



Relative Effects of Cooling Methods

	Improvement in Speed
Increasing Stress	1.2:1
Using Higher Temperature Wire	2:1
Using Solid Heat Sink materials	2:1
Forced Air	4:1
Heat Conductive Grease	10:1
Oil Immersion	25:1
Water with Glycol	100:1

*These improvements are not accumulative on the same basis when used together.

Better cooling methods are likely to require more current or heat to move and/or hold the wire in an "on" position. In some cases one may wish to quickly turn the wire on (that is electrically heat it until it contracts) then hold it on for some time. This will likely require a two-step driving current with a larger current to heat the wire and a reduced current to keep it hot without overheating it. There are a number of simple circuits, which will do this.



Section 4. Miscellaneous

Cutting - Flexinol® actuator wire is a very hard and anti-corrosive material. It is so hard that cutting it with cutters designed to cut copper and soft electrical conductors will damage the cutters. If you plan to do much work with Flexinol® actuator wires a good high quality pair of cutters like those used to cut stainless steel wires will be a good investment.

Attaching - Attaching Flexinol® actuator wires to make both a physical and an electrical connection can be done in several ways. It can be attached with screws, wedged onto a PC board, glued into a channel with conductive epoxies, and even tied with a knot. The simplest and best way is usually by crimping or splicing. With crimping machines both electrical wires and hooks or other physical attachments can be joined at once. Flexinol® wires tends to maintain the same volume, so when they contract along their length, they simultaneously grow in diameter. This means the wires expand inside the crimps and hold more firmly as the stress increases through pulling. While this works to the advantage in crimps it can be a disadvantage if glues or solder is used, as the material tends to work itself loose in those cases. Flexinol® wire is a very strong material and is not damaged by the crimping process. Dynalloy, Inc. can provide wire that is already crimped at specified intervals. One can then solder or spot-weld to the crimps if such manufacturing methods are preferred.

Accompanying Materials - Flexinol® actuator wires work by internal resistance or other heating methods. Their temperature is often over 212 °F (100 °C) and they often apply pressure with a high force over a small area of the device they are attached to, so it is a good idea to use temperature resistant materials in connection with them. Such materials if used in direct contact with the wire will also need to be non conductive so as to not provide an electrical path around the Flexinol® actuator wire. Silicone rubber, Kapton (used to make flexible circuit boards), ceramics, and glass are good examples.

Strain Reliefs - Over stress can damage Flexinol® wires by permanently stretching (or elongating) them or by reducing the stroke over which they contract. To prevent this one should design products with strain reliefs in them. Care should also be taken to prevent manual interference with their contraction or movement as this can over stress the wire. In other words if the device gets stuck and cannot move or is forced backwards while operating a problem can be created breaking or adversely affecting the actuator wires' performance. Protective measures against this should be used.

Reverse Biases - Although Flexinol® actuator wire moves about 4.5% when lifting a weight or when contracting against a constant force, one can improve this stroke by designing mechanisms which have a reverse bias force. The bias force is the force that elongates the wire in its rubber-like martensitic phase. A reverse bias force is one that gets weaker as the stroke gets longer. This can be done with leaf springs or with designs that give the Flexinol® actuator wires a better mechanical advantage over the bias spring or force as the stroke progresses.

Performance Margins - Although very stable compared to other similar alloys Flexinol® actuator wires will permanently stretch out or strain with large cycles strokes and high stresses. At stresses below 15,000 psi (103 MPa), permanent strain will remain less than 0.5% strain even after hundreds of thousands of cycles. At 20,000 psi (138 MPa), perhaps 1% permanent strain will occur after 100,000 cycles, and with higher stresses proportionally more will occur.



Section 4. Miscellaneous cont'd.

Good engineering design dictates that one should take into account the amount of memory strain, possible small decreases in the amount of that strain during operation, and some permanent deformation of the wire during cycling if the design is to meet expectations. Pushing all performance aspects of the wire to the limit from the outset of its cycling is likely to lead to disappointment at an early stage in the product life.

Longevity Testing - Flexinol® actuator wire can be over stressed and damaged even though it seems to be working. Much like actual muscles can be strained when called upon to do work above their actual capacity. The device may work in such a way that it is difficult to calculate the actual stresses involved. A good suggestion is to perform life cycle tests before assuming that a device which has worked a few times will continue to work millions more times. Fatigue which is damaging to Flexinol® actuator wire will usually show up in the form of wire elongation or reduced stroke within the first few hundred strokes. As one works with the material a "feel" for what is "working" will develop. The best rule of thumb is to use enough Flexinol® actuator wire to be sure one is well within the parameters in which it can work.

Precise Positioning - Given close temperature control under a constant stress one can get quite precise position control. Control in microns or less is to be expected. The problem is precise temperature control. The temperature is determined by an equilibrium between the rate of heating and the rate of cooling. Heating by electricity makes control of that easy, but the cooling is dynamically affected by changes in room temperature, airflow and so on. In practical terms this means that precise control is usually not feasible unless one can control the heat loss or has dynamic feedback through a closed loop system and can use this to control the heating rate.

Contact Dynalloy, Inc. Freely - There is no practical way for the authors to include everything that has been learned or will be learned in this short document. We have thousands of customers who call and contribute to our general understanding of typical application solutions. In most cases, we have already encountered problems which seem new to the first time user, so whenever possible we are happy to pass on these suggestions and be of help. We want your project to succeed, so please do not hesitate to call for assistance.



Section 5. Underlying Technology

Flexinol® is a trade name for very high performance, shape memory alloy, actuator wires. Made of nickel-titanium these small diameter wires have been specially processed to have large, stable amounts of memory strain for many cycles. In other words, they contract like muscles when electrically driven. This ability to flex or shorten is characteristic of certain alloys that dynamically change their internal structure at certain temperatures. Flexinol® wires contract by several percent of their length when heated and then easily elongate again by a relatively small load when the current is turned off and they are allowed to cool.

The function of the Flexinol® wire is based on the shape memory phenomenon which occurs in certain alloys in the nickel-titanium family. When both nickel and titanium atoms are present in the alloy in almost exactly a 50%/50% ratio, the material forms a crystal structure which is capable of undergoing a change from one crystal form to another (a martensitic transformation) at a temperature determined by the exact composition of the alloy. In the crystal form that exists above the transformation temperature (the austenite) the material is high strength and not easily deformed. It behaves mechanically much like stainless steel. Below the transformation temperature, though, when the other crystal form (the martensite) exists, the alloy can be deformed several percent by a very uncommon deformation mechanism that can be reversed when the material is heated and transforms. The low temperature crystal form of the alloy will undergo the reversible deformation fairly easily, so the "memory" strain can be put into the material at rather low stress levels.

The resultant effect of the shape memory transformation of the Flexinol® wire is that the wire can be stretched about 4-5% of its length below its transformation temperature by a force of only 10,000 psi (69 MPa) or less. When heated through the transformation temperature, the wire will shorten by the same 4-5% that it was stretched, and can exert stresses of at least 25,000 psi (172 MPa) when it does so. The transformation temperature of the NiTi alloys can be adjusted from over 212 °F (100°C) down to cryogenic temperatures, but the temperature for the Flexinol® actuator wire has been chosen to be 140 – 230 °F (60 - 110 °C). This allows easy heating with modest electrical currents applied directly through the wire, and quick cooling to below the transformation temperature as soon as the current is stopped. Heating with electrical current is not required, but it is perhaps the most convenient and frequently used form of heat.

Flexinol® actuator wires' prime function is to contract in length and create force or motion when it is heated. There are limits, of course, to how much force or contraction can be obtained. The shape memory transformation has a natural limit in the NiTi system of about 8%. That is the amount of strain that can occur in the low temperature phase by the reversible martensitic twinning which yields the memory effect. Deformation beyond this level causes dislocation movement throughout the structure and then that deformation is not only non-reversible but degrades the memory recovery as well. For materials expected to repeat the memory strain for many cycles, it is best to utilize a cyclic memory strain of no more than 4-5%, and that is what is recommended with Flexinol® actuator wire.

The force that the Flexinol® actuator wire can exert when heated is limited by the strength of the high temperature austenitic phase. The phase transformation, or crystal change, that causes the memory effect has more driving force than the strength of the parent material, so one must use care not to exceed that yield strength. The yield strength of Flexinol®'s high temperature phase is over 50,000 psi (345 MPa), and on a single pull the wire can exert this force. To have repeat cycling, however, one should use no more than 2/3 of this level, and forces of 20,000 psi (138 MPa) or below give the best repeat cycling with minimal permanent deformation of the wire.



ACTUATOR WIRE

*A SOLID STATE ACTUATOR THAT MOVES BY
"MOLECULAR RESTRUCTURING"!*

FOR BETTER MECHANICAL PERFORMANCE...

- In really tight places - Flexinol® actuator wires are smaller by far than alternatives. At least 1,000 times smaller than solenoids for the same work done.
- To simplify designs - Flexinol® actuator wires can often be used "as is", eliminating gear boxes, housings, bearings, and so on. Their flexible forgiving performance is easier to work with.
- In corrosive environments - Flexinol® actuator wires' high corrosion resistance really pays off.
- To reduce noise levels - Flexinol® actuator wires' movement by molecular restructuring is both electrically and acoustically quiet.
- To lower costs - Flexinol® actuator wires are inexpensive to buy and cost less to use in many applications. A nice combination for that bottom line.

SAMPLE APPLICATIONS

ELECTRONICS

Micro Circuit Breakers
PC Mount Relays
Chassis Temp. Controls
Electronic Locks
PC Mount Pilot Valves
Mechanical Latches
Subminiature Door Openers
Micro Manipulators
Retrofit Switch to Relay
Micro Clutches
Spring Loaded Releases
Board Temperature Sensors
"Clean" Actuators
Remote Switch Controllers
Read/Write Head Lifters

MEDICAL

Intravenous Med. Controllers
Steerable Catheters
Prosthetic Limbs
Surgical Instruments
Braille Displays

Vacuum Test Manipulators
Micro Pumps
Blood Pressure Test Valve
Exoskeletal Assistance

AUTOMOTIVE

Door Locks
Environmental Controls
Gear Changing Triggers
Clutch Engagement Triggers
Mirror Controls
Heater Cutoff/Sensors
Pneumatic Valve
Remote Latches
Remote Releases
Alarm Devices

APPLIANCES

Moving Louvers
Spring Releases
Door Openers
Electronic Locks

Mechanical Volt. Regulator
Mechanical Curr. Regulator
Motor Protectors
Box Temperature Control
Overheating Controllers
Hair Dryer Cutoff/Sensors
Safety Cutoffs

MISCELLANEOUS

Ultralight Remote Control
Mechanical Scanners
Camera Manipulators
Magnetic Free Positioners
Manipulator Safety
PC Cutoffs
Fiber Gate
Camera Shutters
Cuckoo Clocks
Alarm Devices Light
Light Fiber Switches
Smart Materials
Mechanical IC's
Robotic Limbs

Flexinol® Actuator Wires are small diameter wires which contract like muscles when electrically driven. Smaller than motors or solenoids, cheaper and generally easier to use, these wires perform physical movement for an extremely wide variety of applications.

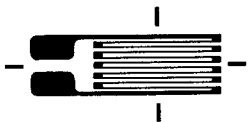
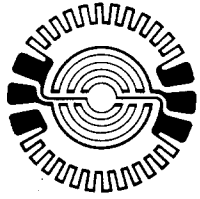

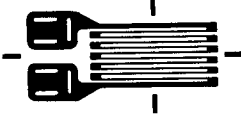

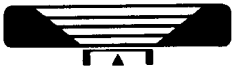

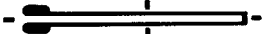


RS 632-124 N11-MA2-120-11 2mm
 RS 632-145 N11-MA2-120-23 2mm
 RS 632-168 N11-MA5-120-11 5mm
 RS 632-180 N11-MA5-120-23 5mm

RS 308-102 N11-FA8-120-11 8mm
 RS 308-118 N11-FA8-120-23 8mm

FOIL STRAIN GAUGES AND ACCESSORIES

(TERMINALS/CEMENT)

CODES FOR BASIC PATTERNS

N		Q	
R		Y	
T		C	
U		X	
Z		P	

CODES

FOR BASIC PATTERN COMBINATIONS

11	21	31		51
—	L	∠		
	22	32		
	+	*		
	23			
	24	34	44	
	T	△	◎	
		35		
		Y		

Y: Yielding type.

For measurement of large strains ranging to plastic sphere. Designed not to cause stress concentration at the point where leads are soldered.

C: For crack analysis.

Gauge grids are arranged in parallel. Gauge resistance increases in the form of stairs when a crack takes place somewhere within the grids.

X: For crack propagation detection.

With the lengthy grid of this gauge, cracks propagating extensively can be sensed.

P: For application to internal surface of pipes or threaded holes where gauges are difficult to install.

The test object is perforated for installation of this gauge inside. Note however that application is considerably critical as the gauge is likely to be damaged when installed or its performance is affected by air bubbles introduced during installation.

* W: Waterproof Moulded Type Strain Gauge

Vinyl cable (2 parallel wires of 1 mm. in external dia., resp.) is being connected with strain gauge and the gauge is moulded with special Epoxy resins. No special protection for waterproofing is necessary after its having been installed on the test object. This feature can be applied to all versions in Nxx-FA Series, except N34, N35 and N51.

FEATURES :

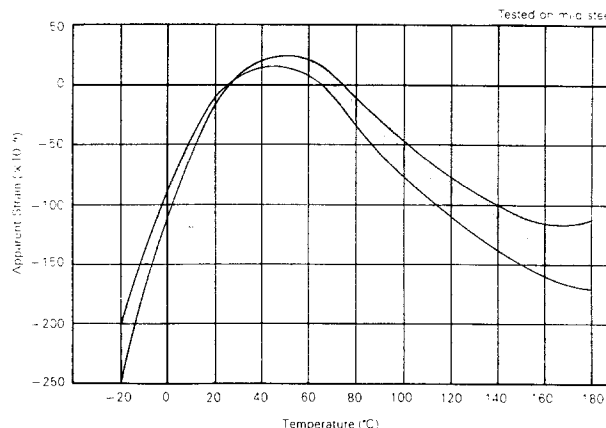
- * Almost no effect on test object.
- * Distant and multi-points measurements are possible.
- * Applicable to both static and dynamic strains.
- * Both surfaces being completely laminated, the gauge grids are entirely protected.
- * The gauges, being fitted with leads, are easy to handle.

STANDARD SPECIFICATIONS :

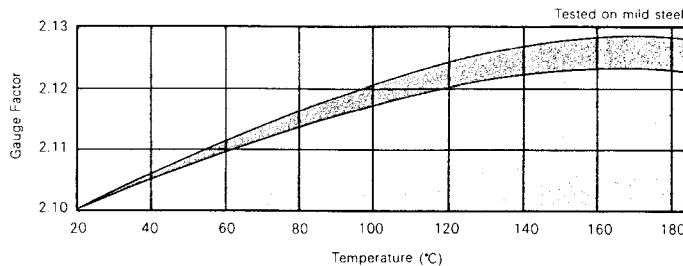
Gauge Length	0.3 mm. min. to 60 mm. max.
Measurable Strain	2 to 4% maximum. Up to 10% with foil yielding strain gauges.
Temperature Range	FA (Polyester Backing) -30°C to +80°C MA (Polyimide Backing) -30°C to +180°C
Thermal Output (See Fig. 1)	FA: Within $\pm 2\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (At room temperature up to +80°C) MA: Within $\pm 2\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (At room temperature up to +160°C) Within $\pm 5\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (At +160°C up to +180°C)
Gauge Factor Change with Temperature (See Fig. 2)	Within $\pm 0.015\%/^\circ\text{C}$
Gauge Resistance Tolerance	Within $\pm 0.5\%$ of the nominal resistance.
Gauge Factor	2.00 (Nominal)
Gauge Factor Tolerance	Within $\pm 1\%$ of the value indicated on individual gauge packet for gauge lengths of 5 mm. to 60 mm. Within $\pm 2\%$ of the value indicated on individual gauge packet for gauge lengths of 0.3 mm. to 3 mm.
Fatigue Life	More than 10^5 reversals at 1000×10^{-6} strain.

