



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

Departamento de Tecnología Electrónica

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR
DE FUERZA, SU ELECTRÓNICA DE
ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE
DATOS**

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Autor: Ignacio Mateos Vázquez

Tutora del T.F.G.: Dra. María Dolores Blanco Rojas

Director del T.F.G.: Dr. Antonio Flores Caballero

Leganés, Septiembre 2015

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero dar mis más sinceros agradecimientos a mi tutor el Dr. Antonio Flores Caballero y a Luis Moreno Lorente por darme la oportunidad de poder realizar este Trabajo Fin de Grado y por su disponibilidad en todo momento.

A mis padres y hermanos, por haberme animado a seguir, a sobreponerme en los momentos difíciles y haber confiado siempre en mí durante esta etapa, la cual finaliza con este Trabajo Fin de Grado. Sin su apoyo nunca hubiera podido concluir este ciclo. A todos ellos, muchas gracias.

A mi novia, Paloma, por haberme aguantado y tranquilizado en todos los momentos de estrés, por sus consejos, su confianza y su infinita paciencia durante todos estos años. Gracias por ser mi mejor amiga y compartir tu vida conmigo.

A José Álvarez Paramio, el mejor amigo que se puede tener, sin su apoyo y sin sus consejos habría abandonado los estudios y no habría logrado mi objetivo, muchas gracias. También me gustaría mencionar a todos mis nuevos amigos que he conocido durante esta etapa en la universidad, Antonio, Luis Carlos, Ricardo, David, Álvaro, Luis, Roberto, Davicito, Fran, Rober, Suqui, Sergio y Francisco. Gracias a todos ellos por las experiencias vividas, por su ayuda, motivación y experiencias vividas juntos durante todo este tiempo, siempre que los necesité estaban ahí.

Gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS	12
1 INTRODUCCIÓN	13
1.1 Marco del proyecto	14
1.2 Objetivos.....	15
1.3 Herramientas empleadas	16
1.4 Alcance del proyecto	18
2 ESTADO DEL ARTE DE LOS SENSORES.....	19
2.1 Robótica y biomedicina.....	20
2.1.1 Ideas generales.....	20
2.1.2 Robots.....	21
2.1.2.1 Definición de robot	21
2.1.2.2 Clasificación de los robots	22
2.2 Sensores.....	24
2.2.1 Definición de sensor	24
2.2.2 Características generales de los sensores	25
2.2.2.1 Diseño	25
2.2.2.1.1 Magnitud de medida	25
2.2.2.1.2 Características eléctricas	26
2.2.2.1.3 Características mecánicas	27
2.2.2.2 Prestaciones.....	27
2.2.2.2.1 Características estáticas	27
2.2.2.2.2 Características dinámicas	30
2.2.2.2.3 Características ambientales.....	33
2.2.2.3 Fiabilidad.....	34
2.2.3 Clasificación de los sensores	35
2.2.3.1 Naturaleza de la señal de salida	35
2.2.3.2 Naturaleza de la magnitud a medir	35
2.2.3.3 Según requerimientos de fuente de energía.....	36
2.2.3.4 Variable física de medida.....	36
2.2.3.5 Empleados en robots.....	37
2.2.3.5.1 Sensores internos	37
2.2.3.5.1.1 Sensores de posición.....	37
2.2.3.5.1.2 Sensores de velocidad.....	44
2.2.3.5.1.3 Sensores de aceleración	45
2.2.3.5.2 Sensores externos	47
2.2.3.5.2.1 Sensores de proximidad.....	47
2.2.3.5.2.2 Sensores de alcance.....	52
2.2.3.5.2.3 Sensores de contacto.....	54
2.2.3.5.2.4 Sensores de fuerza.....	56

3	DISEÑO DEL SENSOR DE FUERZA	61
3.1	Descripción general	62
3.2	Transductor	63
3.2.1	Galgas extensiométricas.....	63
3.2.1.1	Principios básicos de resistencia de materiales.....	65
3.2.1.1.1	Deformación del material.....	65
3.2.1.1.2	Gráfica de la tensión frente a la deformación.....	67
3.2.1.2	Elección de las galgas extensiométricas	68
3.3	Acondicionamiento de la señal	70
3.3.1	Puente de Wheatstone.....	70
3.3.1.1	Montaje en ¼ de puente.....	73
3.3.1.2	Montaje en ½ puente	75
3.3.1.3	Montaje en puente completo.....	79
3.3.2	Amplificación de la señal.....	83
3.3.3	Convertidor Analógico-Digital	84
3.3.3.1	Convertidor Analógico Digital tipo SAR	84
3.3.3.2	Convertidor Analógico Digital tipo Sigma-Delta	85
3.4	Procesamiento de la señal, registro y/o presentación	86
4	DISEÑO DE LA PLETINA	88
4.1	Aspectos generales	89
4.2	Elección de la pletina	89
4.3	Diseño de la pletina en ABAQUS	92
4.3.1	Módulo PART.....	94
4.3.2	Módulo PROPERTY	99
4.3.3	Módulo ASSEMBLY	103
4.3.4	Módulo STEP.....	104
4.3.5	Módulo LOAD	106
4.3.6	Módulo MESH.....	113
4.3.7	Módulo JOB	119
4.3.8	Módulo VISUALIZATION	122
4.4	Estudio de sensibilidad del mallado.....	126
5	MONTAJE Y VALIDACIÓN DEL SENSOR DE FUERZA	128
5.1	Condiciones iniciales.....	129
5.1.1	Montaje del sensor de fuerza.....	130
5.1.1.1	Preparación de las superficies de la pletina de aluminio	130
5.1.1.2	Colocación de las galgas extensiométricas.....	133
5.1.1.3	Diseño de la pieza de sujeción de la pletina	137
5.1.1.4	Diseño del soporte para el Amplificador y el Conversor Analógico-Digital	139
5.1.1.5	Diseño de la pieza de sujeción de los pesos	144
5.1.2	Validación del sensor de fuerza.....	148
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	172
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Banco de pruebas de los SMA’s de la Universidad Carlos III de Madrid	15
Figura 2 – Estructura de un transductor [5]	25
Figura 3 – Interfaces eléctricas del sensor	26
Figura 4 – Curva de calibración ideal y real	27
Figura 5 – Ejemplo de resolución y umbral	28
Figura 6 – Linealización de la curva de calibración	28
Figura 7 - Representación de la saturación y la zona muerta.....	29
Figura 8 – Representación de la histéresis de un sensor analógico	30
Figura 9 – Representación del tiempo de retardo y subida de una señal	31
Figura 10 – Representación del tiempo de respuesta de una señal.....	31
Figura 11 – Representación del tiempo de establecimiento de una señal.....	32
Figura 12 – Respuesta escalón de sistema sobreamortiguado	32
Figura 13 - Respuesta escalón de sistema críticamente amortiguado	32
Figura 14 - Respuesta escalón de sistema subamortiguado	33
Figura 15 – Sensor potenciométrico angular (izq.) y lineal (dcha.) [10]	38
Figura 16 – Sensor de posición Resolver [10]	39
Figura 17 – Esquema de un sensor Sincro y Resolver [10]	39
Figura 18 – Sensor de posición Sincro [10]	39
Figura 19 – Esquema de un sensor de posición LVDT	40
Figura 20 – Sensor de posición LVDT [10]	40
Figura 21– Sensor de posición Inductosyn Lineal (dcha.) y Rotatorio (izq.) [10]	41
Figura 22 – Esquema sensor de posición Inductosyn Lineal.....	41
Figura 23 – Sensor de posición Encoder Incremental [10]	42
Figura 24 – Esquema de un Encoder Incremental	43
Figura 25 – Esquema de un Encoder Absoluto	43
Figura 26 – Sensor de posición Encoder Absoluto [10]	43
Figura 27 – Sensor de velocidad Tacogenerador [10]	44
Figura 28 – Convertidor Frecuencia-Tensión [10]	45
Figura 29 – Esquema sensor de aceleración piezoeléctrico	46
Figura 30 – Sensores de aceleración piezoeléctricos [10]	46
Figura 31 – Esquema de un sensor de aceleración piezoresistivo	46
Figura 32 – Sensores de aceleración piezoresistivos [10]	47
Figura 33 - Esquema de un sensor de proximidad inductivo en ausencia de un objeto (figura A) y en presencia de éste (figura B)	48
Figura 34 – Distintos tipos de sensores de proximidad inductivos [10]	48
Figura 35 – Esquema de sensor de proximidad efecto Hall en ausencia de material ferromagnético (izq.) y en presencia de éste (dcha.)	48

Figura 36 – Distintos tipos de sensores de proximidad efecto Hall [10]	49
Figura 37 – Esquema de un sensor de proximidad capacitivo	49
Figura 38 – Distintos tipos de sensores de proximidad capacitivos [10].....	50
Figura 39 – Esquema de un sensor ultrasónico de proximidad.....	50
Figura 40 – Esquema de funcionamiento de un sensor ultrasónico	50
Figura 41 – Distintos tipos de sensores de proximidad ultrasónicos [10]	51
Figura 42 – Esquema de un sensor de proximidad óptico.....	51
Figura 43 – Distintos tipos de sensores de proximidad ópticos [10].....	52
Figura 44 – Esquema del método de triangulación para el cálculo de distancias	52
Figura 45 – Esquema del método de iluminación estructural para el cálculo de distancias	53
Figura 46 – Esquema de funcionamiento de sensor de alcance láser por tiempo de vuelo	53
Figura 47 – Ejemplo de disposición de un sensor de contacto binario en una mano de robot	54
Figura 48 – Esquema de un sensor de contacto binario.....	55
Figura 49 – Distintos tipos de sensores de contacto binarios [10].....	55
Figura 50 – Esquema de un sensor de contacto analógico	55
Figura 51 – Ejemplo de disposición de un sensor de contacto de tipo array	56
Figura 52 – Representación de un electrodo del array táctil [11]	57
Figura 53 – Imagen de una piel artificial flexible [12]	57
Figura 54 - Esquema de la matriz de sensores (vista superior y transversal) [13]	58
Figura 55 - Imagen de la matriz de sensores 16 × 16 (45 cm2 × 45 cm2) [13]	58
Figura 56 – Ejemplo de disposición de un sensor de muñeca en un brazo robótico	59
Figura 57 – Ejemplo de disposición de galgas en sensor de fuerza de muñeca	59
Figura 58 – Distintos modelos del sensor de muñeca JR3 [14]	59
Figura 59 – Distintos tipos de sensores detorsión [10]	60
Figura 60 - Diagrama de bloques de un sistema de instrumentación	62
Figura 61 – Esquema de una galga extensiométrica	63
Figura 62 – Tipos de galgas extensiométricas de la empresa OMEGA	64
Figura 63 – Representación eléctrica de una galga extensiométrica	64
Figura 64 – Galga extensiométrica con base de poliamida de RS Components.....	68
Figura 65 - Especificaciones de las galgas extensiométricas con base de poliamida de RS Components..	68
Figura 66 – Especificaciones generales de las galgas extensiométricas de RS Components.....	69
Figura 67 - Puente de Wheatstone.....	71
Figura 68 – Puente de Wheatstone con una galga extensiométrica	73
Figura 69 – Puente de Wheatstone con dos galgas extensiométricas	75
Figura 70 – Representación del montaje en contrafase o push-pull.....	77
Figura 71 - Puente de Wheatstone con cuatro galgas extensiométricas	79
Figura 72 - Representación del montaje en contrafase o push-pull.....	81
Figura 73 – Vista en planta del montaje en push-pull	81

Figura 74 – Circuito integrado LTC2051 [16]	83
Figura 75 - Esquema del amplificador diferencial de bajo nivel de ruido [17]	83
Figura 76 – Valor de la ganancia y del ruido de la señal de salida y entrada en función de R_G [17]	84
Figura 77 – CAD tipo SAR [19]	85
Figura 78 – Convertidor analógico-digital Sigma Delta de 24 bits [20]	86
Figura 79 - Microcontrolador STM32F4 [21]	87
Figura 80 – Tabla de equivalencias internacionales de la empresa Alumafel	90
Figura 81 – Catálogo de pletinas normalizadas de la empresa Alumafel	90
Figura 82 – Características mecánicas del aluminio 6063 de la empresa Alumafel en función del estado de tratamiento	91
Figura 83 – Propiedades físicas del aluminio 6063 de la empresa Alumafel.....	91
Figura 84 – Pantalla principal de ABAQUS/CAE.....	94
Figura 85 – Cuadro de diálogo para crear una “part”	95
Figura 86 – Pantalla de visualización del módulo SKETCH y el cuadro de diálogo de las opciones de éste (módulo PART).....	95
Figura 87 - Pantalla de visualización del módulo SKETCH	96
Figura 88 – Pantalla de visualización del módulo PART con el cuadro de diálogo para crear “partitions” 96	
Figura 89 – Selección de opciones del cuadro de diálogo para crear una “partition” (módulo PART)	97
Figura 90 – Pantalla de visualización del módulo SKETCH para definir particiones (módulo PART)	97
Figura 91 – Pantalla de visualización del módulo PART con el cuadro de diálogo del Part Manager	98
Figura 92 – Pantalla de visualización del módulo PROPERTY para la creación de un material	99
Figura 93- Cuadro de diálogo de selección de propiedad I del material (módulo PROPERTY).....	99
Figura 94 - Cuadro de diálogo de selección de propiedad II del material (módulo PROPERTY).....	100
Figura 95 – Pantalla de visualización del módulo PROPERTY para la creación de una sección.....	100
Figura 96 – Cuadro de diálogo I para crear una sección.....	101
Figura 97 - Cuadro de diálogo II para editar una sección	101
Figura 98 - Pantalla de visualización del módulo PROPERTY para la asignación de una sección	102
Figura 99 – Cuadro de diálogo para editar la asignación de secciones (módulo PROPERTY).....	102
Figura 100 - Pantalla de visualización del módulo ASSEMBLY para crear una “instance”	103
Figura 101 – Cuadro de diálogo para crear una “instance” (módulo ASSEMBLY)	103
Figura 102 - Pantalla de visualización para crear un “step” (en el módulo STEP)	104
Figura 103 – Cuadro de diálogo I para crear un “step” (en el módulo STEP)	105
Figura 104 - Cuadro de diálogo II para crear un “step” (en el módulo STEP)	105
Figura 105 – Pantalla de visualización del módulo LOAD para crear una BC (condición de contorno)....	106
Figura 106 – Cuadro de diálogo para crear condiciones de contorno (en el módulo LOAD)	107
Figura 107 – Pantalla de visualización para definir regiones para condiciones de contorno (en el módulo LOAD).....	107
Figura 108 – Cuadro de diálogo para editar el tipo de condición de contorno (en el módulo LOAD)	108
Figura 109 – Pantalla de visualización para crear “loads” (en el módulo LOAD)	108

Figura 110 – Cuadro de diálogo I para crear la fuerza de gravedad (módulo LOAD)	109
Figura 111 - Cuadro de diálogo II para editar la fuerza de gravedad (módulo LOAD).....	109
Figura 112 - Pantalla de visualización para definir la región de actuación de la fuerza a controlar por el sensor (en el módulo LOAD).....	111
Figura 113 – Cuadro de diálogo II para editar la fuerza máxima (módulo LOAD)	112
Figura 114 – Representación de las condiciones de contorno y las fuerzas aplicadas sobre la pletina ...	112
Figura 115 – Pantalla de visualización del módulo MESH	113
Figura 116 – Pantalla de visualización del módulo MESH para definir el formato de los elementos del mallado.....	114
Figura 117 – Cuadro de diálogo para definir el formato de los elementos del mallado (módulo MESH)	114
Figura 118 - Cuadro de diálogo para definir el formato de los elementos del mallado (módulo MESH).....	115
Figura 119 - Pantalla de visualización del módulo MESH para definir el tipo de los elementos del mallado	115
Figura 120 – Cuadro de diálogo para definir el tipo de elemento del mallado (módulo MESH).....	116
Figura 121 – Pantalla de visualización para definir número de elementos de la discretización (módulo MESH).....	117
Figura 122 – Cuadro de diálogo para determinar el tamaño de los elementos del mallado (módulo MESH).....	117
Figura 123 – Pantalla de visualización para realizar el mallado de la “instance” (módulo MESH).....	118
Figura 124 – Pantalla de visualización con el mallado de la pletina de aluminio (módulo MESH).....	118
Figura 125 – Pantalla de visualización para crear el “job” en el módulo JOB	119
Figura 126 – Cuadro de diálogo I para crear el “job” (módulo JOB).....	120
Figura 127 - Cuadro de diálogo II para crear el “job” (módulo JOB)	120
Figura 128 – Pantalla de visualización para entregar el “job” al procesador de ABAQUS	121
Figura 129 – Pantalla de visualización para abrir monitor y ver los mensajes del proceso (módulo JOB)	122
Figura 130 – Monitor del “job” entregado al procesador ABAQUS/Standard (módulo JOB).....	122
Figura 131 – Pantalla de visualización del módulo JOB para cambiar al módulo VISUALIZATION	123
Figura 132 – Pantalla de visualización del módulo VISUALIZATION con la representación de la pletina	123
Figura 133 – Pantalla de visualización del análisis de la tensión de Von Mises (módulo VISUALIZATION)	124
Figura 134 - Pantalla de visualización para cambiar de análisis (módulo VISUALIZATION).....	124
Figura 135 – Cuadro de diálogo para cambiar el tipo de análisis (módulo VISUALIZATION)	125
Figura 136 - Pantalla de visualización del análisis de la deformación (módulo VISUALIZATION).....	125
Figura 137 – Simulación de la flexión de la pletina generada por la fuerza máxima	126
Figura 138 – Representación de la tensión de Von Mises máxima frente al número de elementos del mallado.....	127
Figura 139 – Simulación de la pletina soportando la fuerza máxima (56N).....	129
Figura 140 – Superficie ideal para medición (izq.) y superficie irregular para mediciones (dcha.)[26] ...	130
Figura 141 – Proceso de devastado, indicando dirección y sentido de lijado. [25].....	131
Figura 142 - Proceso de pulido, indicando dirección y sentido de lijado. [25]	132

Figura 143 – Primer paso del proceso de limpieza, indicando dirección y sentido de secado. [25]	132
Figura 144 - Segundo paso del proceso de limpieza, indicando dirección y sentido de secado. [25]	132
Figura 145 – Proceso de marcado de la zona de ubicación de las galgas. [25]	133
Figura 146 – Proceso de limpieza después de marcar la zona, indicando dirección y sentido del secado [25]	133
Figura 147 – Corte de las patillas de conexión de las galgas. [25].....	134
Figura 148 –Adhesión del celo a las galgas y a la pletina. [25]	134
Figura 149 – Despegado del celo con las galgas adheridas a éste. [25]	134
Figura 150 – Pasos para el pegado de las galgas extensiométricas. [25]	135
Figura 151 – Retirada del celo de la pletina y galgas. [25]	135
Figura 152 – Retirada del celo de las galgas y de las rosetas, indicando dirección y sentido. [25]	136
Figura 153 – Pletina durante el proceso de soldadura del puente Wheatstone.	136
Figura 154 – “Packages” y placa de fibra de fibra de vidrio empleadas en el montaje del sensor de fuerza.	136
Figura 155 – Detalle de una placa discontinua de fibra de vidrio discontinua. [27]	137
Figura 156 – Prueba del sensor de fuerza fijado en la mesa.	138
Figura 157 –Dimensiones de un perfil UPN 80. [28]	138
Figura 158 – Pieza de sujeción del sensor de fuerza.	138
Figura 159 – Prueba del sensor de fuerza con la pieza de sujeción y aislamiento de caucho.....	140
Figura 160 – Perfil UPN 80 dibujada en Autocad.	141
Figura 161 – Evolución del diseño de la pieza de sujeción mediante Autocad.	141
Figura 162 – Forma exterior final de la pieza de soporte.	142
Figura 163 – Diseño pieza de soporte del amplificador y el conversor mediante Autocad.	142
Figura 164 – Proceso de fabricación de la pieza de soporte en la impresora 3D (izq.) y resultado final de la pieza.....	143
Figura 165 – Sensor de fuerza con pieza de sujeción de la pletina y pieza de soporte de la circuitería (izq.) y detalle de ésta (dcha.)	143
Figura 166 – Pieza improvisada de sujeción del cable.....	144
Figura 167 – Diseño de la pieza de sujeción del cable y planta y alzado acotadas en mm de la misma. .	145
Figura 168 – Pieza de sujeción de los pesos montada en la pletina de aluminio.	146
Figura 169 – Disposición final del sensor (izq.) y detalle de la camisa termo-retráctil (dcha.)	146
Figura 170 – Explosionado del sensor de fuerza sin la circuitería.	147
Figura 171 – Planta y corte A-A de la pletina de aluminio acotada en mm.....	147
Figura 172 – Perspectiva general del sensor de fuerza.	148
Figura 173 – Pesas de precisión para la toma de medidas.	149
Figura 174 – Pesas adaptadas para la toma de medidas.....	149
Figura 175 – Buscar archivos .mdl del sensor de fuerza en Matlab.	151
Figura 176 – Modelo Simulink encargado de conectar Matlab con el micorcontrolador STM32F4.	151
Figura 177 - Modelo Simulink mediante el cual se realizan las simulaciones y se capturan los datos. ...	152
Figura 178 – Ventana de visualización de las simulaciones en Matlab-Simulink.	152

Figura 179 – Visualización del bloque “Data Composer” del modelo “sensor_fuerza_2440”.	153
Figura 180 – Crear variable en el entorno de “workspace” de Matlab.	155
Figura 181 – Obtener valor de la mediana mediante Matlab.	155
Figura 182 – Creación de variable para poder utilizar la herramienta “Curve Fitting” de Matlab.	165
Figura 183 – Ventana de la herramienta “Curve Fitting” de Matlab.	165
Figura 184 – Representación de la gráfica de subida en “Curve Fitting” de Matlab.	166
Figura 185 – Visualización de la gráfica generada para guardarla como archivo “.jpg”.	166
Figura 186 – Representación de la curva de subida con recta de ajuste polinomial de grado 9 mediante Matlab.	171
Figura 187 – Representación de la curva de bajada con recta de ajuste polinomial de grado 9 mediante Matlab.	171

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Ejemplos de la relación entre la naturaleza de la magnitud a medir y la señal de salida	36
Tabla 2 – Relación entre el número de elementos del mallado y su tensión máxima de Von Mises (Pa)	127
Tabla 3 – Dimensiones y momentos de inercia del perfil UPN 80. [28]	139
Tabla 4 – Valores de la mediana de la curva de subida (izq.) y de la curva de bajada (dcha.).	155
Tabla 5 – Valores de los estimadores para los distintos grados para la recta de subida.	170
Tabla 6 - Valores de los estimadores para los distintos grados para la recta de bajada.	170



1 INTRODUCCIÓN

1.1 Marco del proyecto

La realización de este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo en el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática junto con el grupo de investigación Robotics Lab.