GENERAL PERFORMANCES OF TYPE N11-MA-5-120-11 STRAIN GAUGE

Thermal Output Characteristics (Fig.1)



Gauge Factor variation with temperature (Fig. 2)



CONFIGURATIONS :

N11-FA-5-350-16-L03


- Optional Specifications
03: Length of Leads
L Resin Clad Copper Wire (Up to 0.3m)
W Waterproof Moulded Type* (See page 1)
P Optional Pattern Type
(Subject to special quotations)
- Linear Expansion Factor of Material against which Strain Gauge is self-temperature compensated and its base colour classification

Base Colour	Materials against which strain gauge is self-temperature compensated	Linear expansion factor of materials	Codes
Red	Mild steel	$10.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	11
Orange	Stainless steel	$16.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	16
Blue	Aluminium alloy	$23.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	23

Remarks : Base colour classifications are made in FA Series only.
Code of "11" for mild steel can be deleted.

- Gauge Resistance
Expressing strain gauge nominal resistance in the unit of Ω . Can be deleted when nominal resistance is 120 Ω .
- Gauge Length
Expressing grid effective length in figures in the unit of mm.
- Foil Material
A: Cu-Ni Alloy
- Base Material
F: Polyester, M: Polyimide
- Basic Pattern and its Combinations

PATTERNS AND SPECIFICATIONS :

Strain Gauge Pattern	Type	Nominal Resistance (Ω)	Dimensions(mm)				Approx. Gauge Factor	Material against which strain gauge is self temperature compensated			Compatible Cement				Number of Gauges per Packer
			Grid		Base			Mid Steel (11)	Stainless Steel (18)	Aluminum Alloy (23)	F1	F3	18M	E110	
			Length	Width	Length	Width									
	N11-FA-03-120-(11,16,23)	120	0.3	1.8	3.5	2.5	1.9	●	●	●	●	●	●	●	10
	N11-FA- 1-120-(11,16,23)	120	1.0	1.5	4.0	2.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 2- 60-(11)	60	2.0	1.6	6.0	2.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 2-120-(11,16,23)	120	2.0	1.6	6.0	2.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 2-350-(11,16,23)	350	2.0	2.2	7.0	3.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 5- 60-(11)	60	5.0	1.8	9.5	3.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 5-120-(11,16,23)	120	5.0	1.8	9.5	3.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 5-350-(11,16,23)	350	5.0	2.6	11.0	4.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 8-120-(11,16,23)	120	8.0	2.0	13.0	4.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA- 8-350-(11,16,23)	350	8.0	4.0	14.0	6.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA-10-120-(11,16,23)	120	10.0	2.2	15.0	5.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA-10-350-(11,16,23)	350	10.0	4.5	18.0	6.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA-10-600-(11)	600	10.0	3.0	16.0	5.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA-10-1000-(11)	1000	10.0	4.5	15.0	6.0	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA-30-120-(11)	120	30.0	1.2	40.0	4.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-FA-60-120-(11)	120	60.0	2.2	65.0	5.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA-03-120-(11,16,23)	120	0.3	1.8	3.5	2.5	1.9	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 1-120-(11,16,23)	120	1.0	1.5	4.0	2.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 2-120-(11,16,23)	120	2.0	1.6	6.0	2.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 2-350-(11)	350	2.0	2.2	7.0	3.5	2.0	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 5-120-(11,16,23)	120	5.0	1.8	9.5	3.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 5-350-(11)	350	5.0	2.6	11.0	4.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 8-120-(11,16,23)	120	8.0	2.0	13.0	4.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
	N11-MA- 8-350-(11)	350	8.0	4.0	14.0	6.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●	
N11-MA-10-120-(11,16,23)	120	10.0	2.2	15.0	5.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●		
N11-MA-10-350-(11)	350	10.0	4.5	18.0	6.5	2.1	●	●	●	●	●	●	●		
N11-MA-10-600-(11)	600	10.0	3.0	16.0	5.0	2.1	●	●	●	●	●	●	●		
N11-MA-10-1000-(11)	1000	10.0	4.5	15.0	6.0	2.0	●	●	●	●	●	●	●		

INSTRUCTIONS

In order to obtain the best possible results from a strain gauge installation it is important that care and attention is given to the preparation of the gauge, the surface of the specimen, and bonding techniques.

Whilst circumstances may call for variations in technique for particular installations, the following instructions based on extensive experience, should ensure the complete success of the bonding of Showa foil strain gauges. In applications where it is considered there may be special problems, we will be pleased to give any advice and assistance we can.

1. Specimen Surface Preparation.

An area larger than the installation should be cleared of all paint, rust etc., and finally smoothed with a fine grade emery paper or fine sand blasting to provide a sound bonding surface. The area should now be degreased with a solvent such as trichlorethylene and finally neutralised with a weak detergent solution. One should use tissue for this operation, wetting the surface and wiping off with clean tissues until the final tissue used is stain free. Care must be taken not to wipe grease from a surrounding area onto the prepared area or to touch the surface with the fingers.

This final cleaning should take place immediately prior to installing the strain gauges.

2. Strain Gauge Preparation.

Normally the gauge is ready for applying as soon as it is removed from the packet but, experience shows that some engineers prefer to roughen the back of the gauge before applying it. Extreme care should be taken and the area under the tags should be avoided. One method is to sprinkle pumice powder onto a piece of blotting paper and with one finger tip lightly rub the back of the gauge over the powder. Remove all products of the abrasion and wipe back of gauge with a tissue.

Note: It is advisable not to mix the adhesive until all the gauges to be installed have been prepared to this stage.

3. Strain Gauge Installation.

By sticking a short length of sellotape lengthways along the upper face of the gauge it may be picked up from a flat clean surface. Holding both ends of the tape, orientate the gauge in the desired location and stick the end of the tape furthest from the tags, to the specimen. Bend the other end of the tape back on itself thereby exposing the

back of the gauge.

Adhesives.

Three basic types of adhesives are recommended: (1) Epoxy resin, (2) Phenol-Epoxy resin and (3) pressure sensitive (Cyanoacrylate series) adhesive.

The single component pressure sensitive adhesive is recommended where fast bond and thin glue are optimum requirements as this adhesive reacts immediately upon water contained in the atmospheric air.

For an installation where long term stability under adverse atmospheric conditions is the main requirement one should use Epoxy or Phenol-Epoxy system. F3 cement is simple to use and may be cured at ambient room temperature, whilst F1 cement has excellent heat resistance quality. E110 is most suitable for use with MA Series (Polyimide backing) gauges for high temperature application.

i) Epoxy Adhesives F1 and F3.

Coat the exposed back of the gauge with adhesive and gently push the gauge down into position, at the same time wiping excessive adhesive to the two outside edges of the gauge. Stick the whole length of the sellotape to hold the gauge in position, cover the area with the piece of polyethylene provided and apply a light weight or clamp as required. Care should be taken that there is an even layer of adhesive and no air bubbles are left under the grid. The installation is now ready for curing. After curing remove the tape as per para. 4.

F1	10 parts resin :	2 parts hardener	2 hrs. at 100°C
F3	10 parts resin :	6 parts hardener	24 hrs. at room temp.

Of this two pack adhesive, the base material (A) is inert, and this should be harmless when in contact with human tissue.

The hardener (B) is slightly toxic and can possibly be harmful if allowed in contact with human tissue.

Warning:

- 1. Do not allow the mixed or unmixed materials to contact skin. Protective gloves should be worn. Should skin be inadvertently contaminated it must be washed off immediately and thoroughly, with soap or detergent and water.**
- 2. If heat is applied to accelerate the cure time of the adhesive then adequate ventilation is necessary to avoid inhalation of resulting fumes.**

ii) Phenol-Epoxy Adhesive E110.

The cement is spread by brush or by spatula on both the specimen surface and strain gauges and these must then be left in this condition and dried in a clean atmosphere for 1 to 3 hours in order to allow evaporation of solvents from the cement. If cement is applied by spraygun, the cement should be diluted before it is applied, by methyl-ethyl-ketone until its solidity rate

reaches to 20%. After drying, both the strain gauges and the specimen surface are contacted face to face and clamped and heated in an oven for 30 minutes at 140°C to complete bonding.

iii) Pressure Sensitive Adhesive 18M.

Follow strain gauge installation instructions as above sticking one end of the tape down to the specimen completely up to the gauge. Drop a fillit of adhesive in the 'hinge' formed by the gauge and the specimen. Starting at the fixed end with one finger push the gauge down at the same time pushing the adhesive along the gauge in a single wiping motion until the whole gauge is stuck down. Apply pressure with the finger over the whole length of the gauge for one minute. Extra attention may need to be given to the tag and lead wire area.

4. Removing the tape.

Remove the tape by slowly and very carefully pulling it back over itself starting at the end furthest from the tags. Do not pull upwards.

5. Wiring.

Showa strain gauges are fitted with short leads and it is standard practice to wire these to small stick-on or self adhesive terminals placed adjacent to the gauges. These serve as a bridge-completion point and a change-over point to the heavier wire required for the run to measuring or recording instruments.

The lead out wires from the gauges are fragile, and should be handled with care. Preparatory tinning of the ends of the leadout wires, connecting cables and terminals is recommended. Be sure to remove all traces of flux or soldering paste with trichlorethylene.

6. Installation Protection.

Showa strain gauges are encapsulated and therefore are protected from dust and draughts, etc. This encapsulation serves to make any required form of protection all the more efficient. In choosing a protective coating one should study completely the environment in which the installation is to function and the length of time the installation will be required to function in such environment. One should also pay special attention to the wiring especially if the installation is required to be immersed in water.

There are numerous forms of protection available and we will be pleased to advise you on your particular installation.

High Elongation (Yielding) Strain Gauges.

Generally speaking the foregoing instructions apply also for the bonding of high elongation gauges but there are some specific aspects of the technique which should be followed.

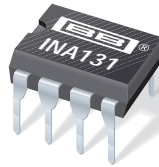
- a F3 or 18M cement is recommended, but in each case the layer of cement between the gauge and specimen surface must be as thin and uniform as possible.
- b It is desirable not to apply any coating material to the installation. Silicone rubber, however, may be thinly applied if necessary.
- c Lead-out wires should be raised and looped in order to keep them free from strains taking place in the test object.
- d Terminals should be used and an excessive amount of solder on the terminals should be avoided.

"P" Series Gauge ("Pipe" Gauge)

This series is intended, for measurement, to be inserted into the test object. Care should be exercised for the handling and installation of this gauge especially when carrying the gauge into the hole prepared on the test object. Removal of air bubbles from the adhesive mixture is also very important in order to prevent any damages from taking place on the gauge or to attain the better measuring results.

Brief instructions:—

- a Prepare a hole of 2.3 mm dia. on the test object.
- b F1 or F3 cement is used for "P" Series gauge. Apply a well mixed adhesive eliminating any air bubbles to the internal surface of that hole. Insert the gauge gently into the hole.
- c After having applied adhesive to the hole and placed the gauge in position, the adhesive is left cured as per para. 3.i).
- d Wire the strain gauge leads to terminals placed adjacent to the hole. Care should be given to the fact that the leads, if covered with splashes of adhesive, are likely to be broken.



INA131

Precision $G = 100$ INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- **LOW OFFSET VOLTAGE:** $50\mu\text{V}$ max
- **LOW DRIFT:** $0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ max
- **LOW INPUT BIAS CURRENT:** 2nA max
- **HIGH COMMON-MODE REJECTION:** 110dB min
- **INPUT OVERVOLTAGE PROTECTION:** $\pm 40\text{V}$
- **WIDE SUPPLY RANGE:** ± 2.25 to $\pm 18\text{V}$
- **LOW QUIESCENT CURRENT:** 3mA
- **8-PIN PLASTIC DIP**

DESCRIPTION

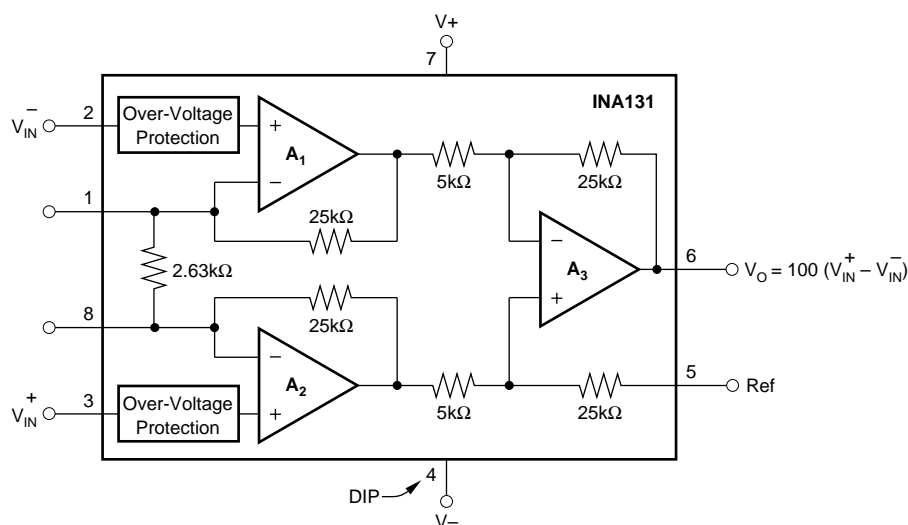
The INA131 is a low cost, general purpose $G = 100$ instrumentation amplifier offering excellent accuracy. Its 3-op amp design and small size make it ideal for a wide range of applications.

On-chip laser trimmed resistors accurately set a fixed gain of 100. The INA131 is laser trimmed to achieve very low offset voltage ($50\mu\text{V}$ max), drift ($0.25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ max), and high CMR (110dB min). Internal input protection can withstand up to $\pm 40\text{V}$ inputs without damage.

The INA131 is available in a 8-pin plastic DIP. They are specified over the -40°C to $+85^\circ\text{C}$ temperature range.

APPLICATIONS

- BRIDGE AMPLIFIER
- THERMOCOUPLE AMPLIFIER
- RTD SENSOR AMPLIFIER
- MEDICAL INSTRUMENTATION
- DATA ACQUISITION



SPECIFICATIONS

At $T_A = +25^\circ\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$, $R_L = 2\text{k}\Omega$, unless otherwise noted.

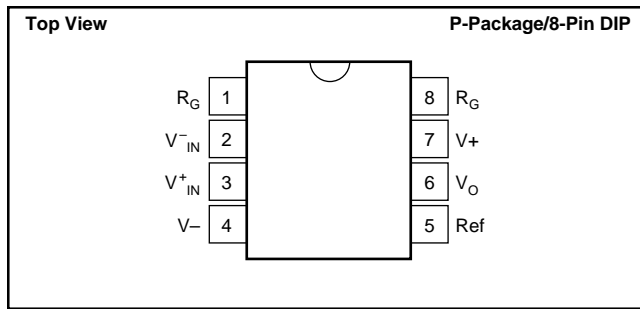
PARAMETER	CONDITIONS	INA131BP			INA131AP			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
INPUT								
Offset Voltage, RTI	$T_A = +25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{MIN}}$ to T_{MAX} $V_S = \pm 2.25\text{V}$ to $\pm 18\text{V}$		± 10	± 50		± 25	± 125	μV
Initial			± 0.1	± 0.25		± 0.25	± 1	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
vs Temperature			0.5	3		*	*	$\mu\text{V}/\text{V}$
vs Power Supply			0.2			*	*	$\mu\text{V}/\text{mo}$
Long-Term Stability			$10^{10} \parallel 6$			*	*	$\Omega \parallel \text{pF}$
Impedance, Differential			$10^{10} \parallel 6$			*	*	$\Omega \parallel \text{pF}$
Common-Mode			± 11		*	*	V	
Input Common-Mode Range				± 40			*	V
Safe Input Voltage								dB
Common-Mode Rejection	$V_{\text{CM}} = \pm 10\text{V}$, $\Delta R_S = 1\text{k}\Omega$	110	120		106	110		
BIAS CURRENT			± 0.5	± 2		*	± 5	nA
vs Temperature			± 8			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
OFFSET CURRENT			± 0.5	± 2		*	± 5	nA
vs Temperature			± 8			*		$\text{pA}/^\circ\text{C}$
NOISE VOLTAGE, RTI	$R_S = 0\Omega$							
f = 10Hz			16			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 100Hz			12			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 1kHz			12			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 10kHz			12			*		$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 10Hz			0.4			*		$\mu\text{Vp-p}$
Noise Current								
f = 10Hz			0.4			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
f = 1kHz			0.2			*		$\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
$f_B = 0.1\text{Hz}$ to 100Hz			18			*		pAp-p
GAIN								
Gain Error ⁽¹⁾			± 0.01	± 0.024		*	± 0.1	%
Resistor Value ⁽²⁾			± 10	± 40		*	*	%
Gain vs Temperature			± 5	± 10		*	± 20	$\text{ppm}/^\circ\text{C}$
Nonlinearity			± 0.0003	± 0.002		*	± 0.004	% of FSR
OUTPUT								
Voltage	$I_O = 5\text{mA}$, T_{MIN} to T_{MAX} $V_S = \pm 11.4\text{V}$, $R_L = 2\text{k}\Omega$ $V_S = \pm 2.25\text{V}$, $R_L = 2\text{k}\Omega$ Stable Operation	± 13.5	± 13.7		*	*		V
		± 10	10.5		*	*		V
		± 1	1.5		*	*		V
			1000		*	*		pF
Load Capacitance, max								mA
Short Circuit Current				$+20/-15$		*		
FREQUENCY RESPONSE								
Bandwidth, -3dB	$V_O = \pm 10\text{V}$		70			*		kHz
Slew Rate		0.3	0.7		*	*		$\text{V}/\mu\text{s}$
Settling Time, 0.01%			100		*	*		μs
Overload Recovery		50% Overdrive		20		*	*	μs
POWER SUPPLY								
Voltage Range	$V_{\text{IN}} = 0\text{V}$	± 2.25	± 15	± 18	*	*	*	V
Current			± 2.2	± 3	*	*	*	mA
TEMPERATURE RANGE								
Specification		-40		85	*		*	$^\circ\text{C}$
Operating		-40		125	*		*	$^\circ\text{C}$
θ_{JA}			100			*		$^\circ\text{C}/\text{W}$

* Specification same as INA131BP.

NOTES: (1) $R_L = 10\text{k}\Omega$. (2) Absolute value of internal gain-setting resistors. (Gain depends on resistor ratios.)

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

PIN CONFIGURATION



PACKAGE/ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER ⁽¹⁾	TEMPERATURE RANGE
INA131AP	8-Pin Plastic DIP	006	-40°C to +85°C
INA131BP	8-Pin Plastic DIP	006	-40°C to +85°C

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book.

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS⁽¹⁾

Supply Voltage	±18V
Input Voltage Range	±40V
Output Short Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature	-40°C to +125°C
Storage Temperature	-40°C to +125°C
Junction Temperature	+150°C
Lead Temperature (soldering -10s)	+300°C

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage.



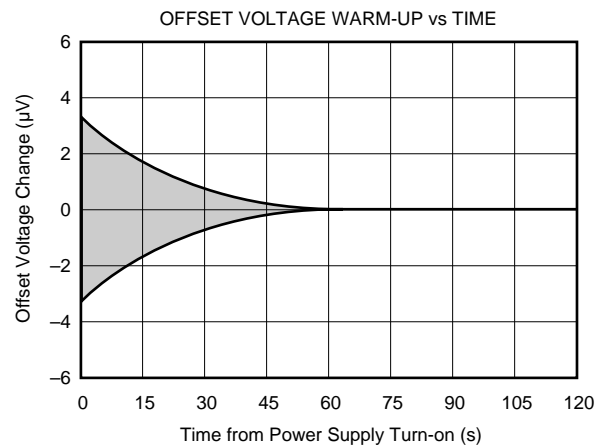
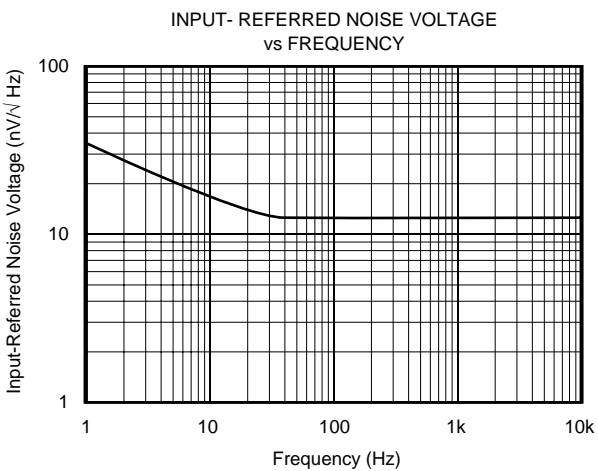
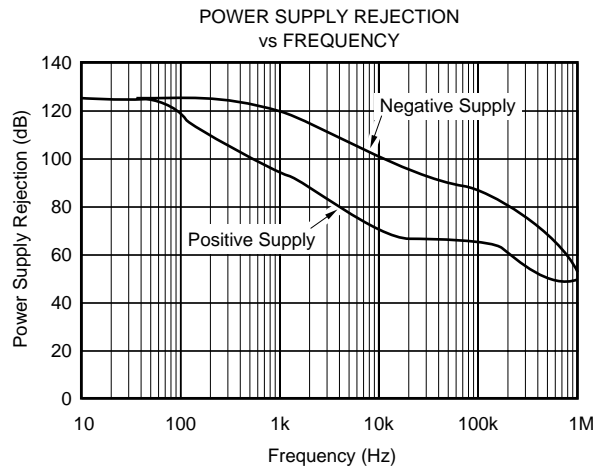
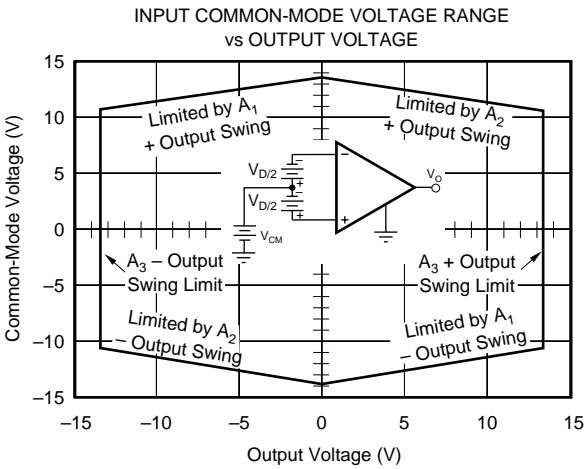
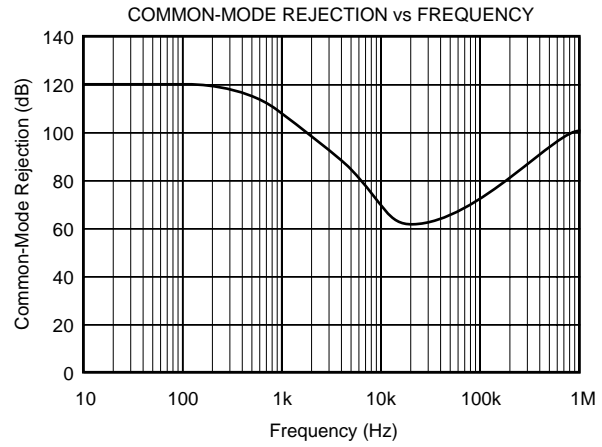
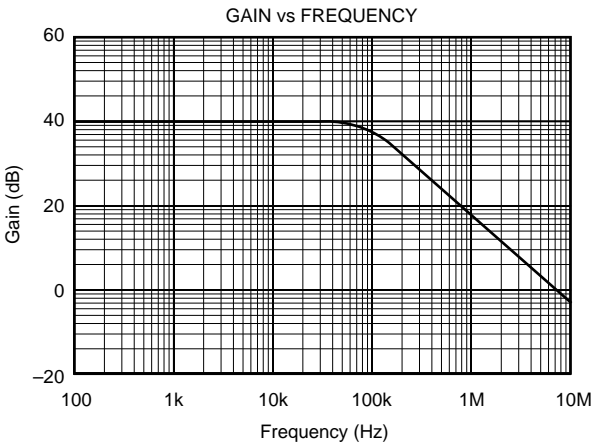
ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

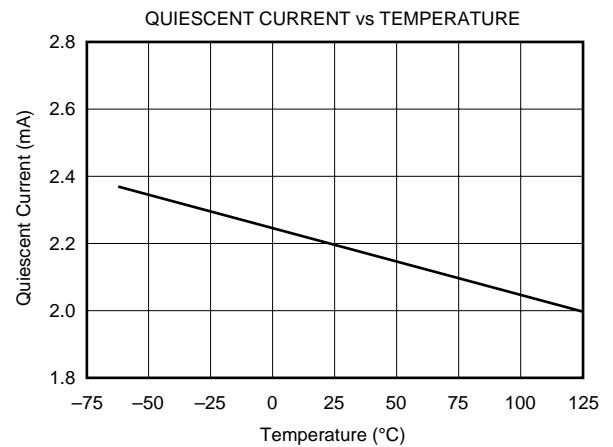
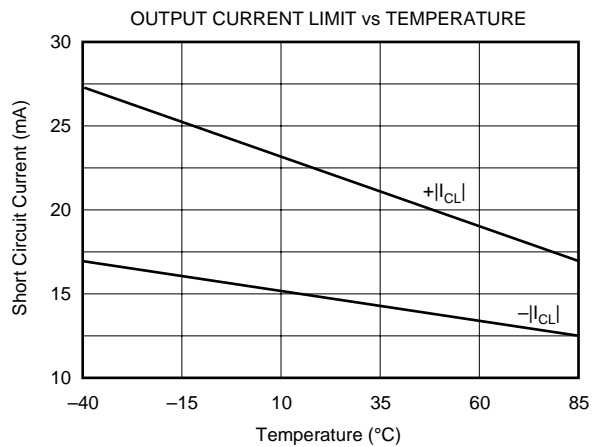
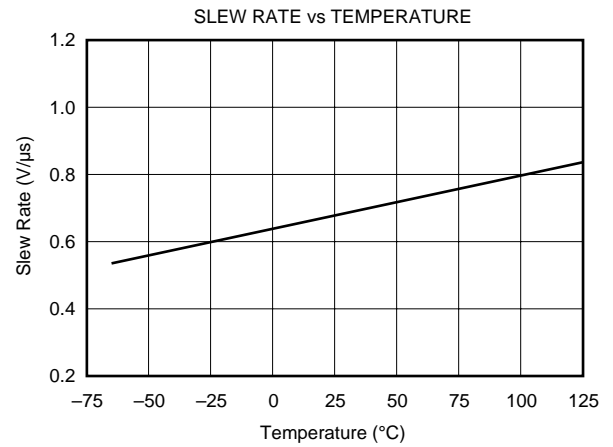
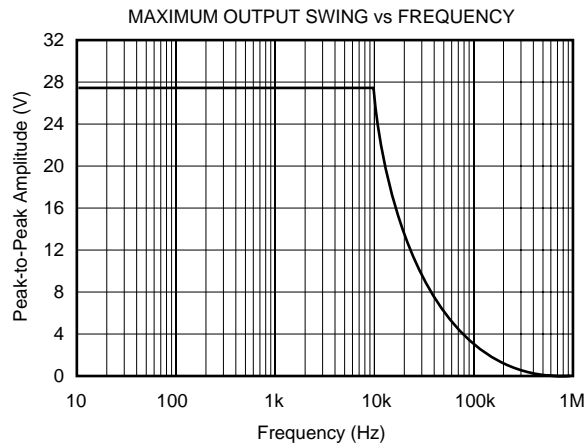
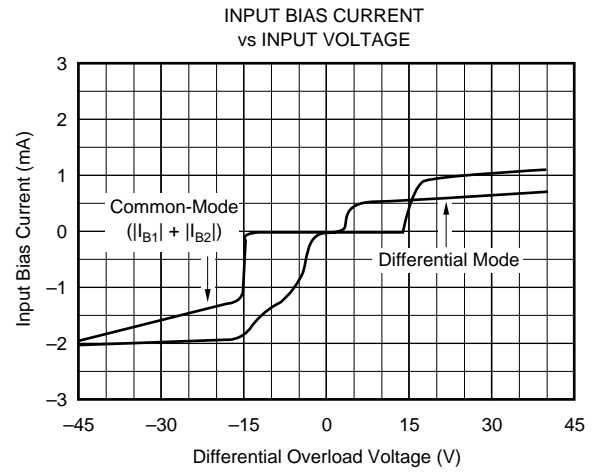
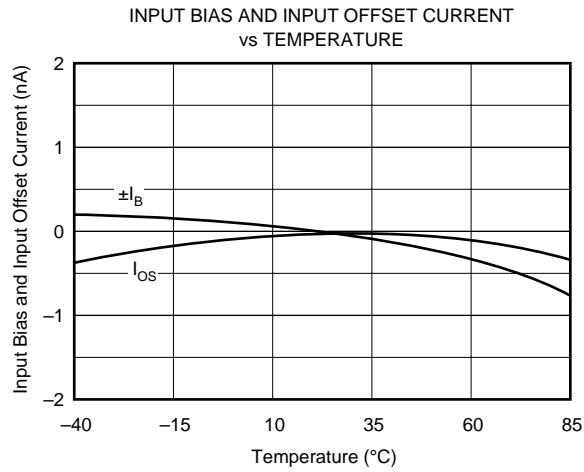
TYPICAL PERFORMANCE CURVES

At 25°C, $V_S = \pm 15V$, unless otherwise noted.