El presente proyecto consiste en el diseño, implementación y validación de un sensor de fuerza con captación de datos para realizar el control en fuerza de los *SMA's* (*Shape Memory Alloys*), denominados *hilos de Nitinol*. Un *hilo de Nitinol* o *SMA's* es un material formado por una aleación equiatómica de Níquel y Titanio. Cuya principal característica es que poseen memoria de forma, esto se debe a que al alcanzar cierta temperatura el *hilo de Nitinol* se contrae, y al enfriarse recupera su forma original. Al tratarse de una aleación metálica, una forma sencilla de conseguir elevar la temperatura del *SMA* es haciendo circular corriente por él, dicha corriente calienta el *SMA* y este varía su forma reduciendo su longitud y, una vez deja de circular corriente por él, recupera su forma inicial. De esta manera se puede sacar una relación entre la intensidad que circula por el *SMA* y la fuerza aplicada en el sensor, para así poder determinar la fuerza que ejerce el *SMA* en función de la intensidad que circula por él.

Actualmente es muy difícil encontrar empresas que distribuyan sensores de fuerza con captación o adquisición de datos, y las que lo hacen, establecen elevados costes por sus productos. Por este motivo, el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid, propuso la realización de un sensor de fuerza con captación de datos basado en un puente de Wheatstone completo de 4 galgas extensiométricas, de forma que el transductor mida la fuerza a partir de la deformación del plano donde se ubican las galgas. La salida del puente debe acondicionarse para llevar a cabo la medida con un conversor A/D diferencial de 24 bits de tipología sigma-delta, la salida digital del conversor A/D será tratada mediante los filtros necesarios; filtros y sistema de adquisición de datos digital que serán implementados en Matlab/Simulink para posteriormente emplearlo de forma embebida en un microcontrolador de 32 bits.

Para lograr este último paso, se ha hecho uso de una herramienta muy sofisticada, creada por el grupo de investigación Robotics Lab, la cual se encarga de la adquisición de datos, dicha función se realiza mediante un hardware de adquisición de señales analógicas diferenciales desarrollado en el citado grupo de investigación. Para la realización del firmware del controlador embebido se emplea una herramienta de programación visual fruto de la tesis doctoral de Antonio Flores Caballero [1].

1.2 Objetivos

El objetivo principal que busca la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado es realizar el control en fuerza del banco de pruebas de los *SMA*'s (ver figura 1), mediante la realización de un sensor de fuerza basado en un puente de Wheatstone completo de 4 galgas extensiométricas.

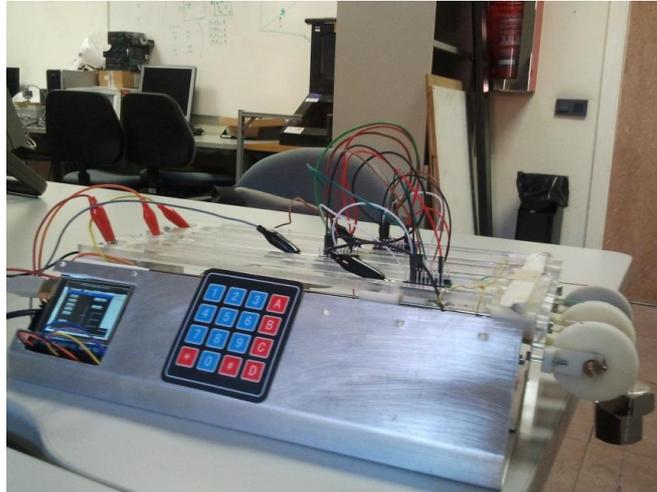


Figura 1 – Banco de pruebas de los *SMA*'s de la Universidad Carlos III de Madrid

Para desarrollar el proyecto, diseñar e implementar un sensor de fuerza, su electrónica de acondicionamiento y adquisición de datos, es necesario seguir una serie de pasos u objetivos secundarios, los cuales se definen a continuación:

- Diseño del circuito de conexión de las galgas extensiométricas.
- Diseño de la pletina en la cual van montadas las galgas extensiométricas.
- Acondicionamiento de la señal. Dicho acondicionamiento se basa en tratar la señal de salida del transductor, ya que, es una señal débil antes de ser transmitida al equipo de procesado y/o registro. Las operaciones fundamentales son:
 - o Amplificación: amplifica la señal.
 - o Filtrado: elimina ruidos aleatorios e interferencias.
 - o Conversión Analógica/Digital: conversión de la señal analógica en digital para su posterior análisis y procesado.
- Una vez realizado el acondicionamiento de la señal se procede a la adquisición de datos mediante un hardware constituido por un microcontrolador conectado a la salida del conversor y al ordenador, el cual mediante el uso de un software muestra los datos en tiempo real.
- Por último, a parte del diseño del sensor, se ha llevado a cabo la validación y puesta en marcha del mismo en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid. Realizando las verificaciones y demostraciones necesarias para su correcto funcionamiento.

Cabe destacar que, estos pasos u objetivos secundarios fueron planteados antes de empezar la realización del sensor.

1.3 Herramientas empleadas

Para el desarrollo del presente Trabajo Fin de Grado se han empleado diferentes herramientas software y hardware. En primer lugar se listan las herramientas software, las cuales son:

- **Matlab:**

Matlab es un potente software empleado para realizar cálculos matemáticos complejos permitiendo la visualización de los mismos. Dicho software se emplea debido a que contiene una herramienta adicional denominada Simulink, la cual es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos.

- **Simulink:**

Simulink es una herramienta del programa Matlab, como se dijo anteriormente, es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Esta herramienta es utilizada por dos motivos, el primero es para generar el diagrama de bloques y su correspondiente código C para compilarlo en el programa Keil μ Vision 5 y enviarlo a la placa controladora que se emplea en el banco de pruebas de las SMA's. El segundo motivo es porque mediante Simulink se pueden obtener los datos de las simulaciones y sus correspondientes gráficas.

- **Keil μ Vision5:**

El programa informático Keil μ Vision 5, es un software que cuenta con la integración de numerosas arquitecturas de microcontroladores permitiendo obtener el máximo rendimiento de éstos. Para el presente proyecto se ha hecho uso de este software para compilar y volcar el código generado en Simulink en la tarjeta controladora.

- **Abaqus:**

Herramienta muy potente que permite realizar cálculos estructurales estáticos lineales y no lineales, dinámicos, contacto de sólidos, térmicos, etc., mediante el método de elementos finitos. Aspecto muy útil para el diseño de la pletina de aluminio donde se ubican las galgas extensiométricas.

- **Autocad:**

Software empleado en diseño arquitectónico o ingeniería industrial para el desarrollo de piezas complejas en dos dimensiones y para el desarrollo de modelados tridimensionales. Autocad ha sido empleado para diseñar las piezas que posteriormente se crearon con la impresora 3D y para la realización del plano de la pletina de aluminio para su posterior mecanizado.

A continuación se listan las herramientas hardware empleadas, son las siguientes:

- **Amplificador:**

El amplificador es un dispositivo electrónico que se emplea para amplificar la señal a tratar. Dicha amplificación puede ser necesaria por varios motivos, pero el principal en la mayoría de los casos y en este proyecto, es poder tratar la señal de una manera más cómoda, ya que, cuando se trabaja con circuitos como el puente de Wheatstone la señal de salida suele ser muy pequeña. El amplificador utilizado es un circuito integrado denominado LTC2051.

- **Conversor A/D:**

El convertidor analógico-digital, como su nombre indica, es un dispositivo electrónico que se emplea para convertir una señal de entrada analógica, normalmente de voltaje aunque también puede ser de corriente, en una señal de salida digital. Esta herramienta hardware es utilizada para poder realizar el procesamiento de la señal. El dispositivo seleccionado es un convertidor especial analógico-digital sigma delta de 24 bits de la empresa Linear Technology.

- **Tarjeta de adquisición STM32F4-Discovery:**

El procesamiento, el registro y/o presentación de la señal se realiza mediante el uso del kit de detección STM32F4-Discovery. Dicho dispositivo es empleado para la captura de los datos y posteriormente tratarlos para ser registrados y presentados.

1.4 Alcance del proyecto

El sensor de fuerza, es el resultado del trabajo de un estudiante de Grado de Ingeniería Electrónica Industrial y Automática, cuyo Trabajo Fin de Grado comprende todos los aspectos necesarios para el diseño, implementación y puesta en marcha del mismo. Dicho Trabajo Fin de Grado es denominado “*DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR DE FUERZA, SU ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO Y ADQUISICIÓN DE DATOS*”.

Los diseños necesarios para el desarrollo y puesta en marcha del sensor de fuerza, alcance del presente Trabajo Fin de Grado, son los siguientes:

- Diseño del circuito puente de Wheatstone.
- Diseño de la pletina de aluminio.
- Diseño de la pieza de sujeción de la pletina.
- Diseño del soporte para el amplificador y el conversor analógico-digital.
- Diseño de la pieza de sujeción de los pesos.

Cabe destacar que, los componentes empleados, en el proceso de acondicionamiento del sensor de fuerza, amplificación y conversión analógico-digital, vienen determinados por el sistema de captación de datos empleado para obtener las gráficas del comportamiento del sensor de fuerza.



2 ESTADO DEL ARTE DE LOS SENSORES

2.1 Robótica y biomedicina

2.1.1 Ideas generales

En este capítulo se van a explicar los conceptos generales de Robótica y Biomedicina, de manera, que se pueda dar un enfoque más específico de las aplicaciones y usos de los sensores de fuerza en los campos mencionados.

Estas disciplinas tienen su origen hace miles de años. En Robótica, uno de los primeros inventos que se puede denominar como un autómatas es la máquina de vapor de Herón de Alejandría, que data del siglo I-II d.C. Al igual que en la Robótica, los primeros indicios de Biomedicina surgieron hace mucho tiempo, datan de más de 3000 años de antigüedad, dichos indicios se encontraron en una tumba egipcia, donde fue hallada una prótesis del dedo pulgar del pie. No obstante, las definiciones de estas disciplinas han surgido recientemente, ya que ambos campos han dado un gran salto evolutivo a raíz del desarrollo de la instrumentación eléctrica y electrónica.

Se podría decir que la Robótica, como se conoce actualmente, surgió principalmente para complementar los procesos de automatización industriales, otorgándoles cierto grado de inteligencia y consiguiendo una mayor eficiencia, en tareas como el transporte, carga y descarga, manejo de materiales, etc. La Robótica [2] es un área interdisciplinaria formada por la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y sistemas computacionales. A la unión de estas disciplinas se le denomina mecatrónica. La mecánica comprende tres aspectos: diseño mecánico de la máquina, análisis estático y análisis dinámico. La microelectrónica le permite al robot transmitir la información que se le entrega, coordinando impulsos eléctricos que hacen que el robot realice los movimientos requeridos por la tarea. La informática provee de los programas necesarios para lograr la coordinación mecánica requerida en los movimientos del robot, dar un cierto grado de inteligencia a la máquina, es decir adaptabilidad, autonomía y capacidad interpretativa y correctiva.

Actualmente el uso de robots se ha extendido a diversos campos como la investigación y exploración espacial, la construcción, la biomedicina, etc., ya que el uso de robots o sistemas robóticos se puede extender a casi todas las áreas donde se necesite realizar tareas mecánicas.

La Biomedicina [3] se define como el amplio punto de encuentro entre las Ciencias Médicas (incluidas la Odontología, Farmacia, Enfermería y sus ramas, Veterinaria, etc.) y las Ciencias Básicas que estudian la Vida y sus procesos. O sea la Biología pero también la Química-Bioquímica, la Física-Biofísica, Morfología, Fisiología etc. La Biomedicina es la “ciencia básica de la Medicina” que estudia los procesos de la morfología y fisiología normales de los individuos pero también las bases de los procesos patológicos que conllevan el desarrollo de las enfermedades. Por tanto

trata de aportar nuevos conocimientos tanto en el diagnóstico, la prevención y el tratamiento de las enfermedades y nuevos conceptos terapéuticos, nuevas tecnologías y, en fin, todo aquello que pueda ayudar a los profesionales a mejorar la salud de sus pacientes.

En la actualidad la Biomedicina está muy ligada con la Robótica, se podría decir que es una relación de dependencia, ya que no se concibe la ingeniería biomédica sin robots. De hecho el uso de sistemas robóticos ha aumentado bastante en los últimos años. Hoy día, gran cantidad de operaciones se realizan mediante robots quirúrgicos, debido a que estos permiten realizar cirugías que son menos invasivas para el paciente, más precisas, con una visión más amplia debida a la potencia del zoom, elimina el temblor de la mano del médico, etc. Otro campo dentro de esta disciplina que trabaja con robots, sería la asistencia a discapacitados, tanto en movilidad como para realizar funciones vitales tales como comer, entre otras. Con la incorporación de exoesqueletos, robots móviles, prótesis, articulaciones robóticas, etc. La Universidad Carlos III de Madrid diseñó un prototipo de brazo mecánico, ASIBOT. Es un robot escalador portátil de asistencia personal, que está diseñado para la asistencia de personas discapacitadas, de modo que el brazo sea capaz de coger platos, lavar los dientes a la persona, dar de comer, etc., de manera que hace la vida cotidiana del discapacitado un poco más fácil.

2.1.2 Robots

2.1.2.1 Definición de robot

La definición de robot, en el presente, es algo que plantea ciertas dificultades, ya que no existe una única definición formal. La diferencia más relevante se encuentra en quien establece dicha definición, el mercado japonés o el euro-americano. El primero defiende que un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, mientras que el mercado euro-americano exige una mayor complejidad en lo referido al control. Cabe destacar que, la evolución tecnológica obliga a ir variando la definición.

Para obtener una idea clara y concisa sobre la definición de robot, a continuación se plantean una serie de definiciones de algunas de las instituciones de mayor importancia.

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, *Robotic Industry Association*), según la cual:

"Un **robot industrial** es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas"

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como:

"Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas"

Se incluye en esta definición la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. Una definición más completa es la establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), que define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot:

Manipulador: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.

Robot: manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectoria variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

Por último, la Federación Internacional de Robótica (IFR, *International Federation of Robotics*) distingue entre robot industrial de manipulación y otros robots:

“Por **robot industrial de manipulación** se entiende una maquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento”.

“Un **robot de servicio** es un robot que opera de forma parcial o totalmente autónoma, para realizar servicios útiles para el bienestar de los humanos y del equipamiento, excluyendo operaciones de manufactura”.

2.1.2.2 Clasificación de los robots

Existen muchas formas de clasificar a los robots, las más comunes son:

- Según su arquitectura
- Según su generación
- Según su nivel de inteligencia
- Según su nivel de control

- Según su función...

La clasificación empleada en el presente documento atiende a su función, debido a que engloba de forma más general todos los campos donde se puede hacer uso de sensores de fuerza. La clasificación de los robots según su función [4], según la A.R.D.E. (*Asociación de Robótica y Domótica de España*) sería la siguiente:

- **Robots industriales:** denominados también de manufactura. Son manipuladores multifuncionales reprogramables, capaces de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.
- **Robots para aplicaciones médicas y biológicas:** se pueden clasificar, de forma genérica, como:
 - **Robots quirúrgicos:** Los robots quirúrgicos son una aplicación clásica del diseño y control de los manipuladores. Algunas de sus ventajas son la repetibilidad (precisión), incisiones más pequeñas (cirugía mínimamente invasiva), versatilidad (el cirujano no necesita estar en la misma sala, permite la telecirugía), se puede trabajar sobre órganos activos (potencialmente sobre un corazón latiendo), costes menores (se manda al paciente antes a casa).
 - **Robots de rehabilitación:** la rehabilitación es el conjunto de procedimientos dirigidos a ayudar a una persona a alcanzar el más completo potencial físico, psicológico, social, vocacional y educacional compatible con su deficiencia fisiológica o anatómica y limitaciones medioambientales. La robótica de rehabilitación tiene como objetivo el desarrollo de equipos especializados para la rehabilitación muscular y la reeducación de pacientes.
 - **Robots de diagnóstico/entrenamiento:** también denominados robots no quirúrgicos. El objetivo de los robots no quirúrgicos, es la de permitir un diagnóstico médico (que podría ser por telepresencia) o entrenamiento del personal médico (robots de entrenamiento).
- **Assistive robots:** conocidos como Caretaker robot: Robots cuidadores o de asistencia. Son robots y máquinas que mejoran la calidad de vida a personas discapacitadas y/o mayores. Principalmente mejorando la independencia personal. Este grupo se divide en:
 - **Robots sociales:** Están destinados a proporcionar asistencia a personas mayores, enfermas o con algún tipo de discapacidad, en entornos específicos como hospitales, residencias e incluso hogares particulares.
 - **Prótesis mioeléctricas y las prótesis visuales:** son dispositivos que reemplazan y permiten mover el miembro sin necesidad de pulsar ningún botón, de una manera más natural y compleja. Dichas prótesis incluyen unos sensores que recogen el movimiento de esos músculos, llevando el impulso a un servomotor, el cual gira en un sentido u otro en función del impulso que le llegue.

- **Service robots (Robots de servicio):** Un robot que opera de manera automática o semiautomática para realizar servicios útiles al bienestar de los humanos o a su equipamiento, excluyendo las operaciones de fabricación.
- **Robots de uso personal (o portables):** este grupo se puede asemejar al grupo de robots domésticos, educativos y de seguridad, ya que son tipos de robots pensados para uso particular, entre otros.
- **Robots domésticos:** en domótica se denominan Domobots porque se comunican con la casa domótica. Son robots pensados para facilitar las tareas rutinarias de la casa, como pasar la aspiradora, cortar el césped, limpiar el suelo, etc. En este grupo también entran los robots con fines de entretenimiento y ocio.
- **Robots educativos:** son robots orientados para el aprendizaje y motivación por la robótica, tanto para niños como para adultos. Desde educación de diseño de robots hasta educación asistida por robot.
- **Robots de seguridad:** son robots destinados a vigilar y preservar la seguridad, tanto de empresas como de particulares.
- **Robots espaciales:** La idea básica sobre Robots Espaciales consiste en utilizar Inteligencia Artificial para enseñar a los robots sobre lo que deben hacer para comportarse de manera semejante a los exploradores humanos. Estos Robots tienen como fin la exploración de la superficie de planetas, incluso la Luna, y para ello que sean capaces de “pensar” por sí mismos sobre posibles obstáculos que puedan encontrar y que por supuesto tengan la habilidad de recuperarse de eventos inesperados. Otro de los conceptos en el diseño de Robots Espaciales es que puedan emular, no solo el proceso de pensamiento y análisis de los humanos en determinar las características del terreno, sino también la habilidad humana de conducir un vehículo en tiempo real.

2.2 Sensores

Los sensores existen desde siempre, porque el ser humano los tiene incluidos en su cuerpo y de diferentes tipos. Los hombres y mujeres experimentan sensaciones como calor o frío, duro o blando, fuerte o flojo, agradable o desagradable, pesado o no. Y poco a poco le ha ido añadiendo adjetivos a estas sensaciones para cuantificarlas como frígido, fresco, tibio, templado, caliente, tórrido. Es decir, que día a día ha ido necesitando el empleo de magnitudes medibles más exactas.