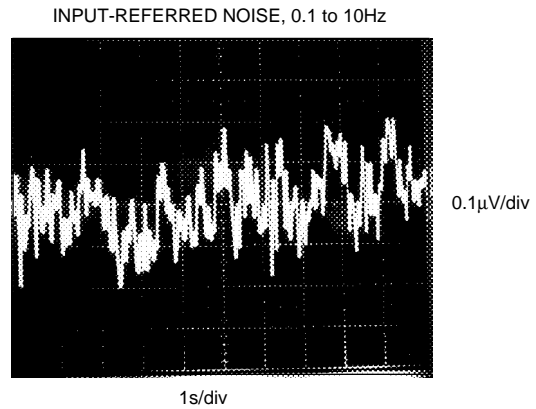
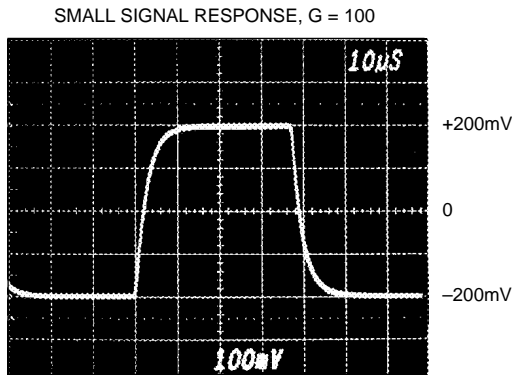
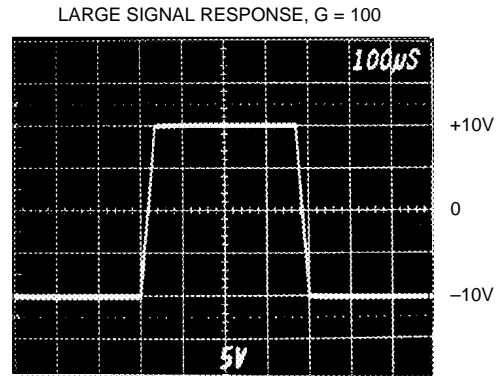
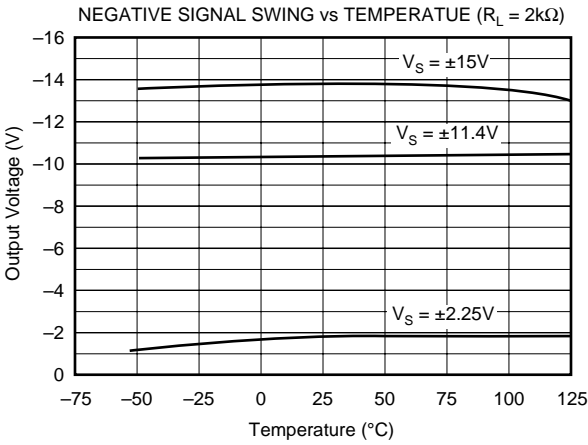
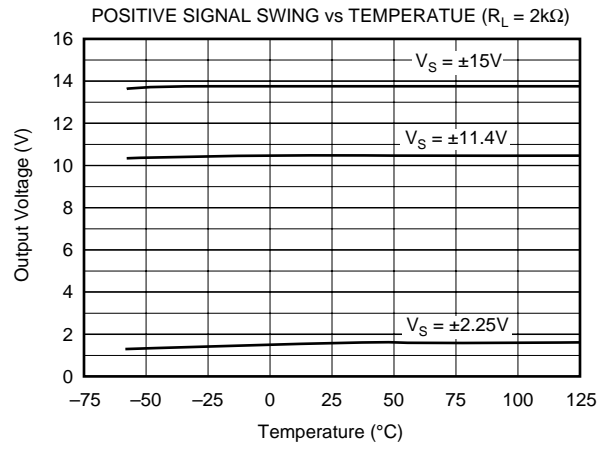
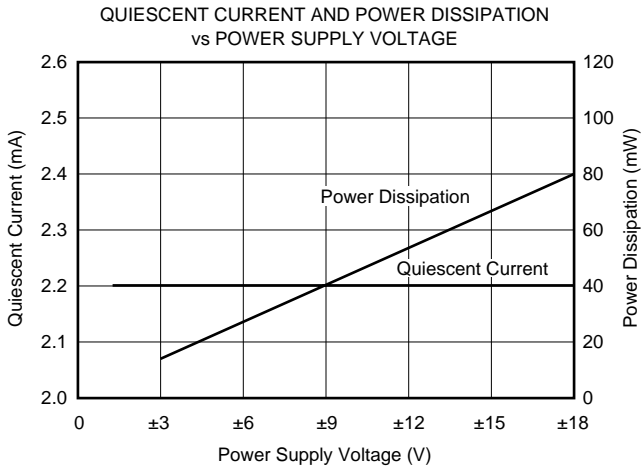
TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At 25°C, $V_S = \pm 15V$, unless otherwise noted.



TYPICAL PERFORMANCE CURVES (CONT)

At 25°C, $V_S = \pm 15V$, unless otherwise noted.



APPLICATION INFORMATION

Figure 1 shows the basic connections required for operation of the INA131. Applications with noisy or high impedance power supplies may require decoupling capacitors close to the device pins as shown.

The output is referred to the output reference (Ref) terminal which is normally grounded. This must be a low-impedance connection to assure good common-mode rejection. A resistance of 5Ω in series with the Ref pin will cause a device with 110dB CMR to degrade to approximately 106dB CMR.

SETTING THE GAIN

No external resistors are required for $G = 100$. On-chip laser-trimmed resistors set the gain, providing excellent gain accuracy and temperature stability. Gain is distributed between the input and output stages of the INA131. Bandwidth is increased by approximately five times (compared to the INA114 in $G = 100$). Input common-mode range is also improved (see “Input Common-Mode Range”).

Although the INA131 is primarily intended for fixed $G = 100$ applications, the gain can be increased by connecting an external resistor to the R_G pins. The internal resistors are trimmed for precise ratios, not to absolute values, so the influence of an external resistor will vary from device to

device. Absolute accuracy of the internal values is $\pm 40\%$. The nominal gain with an external R_G resistor can be calculated by:

$$G = 100 + \frac{250 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (1)$$

Where: R_G is the external gain resistor.

Accuracy of the 250kΩ term is $\pm 40\%$.

The stability and temperature drift of the external gain setting resistor, R_G , also affects gain. R_G 's contribution to gain accuracy and drift can be directly inferred from the gain equation (1).

NOISE PERFORMANCE

The INA131 provides very low noise in most applications. For differential source impedances less than 1kΩ, the INA103 may provide lower noise. For source impedances greater than 50kΩ, the INA111 FET-Input Instrumentation Amplifier may provide lower noise.

Low frequency noise of the INA131 is approximately 0.4μVp-p measured from 0.1 to 10Hz. This is approximately one-tenth the noise of state-of-the-art chopper-stabilized amplifiers.

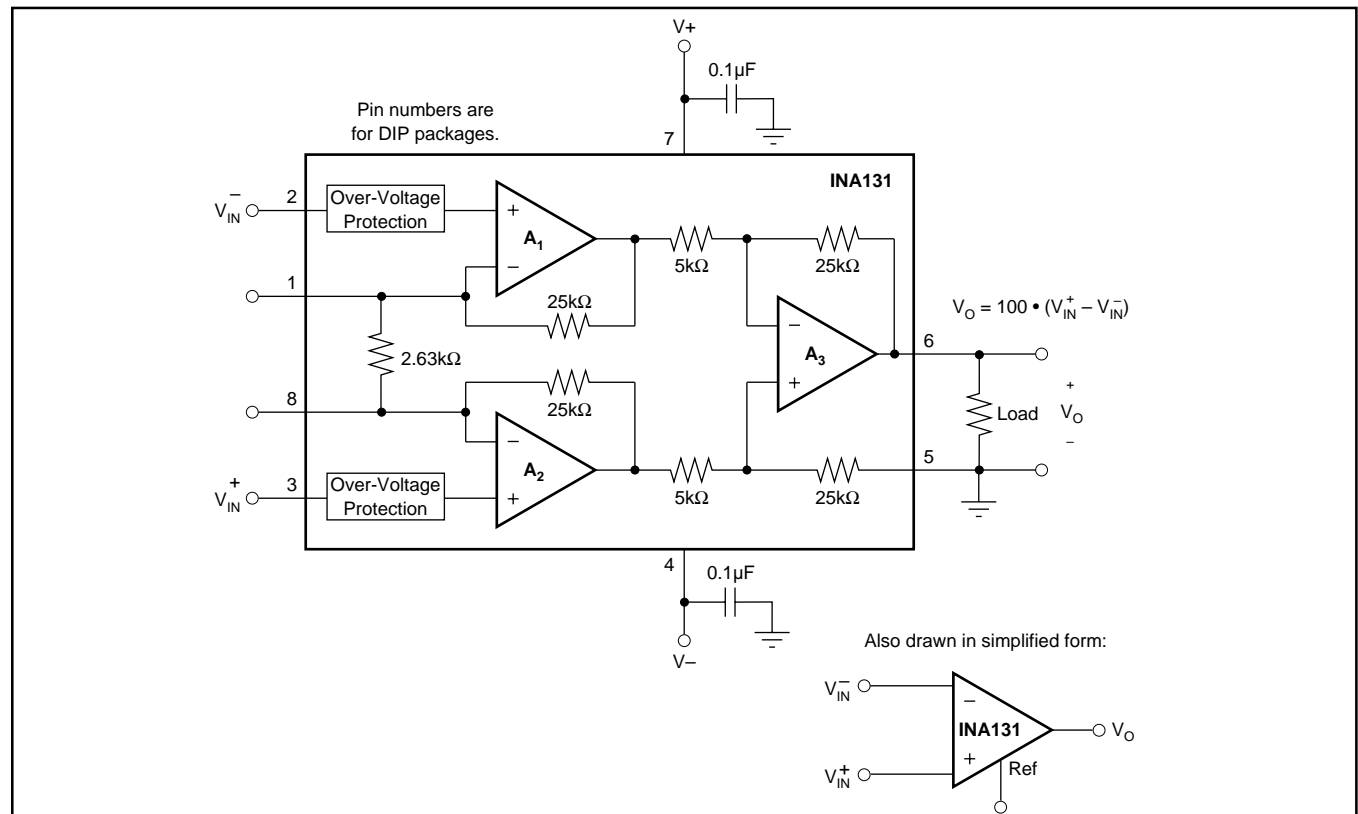


FIGURE 1. Basic Connections.

OFFSET TRIMMING

The INA131 is laser trimmed for very low offset voltage and drift. Most applications require no external offset adjustment. Figure 2 shows an optional circuit for trimming the output offset voltage. The voltage applied to Ref terminal is summed at the output. Low impedance must be maintained at this node to assure good common-mode rejection. This is achieved by buffering trim voltage with an op amp as shown.

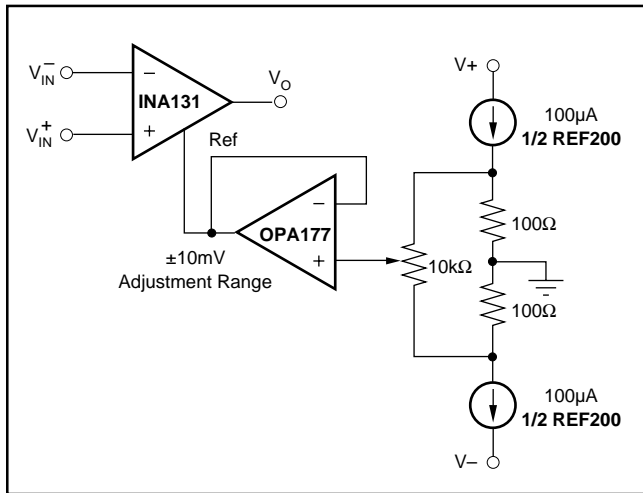


FIGURE 2. Optional Trimming of Output Offset Voltage.

INPUT BIAS CURRENT RETURN PATH

The input impedance of the INA131 is extremely high—approximately $10^{10}\Omega$. However, a path must be provided for the input bias current of both inputs. This input bias current is typically less than $\pm 1\text{nA}$ (it can be either polarity due to cancellation circuitry). High input impedance means that this input bias current changes very little with varying input voltage.

Input circuitry must provide a path for this input bias current if the INA131 is to operate properly. Figure 3 shows various provisions for an input bias current path. Without a bias current return path, the inputs will float to a potential which exceeds the common-mode range of the INA131 and the input amplifiers will saturate. If the differential source resistance is low, bias current return path can be connected to one input (see thermocouple example in Figure 3). With higher source impedance, using two resistors provides a balanced input with possible advantages of lower input offset voltage due to bias current and better common-mode rejection.

INPUT COMMON-MODE RANGE

The linear common-mode range of the input op amps of the INA131 is approximately $\pm 13.75\text{V}$ (or 1.25V from the power supplies). As the output voltage increases, however, the linear input range is limited by the output voltage swing of the input amplifiers, A_1 and A_2 . The 5V/V output stage gain of the INA131 reduces this effect. Compared to the

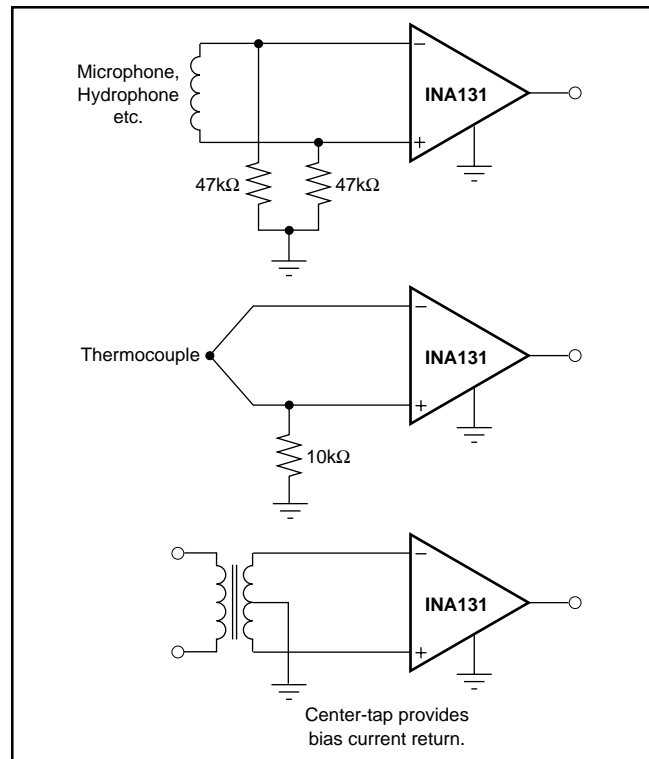


FIGURE 3. Providing an Input Common-Mode Current Path.

INA114 and other unity output gain instrumentation amplifiers, the INA131 provides several additional volts of input common-mode range with full output voltage swing. See the typical performance curve “Input Common-Mode Range vs Output Voltage”.

Input-overload often produces an output voltage that appears normal. For example, an input voltage of $+20\text{V}$ on one input and $+40\text{V}$ on the other input will obviously exceed the linear common-mode range of both input amplifiers. Since both input amplifiers are saturated to the nearly the same output voltage limit, the difference voltage measured by the output amplifier will be near zero. The output of the INA131 will be near 0V even though both inputs are overloaded.

INPUT PROTECTION

The inputs of the INA131 are individually protected for voltages up to $\pm 40\text{V}$. For example, a condition of -40V on one input and $+40\text{V}$ on the other input will not cause damage. Internal circuitry on each input provides low series impedance under normal signal conditions. To provide equivalent protection, series input resistors would contribute excessive noise. If the input is overloaded, the protection circuitry limits the input current to a safe value (approximately 1.5mA). The typical performance curve “Input Bias Current vs Input Voltage” shows this input current limit behavior. The inputs are protected even if no power supply voltage is present.

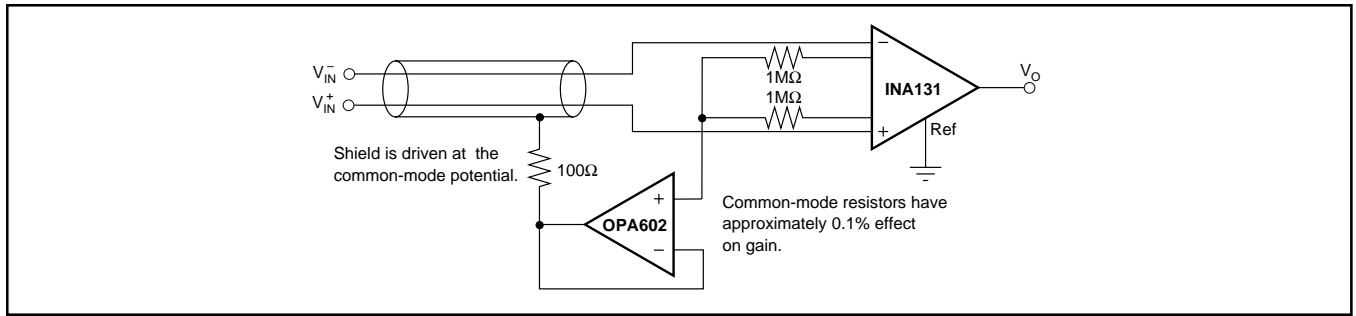


FIGURE 4. Shield Driver Circuit.

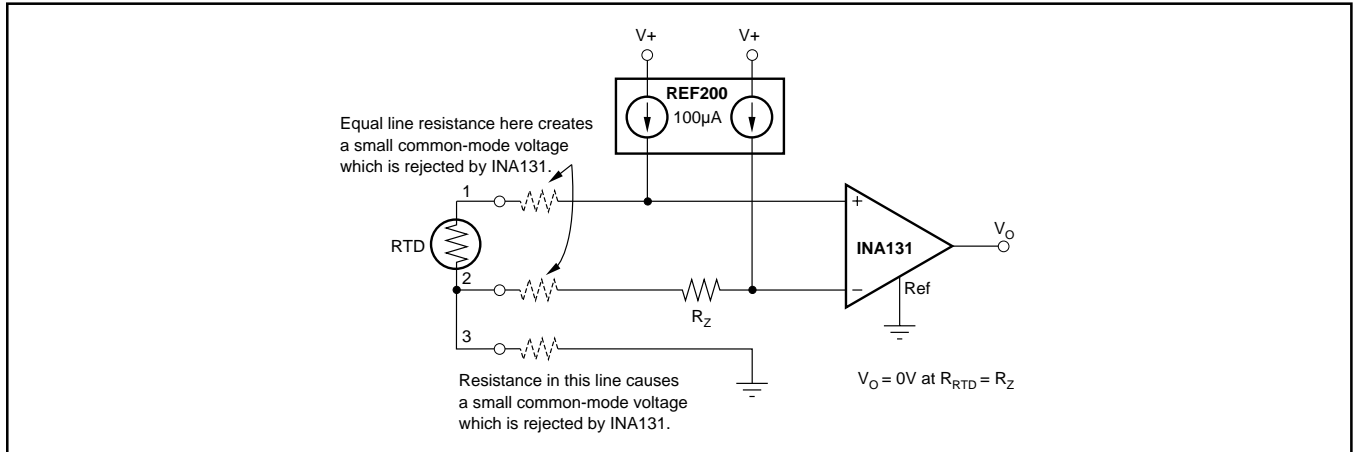


FIGURE 5. RTD Temperature Measurement Circuit.

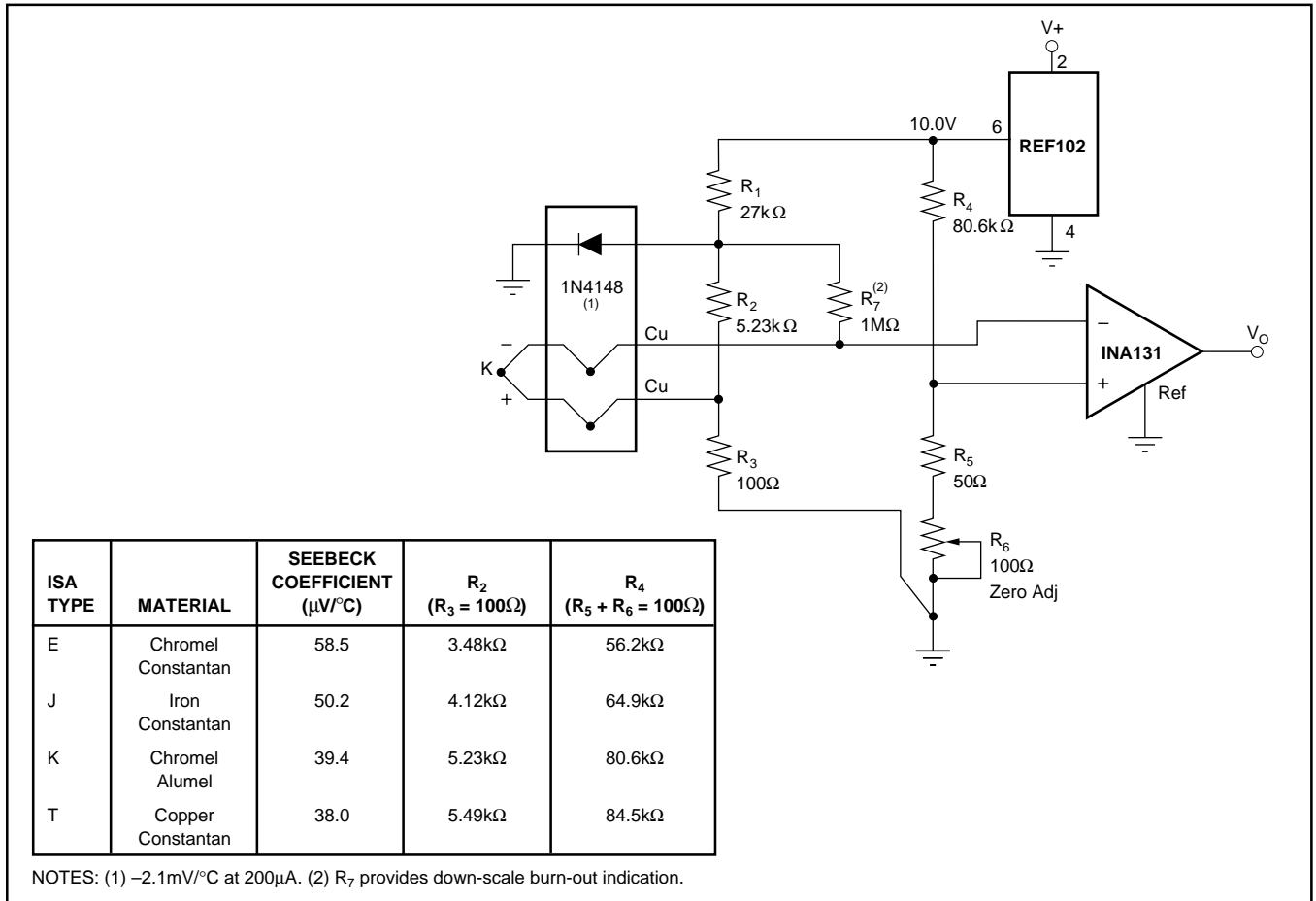


FIGURE 6. Thermocouple Amplifier with Cold Junction Compensation.

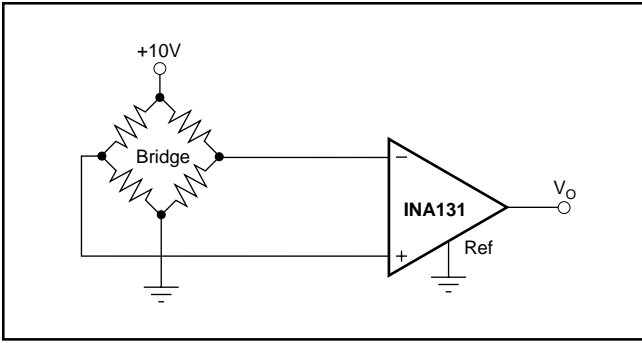


FIGURE 7. Bridge Transducer Amplifier.

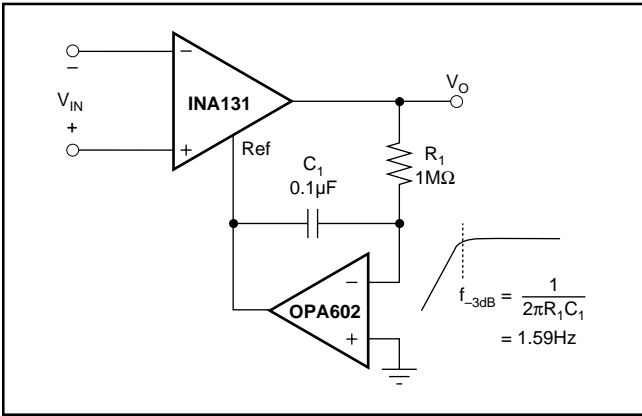


FIGURE 8. AC-Coupled Instrumentation Amplifier.

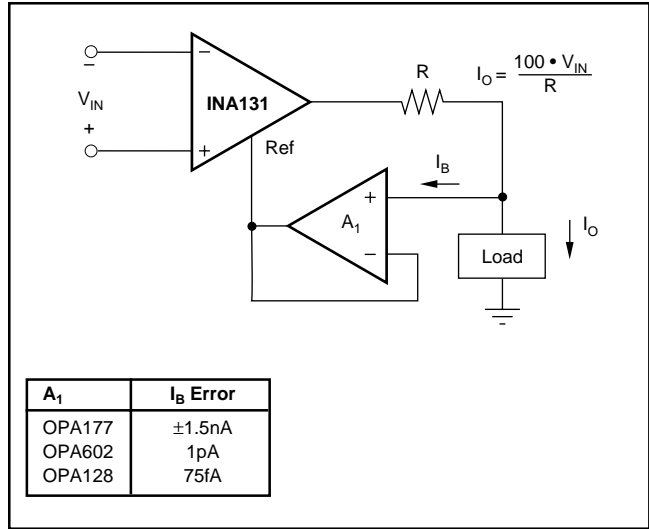


FIGURE 9. Differential Voltage to Current Converter.

IMPORTANT NOTICE

Texas Instruments and its subsidiaries (TI) reserve the right to make changes to their products or to discontinue any product or service without notice, and advise customers to obtain the latest version of relevant information to verify, before placing orders, that information being relied on is current and complete. All products are sold subject to the terms and conditions of sale supplied at the time of order acknowledgment, including those pertaining to warranty, patent infringement, and limitation of liability.

TI warrants performance of its semiconductor products to the specifications applicable at the time of sale in accordance with TI's standard warranty. Testing and other quality control techniques are utilized to the extent TI deems necessary to support this warranty. Specific testing of all parameters of each device is not necessarily performed, except those mandated by government requirements.

Customers are responsible for their applications using TI components.

In order to minimize risks associated with the customer's applications, adequate design and operating safeguards must be provided by the customer to minimize inherent or procedural hazards.

TI assumes no liability for applications assistance or customer product design. TI does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right of TI covering or relating to any combination, machine, or process in which such semiconductor products or services might be or are used. TI's publication of information regarding any third party's products or services does not constitute TI's approval, warranty or endorsement thereof.

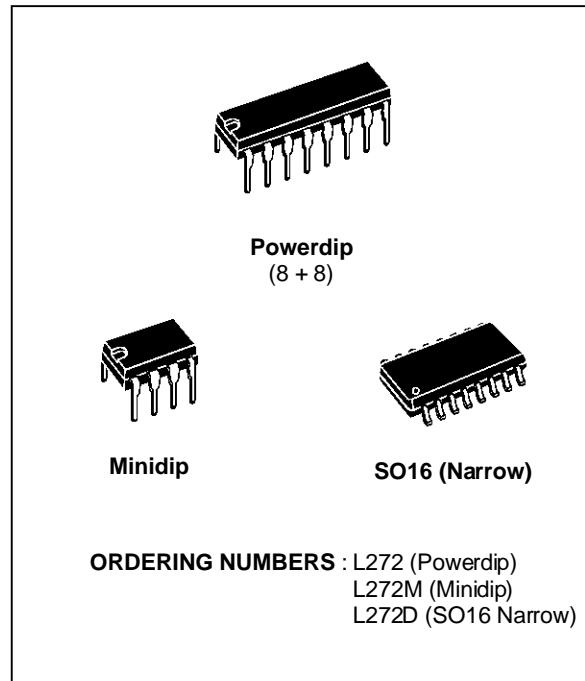
DUAL POWER OPERATIONAL AMPLIFIERS

- OUTPUT CURRENT TO 1 A
- OPERATES AT LOW VOLTAGES
- SINGLE OR SPLIT SUPPLY
- LARGE COMMON-MODE AND DIFFERENTIAL MODE RANGE
- GROUND COMPATIBLE INPUTS
- LOW SATURATION VOLTAGE
- THERMAL SHUTDOWN

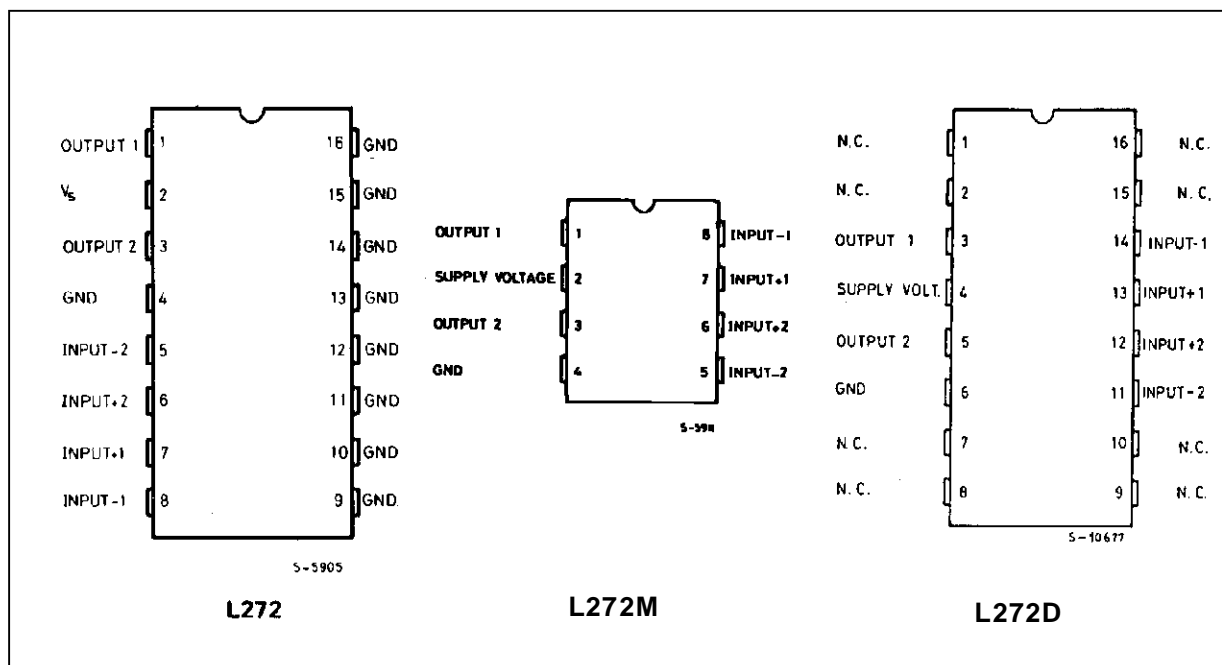
DESCRIPTION

The L272 is a monolithic integrated circuits in Powerdip, Minidip and SO packages intended for use as power operational amplifiers in a wide range of applications including servo amplifiers and power supplies, compact disc, VCR, etc.

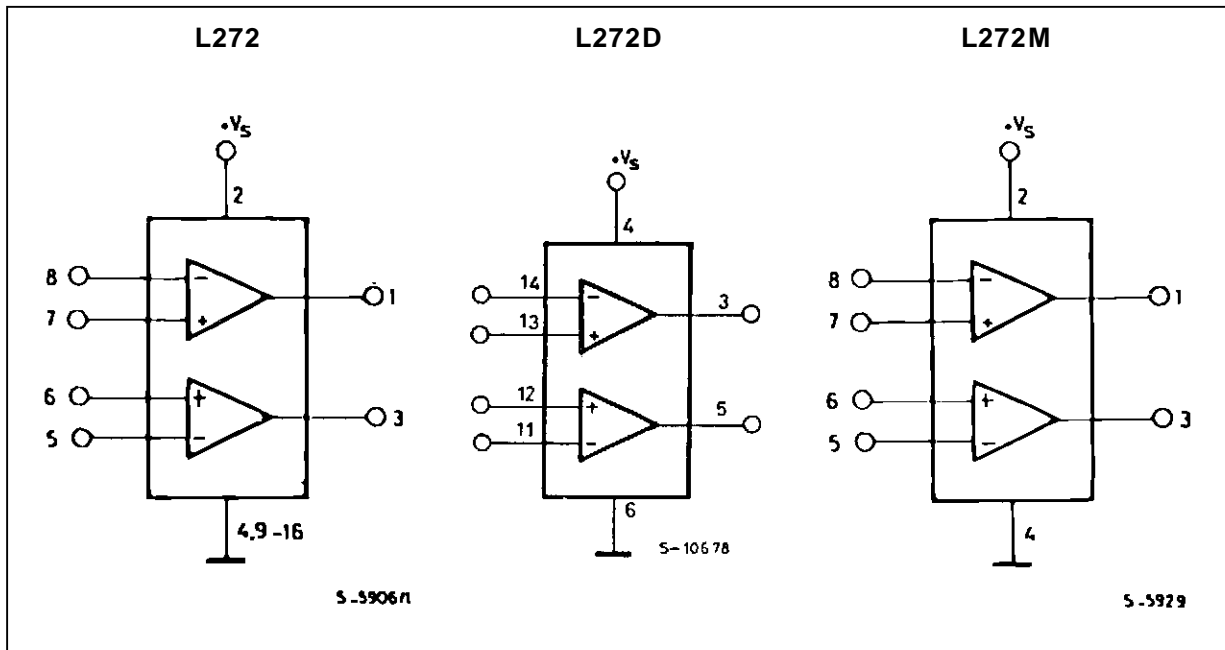
The high gain and high output power capability provide superior performance whatever an operational amplifier/power booster combination is required.