2.2.1 Definición de sensor

Los sensores [5] son en realidad unos elementos físicos que pertenecen a un tipo de dispositivo llamado *transductor* (véase figura 2). Los transductores son unos elementos capaces de transformar una variable física (presión, humedad, dilatación,

temperatura, etc.) en otra diferente. Los sensores son un tipo concreto de transductores que se caracterizan porque son usados para medir la variable transformada. La magnitud física que suele ser empleada por los sensores como resultado suele ser la tensión eléctrica, debido a la facilidad del trabajo con ella.

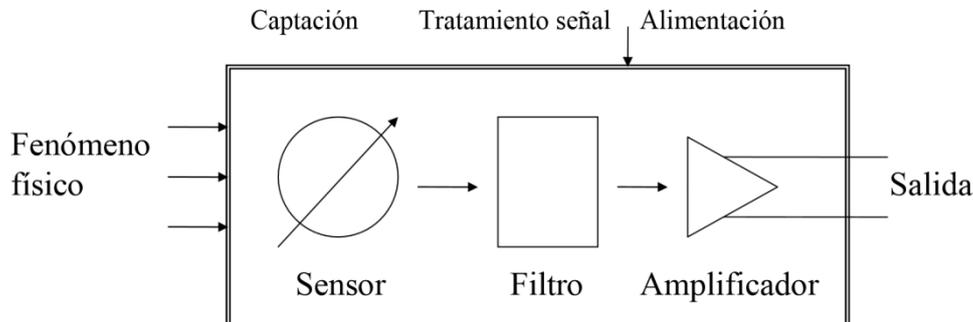


Figura 2 – Estructura de un transductor [5]

2.2.2 Características generales de los sensores

La forma habitual de definir las características generales de los sensores, es definiendo sus características estáticas y dinámicas, ya que definen el comportamiento en régimen permanente y en régimen transitorio respectivamente, es decir, las características de funcionamiento. No obstante, hay autores que incorporan algunas definiciones más, atendiendo a propiedades del diseño, fiabilidad y factores medioambientales. En el presente documento se van a desarrollar todas las propiedades mencionadas, ya que son particularidades del diseño de sensores.[6][7][8]

2.2.2.1 Diseño

La primera característica que se debe tener en cuenta a la hora de proyectar un sensor es el diseño. Por diseño se entiende al conjunto de características comunes a todos los tipos de sensores, es decir, magnitud de la medida, características eléctricas y características mecánicas.

2.2.2.1.1 Magnitud de medida

La primera característica con respecto al diseño del sensor es la magnitud de medida, la cual se caracteriza por:

- **Naturaleza:** magnitud física detectada por el sensor (posición, velocidad, fuerza y par, etc.). En algunas ocasiones se pueden calcular magnitudes de salida

distintas en función de la magnitud de medida. El caso ideal es que el sensor dé una salida en función de una única variable de entrada.

- **Rango:** son los límites superior e inferior de la variable a medir.
- **Span de entrada:** denominado también fondo de escala de entrada. Es la diferencia algebraica entre los límites superior e inferior de la magnitud a medir.

2.2.2.1.2 Características eléctricas

En segundo lugar, se definen las características eléctricas mediante una serie de parámetros (ver figura 3). Siendo V_S el voltaje de la fuente de alimentación, R_S la resistencia de la fuente de alimentación, R_i la impedancia de entrada, V_O la tensión de salida, R_O la resistencia de la tensión de salida y R_L la impedancia de salida. También hay destacar otras características, las cuales son:

- **Salida:** señal eléctrica generada en función de la variable medida a la entrada. La información de la magnitud eléctrica de la salida va en la amplitud de su señal, normalmente es una función continua de la variable de entrada.
- **Puntos finales:** valores de salida para los límites inferior y superior del rango de entrada del sensor.
- **Span de salida:** o fondo de escala de salida. Es la diferencia algebraica entre las salidas eléctricas medidas cuando se aplican los valores mínimo y máximo de la señal de entrada.
- **Alimentación:** señal eléctrica externa que suministra la potencia necesaria para activar el funcionamiento del sensor.
- **Impedancia de entrada:** impedancia que presenta el sensor a la fuente de alimentación.
- **Impedancia de salida:** impedancia medida en los terminales de salida del sensor.

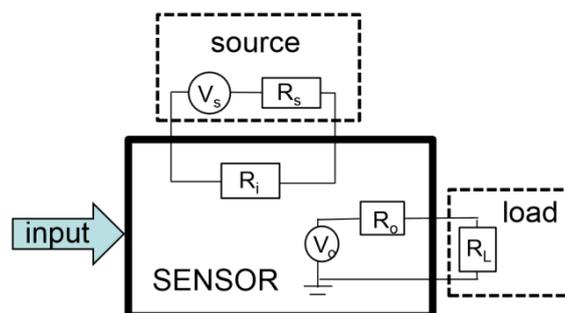


Figura 3 – Interfaces eléctricas del sensor

2.2.2.1.3 Características mecánicas

El último conjunto de características que definen la característica general del diseño de un sensor, son las características mecánicas, en las cuales se determinan:

- **Peso.**
- **Configuración:** es necesario realizar planos en los que se indiquen las dimensiones, los mecanizados, encapsulados (en caso de ser un sellado especial debe ir especificado según la normal industrial que cumple) y las conexiones eléctricas, mecánicas y de fluidos.
- **Identificación:** las características más destacadas se deben referenciar según la nomenclatura conveniente.

2.2.2.2 Prestaciones

Esta característica general se determina mediante un conjunto de características las cuales definen el comportamiento del sensor en régimen permanente, en régimen transitorio y ante las condiciones ambientales.

2.2.2.2.1 Características estáticas

Describen la respuesta o prestaciones del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la magnitud de entrada, en condiciones ambientales normales, es decir, temperatura a $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, humedad relativa $< 90\%$, presión barométrica entre 88 y 108 KPa, o, entre 0'88 y 1'08 bares (880 – 1080 mbar), y en ausencia de vibraciones.

- **Curva de calibración:** es la forma de caracterizar un sensor (o transductor), indica la relación entre la entrada y la salida. La forma más común de dar esta curva es mediante una gráfica como la mostrada en la figura 4.

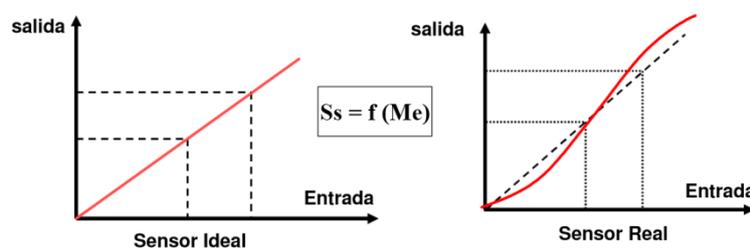


Figura 4 – Curva de calibración ideal y real

- **Campo, escala o rango de medida:** valores mínimo y máximo que pueden medirse con el sensor, con una tolerancia de error aceptable. Es el intervalo de valores con el que se trabaja.

- **Resolución (resolution):** es la variación mínima de la magnitud de entrada o “input”, eje de abscisas, que somos capaces de apreciar a la salida o “output”, eje de ordenadas. (Véase figura 5).

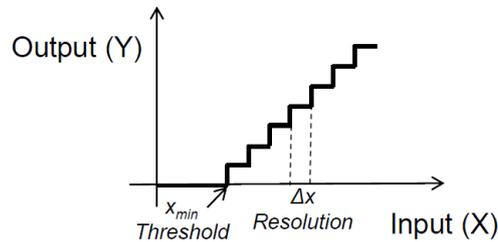


Figura 5 – Ejemplo de resolución y umbral

- **Umbral (threshold):** es el mínimo valor de entrada para salida cero. En la figura anterior, figura 5, se muestra un ejemplo de umbral.
- **Sensibilidad:** relación entre la variación de la señal de salida generada por la variación de la magnitud de entrada. Se corresponde con la pendiente de la curva de calibración, si la curva de calibración es lineal implica que la sensibilidad es constante.
- **Offset, Zero o null:** es el valor de salida para entra cero.
- **Linealidad:** siempre procuramos que la curva de calibración sea lineal para que la salida evolucione proporcionalmente a la entrada, de manera que, la linealidad mide la relación entre la curva de calibración y la recta ideal.
- **Error de linealidad (no linealidad):** máxima diferencia existente entre la línea recta que trazamos desde el punto inicial al punto final y la curva de calibración.

Ecuación de la línea recta entre el punto inicial y punto final:

$$Y = S \cdot X + y_0$$

y_0 : Deriva de cero (offset de salida)

S : Pendiente de la recta

Sensibilidad global del transductor:

$$S = \frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

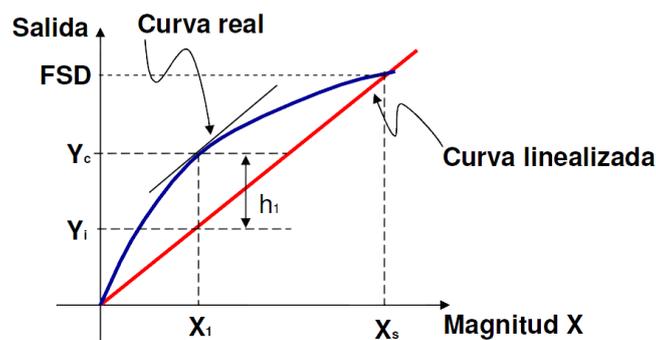


Figura 6 – Linealización de la curva de calibración

Cuando un transductor no es exactamente lineal, se tiende a aproximar a una línea recta, lo que implica que se debe dar el error de linealidad.

Como se aprecia en la figura 6, el valor de h_1 es la diferencia máxima entre la curva de calibración real y la línea recta. A este término se le denomina error absoluto. Cabe destacar, que en el caso de la figura 6, se debería linealizar como mínimo con dos rectas, debido a la forma que presenta la curva real.

Normalmente este error suele darse en % normalizado al fondo de escala de salida. El cual denominamos **FSD**; es el valor máximo del rango de medida o escala.

$$\varepsilon_l(\%) = \frac{h_1}{FSD} \cdot 100$$

- **Estabilidad:** es la capacidad que tiene el transductor de mantener invariable su curva de calibración a lo largo del tiempo dentro de los márgenes de error dados. Pueden producirse dos posibles variaciones en la curva de calibración:
 - *Derivas de cero:* la curva de calibración se desplaza paralela a sí misma.
 - *Derivas de pendiente:* cambia la forma de la curva de calibración.
- **Saturación (saturation):** indica a partir de qué valor de entrada la sensibilidad comienza a disminuir considerablemente.
- **Zona muerta (dead-zone band):** rango de valores de entrada que no producen variación en la salida, como se muestra en la figura 7.

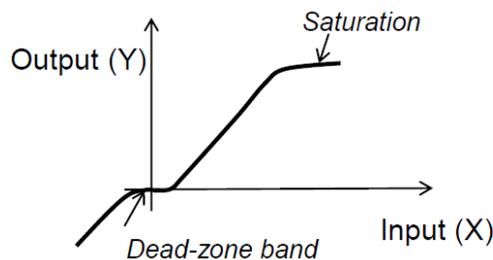


Figura 7 - Representación de la saturación y la zona muerta

- **Histéresis:** se da cuando para un mismo valor de la magnitud de entrada se encuentran dos posibles valores de la salida, el valor de la salida depende de la zona de la curva en la que se encuentra, es decir, en la zona ascendente o en la zona descendente. Un ejemplo de histéresis se muestra en la figura 8. El valor de la histéresis, referido al ejemplo de la gráfica, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Histéresis (\%)} = h = \frac{\Delta Y_{max}}{FSD} \cdot 100 = \frac{Y_1 - Y_2}{FSD} \cdot 100$$

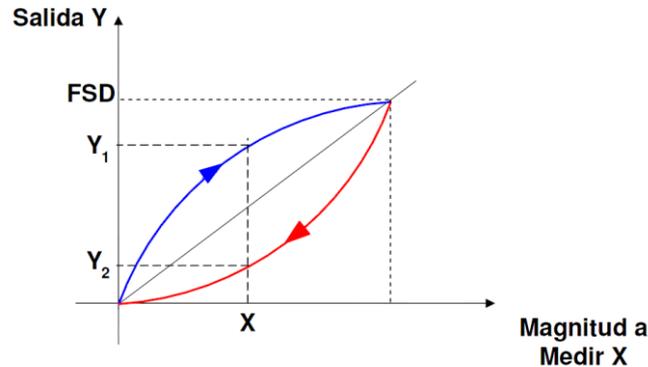


Figura 8 – Representación de la histéresis de un sensor analógico

- **Exactitud:** indica el grado de semejanza entre los valores reales y teóricos, se obtiene haciendo la diferencia que existe entre la salida real (valor tomado experimentalmente) y el valor teórico para esa misma salida. Se suele dar en valor absoluto o relativo.
- **Repetitividad o repetibilidad:** capacidad de un transductor de dar la misma salida dentro de un margen de error siempre que midamos la entrada en las mismas condiciones durante dos medidas consecutivas. Dicho de otra forma, es la capacidad de conseguir el mismo valor de salida para distintas mediciones de la misma entrada en un plazo corto de tiempo y con unas condiciones determinadas.
- **Reproducibilidad:** es igual que la repetitividad pero en un plazo largo de tiempo y con la posibilidad de variar las condiciones.
- **Ruido:** se da cuando una señal no deseada se mezcla con nuestra señal de trabajo.

2.2.2.2.2 Características dinámicas

Describen la respuesta del sensor en régimen transitorio o ante cambios bruscos o significativos de la variable de entrada. Es decir, describen la respuesta del sensor a variaciones de la entrada en el tiempo, en condiciones ambientales normales (temperatura a $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, humedad relativa $< 90\%$, presión barométrica entre 88 y 108 KPa y en ausencia de vibraciones).

Cuando la relación entrada-salida puede describirse a través de una ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes, las características dinámicas pueden estudiarse a través de dicha ecuación (orden del sistema). De acuerdo con su comportamiento dinámico los sensores se pueden clasificar en:

- **Sistemas de orden cero:** Su comportamiento está caracterizado por la sensibilidad y, tanto su error dinámico como su retardo son nulos. El sistema está exento de elementos almacenadores de energía.

- **Sistemas de primer orden:** son sistemas compuestos por un elemento que almacena energía y otro que la disipa. La relación de la entrada y la salida se define mediante una ecuación diferencial de primer orden. Se caracterizan por:
 - *Tiempo de retardo, t_d :* es el tiempo que tarda el sensor en alcanzar el 10% del valor final permanente de su salida desde que se aplica un cambio en escalón de la señal de entrada (véase figura 9).
 - *Tiempo de subida, t_s :* es el tiempo que tarda la señal de salida en pasar del 10% al 90% de su valor final permanente desde que se aplica un cambio en escalón de la señal de entrada (véase figura 9).

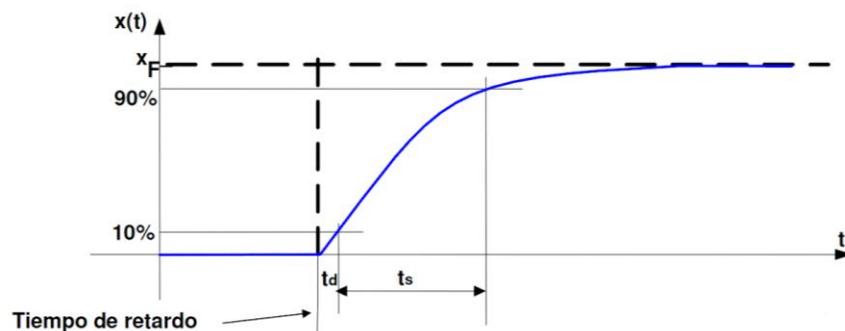


Figura 9 – Representación del tiempo de retardo y subida de una señal

- *Tiempo de respuesta, t_r :* es el tiempo que pasa, desde que se aplica un cambio en escalón de la señal de entrada, en el que la señal de salida alcanza un valor en porcentaje determinado, normalmente el 95% o 98%, como se muestra en la figura 10. En el caso en el que dicho porcentaje sea del 90%, se dice:

$$t_r = t_d + t_s$$

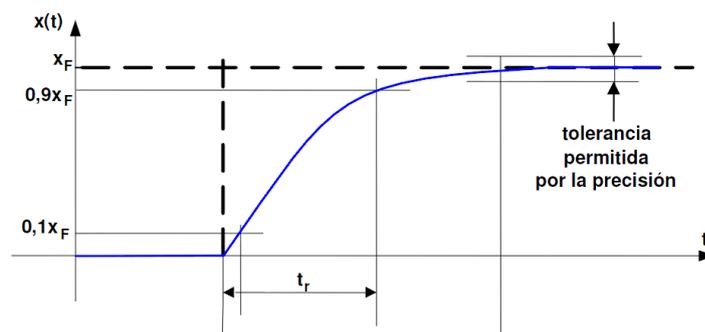


Figura 10 – Representación del tiempo de respuesta de una señal

- *Tiempo de establecimiento, t_e :* al igual que en los casos anteriores, es el tiempo transcurrido desde que se aplica un cambio escalón a la entrada hasta que la señal de salida tiene un valor que se encuentra dentro del margen de tolerancia permitida por la precisión, como se puede apreciar en la figura siguiente, figura 11.

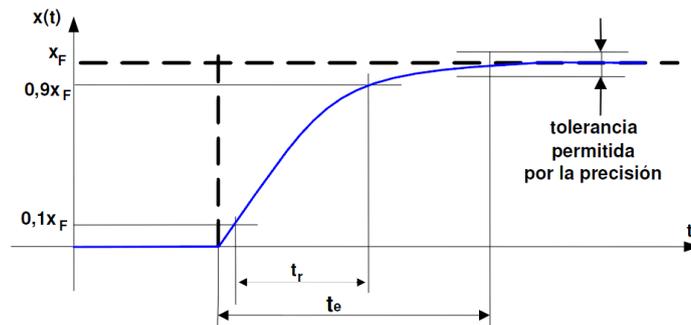


Figura 11 – Representación del tiempo de establecimiento de una señal

- **Sistemas de segundo orden:** son sistemas compuestos por dos elementos que almacenan energía y al menos uno que la disipa. La relación de la entrada y la salida se define mediante una ecuación diferencial de segundo orden. Existen tres casos ante una entrada escalón:
 - *Sistema sobreamortiguado:* la figura 12 representa un sistema sobreamortiguado, los cuales son sistemas de respuesta lenta, se dan cuando se obtiene el valor final de la salida, sin ser superado.

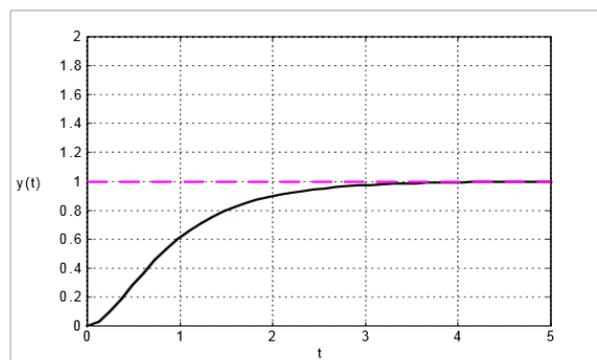


Figura 12 – Respuesta escalón de sistema sobreamortiguado

- *Sistema críticamente amortiguado:* son como los sistemas sobreamortiguados, pero estos se caracterizan por tener la respuesta más rápida posible (véase figura 13).

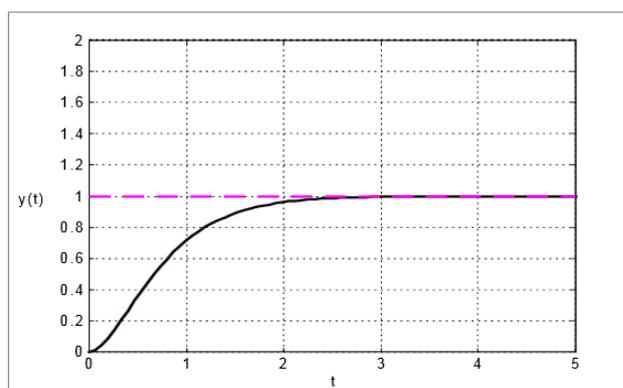


Figura 13 - Respuesta escalón de sistema críticamente amortiguado

- *Sistema subamortiguado*: son sistemas de respuesta rápida, se dan cuando la señal de salida oscila alrededor del valor final hasta alcanzarlo, como se aprecia en la figura 14.