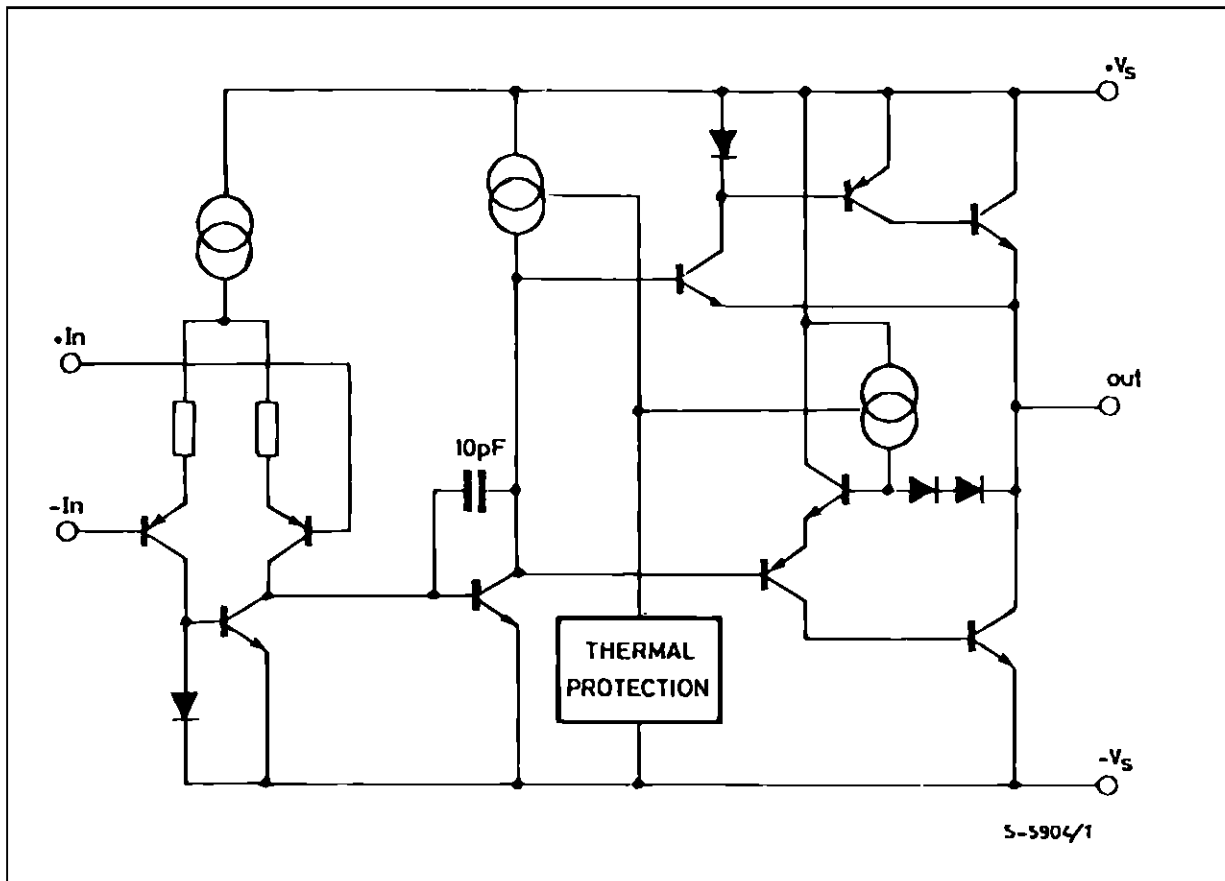
PIN CONNECTIONS (top view)



BLOCK DIAGRAMS



SCHEMATIC DIAGRAM (one only)



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V_s	Supply Voltage	28	V
V_i	Input Voltage	V_s	
V_i	Differential Input Voltage	$\pm V_s$	
I_o	DC Output Current	1	A
I_p	Peak Output Current (non repetitive)	1.5	A
P_{tot}	Power Dissipation at: $T_{amb} = 80^\circ\text{C}$ (L272), $T_{amb} = 50^\circ\text{C}$ (L272M), $T_{case} = 90^\circ\text{C}$ (L272D) $T_{case} = 75^\circ\text{C}$ (L272)	1.2 5	W W
T_{op}	Operating Temperature Range (L272D)	- 40 to 85	$^\circ\text{C}$
T_{stg}, T_j	Storage and Junction Temperature	- 40 to 150	$^\circ\text{C}$

THERMAL DATA

Symbol	Parameter	Max.	Powerdip	SO16	Minidip	Unit
$R_{th\ j-case}$	Thermal Resistance Junction-pins	Max.	15	-	* 70	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{th\ j-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	70	-	100	$^\circ\text{C}/\text{W}$
$R_{th\ j-alumina}$	Thermal Resistance Junction-alumina	Max.	-	** 50	-	$^\circ\text{C}/\text{W}$

* Thermal resistance junction-pin 4

** Thermal resistance junctions-pins with the chip soldered on the middle of an alumina supporting substrate measuring 15x 20mm; 0.65mm thickness and infinite heatsink.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_s = 24\text{V}$, $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V_s	Supply Voltage		4		28	V
I_s	Quiescent Drain Current	$V_o = \frac{V_s}{2}$ $V_s = 24\text{V}$ $V_s = 12\text{V}$		8 7.5	12 11	mA mA
I_b	Input Bias Current			0.3	2.5	μA
V_{os}	Input Offset Voltage			15	60	mV
I_{os}	Input Offset Current			50	250	nA
SR	Slew Rate			1		V/ μs
B	Gain-bandwidth Product			350		kHz
R_i	Input Resistance		500			k Ω
G_v	O. L. Voltage Gain	$f = 100\text{Hz}$ $f = 1\text{kHz}$	60	70 50		dB dB
e_N	Input Noise Voltage	$B = 20\text{kHz}$		10		μV
I_N	Input Noise Current	$B = 20\text{kHz}$		200		pA
CRR	Common Mode Rejection	$f = 1\text{kHz}$	60	75		dB
SVR	Supply Voltage Rejection	$f = 100\text{Hz}$, $R_G = 10\text{k}\Omega$, $V_R = 0.5\text{V}$ $V_s = 24\text{V}$ $V_s = \pm 12\text{V}$ $V_s = \pm 6\text{V}$	54	70 62 56		dB
V_o	Output Voltage Swing	$I_p = 0.1\text{A}$ $I_p = 0.5\text{A}$	21	23 22.5		V V
C_s	Channel Separation	$f = 1\text{kHz}$; $R_L = 10\Omega$, $G_v = 30\text{dB}$ $V_s = 24\text{V}$ $V_s = \pm 6\text{V}$		60 60		dB
d	Distortion	$f = 1\text{kHz}$, $G_v = 3\text{dB}$, $V_s = 24\text{V}$, $R_L = \infty$		0.5		%
T_{sd}	Thermal Shutdown Junction Temperature			145		$^\circ\text{C}$

Figure 1 : Quiescent Current versus Supply Voltage

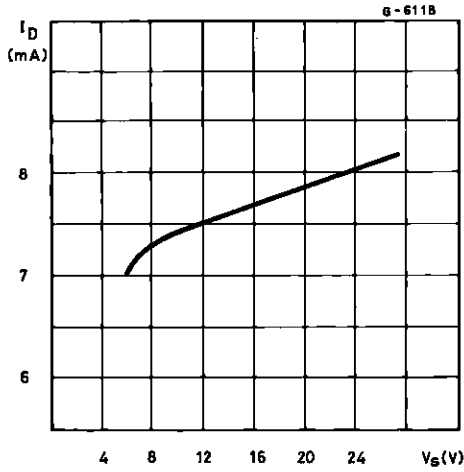


Figure 2 : Quiescent Drain Current versus Temperature

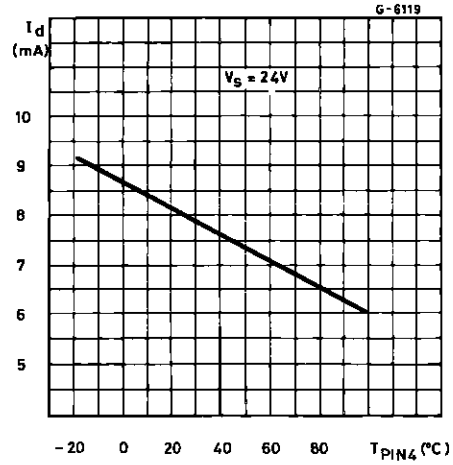


Figure 3 : Open Loop Voltage Gain

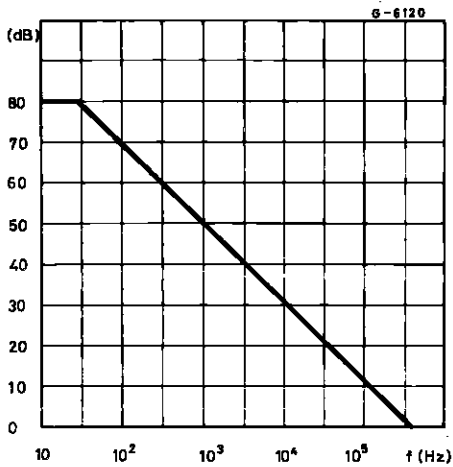


Figure 4 : Output Voltage Swing versus Load Current

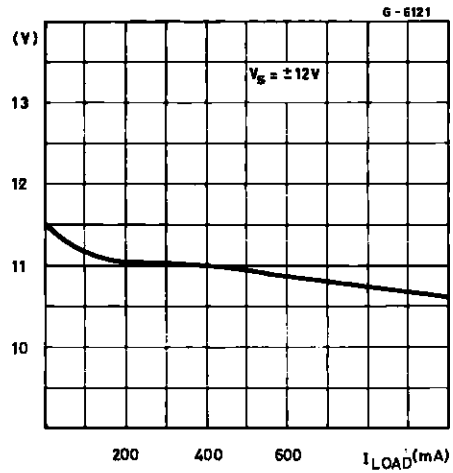


Figure 5 : Output Voltage Swing versus Load Current

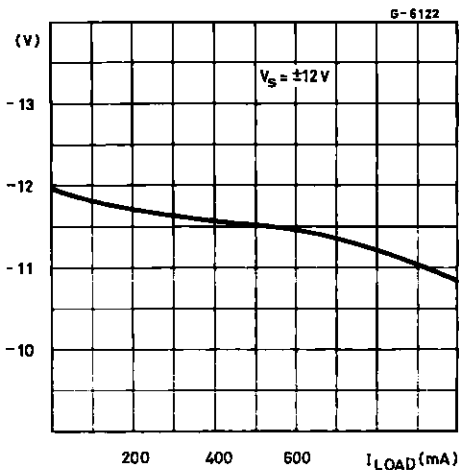


Figure 6 : Supply Voltage Rejection versus Frequency

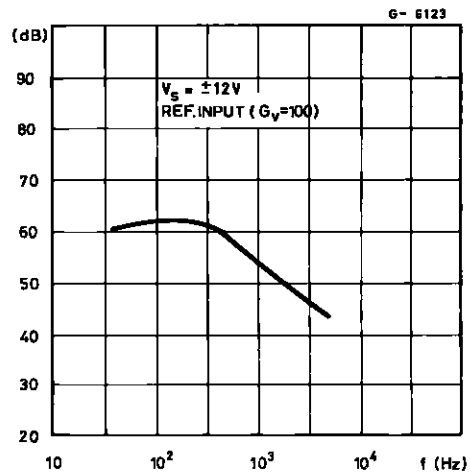


Figure 7 : Channel Separation versus Frequency

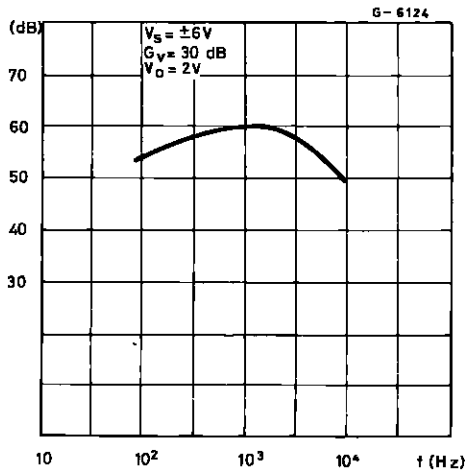
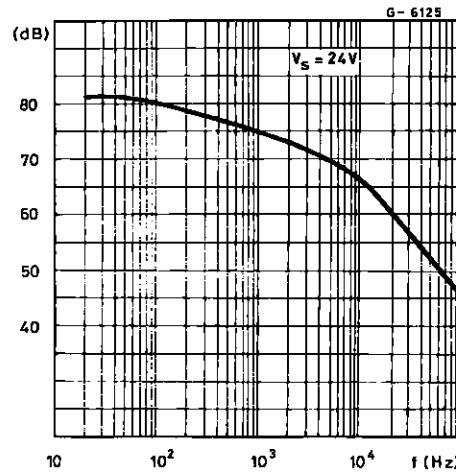


Figure 8 : Common Mode Rejection versus Frequency



APPLICATION SUGGESTION

NOTE

In order to avoid possible instability occurring into final stage the usual suggestions for the linear power stages are useful, as for instance :

- layout accuracy ;
- a 100nF capacitor connected between supply pins and ground ;
- boucherot cell (0.1 to 0.2 μ F + 1 Ω series) between outputs and ground or across the load.

Figure 9 : Bidirectional DC Motor Control with μ P Compatible Inputs

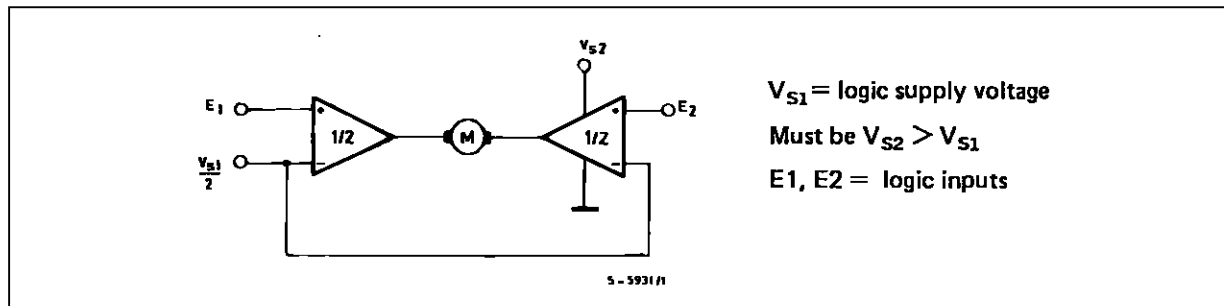


Figure 10 : Servocontrol for Compact-disc

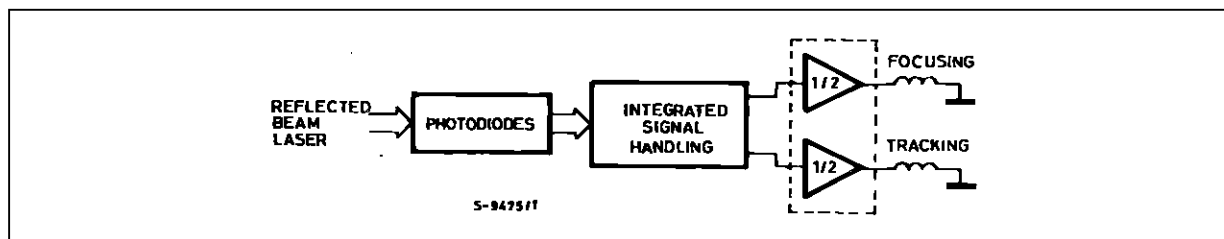


Figure 11 : Capstan Motor Control in Video Recorders

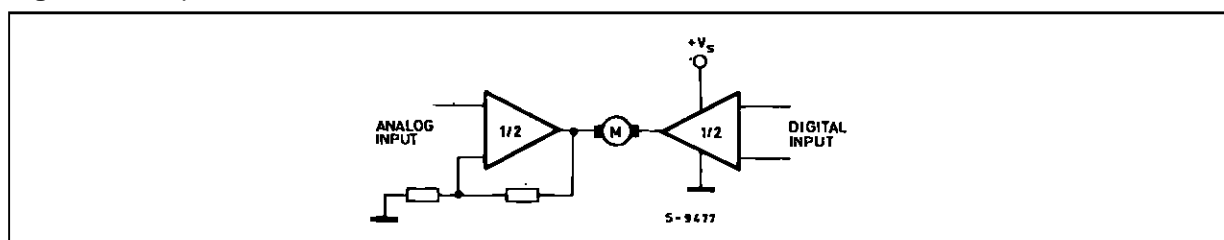
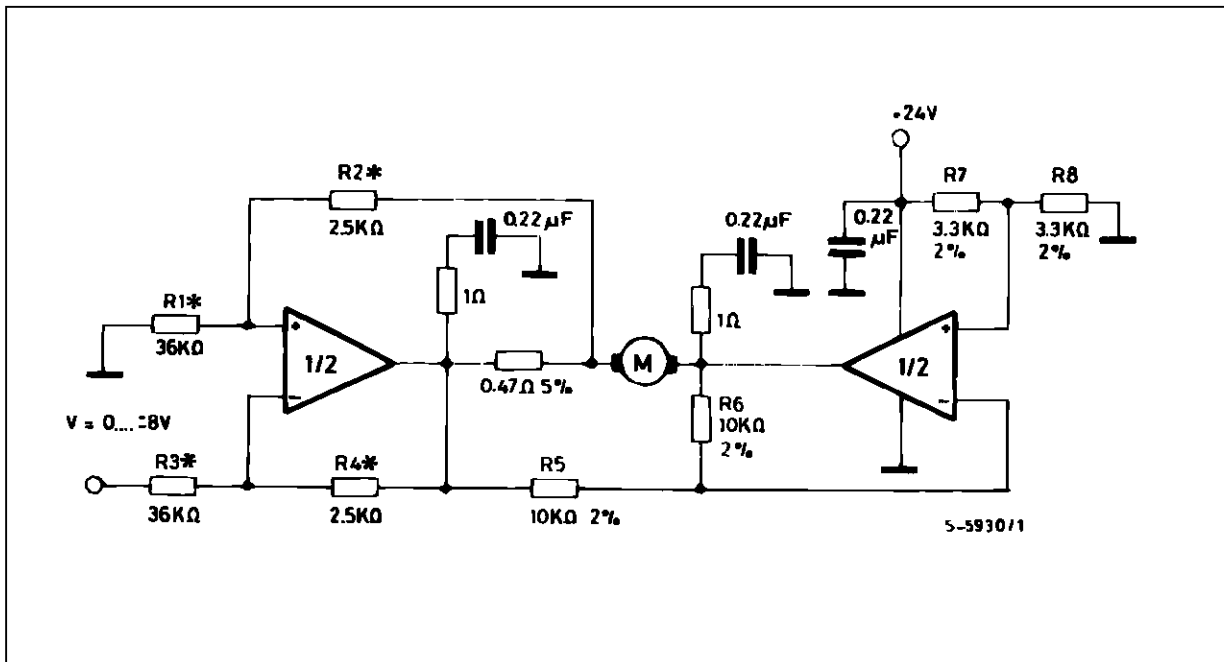


Figure 12 : Motor Current Control Circuit.

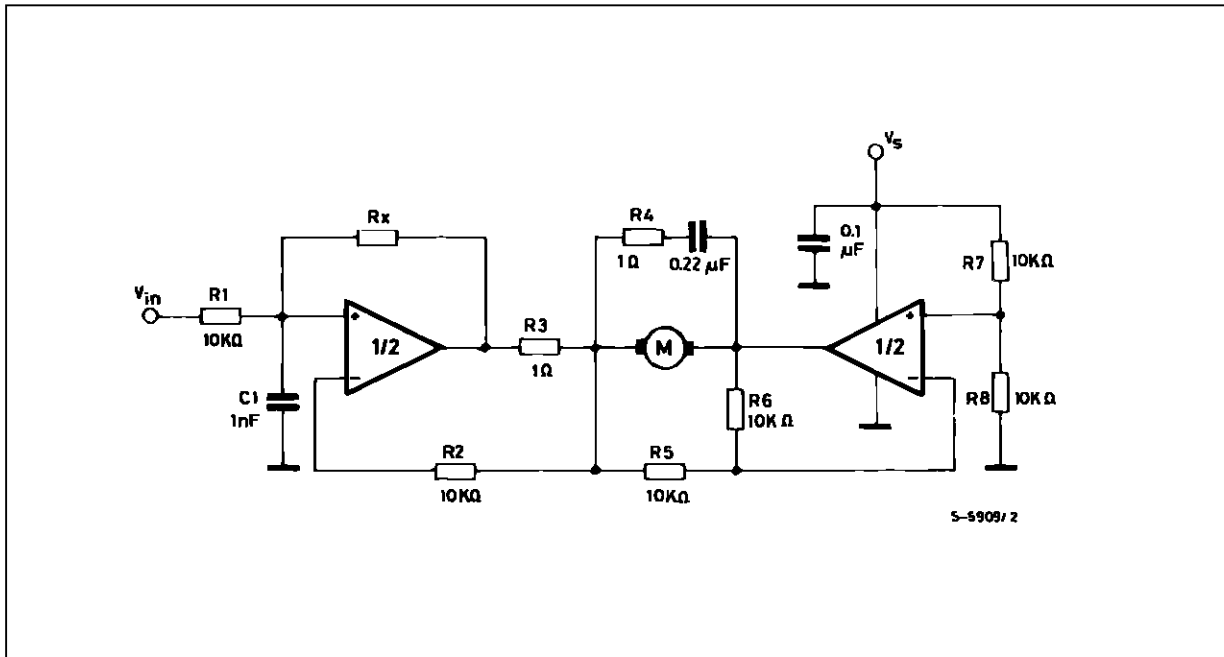


Note : The input voltage level is compatible with L291 (5-BIT D/A converter).

Figure 13 : Bidirectional Speed Control of DC Motors.

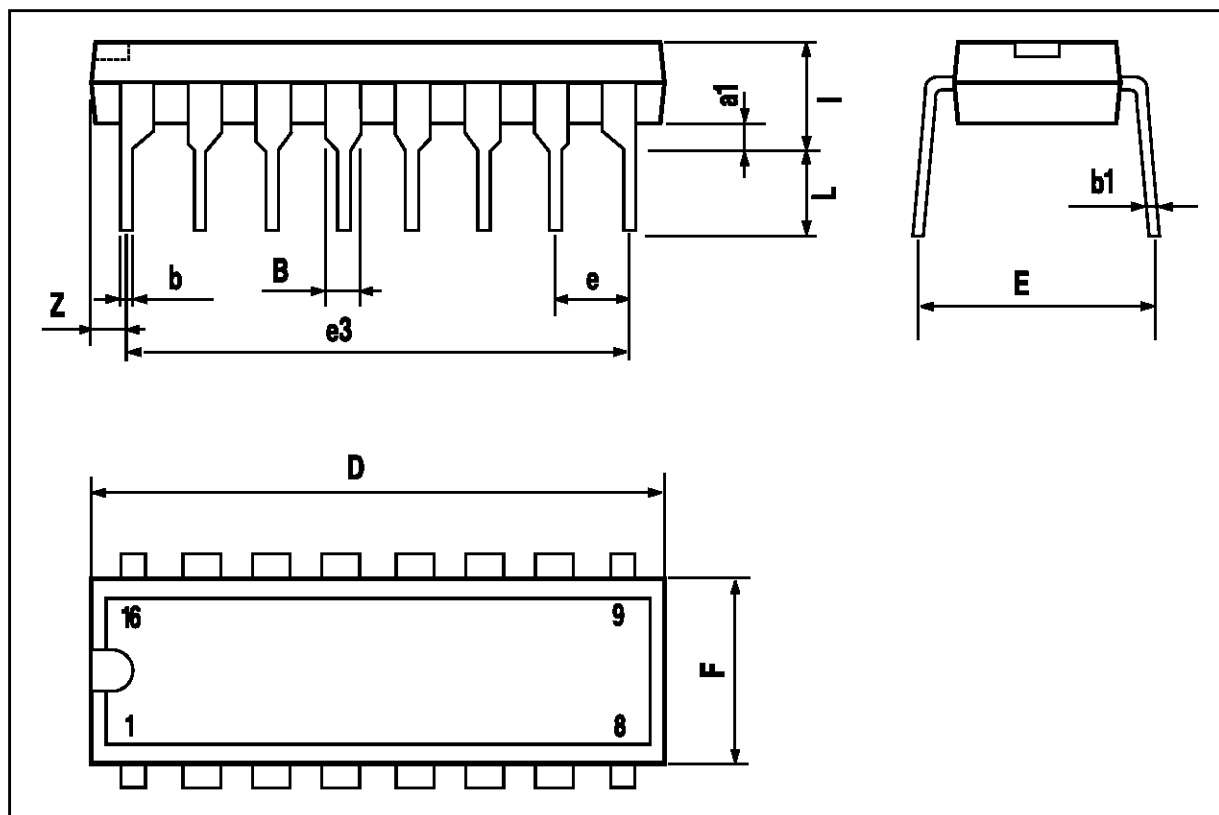
For circuit stability ensure that $R_x > \frac{2R_3 \cdot R_1}{R_M}$ where R_M = internal resistance of motor.

The voltage available at the terminals of the motor is $V_M = 2 \left(V_i \cdot \frac{V_s}{2} \right) + |R_o| \cdot I_M$ where $|R_o| = \frac{2R \cdot R_1}{R_x}$ and I_M is the motor current.



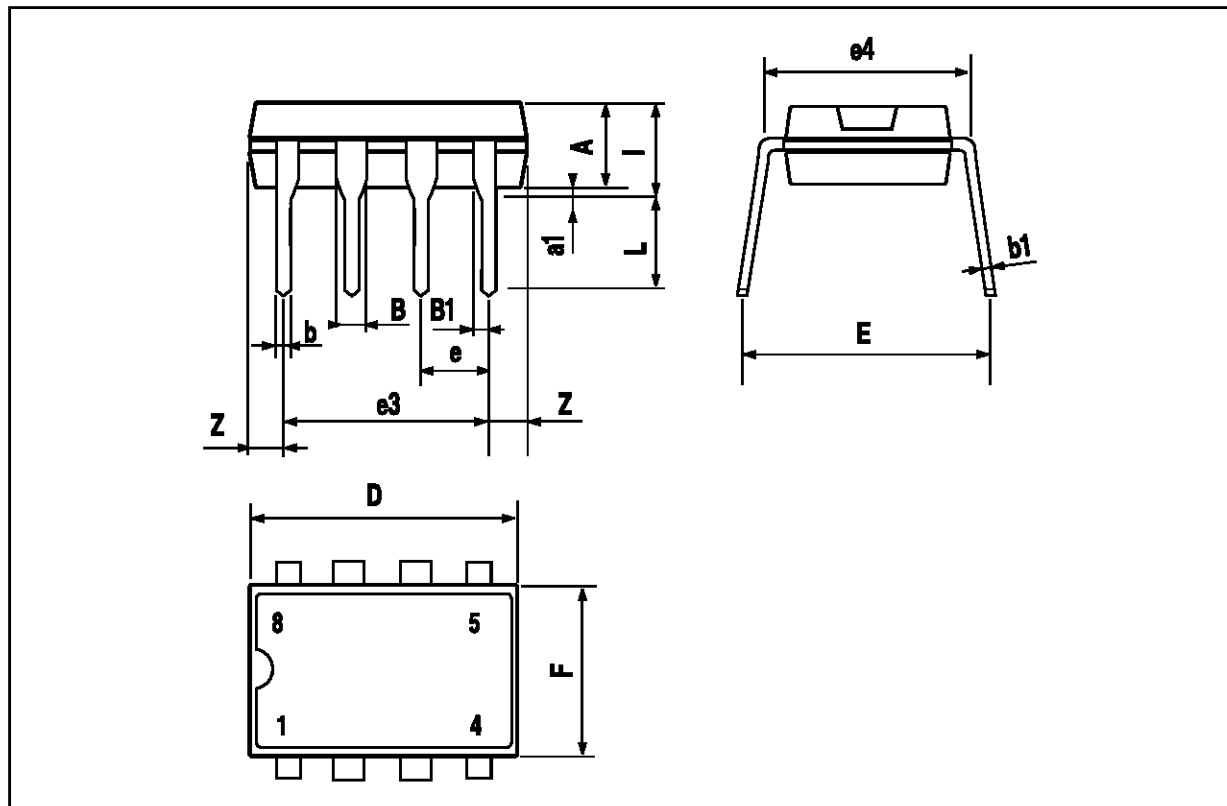
POWERDIP 16 PACKAGE MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
a1	0.51			0.020		
B	0.85		1.40	0.033		0.055
b		0.50			0.020	
b1	0.38		0.50	0.015		0.020
D			20.0			0.787
E		8.80			0.346	
e		2.54			0.100	
e3		17.78			0.700	
F			7.10			0.280
I			5.10			0.201
L		3.30			0.130	
Z			1.27			0.050



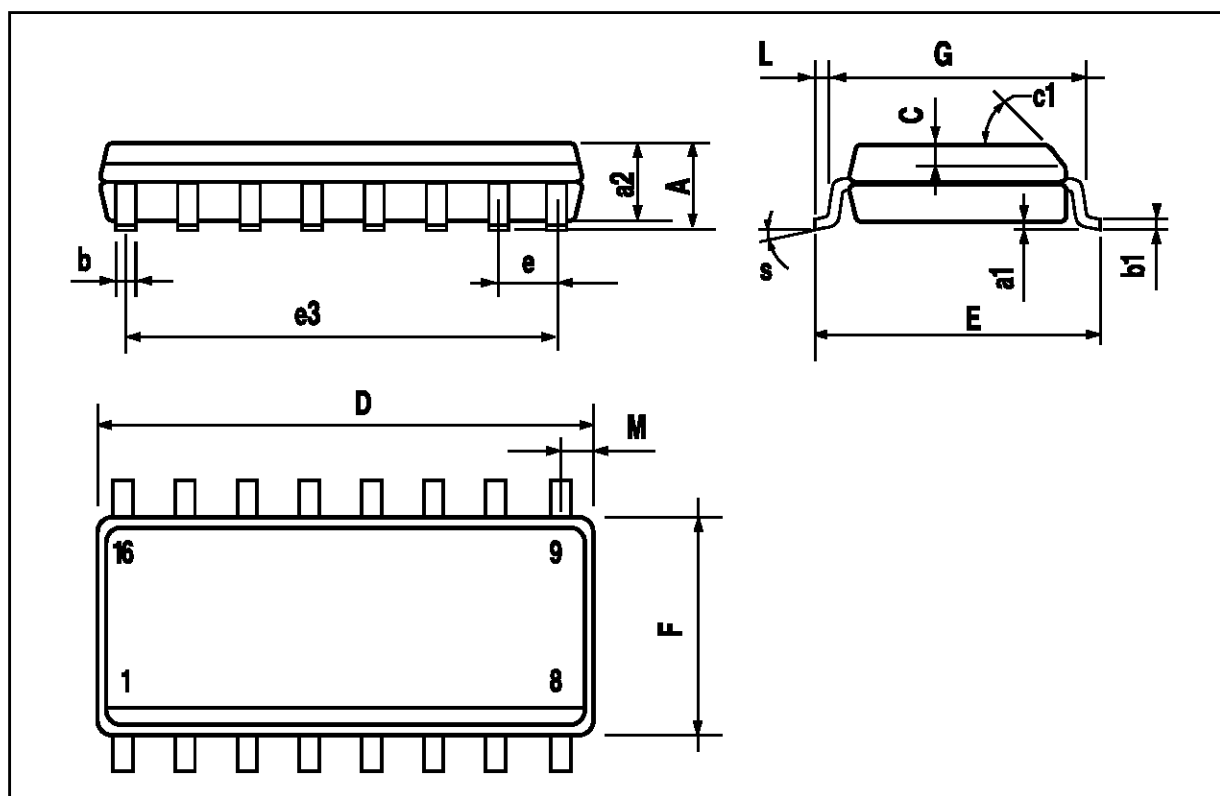
MINIDIP PACKAGE MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A		3.32			0.131	
a1	0.51			0.020		
B	1.15		1.65	0.045		0.065
b	0.356		0.55	0.014		0.022
b1	0.204		0.304	0.008		0.012
D			10.92			0.430
E	7.95		9.75	0.313		0.384
e		2.54			0.100	
e3		7.62			0.300	
e4		7.62			0.300	
F			6.6			0.260
I			5.08			0.200
L	3.18		3.81	0.125		0.150
Z			1.52			0.060



SO16 NARROW PACKAGE MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.25	0.004		0.009
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1	45° (typ.)					
D	9.8		10	0.386		0.394
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		8.89			0.350	
F	3.8		4.0	0.150		0.157
L	0.4		1.27	0.150		0.050
M			0.62			0.024
S	8° (max.)					