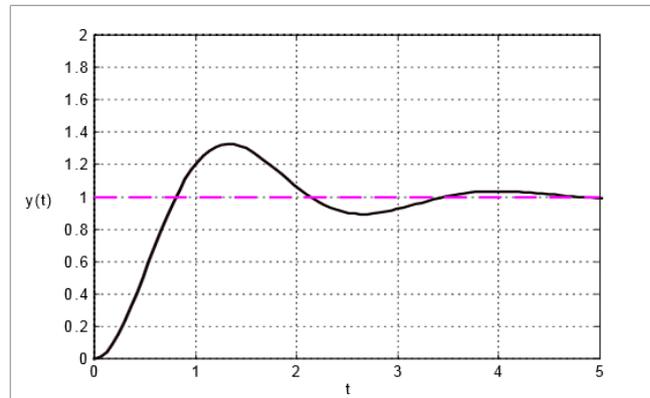


Figura 14 - Respuesta escalón de sistema subamortiguado

2.2.2.2.3 Características ambientales

Las características ambientales hacen referencia a la forma de actuar del equipo (no a la variable que mide el sensor) ante exposiciones o exposiciones duraderas a condiciones ambientales externas establecidas. Dichas características se pueden organizar en dos grupos atendiendo a los efectos cuando el sensor se encuentra en estado no operativo y operativo, es decir, si el sensor está tomando medidas o no:

- **Sensor no operativo:**

- *Almacenaje, transporte y montaje*: señalan las condiciones límite a las que se puede exponer el sensor durante un plazo de tiempo determinado antes de volver a estar en condiciones operativas normales sin haber variado alguna de sus prestaciones de manera permanente.

- **Sensor operativo:**

- *Efecto térmico*: en los sensores suele venir especificado el rango de temperatura de funcionamiento y la temperatura máxima a la que el sensor trabaja de forma correcta. La influencia de dichos efectos térmicos se define mediante el *error de temperatura*, el cual se calcula como la variación máxima de la salida para dos valores de temperaturas diferentes, uno es a temperatura ambiente y el otro es la temperatura máxima especificada en el sensor. Algunos sensores también incluyen los errores denominados *deriva térmica de cero* y *deriva térmica de la sensibilidad*, el primer error indica la variación máxima a la salida al variar la temperatura dentro del rango de temperatura de funcionamiento en ausencia de la magnitud de entrada, este error implica que la

curva de calibración se desplace de forma paralela. En el segundo caso el error indica la variación máxima a la salida al variar la temperatura dentro del rango de temperatura de funcionamiento para una determinada magnitud de entrada, este error implica una variación de la pendiente de la curva de calibración, es decir, de la sensibilidad.

- Efectos de la aceleración y las vibraciones: ambos efectos se especifican mediante sus respectivos errores. En el primer caso está el *error de aceleración*, indica la variación máxima de los valores a la salida adquiridos mediante el uso de una aceleración constante en un eje determinado y en ausencia de ella, para una determinada entrada dentro del rango. En segundo lugar está el *error de vibración*, indica la variación máxima de la salida para valores especificados de amplitud y frecuencia en condiciones ambientales determinadas. Estos errores pueden ser relevantes en sistemas mecánicos o móviles.
- Efecto de la presión ambiental: se define mediante el *error de presión ambiental*, el cual indica la variación máxima a la salida para valores distintos de la presión ambiental bajo unas condiciones determinadas.
- Efecto de las perturbaciones eléctricas: se dan cuando en la señal de salida se aprecia la existencia de señales superpuestas, estos efectos se definen como *errores de interferencia*.
- Humedad, corrosión, atmósfera salina, etc.: existen otros factores ambientales que pueden ser relevantes cuando el dispositivo se encuentra inmerso en líquidos o en vacío.

2.2.2.3 Fiabilidad

Esta característica define la capacidad que tiene el sensor para trabajar en unas condiciones especificadas a lo largo de un plazo de tiempo determinado. La fiabilidad se especifica en función de:

- **Vida de almacenamiento**: indica el tiempo que puede estar almacenado el sensor, bajo condiciones específicas, sin variar ninguna de sus características o prestaciones bajo una tolerancia determinada.
- **Vida útil**: también denominada vida de funcionamiento, indica la cantidad mínima de tiempo que puede estar funcionando el sensor sin variar ninguna de sus características o prestaciones bajo una tolerancia determinada.
- **Estabilidad**: hace referencia a variaciones en la salida, en condiciones ambientales y de la magnitud de entrada constantes, en un plazo de tiempo específico.

2.2.3 Clasificación de los sensores

A la hora de clasificar los sensores ocurre lo mismo que en el caso de la clasificación de los robots, existen múltiples maneras de hacerlo. Podemos clasificar los sensores por la variable que miden (velocidad, proximidad...), por el principio físico en el que se basa su funcionamiento (efecto Hall...), por la tecnología en la que se basan (silicio, electro-mecánica...), la relación entre el sensor y la característica a medir (contacto, sin contacto), etc. En el desarrollo del presente trabajo la clasificación se realiza en función de la necesidad de uso de una fuente de energía, la naturaleza de la señal, la naturaleza de la magnitud a medir, en función de la variable física de medida y por último una clasificación de los sensores empleados en los robots.

2.2.3.1 Naturaleza de la señal de salida

Desde el punto de vista de la forma de la variable de salida, podemos clasificar los sensores en dos grupos: *analógicos* y *digitales*.

- **Analógicos:** dan como señal de salida un valor de tensión o corriente variables en forma analógica continua dentro del campo de medida.
- **Digitales:** transforman la variable medida en una señal digital, a modo de pulsos o bits. En la actualidad los sensores más empleados son los digitales, debido sobre todo a la compatibilidad de su uso con los ordenadores.
- **Todo-nada:** indican cuando la variable detectada rebasa un cierto umbral.

2.2.3.2 Naturaleza de la magnitud a medir

La clasificación de los sensores en función de la magnitud física a detectar es muy amplia, de manera que se citaran algunos de los ejemplos más significativos, los cuales son:

- Posición, velocidad, fuerza y par, presión, presión, caudal, proximidad, etc. En la tabla 1 se muestran las relaciones entre la magnitud física y los transductores que se pueden emplear para medir dicha magnitud, indicando también el tipo de señal de salida de los transductores.

Magnitud Física	Transductor	Características
Posición (Lineal o Angular)	Potenciómetro	Analógico
	Encoder	Digital
	Sincro y Resolver	Analógico
Pequeños desplazamientos	Transformador diferencial	Analógico
	Galga Extensiométrica	Analógico
Velocidad (Lineal o Angular)	Dinamo tacométrica	Analógico
	Encoder	Digital
	Detector inductivo u óptico	Digital
Aceleración	Acelerómetro	Analógico
	Sensor de velocidad + calculador	Digital
Fuerza y Par	Galga Extensiométrica	Analógico
Temperatura	Termopar	Analógico
	Resistencias PT100	Analógico
	Termistores CTN	Analógico
	Termistores CTP	Todo-Nada
	Bimetales	Todo-Nada
Sensores de Presencia o Proximidad	Inductivos	Analógico o Todo-Nada
	Capacitivos	Todo-Nada
	Ópticos	Analógico o Todo-Nada

Tabla 1 – Ejemplos de la relación entre la naturaleza de la magnitud a medir y la señal de salida

2.2.3.3 Según requerimientos de fuente de energía

Atendiendo a los requerimientos de energía esta clasificación la componen dos grupos: *activos o modulantes* y *pasivos o autogenerativos*.

- **Activos o modulantes:** Requieren de una fuente de energía externa o de una señal de excitación para poder funcionar. Como por ejemplo los termistores, inductores, etc.
- **Pasivos o autogenerativos:** Generan directamente una señal eléctrica en respuesta a un estímulo externo sin la necesidad de una fuente de energía externa. Toman energía del estímulo. Algunos ejemplos son los termocouplas, sensores piezoeléctricos, etc.

2.2.3.4 Variable física de medida

De la misma manera que en el caso anterior, la clasificación de los sensores dependiendo de la magnitud física a detectar es bastante extensa, por lo que solo se muestran algunos ejemplos:

- Resistivo, Inductivo, Capacitivo, Piezoeléctrico, etc.

2.2.3.5 Empleados en robots

En este apartado se va a presentar una clasificación de los sensores en función de su uso en los robots. Los robots para poder realizar sus tareas de manera rápida y eficiente, es necesario que tengan conocimiento de su entorno y de sí mismos. Atendiendo a estas dos características la clasificación [9] queda de la siguiente manera:

- **Sensores internos:** sensores integrados en la propia estructura mecánica del robot, que dan información del estado del robot, fundamentalmente de la posición, velocidad y aceleración de las articulaciones.
- **Sensores externos:** sensores colocados en la estructura externa del robot que dan información del entorno de éste, tales como alcance, proximidad, contacto, fuerza, etc. Se utilizan para guiado de robots, para identificación y manipulación de objetos.

2.2.3.5.1 Sensores internos

Los sensores internos o propioceptivos informan al robot de una serie de características o parámetros internos. Estos parámetros pueden abarcar un grupo muy amplio (temperatura, presión, etc.) y en función de las necesidades se controlarán unos parámetros u otros. Para simplificar la clasificación de estos sensores se van a mostrar las características más generales e importantes que se deben controlar en los robots, que son la posición, la velocidad y la aceleración de sus articulaciones.

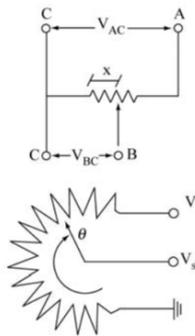
2.2.3.5.1.1 Sensores de posición

Son sensores que informan de la posición en un instante determinado de tiempo. Determinar la posición del robot es uno de los problemas más importantes en el campo de la robótica. Actualmente no existe un método totalmente eficaz para obtener este parámetro, por lo que se hace uso de distintos sensores. A continuación se muestra una clasificación en función de la señal, *analógica* o *digital*.

Los principales sensores de posición *analógicos* son:

- **Potenciómetros:** en estos transductores las variaciones de la posición que se quiere medir se convierten en variaciones de resistencia eléctrica, a través de un contacto móvil que se desplaza a lo largo de un material resistivo. Se pueden medir desplazamientos angulares y pequeños desplazamientos lineales (véase figura 15). Cumplen la siguientes relaciones:

$$R(x) = \frac{x}{X} \cdot R_0$$



$$\frac{V_{BC}}{V_{AC}} = \frac{R_{BC}}{R_{AC}}$$

$$V_s = V \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right)$$

x = desplazamiento del cursor

$x = l$ → desplazamiento lineal

$x = \alpha$ → desplazamiento angular

X = desplazamiento total máximo

R_0 → valor nominal



Figura 15 – Sensor potenciométrico angular (izq.) y lineal (dcha.) [10]

Estos dispositivos constan de una resistencia con una diferencia de potencial especificada y un contacto que se une a ella. Dicho contacto puede moverse por la resistencia, variando de esta manera la diferencia de potencial en él. Entonces, conectando el elemento, del cual se quiere conocer el desplazamiento, al contacto, cuando el elemento se desplace moverá el contacto variando su diferencia de potencial. Conociendo dicha tensión de salida se puede obtener el desplazamiento del contacto y con éste se obtiene el desplazamiento del elemento.

- **Resolver:** al igual que el Sincro, es un dispositivo de tipo electromagnético diseñado para medir el desplazamiento angular, en la figura 16 se muestra un ejemplo de este tipo de sensor. El principio de funcionamiento de un Resolver es el mismo que el de un Sincro, por lo que, es el mismo que el de un transformador en rotación. Un bobinado primario móvil que se encuentra solidario en el rotor (eje de giro) y dos bobinados secundarios (seno y coseno) fijos que se encuentran en el estator. Al aplicar una señal alterna del tipo $V_{sen}(\omega t)$ en el rotor, éste gira induciendo un voltaje en el estator o bobinados secundarios fijos resultando las siguientes tensiones:

$$V_1 = V \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}\theta$$

$$V_2 = V \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{cos}\theta$$

Como la separación de las bobinas fijas es de 90° , como se puede apreciar en la figura 17, en la segunda señal se sumará al $\text{sen}\theta$ un ángulo de 90° y esto es lo mismo que $\text{cos}\theta$. De esta manera los voltajes inducidos en el estator son

modulados en amplitud por el seno y el coseno del ángulo θ del rotor relativo al estator.



Figura 16 – Sensor de posición Resolver [10]

Este tipo de sensor tiene el mismo inconveniente que los sensores Sincro, el desgaste de las escobillas con el paso del tiempo.

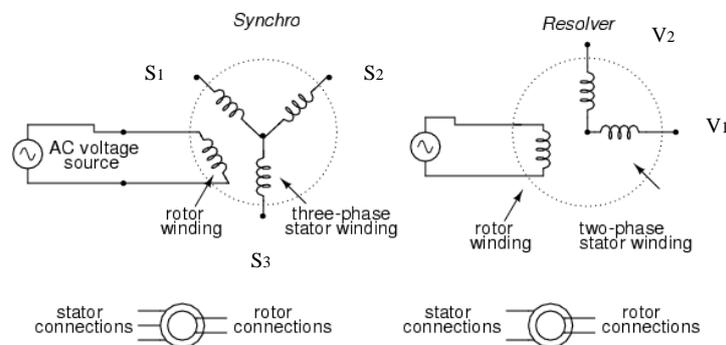


Figura 17 – Esquema de un sensor Sincro y Resolver[10]

- **Sincro:** es un sensor de tipo electromagnético diseñado para medir el desplazamiento angular, es el precursor del Resolver, en la figura 18 se muestra un ejemplo de un sensor de posición Sincro. El principio de funcionamiento de un Sincro es el mismo que el de un transformador en rotación.



Figura 18 – Sensor de posición Sincro [10]

El Sincro está compuesto de un estator fijo y un rotor móvil. En el estator hay tres bobinas fijas dispuestas 120° una con respecto a la otra, formando una conexión en estrella (como se puede apreciar en la figura 17), mientras que, la bobina fija esta solidaria al eje de giro, el rotor. Dicha bobina es excitada mediante una señal de tipo $V_{sen}(\omega t)$, induciendo en las bobinas fijas un voltaje que variará en función del ángulo θ formado entre el eje del rotor y los ejes de las bobinas del estator, éstos voltajes quedarán de la siguiente forma:

$$V_{13} = \sqrt{3} \cdot \cos(\omega t) \cdot \text{sen}\theta$$

$$V_{32} = \sqrt{3} \cdot \cos(\omega t) \cdot \text{sen}(\theta + 120)$$

$$V_{21} = \sqrt{3} \cdot \cos(\omega t) \cdot \text{sen}(\theta + 240)$$

Este tipo de sensor tiene el inconveniente del desgaste, ya que la señal de excitación que se aplica en el rotor se hace a través de unas escobillas, y éstas al estar en continuo movimiento debido al giro del rotor sufren desgaste con el paso del tiempo.

- **LVDT:** o transformador diferencial de variación lineal. Es un transductor pasivo de posición de tipo electromagnético alimentado con alterna que tiene una alta resolución y alta linealidad, debido a que sus medidas son diferenciales. Está compuesto por un devanado primario y dos secundarios (véase figura 19) que unidos adecuadamente producen una tensión diferencial sinusoidal proporcional al desplazamiento del núcleo:

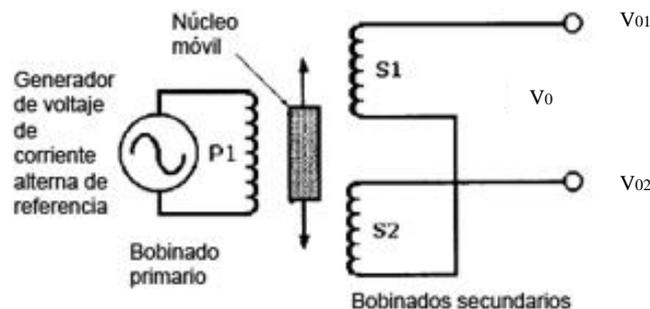


Figura 19 – Esquema de un sensor de posición LVDT

$$V_0 = V_{01} - V_{02} = S \cdot x$$

Donde S es la sensibilidad del transductor y x el desplazamiento del núcleo.

El funcionamiento del LVDT se basa en el movimiento del núcleo ferromagnético, de manera que al desplazarse inducirá un voltaje distinto para cada bobina secundaria, (haciendo que aumente el voltaje en una y disminuya en la otra esa misma cantidad). Midiendo esta diferencia de potencial en los devanados secundarios se obtiene el desplazamiento del núcleo. En la figura 20 se muestra un ejemplo de este sensor.



Figura 20 – Sensor de posición LVDT [10]

Es uno de los transductores más utilizados para medir desplazamientos lineales (LVDT) y angulares (RVDT) ya que trabajan sin fricción, resolución alta, linealidad alta, larga vida de funcionamiento, son muy robustos y tienen aislamiento de entrada y salida.

- **Inductosyn:** es uno de los transductores de posición más precisos, tanto el Inductosyn Lineal como el Inductosyn Rotatorio, un ejemplo de éstos se puede ver en la figura 21. Son sensores que trabajan con una precisión del orden de micras, por lo que se emplean mucho por las empresas de Control Numérico y Máquinas Herramientas para el control y medición de ejes.



Figura 21– Sensor de posición Inductosyn Lineal (dcha.) y Rotatorio (izq.)[10]

El principio de funcionamiento de este sensor es el mismo tanto para medir desplazamientos lineales como angulares, por ello, se explicará el principio de operación de un tipo de movimiento, en este caso el lineal. Este transductor es de tipo electromagnético y está formado por dos placas, una fija y otra móvil (véase figura 22), estando la fija solidaria con el eje de medición y la móvil solidaria al elemento del cual se quiere obtener su desplazamiento.

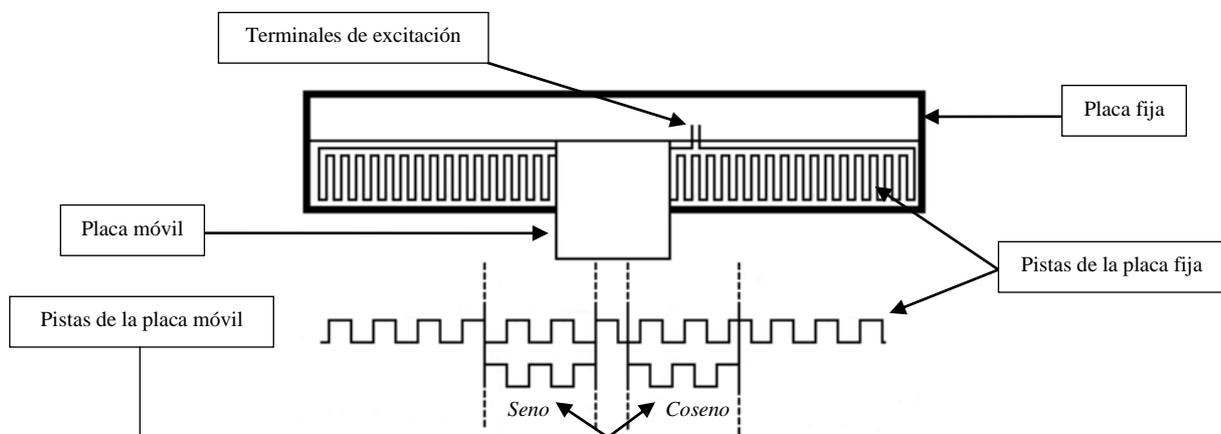


Figura 22 – Esquema sensor de posición Inductosyn Lineal

La placa fija contiene un circuito impreso pegado en su base en el cual está grabada una onda de forma rectangular, mientras que la placa móvil tiene dos circuitos impresos idénticos con la misma forma de onda que la placa fija en cada uno de ellos pero desfasados el uno respecto del otro 90°. La colocación de ambas placas, fija y móvil, debe realizarse encarando los circuitos mencionados, de forma que, al excitar la placa fija con un voltaje de corriente alterna de la siguiente forma $V \cdot \text{sen}(\omega t)$, en la salida del bobinado de la placa móvil se obtendrán las siguientes expresiones:

$$V \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi X}{S}\right) \quad V \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{cos}\left(\frac{2\pi X}{S}\right)$$

Donde la X representa el desplazamiento lineal de la placa móvil y S representa el periodo de la onda cuadrada. En el caso del Inductosyn Rotatorio las señales a la salida de la parte móvil serían:

$$V \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}\left(\frac{N \cdot \theta}{2}\right) \quad V \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{cos}\left(\frac{N \cdot \theta}{2}\right)$$

En este caso θ representa el ángulo de rotación de la placa móvil (rotor) con respecto al de la placa fija (estator) y N indica el número de polos del rotor.

En segundo lugar se van a describir los principales sensores de posición *digitales* empleados en robots, los cuales son:

- **Encoder Incremental:** denominado también codificador óptico es un tipo de sensor de posición que mide desplazamientos angulares. Está compuesto por un disco transparente con una serie de marcas opacas dispuestas radialmente, un emisor de luz (normalmente un diodo LED) y un receptor de luz, es decir, un elemento fotosensible. Cabe destacar que estos dos últimos elementos están colocados a ambos lados del disco a la misma distancia de éste. La figura 23 muestra un tipo de este sensor.



Figura 23 – Sensor de posición Encoder Incremental [10]

El funcionamiento del Encoder consiste en acoplar el disco al eje de giro del cual se quiere obtener su desplazamiento angular. Una vez que dicho eje empieza a funcionar el emisor de luz empieza a emitir la señal, de manera que, debido al giro del disco en el receptor se van generando una serie de pulsos que corresponden al paso de la luz por las transparentes. De esta forma, llevando la cuenta de los pulsos se puede obtener el desplazamiento angular del eje.

Actualmente los Encoders Incrementales incluyen algunas mejoras sobre el modelo básico explicado en este documento. Dichas mejoras son una marca de cero para saber cuando el disco ha dado una vuelta completa y una segunda banda de marcas por debajo de la primera para saber el sentido de giro del eje (véase figura 24).

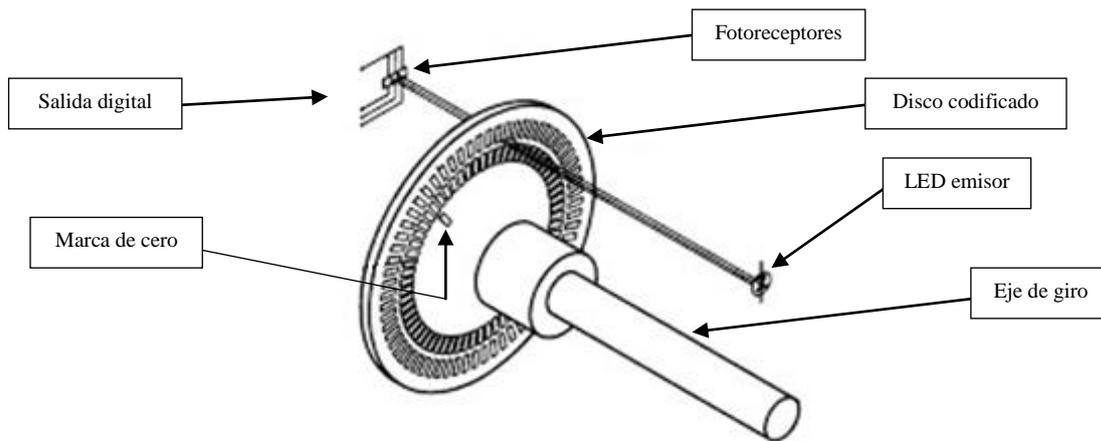


Figura 24 – Esquema de un Encoder Incremental

- Encoder Absoluto:** al igual que en el caso anterior es un codificador óptico que mide desplazamientos angulares. Los componentes que lo constituyen y la disposición de los mismos, al igual que el principio de funcionamiento del dispositivo, es semejante al Encoder Incremental; un emisor, un disco transparente con marcas opacas y un receptor, como se muestra en el esquema de la figura 25.

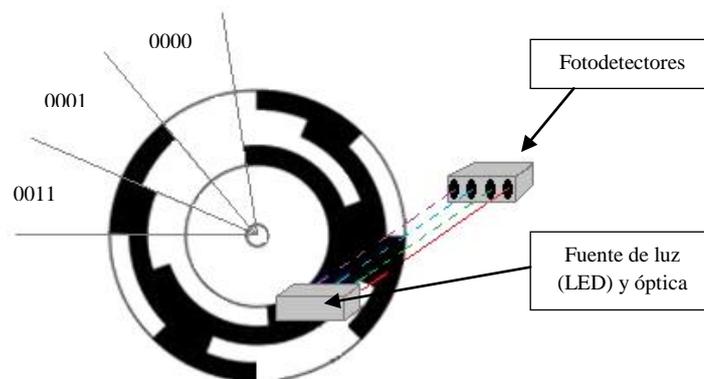


Figura 25 – Esquema de un Encoder Absoluto

La diferencia entre ambos tipos (incremental y absoluto) radica en que éste último tiene el disco marcado de diferente forma. En este caso se fracciona el disco en un número determinado de partes (potencia de 2), codificando dichas partes mediante código binario, normalmente código Gray, lo que hace que queden representadas zonas transparentes y opacas en el disco. Un ejemplo de este tipo de sensores se muestra en la figura 26.



Figura 26 – Sensor de posición Encoder Absoluto [10]

Tanto en el Encoder Incremental como en el Absoluto, la resolución viene restringida por el número de marcas físicas que se pueden hacer en el disco o el número de bits del código empleado, que suele ser de 8 a 19 bits.

El inconveniente más grande que tienen ambos sensores es la precisión requerida en el proceso de fabricación y la sensibilidad que muestran antes golpes y vibraciones.

2.2.3.5.1.2 Sensores de velocidad

Los sensores de velocidad ayudan a mejorar el comportamiento dinámico de los actuadores del robot. Cada actuador tiene un bucle de control analógico equipado en su propio elemento motor, de manera que se realimenta la información de la velocidad de los movimientos de los mencionados actuadores. Cabe destacar que las velocidades de cada actuador se pueden mandar, si fuese necesario, a la unidad de control del robot.

La forma más sencilla de obtener la velocidad se basa en la posición. Mediante el uso de un sensor de posición se puede derivar la posición obteniendo la velocidad. A continuación se muestran otros posibles métodos para la obtención de la velocidad.

- **Tacogenerador:** es un dispositivo analógico, de tipo electromagnético, empleado para medir velocidad angular, permite obtener una medida de tensión proporcional a la rotación del eje de giro del cual se quiere saber su velocidad. Existen varias configuraciones en función del montaje en el elemento que se quiere controlar en velocidad (en un eje, en una rueda dentada, etc.). En este documento se explica la configuración de un Tacogenerador montado en un eje (véase figura 27), es la siguiente; al eje el cual queremos medir, el eje del motor, se le acopla una espira, de forma que gire solidariamente con el eje mencionado. Dicha espira se introduce en un campo magnético formado por dos imanes fijos, de manera que el giro de la espira genera una corriente eléctrica.



Figura 27 – Sensor de velocidad Tacogenerador [10]

- **Convertidores de frecuencia-tensión:** son dispositivos digitales, actúan de forma similar a los encoders incrementales, es decir, generan una tensión de salida proporcional a la frecuencia de giro. Dicha frecuencia de giro se puede obtener de diversas formas, mediante un sensor de posición digital o mediante uno analógico con un conversor analógico-digital. Actualmente el uso de estos

sensores se ha extendido mucho, sustituyendo a los tacogeneradores, ya que, tienen muy buenas características como la robustez, son adaptables al control digital, buena calidad-precio, alta resolución, etc. En la figura 28 se muestra un ejemplo de este tipo de sensor, de la empresa Texas Instruments.

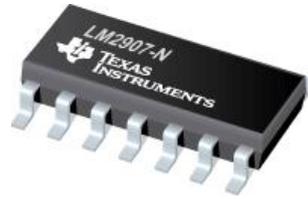


Figura 28 – Convertidor Frecuencia-Tensión [10]

2.2.3.5.1.3 Sensores de aceleración

El control de la aceleración, al igual que el control de la velocidad, ayuda a mejorar el comportamiento dinámico de las articulaciones del robot, sobre todo cuando se trabaja desplazando grandes cargas a velocidades altas, ya que de esta manera se consigue evitar que el robot, o sus articulaciones, realicen esfuerzos dinámicos elevados.

Existen varios métodos de obtener la aceleración, el más simple y menos preciso sería emplear la derivada de la velocidad, o la segunda derivada de la posición. Estas dos formas de obtener la aceleración no se emplean prácticamente nada, debido a la falta de precisión en sus resultados.

Por ello se emplean los sensores o transductores de aceleración o acelerómetros, son unos dispositivos que permiten obtener una señal eléctrica de salida en función de la aceleración. Su principio de funcionamiento se basa en la segunda ley de Newton:

$$F = m \cdot a$$

De forma que conociendo la masa y la fuerza ejercida se obtiene la aceleración. La clasificación de estos sensores atiende a las tecnologías existentes, encontrando acelerómetros piezoresistivos, piezoeléctricos, capacitivos, micromecánicos o MEMS, etc.). A continuación se exponen algunos ejemplos de los distintos tipos de acelerómetros:

- **Piezoeléctricos:** son dispositivos empleados para medir la aceleración, generada por el cambio de velocidad, en función de una corriente eléctrica. Su principio de funcionamiento se basa en las características de los materiales piezoeléctricos, los cuales generan una corriente eléctrica al sufrir modificaciones en su estructura cristalina. La configuración de estos sensores es la siguiente, entre el elemento del cual se quiere obtener su aceleración y una masa inercial se coloca el material piezoeléctrico (véase la figura 29).

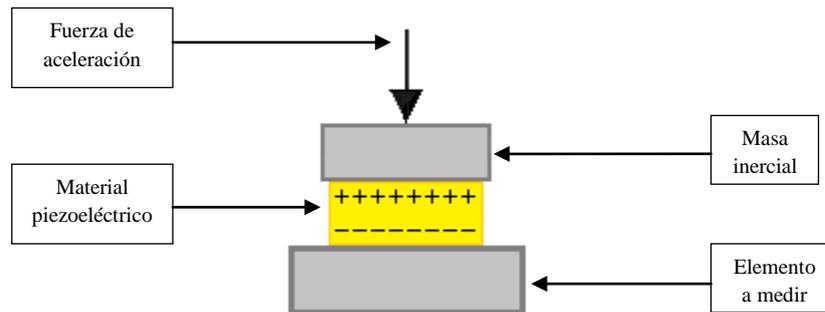


Figura 29 – Esquema sensor de aceleración piezoeléctrico

De manera que al sufrir una aceleración, la masa inercial producirá una fuerza en el material piezoeléctrico, implicando una deformación de éste, y por consiguiente, generando una corriente eléctrica que será proporcional a la fuerza ejercida por la masa inercial. Para obtener el valor de la aceleración se mide esta corriente generada, se obtiene la fuerza y a continuación se aplica la segunda ley de Newton. Cabe destacar que hay modelos de estos sensores que dan un valor de tensión en vez de corriente. En la figura 30 se muestran distintos modelos de estos sensores.



Figura 30 – Sensores de aceleración piezoeléctricos [10]

- **Piezo-resistivos:** al igual que los sensores de aceleración piezoeléctricos, los sensores piezo-resistivos miden la aceleración en función de una corriente eléctrica. La diferencia entre estos dos tipos de sensores radica en el principio de funcionamiento. En este caso (sensores piezo-resistivos), en vez de usar un material piezoeléctrico se usa un sustrato, como se muestra en el esquema de la figura 31.

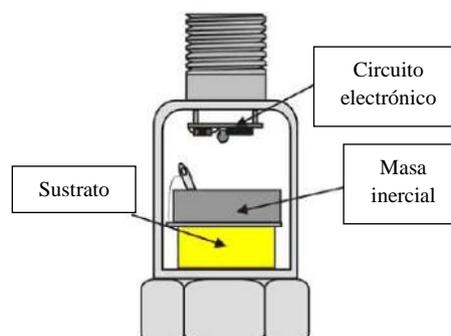


Figura 31 – Esquema de un sensor de aceleración piezo-resistivo

La característica de este sustrato es que al aplicar una fuerza sobre él, genera una variación de su resistencia. De manera que, al variar la velocidad se genera una fuerza sobre la masa inercial implicando una variación de la resistencia del sustrato. Incluyendo el sustrato como resistencia de un circuito electrónico (puente de Wheatstone) se puede obtener el valor de la corriente producida por la variación de la resistencia. En la figura 32 se muestran distintos tipos de sensores de aceleración piezoresistivos.



Figura 32 – Sensores de aceleración piezoresistivos [10]

2.2.3.5.2 Sensores externos

Los sensores externos o exteroceptivos informan al robot de una serie de características o parámetros externos, es decir, se encargan de la percepción del entorno de éste permitiéndolo interactuar de una forma más independiente y flexible. La clasificación de estos sensores es muy extensa, ya que, hay tantos sensores como parámetros externos se quieran controlar. Al igual que en el apartado de los sensores internos, en este apartado se van a clasificar los sensores externos en función de las características más comunes que interesan controlar de forma general en todos los robots, las cuales son la proximidad, el contacto, el alcance y la fuerza.

2.2.3.5.2.1 Sensores de proximidad

Los sensores de proximidad, denominados también sensores de presencia, tienen como función avisar de la cercanía de un objeto, o bien para esquivarlo, o bien para coger el objeto. Estos sensores suelen ir colocados en la estructura del robot que va a trabajar cerca del objeto u objetos. Los diferentes tipos de sensores de proximidad se explican a continuación:

- **Sensores inductivos:** en estos sensores las variaciones de la distancia que queremos medir se convierten en variaciones de la inductancia de una bobina. La configuración de estos sensores consta básicamente de un imán permanente y una bobina introducidos en una carcasa, como se muestra en la figura 33-A.

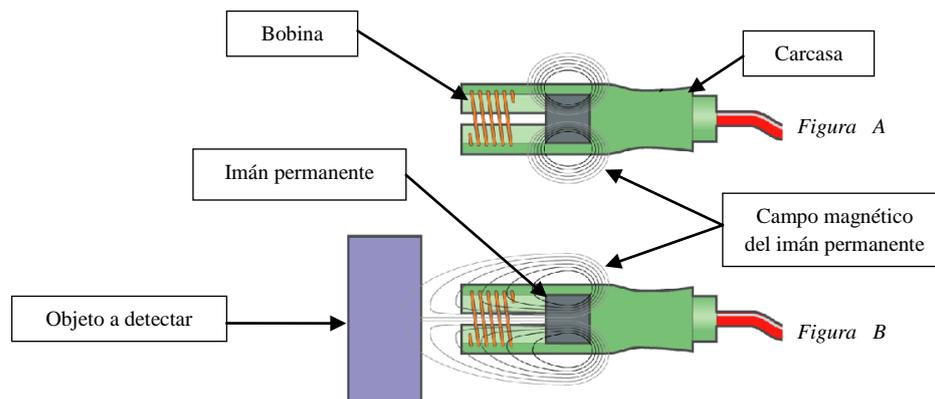


Figura 33 - Esquema de un sensor de proximidad inductivo en ausencia de un objeto (figura A) y en presencia de éste (figura B)

Su principio de funcionamiento se basa en medir las variaciones de inductancia de la bobina provocadas por la presencia de un objeto ferromagnético en el campo magnético del imán permanente. De manera que, al acercarse el sensor a un objeto ferromagnético, las líneas de flujo del campo magnético del imán permanente varían de posición (véase figura 33-B) induciendo un impulso de corriente en la bobina. Midiendo la tensión a la salida de la bobina se puede saber la distancia al objeto, a través de una relación entre amplitud de tensión y distancia sensor-objeto. En la siguiente figura, figura 34, se muestran distintos tipos de sensores de proximidad inductivos.



Figura 34 – Distintos tipos de sensores de proximidad inductivos [10]

- **Sensores de efecto Hall:** son sensores que proporcionan una tensión de salida en función del campo magnético de forma lineal. En el esquema de la figura 35 se muestra la configuración de este sensor, el cual consta de un imán y de un elemento conductor o semiconductor colocado en el interior del imán.

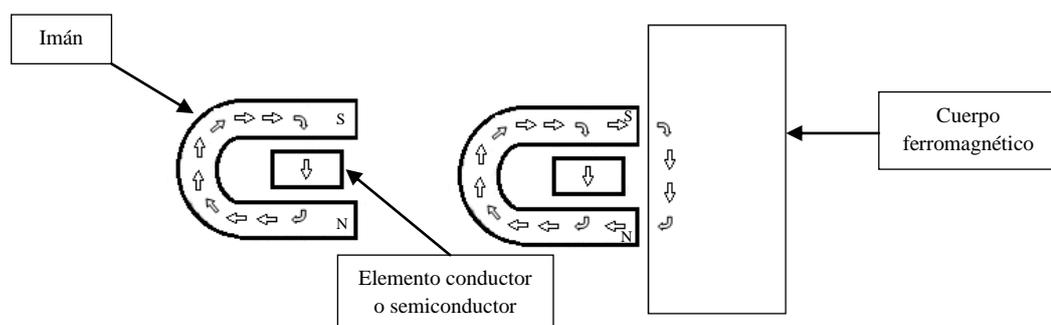


Figura 35 – Esquema de sensor de proximidad efecto Hall en ausencia de material ferromagnético (izq.) y en presencia de éste (dcha.)

El funcionamiento de este sensor es el siguiente; cuando el sensor no detecta ningún objeto, la intensidad del campo magnético (inducido por el imán) que circula a través del elemento conductor o semiconductor es elevada. Por el contrario, cuando el imán se acerca a un objeto ferromagnético, el campo magnético pierde intensidad ya que parte de éste circula a través de dicho objeto (véase figura 35). De esta manera es como se determina la proximidad de un objeto, al disminuir el campo magnético, disminuye la caída de tensión en el elemento conductor (o semiconductor), por lo que midiendo dicha caída de tensión se obtiene el valor de la proximidad al objeto. En la figura 36 se pueden ver distintos tipos de este sensor.



Figura 36 – Distintos tipos de sensores de proximidad efecto Hall [10]

- **Sensores capacitivos:** son dispositivos que dan una medida de proximidad a un objeto en función de variaciones de su capacidad, provocadas al acercar el mencionado objeto al sensor. Los elementos y la posición de éstos en este tipo de sensores es la mostrada en el esquema de la figura 37.

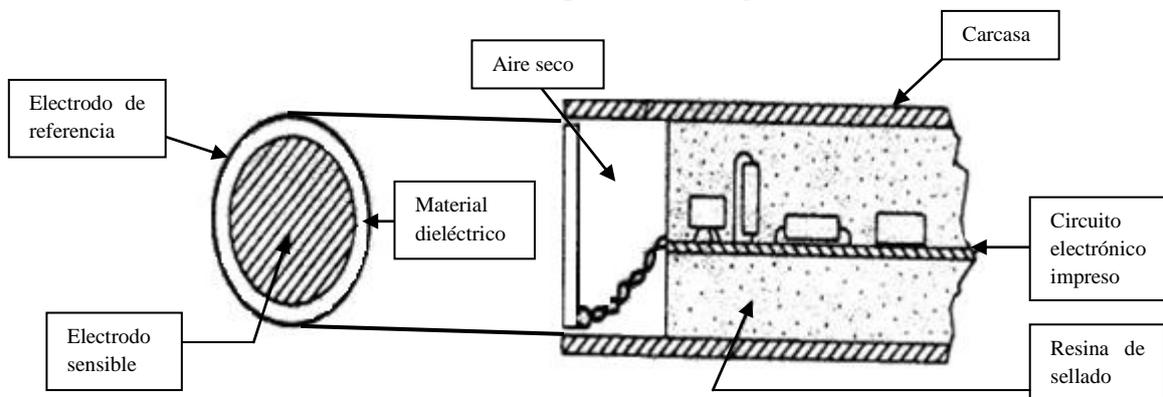


Figura 37 – Esquema de un sensor de proximidad capacitivo

Como se puede apreciar en la figura anterior, hay un electrodo de referencia y un electrodo sensible, separados por un material dieléctrico, es decir, un condensador. El funcionamiento de este sensor se basa en que cuando se acerca un objeto a los electrodos, el electrodo sensible se desplaza modificando la capacidad del sensor. Dicha variación de la capacidad es detectada gracias al circuito electrónico, éste compara la señal de referencia sinusoidal que tiene con la nueva señal obtenida por el sensor, midiendo el desfase entre las señales se calcula de forma proporcional la variación de la capacidad, calculando por último la proximidad al objeto. Por último, señalar que el hueco de aire seco detrás del condensador se usa de aislamiento y que la resina de sellado de la zona del circuito electrónico se emplea como soporte mecánico y de sellado.

Cabe destacar que a diferencia de los sensores anteriores, los sensores capacitivos detectan cualquier material tanto sólido como líquido, con ciertas restricciones en el rango de distancia para cada material. En la siguiente figura, figura 38, se muestran distintos tipos de sensores capacitivos.



Figura 38 – Distintos tipos de sensores de proximidad capacitivos [10]

- **Sensores ultrasónicos:** son dispositivos que dan una medida de proximidad en función de lo que tarda el sensor en recibir la señal reflejada en el objeto. En la figura siguiente (figura 39) se puede observar los componentes y la disposición de éstos en un sensor ultrasónico básico.

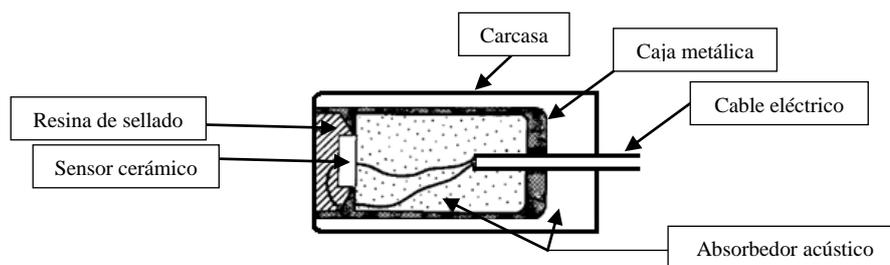


Figura 39 – Esquema de un sensor ultrasónico de proximidad

El elemento principal es el sensor electroacústico, normalmente de tipo cerámico piezoeléctrico. Éste se encuentra sellado por la resina de sellado, la cual tiene como función proteger al sensor de elementos externos y factores ambientales. Otro elemento a destacar es el absorbedor acústico, este elemento tiene como función amortiguar la señal del sensor de forma rápida, esto se debe a que al usar el mismo sensor como emisor y receptor, cuando el objeto se encuentra a una distancia muy pequeña puede dar una medida errónea de la distancia a dicho objeto.

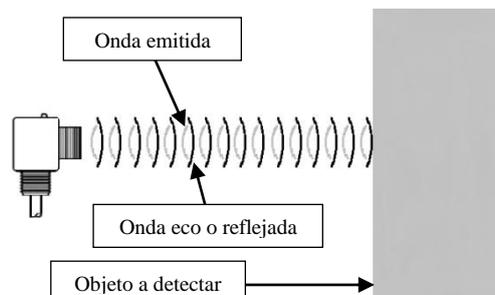


Figura 40 – Esquema de funcionamiento de un sensor ultrasónico

Un esquema básico del funcionamiento de estos sensores se puede ver en la figura 40. El sensor emite una señal denominada onda emitida, cuando un objeto interrumpe la señal, ésta es reflejada en el objeto y vuelve al sensor, dicha señal de retorno se denomina señal eco o reflejada. El tiempo que tarda en recibir esta señal el sensor, tiempo de eco, es la variable que se emplea para el cálculo de proximidad al objeto. Cabe destacar que estos sensores pueden trabajar con cualquier tipo de material, aunque presenta diferentes problemas como la contaminación acústica, ángulo de incidencia, temperatura, etc. A continuación se muestran algunos ejemplos de estos sensores (véase figura 41).



Figura 41 – Distintos tipos de sensores de proximidad ultrasónicos [10]

- **Sensores ópticos:** al igual que en el caso de los sensores de proximidad ultrasónicos, este tipo de sensores basan su medida en función de la señal recibida, en este caso las señales son de tipo lumínicas. A diferencia de los ultrasónicos, los sensores ópticos tienen un elemento emisor, generalmente un diodo LED, y un elemento receptor, un fotodiodo (véase figura 42).

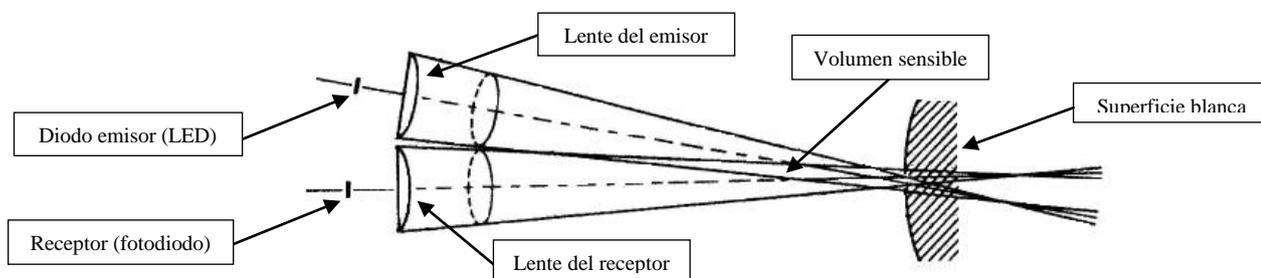


Figura 42 – Esquema de un sensor de proximidad óptico

El funcionamiento es el siguiente, el diodo LED y el fotodiodo deben apuntar al mismo punto de una superficie. De esta forma la confluencia de ambas señales produce una zona delimitada denominada volumen sensible, el cual define la zona de actuación del sensor, ya que, un objeto que penetra en esta zona es iluminado por el emisor y detectado por el receptor al mismo tiempo. De esta manera, si un objeto entra en dicha zona producirá una variación de la intensidad de la señal recibida y, en función de esta variación se determina la proximidad del objeto. En la figura adjunta, figura 43, se muestran distintos tipos de sensores ópticos.



Figura 43 – Distintos tipos de sensores de proximidad ópticos [10]

2.2.3.5.2.2 Sensores de alcance

Los sensores de alcance miden la distancia que hay desde un punto de referencia, situado normalmente en el propio sensor, hasta objetos que se encuentran dentro de su zona de actuación. Con el fin de determinar la situación y forma de los objetos, facilitando el desplazamiento de los robots, ya que puede evitar los obstáculos. Se diferencian tres métodos de trabajo en estos sensores, las cuales son:

- **Triangulación:** este método es de los más sencillos y más antiguos. Los sensores que trabajan con este método tienen un emisor y un receptor de luz (véase el esquema de la figura 44).

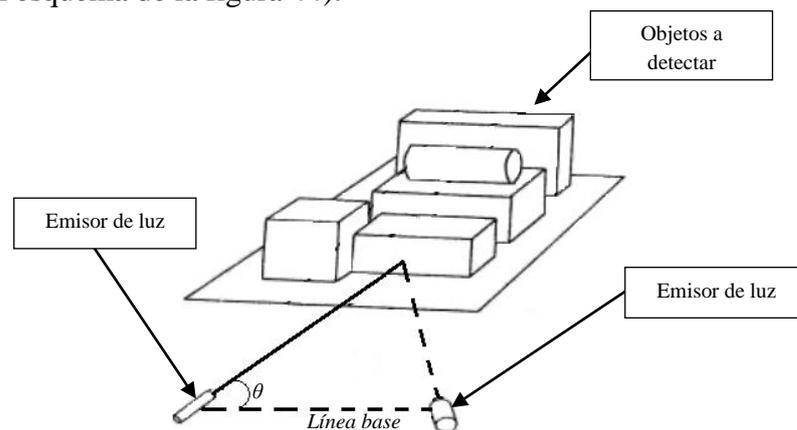


Figura 44 – Esquema del método de triangulación para el cálculo de distancias

El principio de funcionamiento de estos sensores se basa en la trigonometría. De manera que, cuando el emisor ilumina la superficie de un objeto, el detector se activa al notar luz en la superficie. Conociendo la distancia entre emisor y detector, denominada línea base, y el ángulo θ que forma el haz de luz con dicha línea, mediante cálculos trigonométricos se puede obtener la distancia al objeto. Cabe destacar que este método obtiene por cada lectura una distancia a un punto de la superficie del objeto, para poder determinar la forma de dicho objeto es necesario que emisor y detector se mueva al mismo tiempo por un plano fijo.

- **Iluminación estructural:** este tipo de sensores dan medidas de alcance o distancia a objetos en función de la distorsión de un haz de luz. Los sensores de alcance por el método de iluminación estructural se componen de dos elementos

básicos, un emisor de luz, generalmente con forma cilíndrica, y un detector de luz que es una cámara de televisión.

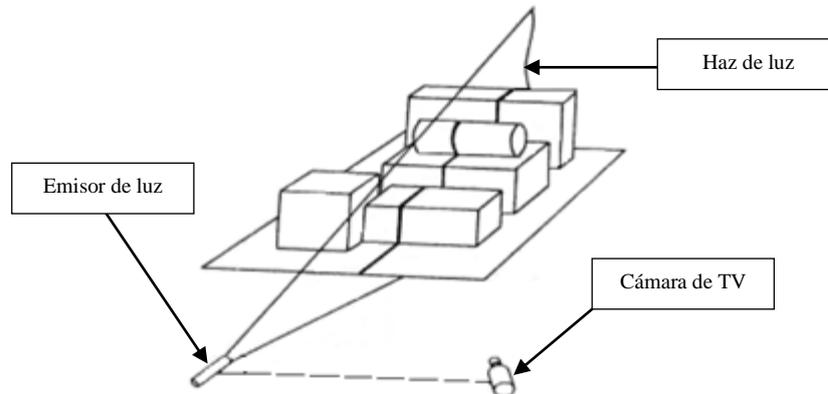


Figura 45 – Esquema del método de iluminación estructural para el cálculo de distancias

La forma de trabajar de este sensor es la siguiente, el emisor de luz proyecta un haz de luz sobre los objetos a detectar creando una franja de luz sobre éstos (véase figura 45, esquema de un sensor de alcance por el método de iluminación estructural) y, con una cámara de televisión, separada una distancia determinada, se captan las imágenes que crea el haz en los distintos objetos lo que denominamos franjas. Una vez capturadas las imágenes de dichas franjas, es necesario el uso de un ordenador para poder tratar la información debido a la complejidad de los cálculos y dar las distintas medidas de distancia a los distintos objetos.

- **Tiempo de vuelo:** los sensores de alcance que trabajan por el método de tiempo de vuelo, son sensores que dan un valor de la distancia en función del tiempo que tarda la señal emitida en volver, es decir, el tiempo que tarda la señal reflejada en volver al sensor. La señal puede ser tanto sónica como lumínica. Existen tres formas diferentes de trabajar con este tipo de método, la primera consiste en medir el tiempo que tarda en volver un pulso luz emitida por un láser, ambas señales, emisora y reflejada viajan por la misma trayectoria (véase figura 46).

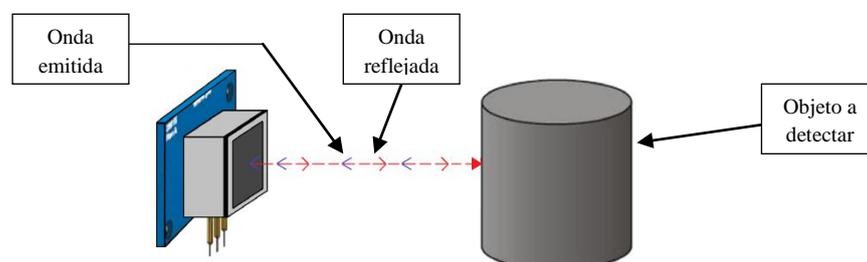


Figura 46 – Esquema de funcionamiento de sensor de alcance láser por tiempo de vuelo

En la segunda forma de trabajo por tiempo de vuelo también se emplea un láser para emitir la señal, con la diferencia de que en este caso se mide el desfase entre las señales, entrante y saliente, y que la señal que se emite es un haz continuo.

En último lugar, la tercera forma de trabajo por tiempo de vuelo, emplea señales ultrasónicas, el principio de funcionamiento es el mismo, se emite una señal y se mide el tiempo que tarda en volver al sensor. El inconveniente de esta forma con respecto a las anteriores es que debido a la reflexión de las señales ultrasónicas ante determinadas formas como los salientes muy pronunciados o entrantes, puede inducir a error.

2.2.3.5.2.3 Sensores de contacto

Los sensores de contacto se emplean, como su nombre indica, cuando se quiere controlar la manipulación de objetos de la zona de trabajo con el robot, concretamente con alguna de sus articulaciones. La disposición de estos sensores en el robot se encuentra en los extremos de las articulaciones para facilitar dicha manipulación. En función de la forma de tratar la información, se diferencian tres tipos de sensores; *binarios*, *analógicos* y de *presión*.

- **Sensores binarios:** estos dispositivos dan información sobre la presencia, o no, de objetos en el interior de la mano del robot. Suelen ser son microinterruptores o sensores todo-nada. Un ejemplo de la disposición de estos sensores en las articulaciones de los robots se puede ver en la figura 47. También pueden ir colocados en las puntas de los dedos, en articulaciones de tipo sonda, etc., la colocación será en función de la aplicación que se le dé.

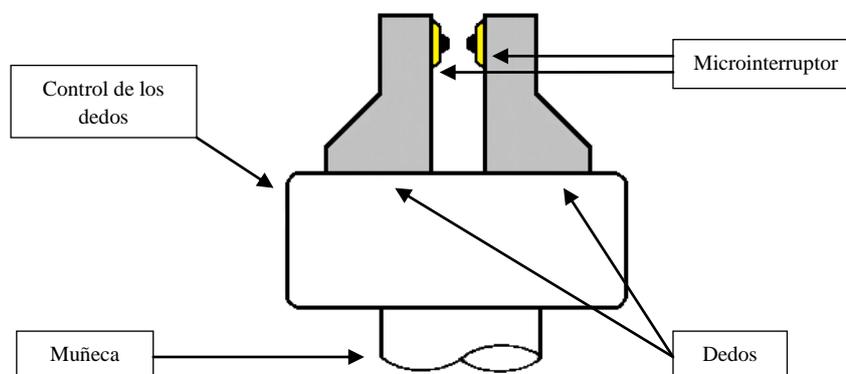


Figura 47 – Ejemplo de disposición de un sensor de contacto binario en una mano de robot

Otra posible disposición en las manos de los robots, sería utilizar varios microinterruptores, tanto en el interior de los dedos como en el exterior de la mano, de esta forma se dota al robot de una mayor sensibilidad táctil del entorno de trabajo en el que se encuentre. Las aplicaciones más características de estos sensores son la detección de cuando se ha tocado un objeto o cuando se ha cogido, determinación de dimensiones de los objetos huecos y determinación del entorno.

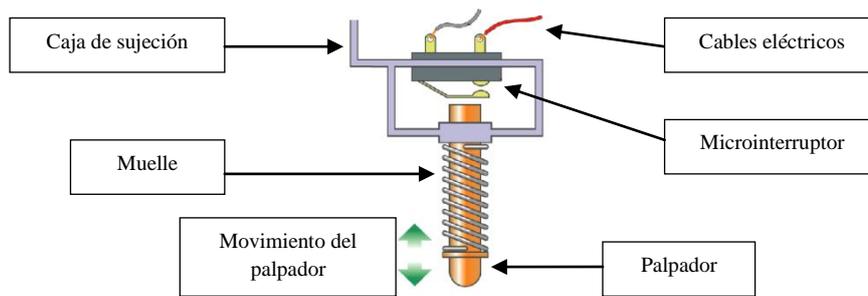


Figura 48 – Esquema de un sensor de contacto binario

El funcionamiento es el siguiente, cuando el palpador toca la superficie de un objeto (y supera una fuerza mínima, la fuerza que hace que se comprima el muelle) provoca el movimiento del mismo palpador provocando que la pestaña metálica cierre o abra, esto dependerá de la colocación de los elementos del contacto, el circuito eléctrico del microinterruptor, implicando una variación de su estado (véase figura 48). En la figura adjunta a continuación, figura 49, se muestran algunos ejemplos de sensores de contacto binarios.



Figura 49 – Distintos tipos de sensores de contacto binarios [10]

- **Sensores analógicos:** son dispositivos que informan de si se produce contacto entre el robot y un objeto, a diferencia de los binarios, estos proporcionan una medida de la fuerza ejercida en una zona concreta del objeto. El ejemplo más básico de estos sensores se muestra en la figura 50.

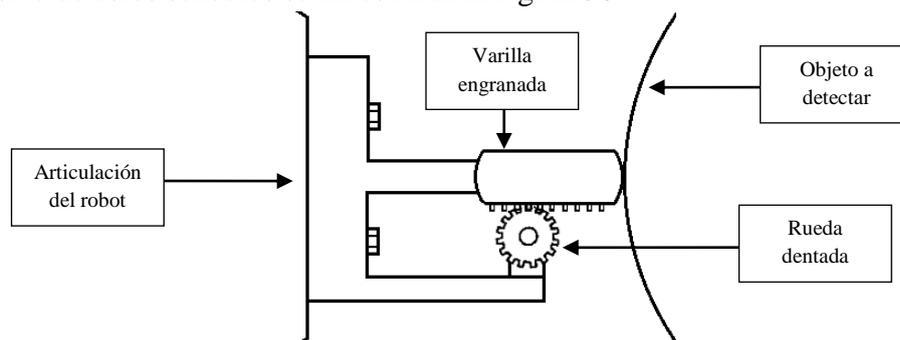


Figura 50 – Esquema de un sensor de contacto analógico

El funcionamiento del dispositivo de la figura arriba mostrada es bastante sencillo. Se engancha a la articulación del robot que se quiere controlar una varilla engranada que se acciona mediante un muelle y que se puede mover sobre dicha articulación, de esta forma cuando la varilla entra en contacto con un objeto, en función de la fuerza ejercida, engranará con la rueda desplazándose

una distancia. Midiendo el giro de la rueda dentada y conociendo los parámetros del muelle se obtiene la fuerza ejercida sobre el objeto.

2.2.3.5.2.4 Sensores de fuerza

Los sensores de fuerza se emplean para controlar la fuerza que ejerce el robot a la hora de manipular los objetos. El uso de estos sensores es de gran utilidad, ya que, permiten la manipulación de distintos objetos, ya sean robustos, frágiles, etc. las técnicas de terminación de la fuerza son variadas, con lo que, en este documento se recogen los sensores más característicos que son el *sensor táctil de array*, *sensor de muñeca* y *sensor de torsión*.

- **Sensor táctil de array:** estos dispositivos son una evolución de los sensores binarios múltiples, se denominan pieles artificiales, y actualmente están en investigación por distintas universidades. Al igual que en los casos anteriores, su disposición en las articulaciones de los robots es en la superficie que va a contactar con el objeto a manipular (en el ejemplo de la figura 51 es en el interior de los dedos de la mano del robot).

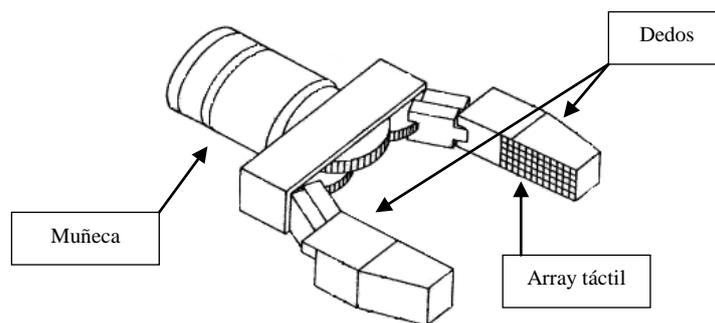


Figura 51 – Ejemplo de disposición de un sensor de contacto de tipo array

El array táctil está compuesto por una matriz formada por electrodos y un material piezoeléctrico (véase figura 52), ambos componentes están unidos mediante contactos eléctricos. El funcionamiento de dicha matriz se basa en que al ejercer presión sobre ésta se producen variaciones de forma, es decir, deformaciones, las cuales implican variaciones de resistencia eléctrica.

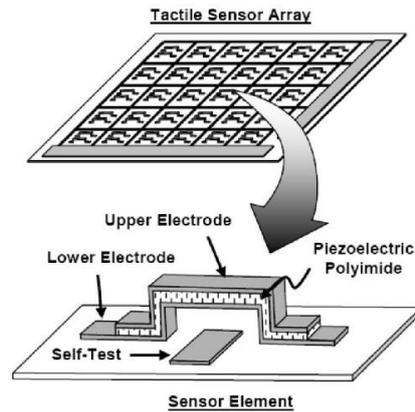


Figura 52 – Representación de un electrodo del array táctil [11]

Midiendo estas variaciones de resistencia eléctrica se puede determinar de forma proporcional la fuerza aplicada en la zona del array táctil. Cabe destacar que al tratarse de una matriz es posible la determinación de la forma de los objetos a manipular. Un ejemplo real de un tipo de piel artificial se puede ver en la figura 53.

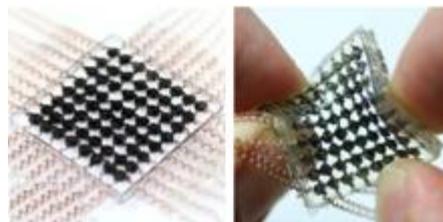


Figura 53 – Imagen de una piel artificial flexible [12]

- **Sensor de presión [13]:** a continuación se va a presentar un tipo de sensor semejante al anterior (las pieles artificiales), el cual se denomina como una plataforma de sensor de presión, desarrollado por la Universidad Carlos III de Madrid y el IK4-Cidetec. Es un sensor de bajo costo, simplificado y de fácil integración de la electrónica. Una característica importante es que pueden ser utilizados en ambientes extremadamente duros (ambientes con polvo) y que requieren fuentes de energía pequeñas (5 ó 3 voltios).

La plataforma de sensor de presión consiste en una matriz de 256 sensores analógicos, basado en la electrónica de impresión flexible. La configuración del sensor está formado por una matriz de 16×16 sensores con una superficie total de 45x45 (cm²). Cada sensor está formado por electrodos interdigitados de plata definidos por la tecnología de impresión de la pantalla en un tereftalato de polietileno (PET) sustrato flexible y un poli (3,4-dioxitiofeno) (PEDOT) polímero conductor en el lado superior de los electrodos que actúan como un recubrimiento activo. Un recubrimiento elastomérico de acrilato aislante se utiliza como separador entre los electrodos y el recubrimiento electroactivo. En la figura 54 se muestra un esquema de la matriz de sensores.

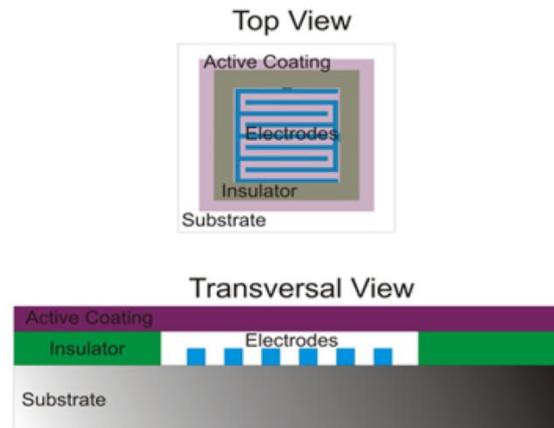


Figura 54 - Esquema de la matriz de sensores (vista superior y transversal) [13]

El comportamiento físico de este sensor de presión puede entenderse fácilmente si se estudia la relación entre la superficie de contacto (formada por PET y PEDOT) y los electrodos. Como el área de contacto entre el polímero y los electrodos aumenta, la resistencia muestra un valor más bajo, debido a la existencia de trayectorias resistivas paralelas adicionales. En este contexto, un valor más pequeño sensor de resistencia está relacionado con una pendiente V_{out} superior, de acuerdo con la configuración del sensor de acondicionamiento de señal. En la figura 55 se muestra una imagen de la matriz de sensores.

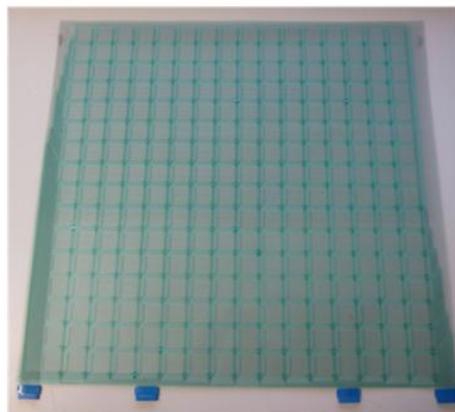


Figura 55 - Imagen de la matriz de sensores 16 × 16 (45 cm × 45 cm) [13]

- **Sensor de muñeca:** este tipo de sensores, además de dar una medida de la fuerza ejercida en las tres componentes, por la articulación del robot sobre el objeto a manipular, también determinan el momento de la fuerza, en cada componente, en el extremo de dicha articulación. La situación de este tipo de sensor en la articulación de un robot es entre el extremo de dicha articulación y el elemento enganchado a ésta (una mano robótica, una herramienta de trabajo, etc.). La figura 56 muestra un ejemplo de la disposición del sensor de muñeca en un robot.

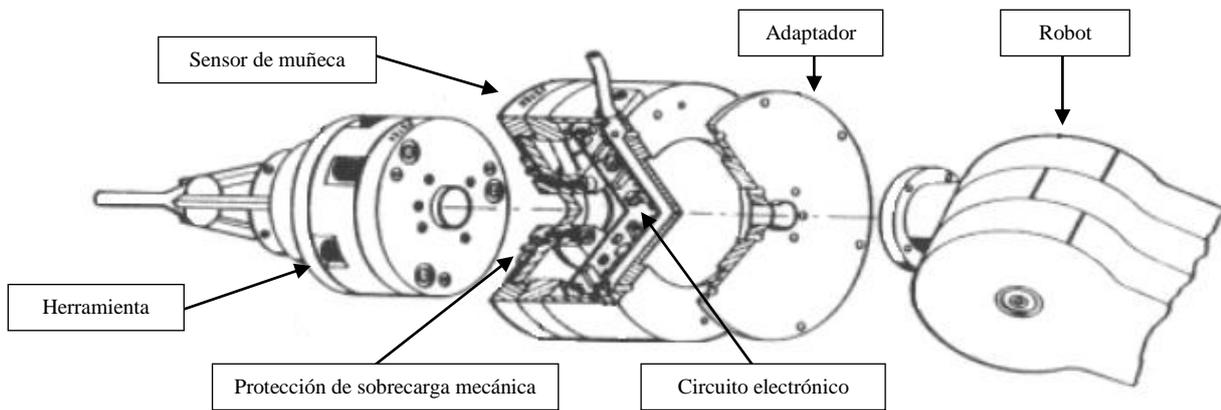


Figura 56 – Ejemplo de disposición de un sensor de muñeca en un brazo robótico

El elemento sensor de un transductor de muñeca es la galga de deformación de semiconductor, de esta manera y mediante la conexión con un circuito electrónico se obtiene la medida de la fuerza de forma proporcional a la salida de tensión de dicho circuito. La galgas mencionadas en este tipo de sensor, se sitúan en una pieza de metal maciza en forma de cruz formada por cuatro barras de deflexión (véase figura 57), colocando dos pares de galgas en cada barra (de dicha pieza de metal, así se consigue medir la fuerza ejercida en las tres componentes de los ejes, obteniendo los valores de F_x , F_y y F_z).

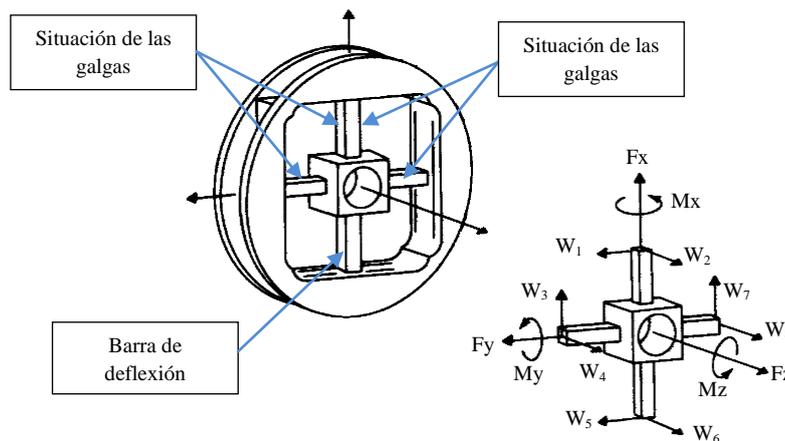


Figura 57 – Ejemplo de disposición de galgas en sensor de fuerza de muñeca

Para calcular los momentos que crean las fuerzas, en sus respectivos ejes, es necesario realizar una serie de cálculos con los valores de tensión de salida del circuito electrónico para cada componente. En la figura que se muestra a continuación, figura 58, se pueden ver ejemplos reales de este tipo de sensor.



Figura 58 – Distintos modelos del sensor de muñeca JR3 [14]

- **Sensor de articulación:** este dispositivo mide la fuerza de torsión que sufren las articulaciones de los robots. Este tipo de sensores miden la fuerza en cada eje (X, Y, Z) de la articulación del robot a controlar y, dan como resultado final la suma vectorial de dicha fuerza en cada eje. Si las articulaciones son movidas por motores de corriente continua, la fuerza ejercida en la articulación se calcula de forma proporcional a la corriente de dicho motor. El inconveniente que presentan estos sensores es que el cálculo de la fuerza de torsión lo realizan de toda la articulación completa, es decir, calculan la fuerza de torsión que implica manipular el objeto y la fuerza de torsión generada por el movimiento de la propia articulación. En la figura 59 se muestran distintos tipos de estos sensores.



Figura 59 – Distintos tipos de sensores detorsión [10]



3 DISEÑO DEL SENSOR DE FUERZA

3.1 Descripción general

Un sensor de fuerza, como se explicó en el capítulo anterior, es un dispositivo que se emplea para controlar la fuerza de sistemas robotizados, ya sea para preservar la integridad del objeto a manipular o la del mismo sistema robotizado.

El sensor de fuerza diseñado en este proyecto es de tipo resistivo. El principio de funcionamiento de estos dispositivos se basa en medir las variaciones de tensión a la salida del circuito electrónico, producidas por las variaciones de resistencia eléctrica, que a su vez son producidas por la fuerza ejercida sobre dicho dispositivo. Para lograr este objetivo se emplea un circuito electrónico conocido, el puente de Wheatstone, compuesto por galgas extensiométricas, estos elementos tienen la cualidad de que al sufrir deformaciones, producidas por la fuerza a medir, varían sus valores de resistencia, implicando una variación de la tensión de salida de dicho circuito, de manera que, midiendo la tensión de salida se puede obtener el valor de la fuerza.

Los sensores se pueden considerarse como sistemas de instrumentación que recogen una magnitud física del entorno (la fuerza ejercida por un peso concreto en el caso del diseño del sensor de este documento), y la convierten a una magnitud eléctrica y la tratan electrónicamente hasta que pueda quedar registrada para el posterior análisis. En la figura siguiente, figura 60, se muestra un diagrama de bloques genérico de un sistema de instrumentación.



Figura 60 - Diagrama de bloques de un sistema de instrumentación

Las características de la magnitud de medida o magnitud física están explicadas en el capítulo 2 del presente documento, motivo por el cual no son explicadas en este apartado.

El primer bloque es el bloque del transductor, el cual convierte la magnitud física a medir en una magnitud eléctrica, neumática o hidráulica.

El siguiente bloque que se encuentra es el bloque de acondicionamiento de señal, tiene como función tratar (acondicionar) la señal de salida del transductor. La salida de un transductor pasivo resistivo es una variación de la resistencia en función de la magnitud física a medir. Este bloque de acondicionamiento de señal convierte las variaciones de resistencia a variaciones de tensión, antes de ser transmitida al equipo de procesado y/o registro. Las operaciones fundamentales son:

- Acondicionamiento de la señal mediante el puente de Wheatstone.
- Amplificación: amplifica la señal.
- Filtrado: elimina ruidos aleatorios e interferencias.

- Conversión analógico-digital.

A continuación está el bloque de procesamiento de señal, en el cual se desarrollan operaciones para preparar los datos para ser registrados. Por último, está el bloque de registro y/o presentación, en el cual se procede al registro de los valores obtenidos (memoria USB, ordenador, Cd, etc.) y a la presentación de los valores de las magnitudes en formato digital o analógico para poder ser supervisadas y analizadas posteriormente.

3.2 Transductor

El primer bloque, denominado transductor, es el encargado de convertir la magnitud física a medir en una magnitud eléctrica, neumática o hidráulica. La salida de un transductor pasivo resistivo es una variación de la resistencia en función de la magnitud física a medir. En el diseño del sensor de fuerza se corresponde con las galgas extensiométricas, ya que es el dispositivo encargado de medir la magnitud física y variar su magnitud de resistencia eléctrica.

3.2.1 Galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas son el elemento principal del sensor de fuerza, ya que son el elemento transductor, es decir, es el elemento encargado de convertir la magnitud física a medir en una magnitud eléctrica. Son conductores cuya construcción permite que al deformarse, sufrir cambios en sus dimensiones, se provoquen cambios en su resistencia. En la figura 61 se muestra un esquema donde se indican las partes de las que está compuesta la galga.

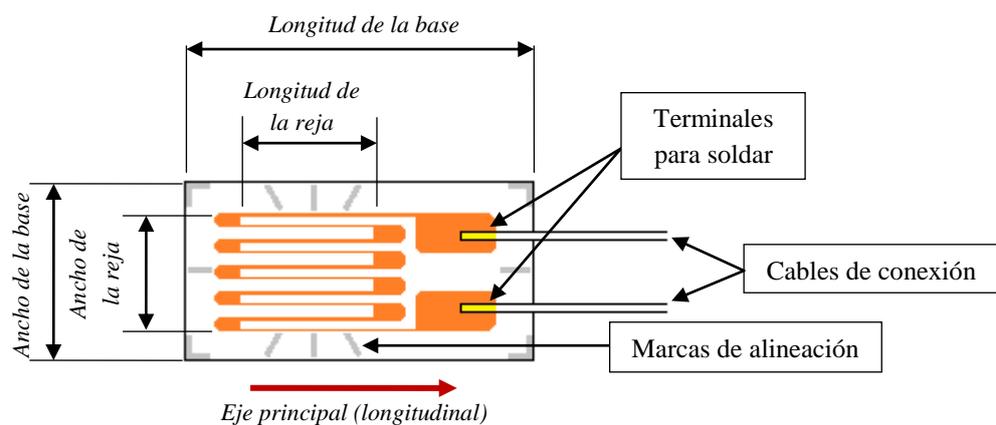


Figura 61 – Esquema de una galga extensiométrica

Como se aprecia en la figura anterior (figura 61), la galga está compuesta de una base, un material conductor (representado en color naranja) y dos cables de conexión. La base es donde se fija el material conductor y a su vez ésta se pega al objeto que se va a

deformar, debe de ser de una material flexible y aislante como las poliamidas, polímeros, resinas epoxi o fibras de vidrio. El material conductor suele ser de aleaciones metálicas como las de níquel-cobre, níquel-cromo, y en algunos casos de materiales semiconductores como el silicio o germanio. Como este material es conductor la corriente eléctrica circula por todos los finos alambres, de esta manera, al sufrir deformaciones y variar su resistencia, variará también la caída de tensión en la galga. Otro elemento son los cables de conexión, éstos deben ir soldados al material conductor en la zona representada en color amarillo. Por último se pueden apreciar unas marcas alrededor del material conductor, las cuales tienen la función de facilitar la colocación a la hora del montaje. En la figura 62 se muestran distintos tipos de galgas extensiométricas de la empresa OMEGA.

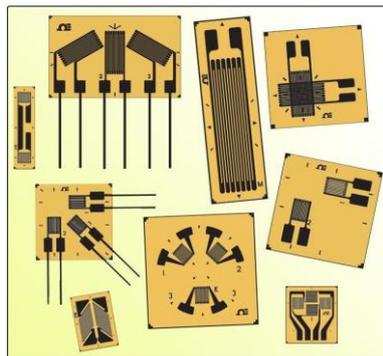


Figura 62 – Tipos de galgas extensiométricas de la empresa OMEGA

Las galgas extensiométricas tienen un eje principal que se denomina eje activo (longitudinal) para el que la deformación es máxima, mientras que en el eje transversal es prácticamente insensible a la deformación. Como ya se dijo anteriormente, las galgas al cambiar sus dimensiones cambian su resistencia eléctrica, por lo que, las podemos considerar como resistencias a la hora de tratarlas en un circuito electrónico teniendo en cuenta que se rigen por la siguiente expresión:

$$R_{GALGA} = R_0 + \Delta R_{GALGA} + \Delta R_T$$

R_{GALGA} = Resistencia total de la galga

R_0 = Resistencia nominal de la galga

ΔR_{GALGA} = Variación de la resistencia debida a la deformación

ΔR_T = Variación de la resistencia debida a la temperatura

La representación eléctrica de una galga extensiométrica es bastante parecida a la de una resistencia (véase figura 63):



Figura 63 – Representación eléctrica de una galga extensiométrica

La variación de la resistencia debida a la temperatura, es una variable indeseable que influye en la medida del sensor provocando pequeños errores en la toma de medidas,

por lo que se debe eliminar del sistema (en el siguiente apartado de este capítulo se muestra como se elimina dicha variable).

La variación de la resistencia de la galga debida a la deformación se puede obtener mediante la expresión:

$$\Delta R_{GALGA} = R_0 \cdot K \cdot \varepsilon_l$$

R_0 = Resistencia nominal de la galga

K = Factor de la galga, es un valor adimensional

ε_l = Deformación en la dirección longitudinal de la galga

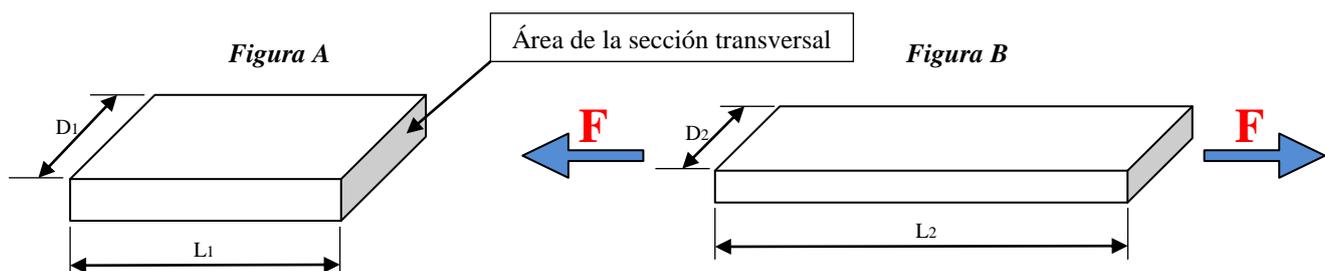
En la mayoría de los casos, normalmente el valor de la deformación en la dirección longitudinal de la galga es muy pequeño, lo que implica que, la variación de la resistencia de la galga tenga un valor muy pequeño en comparación con el valor de la resistencia nominal de la galga, en este caso en las ecuaciones del circuito electrónico se podrá despreciar el valor de la variación de la resistencia de la galga frente a su valor nominal. Este método de simplificación se denomina pequeña señal y es empleado a la hora de linealizar el sistema, como se verá más adelante.

3.2.1.1 Principios básicos de resistencia de materiales

En este apartado se van a explicar los principios más básicos de resistencia de los materiales; los tipos de deformaciones que sufre el material con determinadas fuerzas y la representación de la tensión frente a la deformación. Toda esta información es necesaria para poder relacionar las ecuaciones de las galgas con las ecuaciones del circuito electrónico y a su vez con la fuerza ejercida, la cual se quiere controlar o medir con el sensor de fuerza, esta relación se mostrará después de la explicación del puente de Wheatstone.

3.2.1.1.1 Deformación del material

Cuando un material, por ejemplo una lámina (en este proyecto la galga extensiométrica), está sometida a una fuerza de tracción, las dimensiones de dicha lámina se modifican debido a la deformación sufrida por la acción de la mencionada fuerza, quedando de la siguiente manera:



Donde la figura A representa a la lámina sin sufrir la acción de la fuerza, es decir, antes de estirar, mientras que la figura B representa a la lámina bajo la acción de una fuerza de tracción, la cual tira de la lámina en el sentido de la fuerza. Como se puede apreciar las dimensiones de la lámina varían tanto la longitud L , como la anchura D y el área de la sección transversal.

En este caso la lámina sufre dos tipos de deformación:

- **Deformación longitudinal:** también conocida como deformación axial, esta deformación se da en dirección de la fuerza aplicada, se puede calcular de la siguiente forma:

$$\varepsilon_{axial} = \frac{\Delta L}{L_1} = \frac{L_2 - L_1}{L_1}$$

- **Deformación transversal:** es la deformación que sufre el material transversalmente a la fuerza aplicada, al igual que la anterior existe una ecuación que la relaciona con sus dimensiones:

$$\varepsilon_{transversal} = \frac{\Delta D}{D_1} = \frac{D_2 - D_1}{D_1}$$

Otro aspecto a tener en cuenta es que el valor de las deformaciones es muy pequeño, por lo que se habla en la mayoría de los casos de microdeformaciones.

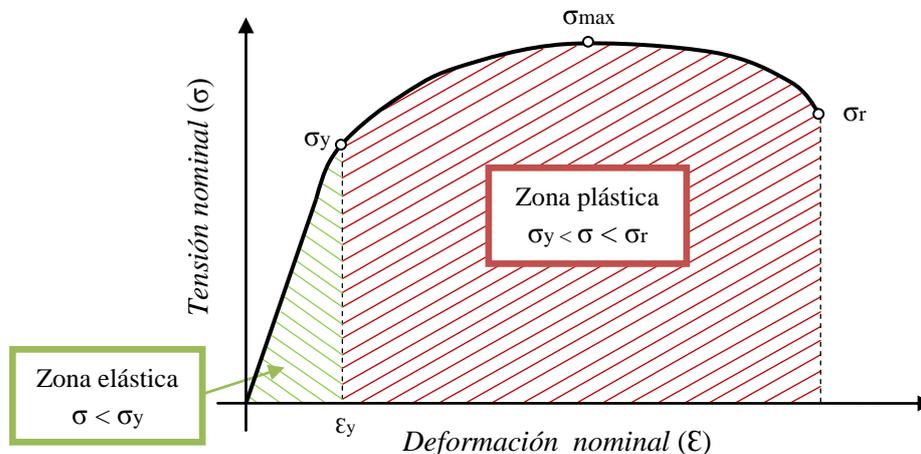
El **coeficiente de Poisson** es una característica de los materiales (denotado mediante la letra griega ν) y es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento [15], es decir, relaciona las deformaciones axial y transversal mediante la expresión siguiente:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{axial}}$$

Es importante destacar que los signos de ambas deformaciones son contrarios, es decir, tienen sentidos contrarios. Esto es evidente, ya que en este caso, bajo la acción de una fuerza de tracción, la longitud aumentará mientras que el ancho disminuye. En el caso opuesto, bajo el efecto de una fuerza de compresión, ocurre lo contrario, la deformación axial tendrá signo negativo mientras que la transversal lo tendrá positivo.

3.2.1.1.2 Gráfica de la tensión frente a la deformación

En la gráfica de la tensión frente a la deformación quedan definidas las distintas deformaciones que sufre el material bajo la acción de una fuerza, ya sea de tracción o compresión.



Dichas deformaciones, deformación elástica y deformación plástica, delimitan dos zonas de la gráfica, la zona elástica y la zona plástica, respectivamente.

La zona elástica (rayada de color verde) tiene como característica principal que los objetos o cuerpos sometidos a fuerzas dentro de los límites de esta zona, sufren deformación elástica o reversible, en la cual el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza aplicada que provoca la deformación. En este tipo de deformación, el sólido, al variar su estado tensional y aumentar su energía interna en forma de energía potencial elástica, solo pasa por cambios termodinámicos reversibles. La deformación se mide con el módulo de elasticidad o módulo de Young (E), éste sirve para conocer la rigidez del material o resistencia a la deformación elástica. En esta zona se cumple la ley de elasticidad de Hooke, la cual establece una relación entre la deformación longitudinal y la fuerza aplicada:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \epsilon_l$$

Donde la σ representa la tensión nominal (se mide en N/m^2) y es igual a la fuerza aplicada entre el área de la sección transversal del cuerpo sometido a dicha fuerza. La ϵ_l es la deformación longitudinal explicada anteriormente, y por último el módulo de elasticidad o módulo de Young, E , es una característica de los materiales.

Por el contrario, en la zona plástica (rayada de color rojo), los cuerpos sufren deformaciones plásticas y esto implica que, al cesar la tensión sobre el cuerpo, éste experimenta un cambio permanente respecto a sus dimensiones originales. En esta zona la deformación deja de ser proporcional a la tensión, por lo que no se cumple la ley Hooke.

Los puntos más característicos a destacar de la gráfica son el límite elástico σ_y , este límite define a partir de qué valor de σ se produce una deformación plástica visible, también define la deformación en dicho punto como ϵ_y . Siempre que la fuerza no supere este valor el material recuperará su forma. El siguiente punto característico es la resistencia a la tracción σ_{max} , el cual indica la máxima tensión nominal que soporta el cuerpo a la fuerza aplicada. Por último se encuentra la resistencia o carga a la rotura, es la tensión que soporta el material en el punto ruptura.

3.2.1.2 Elección de las galgas extensiométricas

Las galgas extensiométricas han sido obtenidas de la empresa RS Components, son galgas de acero dulce de 5mm con base de poliamida, como la mostrada en la figura 64.

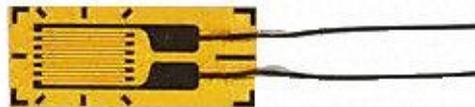


Figura 64 – Galga extensiométrica con base de poliamida de RS Components

Las características principales de las galgas extensiométricas, que a su vez, actúan como limitaciones en el diseño de la pletina, son las dimensiones, la deformación máxima y la deformación mínima.

La primera limitación que presenta el uso de las galgas extensiométricas es su tamaño. Como el circuito electrónico del cual forman parte las galgas es un puente de Wheatstone con un montaje en contrafase o *push-pull*, la pletina de aluminio tendrá dos galgas situadas en la cara superior y otras dos en la misma posición pero en la cara inferior. Por este motivo, de la figura 65 hay que fijarse en los valores resaltados.

Specification (Miniature polyimide backed type)		
Temperature range	-30°C to +180°C	
Gauge length	2 mm	5mm
Gauge width	1.6 mm	1.8mm
Gauge factor	2.0	2.1
Base length (single types)	6.0 mm	9.0 mm
Base width (single types)	2.5 mm	3.5 mm
Base diameter (rosettes)	7.5 x 7.5 mm	12 x 12mm

Figura 65 - Especificaciones de las galgas extensiométricas con base de poliamida de RS Components

En segundo lugar la limitación viene determinada por la deformación máxima de la galga, la cual no debe superarse, ya que, las galgas están diseñadas para trabajar en la zona elástica de su curva de tensión-deformación, si se supera el valor máximo la galga puede partir o quedar doblada y, en los dos casos, la galga deja funcionar correctamente,

implicando que el sensor de fuerza también funcione incorrectamente. En la figura siguiente, figura 66, se muestran los valores mediante los cuales se calcula dicha deformación máxima.

General specification (all types)	
Measurable strain	2 to 4% max.
Thermal output 20 to 160°C	±2 micro strain/°C*
160°C to 180°C	±5 micro strain/°C*
Gauge factor change with temperature	± 0.015%/°C max.
Gauge resistance	120Ω
Gauge resistance tolerance	±0.5%
Fatigue life	>10 ⁸ reversals @ 100 micro strain*
Foil material	copper nickel alloy

* 1 micro strain is equivalent to an extension of 0.0001%

Figura 66 – Especificaciones generales de las galgas extensiométricas de RS Components

El valor de “*Gauge resistance*” se refiere al valor de resistencia nominal R_0 . Por otro lado, el valor de “*Gauge resistance tolerance*” se refiere al rango de valores del incremento de resistencia de la galga que ésta puede tomar, es decir:

Las galgas extensiométricas cumplen la siguiente expresión:

$$R_{GALGA} = R_0 + \Delta R_{GALGA}$$

Siendo el incremento de resistencia de la galga:

$$\Delta R_{GALGA} = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon$$

Donde k es el factor de la galga, este valor aparece en la figura 65 como “*Gauge factor*”, y ε representa el valor de la deformación sufrida por la galga, dicho valor es el objeto de estudio de este apartado. De manera que la expresión anterior quedaría de la siguiente forma:

$$R_{GALGA} = 120\Omega \pm 0,5\%$$

El incremento de resistencia de la galga es un 0,5% del valor de resistencia nominal, es decir, es un 0,5% de 120, por lo que:

$$\Delta R_{GALGA} = \pm 0,6\Omega$$

Para el cálculo de la deformación máxima se toma el valor absoluto del incremento de resistencia de la galga extensiométrica, quedando:

$$\Delta R_{GALGA} = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_{max} = 0,6\Omega \Rightarrow \varepsilon_{max} = \frac{0,6\Omega}{R_0 \cdot k} = \frac{0,6\Omega}{120\Omega \cdot 2,1} \Rightarrow \varepsilon_{max} = 2,381 \cdot 10^{-3}$$

Por último, el cálculo de la deformación mínima se determina utilizando el valor de “*Measurable strain 2 to 4% max.*” (Véase figura 66), o lo que es lo mismo, la mínima

deformación apreciable es del 2 al 4% de la máxima deformación, $2,381 \cdot 10^{-3}$. Esto implica que:

- En el caso del 4%: $\varepsilon_{min} = 9,524 \cdot 10^{-5}$
- En el caso del 2%: $\varepsilon_{min} = 4,762 \cdot 10^{-5}$

De manera que:

$$\varepsilon_{max} = 2,381 \cdot 10^{-3}$$
$$\varepsilon_{min} = 4,762 \cdot 10^{-5} - 9,524 \cdot 10^{-5}$$

En el diseño de la pletina, la limitación que supone la deformación máxima es que se debe realizar un diseño que para la fuerza máxima no supere el valor de deformación máxima, pero si este cercano. En el caso de la deformación mínima ocurre exactamente lo mismo, para la mínima fuerza del rango del sensor la galga debe medir una deformación lo más próxima al valor de la mínima deformación apreciable. De esta manera se emplea el mayor conjunto de valores del rango de deformación de las galgas extensiométricas.

3.3 Acondicionamiento de la señal

El acondicionamiento de señal ocupa el segundo lugar del diagrama de bloques que se muestra en el apartado 3.1. Como ya se explicó anteriormente, el acondicionamiento de señal consiste en tratar la señal antes de enviarla al equipo de procesado y registro. Las operaciones que se realizan son: acondicionamiento de la señal mediante el puente de Wheatstone, amplificación de la señal, filtrado y conversión analógico-digital.

Cabe destacar que, tanto el acondicionamiento de señal como el procesamiento de la misma, son etapas que están determinadas por el laboratorio de robótica para el cual se realiza el sensor de fuerza, debido a que trabaja con los componentes que se explican a continuación. Por este motivo solo se realizará una breve explicación de las mencionadas etapas.

3.3.1 Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone (véase figura 67) está compuesto por cuatro resistencias, R_1, R_2, R_3, R_x , una fuente de voltaje E_s y un galvanómetro (empleado para medir corriente eléctrica). La aplicación principal de este circuito es obtener el valor de

una resistencia R_x en función de dos resistencias conocidas R_1 y R_3 y una resistencia variable R_2 , también conocida.

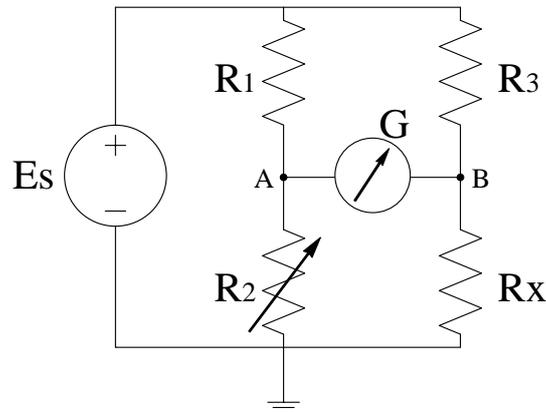
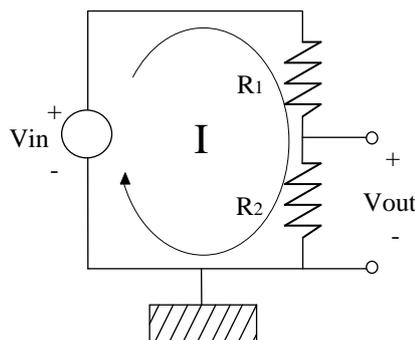


Figura 67 - Puente de Wheatstone

El funcionamiento es el siguiente, una vez conectadas todas las resistencias y alimentado el circuito, se va regulando la resistencia variable hasta que el galvanómetro indica que la intensidad que circula por él es cero, implicando que la caída de tensión entre los puntos A y B sea cero también. Cuando esto sucede se dice que el puente esta en equilibrio o en reposo (ya que la aguja del galvanómetro vuelve a la posición de reposo, el cero) y es una condición fundamental para poder hallar la resistencia desconocida.

El análisis del circuito se realiza mediante divisores de tensión, este método es muy práctico para averiguar valores de tensión cuando se tienen impedancias en serie, como se muestra en el ejemplo siguiente:



En este caso lo que se busca es conocer el valor de la tensión V_{out} , es decir, la caída de tensión en la resistencia R_2 . Aplicando la ley de Ohm que dice: *"la intensidad de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada e inversamente proporcional a la resistencia del mismo"*, su expresión matemática es:

$$I = \frac{V}{R}$$

Calculamos la tensión V_{in} y V_{out} obteniendo:

$$V_{in} = I \cdot (R_1 + R_2) \quad (1)$$

$$V_{out} = I \cdot R_2 \quad (2)$$

La intensidad, al tratarse de un circuito cerrado, es la misma en los dos casos, de manera que, despejando la intensidad de la expresión (1) e introduciendo ese valor en la expresión (2) se obtiene la expresión de la tensión V_{out} :

$$V_{out} = \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \cdot V_{in}$$

Aplicando el método del divisor de tensión a las dos ramas del puente de Wheatstone se obtiene lo siguiente:

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_S - \frac{R_X}{R_3 + R_X} \cdot E_S$$

Como el puente de Wheatstone debe cumplir la condición de equilibrio, implica que:

$$\begin{aligned} V_{AB} = V_A - V_B = 0 &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_S - \frac{R_X}{R_3 + R_X} \cdot E_S = \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_X}{R_3 + R_X} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_2 \cdot (R_3 + R_X) &= R_X \cdot (R_1 + R_2) = R_2 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_X = R_X \cdot R_1 + R_X \cdot R_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow R_2 \cdot R_3 &= R_X \cdot R_1 \Rightarrow R_X = \frac{R_3}{R_1} \cdot R_2 \end{aligned}$$

En el caso de emplear galgas extensiométricas en vez de resistencias, el puente de Wheatstone tiene dos ventajas características para su uso en el diseño del sensor de fuerza, la primera es que permite eliminar, por un lado, el efecto de las magnitudes de influencia (en el caso de las galgas es la temperatura), y por otro, un alejamiento excesivo del sistema de instrumentación al lugar de medición. La segunda ventaja es que las expresiones obtenidas del análisis del circuito permiten emplear el método de pequeña señal, el cual es muy útil para linealizar la expresión de la tensión de salida del puente. Por estos motivos es el circuito acondicionador más óptimo cuando se trabaja con galgas extensiométricas. Cabe destacar que el uso del puente de Wheatstone en este proyecto no es para el cálculo de resistencias, sino para medir las variaciones de tensión producidas por las variaciones de deformación, que a su vez, son producidas por la fuerza aplicada.

Existen distintas configuraciones del puente de Wheatstone en función del número de galgas empleadas, a continuación se explicarán y analizarán los circuitos más comunes para poder seleccionar la configuración más adecuada para el sensor de fuerza.

3.3.1.1 Montaje en ¼ de puente

La configuración del puente de Wheatstone denominada, montaje en ¼ de puente, recibe este nombre debido a que emplea una galga extensiométrica, como se puede ver en la figura 68. La colocación de esta galga se hace en la posición 2 o 3, de esta manera la expresión de la tensión diferencial queda con signo positivo.

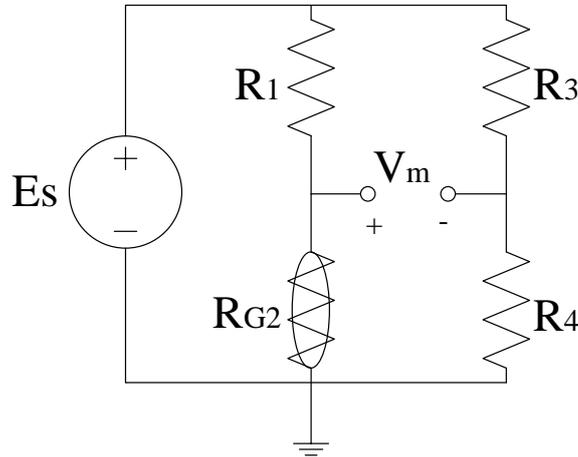


Figura 68 – Puente de Wheatstone con una galga extensiométrica

Antes de empezar con el análisis del circuito es importante aclarar que la tensión de salida del circuito es una tensión diferencial, es decir:

$$\Delta V_m = V_m - V_{m_0} \Rightarrow V_m = \Delta V_m + V_{m_0}$$

Donde ΔV_m es la componente de la señal que lleva la información de las variaciones de la magnitud física, V_{m_0} es la tensión inicial, o lo que es lo mismo, es la tensión de salida del circuito en reposo, es decir, cuando las galgas no sufren deformación. Por el contrario, V_m es la tensión de salida del circuito cuando las galgas si sufren deformación.

La principal condición de funcionamiento del sensor de fuerza es que cuando no se aplican fuerzas sobre éste, la lectura de fuerza debe ser cero, lo que implica que la tensión inicial V_{m_0} , (tensión cuando las galgas no sufren deformación) debe ser también cero. Cuando esta condición se cumple se dice que el puente está equilibrado en reposo, quedando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} V_{m_0} = 0 &\Rightarrow V_{m_0}^+ - V_{m_0}^- \Rightarrow V_{m_0}^+ = V_{m_0}^- \Rightarrow \frac{R_{G2}}{R_1 + R_{G2}} \cdot ES = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot ES \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_4 \cdot (R_1 + R_{G2}) = R_{G2} \cdot (R_3 + R_4) \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_4 \cdot R_1 + R_4 \cdot R_{G2} = R_{G2} \cdot R_3 + R_{G2} \cdot R_4 \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_4 \cdot R_1 = R_{G2} \cdot R_3 \end{aligned}$$

Como el valor total de resistencia de la galga, cuando no sufre deformación $\varepsilon=0$, es igual a su valor de resistencia nominal, R_0 :

$$R_{GALGA} = R_0$$

Y se debe cumplir la principal condición de funcionamiento, se establece una condición de diseño, la cual determina que el valor del resto de resistencias R_1 , R_3 y R_4 debe ser el mismo que R_0 :

$$R_1 = R_3 = R_4 = R_0$$

Gracias a que la tensión inicial es nula, se pueden obtener resoluciones muy buenas, esto se debe a que el ΔV_m puede tomar valores muy pequeños.

Una vez calculada la tensión inicial se empieza con el análisis de la tensión V_m la cual queda:

$$\begin{aligned} V_m &= \Delta V_m + V_{m_0} = \Delta V_m = \left(\frac{R_{G2}}{R_1 + R_{G2}} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot E_S = \\ &= \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{R_0 + R_0 + \Delta R_{G2}} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) \cdot E_S = \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{2R_0 + \Delta R_{G2}} - \frac{1}{2} \right) \cdot E_S = \\ &= \left(\frac{(R_0 + \Delta R_{G2}) \cdot 2 - (2R_0 + \Delta R_{G2})}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G2})} \right) \cdot E_S = \frac{2R_0 + 2\Delta R_{G2} - 2R_0 - \Delta R_{G2}}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G2})} \cdot E_S \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_m = \Delta V_m = \frac{\Delta R_{G2}}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G2})} \cdot E_S \end{aligned}$$

Estudiando la expresión obtenida, se comprueba que los incrementos de tensión no son proporcionales a los incrementos de resistencia, es decir, la expresión es no lineal. En este caso se estudia la posibilidad de linealizar mediante el método de pequeña señal, el cual dice que, si el incremento de resistencia es cien veces menor, o más, que el valor de resistencia nominal, dicho incremento se puede despreciar frente al valor nominal, de esta manera la expresión de la tensión quedaría:

$$\begin{aligned} V_m = \Delta V_m &= \frac{\Delta R_{G2}}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G2})} \cdot E_S = \frac{\Delta R_{G2}}{4R_0} \cdot E_S = \\ &= \frac{\Delta R_{\varepsilon_2} + \Delta R_T}{4R_0} \cdot E_S = \frac{R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2 + \Delta R_T}{4R_0} \cdot E_S \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow V_m = \Delta V_m = \frac{k \cdot \varepsilon_2 + \Delta R_T}{4} \cdot E_S$$

Es importante añadir que en este tipo de montaje el efecto de la variable de influencia no se anula, ya que aparece en la expresión final, por lo que no se hace uso de una de las

características principales del puente de Wheatstone, haciendo poco útil este tipo de montaje para el diseño del sensor de fuerza.

En el capítulo anterior se definía la sensibilidad como la relación entre la variación de la señal de salida generada por la variación de la magnitud de entrada. Aplicando esta definición al circuito acondicionador (puente de Wheatstone), la sensibilidad se define como la relación entre la variación de tensión generada por la variación de la deformación:

$$[S] = V/\Omega = A \rightarrow S = \frac{\Delta V_m}{\Delta R_{G2}} = \frac{\frac{k \cdot \varepsilon_2}{4} \cdot ES}{R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2} \Rightarrow S = \frac{ES}{4R_0}$$

$$[S] = V/\varepsilon = A \rightarrow S = \frac{\Delta V_m}{\Delta \varepsilon_2} = \frac{\frac{k \cdot \varepsilon_2}{4} \cdot ES}{\varepsilon_2} \Rightarrow S = \frac{k \cdot ES}{4}$$

3.3.1.2 Montaje en 1/2 puente

El montaje en 1/2 puente, como se representa en la figura 69, se emplean dos galgas extensiométricas. Al igual que en el montaje en cuarto de puente, las posiciones de las galgas en este montaje se deciden en función de la variable de influencia, es decir, se deben buscar las posiciones en las que dicha variable sea eliminada de la expresión final de V_m . Solo existen dos posibles configuraciones que no anulan el efecto de la variable que se quiere eliminar, las posiciones 2 y 3 o las posiciones 1 y 4. En el presente documento las posiciones empleadas han sido la 1 y 2, y como se verá más adelante, estas posiciones hacen que se cumpla la característica principal del puente de Wheatstone mencionada.

Hay que destacar que todas las condiciones impuestas en el primer montaje se deben cumplir en este también, de manera que no se profundizará demasiado en las explicaciones.

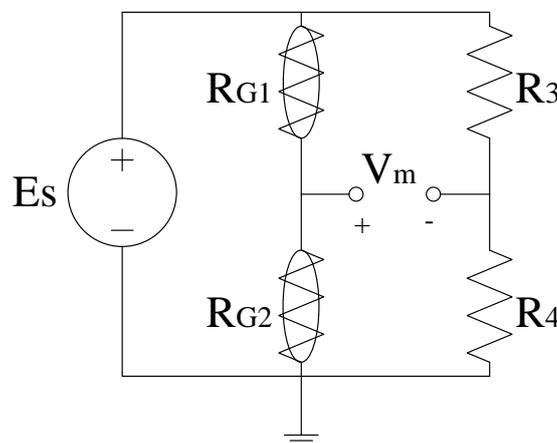


Figura 69 – Puente de Wheatstone con dos galgas extensiométricas

La tensión de salida del circuito es:

$$\Delta V_m = V_m - V_{m_0} \Rightarrow V_m = \