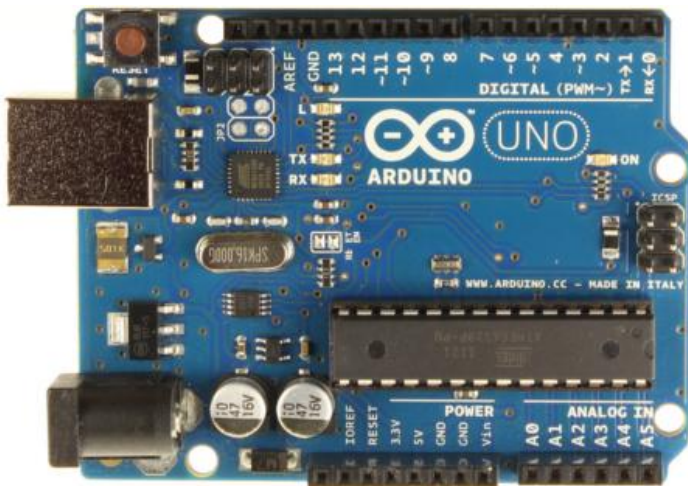


Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, SGS-THOMSON Microelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of SGS-THOMSON Microelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. SGS-THOMSON Microelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of SGS-THOMSON Microelectronics.

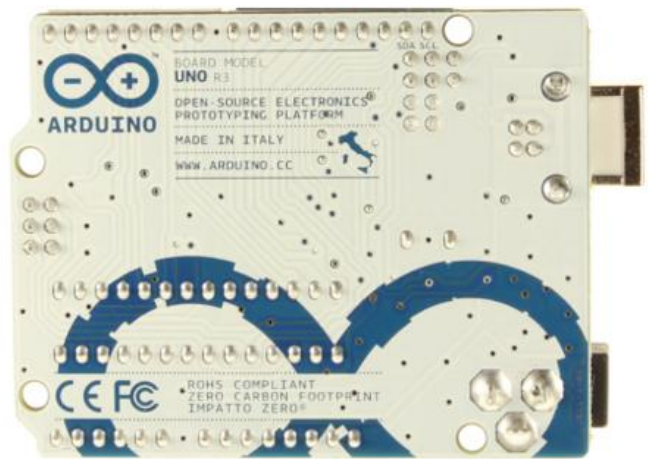
© 1995 SGS-THOMSON Microelectronics - All Rights Reserved

SGS-THOMSON Microelectronics GROUP OF COMPANIES
Australia - Brazil - France - Germany - Hong Kong - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Morocco - The Netherlands - Singapore -
Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A.

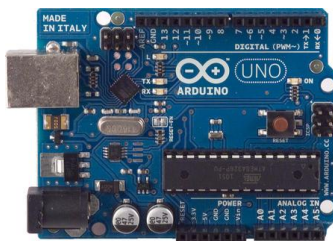
Arduino Uno



Arduino Uno R3 Front



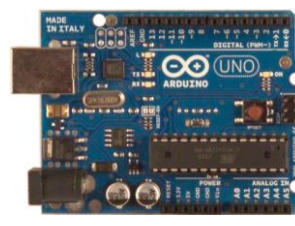
Arduino Uno R3 Back



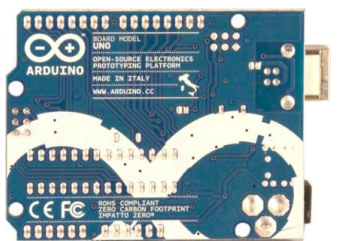
Arduino Uno R2 Front



Arduino Uno SMD



Arduino Uno Front



Arduino Uno Back

Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz ceramic resonator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega16U2 (Atmega8U2 up to version R2) programmed as a USB-to-serial converter.

[Revision 2](#) of the Uno board has a resistor pulling the 8U2 HWB line to ground, making it easier to put into [DFU mode](#).

[Revision 3](#) of the board has the following new features:

- 1.0 pinout: added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible both with the board that use the AVR, which operate with 5V and with the Arduino Due that operate with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- Stronger RESET circuit.
- Atmega 16U2 replace the 8U2.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the [index of Arduino boards](#).

Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V

Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-uno-Rev3-reference-design.zip](#) (NOTE: works with Eagle 6.0 and newer)

Schematic: [arduino-uno-Rev3-schematic.pdf](#)

Note: The Arduino reference design can use an Atmega8, 168, or 328, Current models use an ATmega328, but an Atmega8 is shown in the schematic for reference. The pin configuration is identical on all three processors.

Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

Memory

The ATmega328 has 32 KB (with 0.5 KB used for the bootloader). It also has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.

- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#).
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Uno has 6 analog inputs, labeled A0 through A5, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though it is possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **TWI: A4 or SDA pin and A5 or SCL pin.** Support TWI communication using the [Wire library](#).

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and ATmega328 ports](#). The mapping for the Atmega8, 168, and 328 is identical.

Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega16U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '16U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, [on Windows, a .inf file is required](#). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Uno's digital pins.

The ATmega328 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the [documentation](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Uno" from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available. The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

- On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2.
- On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Uno is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2/16U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

The Uno contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

USB Overcurrent Protection

The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

Physical Characteristics

The maximum length and width of the Uno PCB are 2.7 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Four screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.



Anexo III. Pegado de galgas extensiométricas





Para que una galga extensométrica mida con precisión debe estar correctamente instalada en el objeto de medida. Este anexo pretende servir como guía para ayudar a elegir el adhesivo adecuado y explicar cómo aplicarlo al objeto correctamente. También señala algunas diferencias entre los adhesivos, indica el modo de preparar una superficie para la unión y ofrece consejos para la instalación de galgas extensométricas.

Adhesivos

La forma más habitual de fijar galgas extensométricas a una estructura consiste en utilizar un adhesivo. Ese adhesivo debe ser de muy alta calidad, de modo que transmita de forma íntegra la deformación de la estructura a la galga extensométrica. Si se “pierde” algo de la extensión en la unión entre la estructura y la galga extensométrica, la medición presentará errores.

Para garantizar una transferencia completa de la extensión de la estructura a la galga, es preciso elegir un adhesivo adecuado al objeto de medida e instalar convenientemente las galgas.

Diferentes opciones de adhesivos

Para que una medición sea lo más precisa posible, se debe elegir el adhesivo más adecuado para el objeto y la aplicación en cuestión. Para ello, conviene conocer las distintas opciones disponibles.

Adhesivos monocomponente o multicomponente

Los **adhesivos monocomponente** se pueden utilizar directamente según salen del tubo. No hace falta mezclarlos con otros componentes.

Los **adhesivos multicomponente** suelen consistir en dos componentes que deben mezclarse antes del uso. Estos adhesivos también tienen un “tiempo de empleo útil”; es decir, hay un plazo de tiempo para utilizarlos una vez mezclados. Este tiempo puede oscilar entre unos minutos y varias horas.

Adhesivos de curado en caliente o de curado en frío

Los **adhesivos de curado en frío** permiten instalar la galga extensométrica en el objeto a temperatura ambiente.

Los **adhesivos de curado en caliente**, en cambio, deben calentarse mientras se secan. Para ello, el objeto debe introducirse en un horno y soportar temperaturas elevadas mientras el adhesivo polimeriza. Asimismo, se debe disponer de algún medio para aplicar y mantener la presión sobre la galga extensométrica mientras el objeto esté en el horno. Como estos adhesivos se calientan durante el proceso de curado, pueden soportar temperaturas de trabajo superiores. Con frecuencia se utilizan en la fabricación de transductores.



Tiempo de curado

Los distintos adhesivos requieren tiempos de curado diferentes para polimerizar. Estos tiempos de curado dependen en parte de la temperatura del entorno. Si es baja, los adhesivos tardan más tiempo en polimerizar. Si la temperatura es más elevada, los adhesivos curan más rápido.

Temperatura de trabajo

El diseño de los distintos adhesivos hace posible que soporten diferentes temperaturas ambientales. En las especificaciones del adhesivo se indica su intervalo de temperatura de uso. Si utiliza el objeto y la galga extensométrica a una temperatura fuera del intervalo indicado, pueden producirse errores en la medición de la extensión. Por ejemplo, si un adhesivo está indicado para uso en entornos con temperaturas de hasta 200 °C, el uso a una temperatura por encima de este valor ablandará el adhesivo haciendo que adquiera una consistencia untuosa, lo que afecta negativamente a la medición de la extensión.

Además de la temperatura, la aplicación de algunos adhesivos debe respetar determinados parámetros de humedad.

Los **adhesivos fluidos** permiten pegar la galga extensométrica al objeto y obtener una unión firme sin necesidad de aplicar una capa muy gruesa para. Por lo general, son preferibles los adhesivos fluidos, ya que una capa más gruesa aumenta la distancia entre el objeto y la galga, lo cual distorsiona la lectura de la extensión. Esta distorsión puede verse exacerbada cuando se utilizan galgas extensométricas de flexión, que requieren una capa neutra sobre el objeto como base para la medición.

Los **adhesivos espesos** son más adecuados para los objetos porosos. Por ejemplo, el hormigón absorbe los adhesivos fluidos y por eso requiere el uso de un adhesivo más espeso o pastoso. No obstante, siempre es conveniente tratar de aplicar una capa lo más fina posible.

¿Cómo se prepara la superficie de un objeto para la aplicación de un adhesivo?

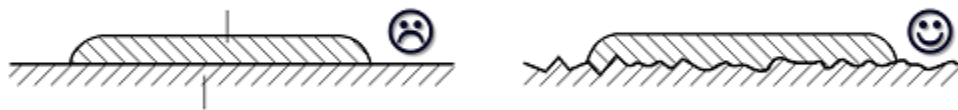
Para poder adherir una galga extensométrica a un objeto es muy importante que la superficie esté muy limpia. Si el objeto presenta suciedad, grasa, pintura, óxido u otros acabados, la unión no será eficaz. En primer lugar, utilice una rasqueta o amoladora para eliminar de la superficie cualquier material que pueda impedir la adhesión directa de la galga al objeto.

El segundo paso consiste en eliminar de la superficie cualquier resto que pueda haberse generado durante la operación de rascado o amolado. Por último, aplique un disolvente, específicamente diseñado para preparar superficies para la adhesión.

Nota: Para asegurarse de que no haya óxido en el punto donde quiera instalar la galga extensométrica, deberá limpiar el objeto poco antes de aplicar el adhesivo y colocar la galga. Si no puede colocar la galga extensométrica inmediatamente después de la

limpieza, puede proteger la superficie frente al oxígeno y la suciedad durante un breve periodo de tiempo con cinta adhesiva.

Una vez que la superficie del objeto esté bien limpia, puede desbastarla para mejorar la adherencia aumentando la superficie activa. Puede emplear una técnica de granallado o papel de esmeril con un tamaño de grano de entre 180 y 300, en función del adhesivo. En las especificaciones del adhesivo se indicará el tamaño de grano recomendado. A continuación, limpie la superficie una última vez. Es importante no saltarse este paso, ya que existe la posibilidad de arrastrar suciedad al punto de medición durante el desbastado.



Consejos para la preparación de superficies concretas y adhesivos idóneos

La calidad de la instalación de una galga extensométrica influye directamente en el margen de error de una lectura. A continuación se ofrecen algunos consejos para la preparación de superficies de materiales concretos.

Metales

Por lo general, los metales (como el aluminio, el cobre-berilio, el cobre y el acero) se preparan fácilmente con el procedimiento de limpieza y desbastado estándar. Normalmente se puede emplear cualquiera de los adhesivos que se han mencionado antes.

La aplicación de adhesivos a los metales resulta muy sencilla, con pocas excepciones. Con el titanio es preciso aplicar la galga extensométrica con rapidez, porque el adhesivo puede crear una capa de óxido sobre el metal.

Plástico

Para la preparación de superficies plásticas, en lugar de emplear una técnica de desbastado por abrasión se recomienda optar por un desbastado químico. En el caso del polietileno, también se puede aplicar plasma de oxígeno con un aplicador de mano. No todos los adhesivos funcionan bien con los plásticos. Lea atentamente las especificaciones una vez que haya reducido el número de opciones.

Instalación de la galga extensométrica

Una vez que haya limpiado, desbastado y limpiado de nuevo la superficie podrá pasar a instalar la galga extensométrica con el adhesivo que haya elegido. En primer lugar, marque en la superficie la zona en la que quiera fijar la galga extensométrica al punto de medición del objeto. Utilice un bolígrafo seco para marcar la superficie sin dejar tinta (de lo contrario, tendría que eliminar cualquier resto de tinta).

Recuerde:

No utilice una aguja afilada para arañar la superficie, porque dañaría los componentes.

No toque la superficie. Por muy limpios que estén los dedos siempre dejan algo de grasa, lo cual afecta negativamente a la unión.

No sople sobre la superficie. El aliento añade humedad y atrae la suciedad.

Una vez marcada la superficie, ya está lista para una última limpieza. Empape una gasa limpia de celulosa (que no deje pelusa) en desengrasante o en un producto similar, para eliminar los últimos restos de grasa. Frote la superficie hasta que no quede ningún resto de suciedad. Utilice una gasa nueva para cada limpieza y no devuelva el exceso de desengrasante a la botella.

Ya puede instalar la galga extensométrica. Las galgas extensométricas de HBM se suministran ya limpias y listas para colocarlas sobre objetos. Extraiga la galga de su envase con unas pinzas (no la toque con los dedos) y colóquela sobre la marca que ha hecho previamente con el bolígrafo seco en la superficie limpia. Utilice cinta adhesiva para tapar las conexiones y mantener la galga en su posición mientras prepara el adhesivo. También puede utilizar la cinta adhesiva para proteger el objeto del pegamento adhesivo una vez que lo aplique. Simplemente coloque la cinta alrededor de la galga extensométrica, como si fuera un cerco. Esta cinta protege el objeto del adhesivo.

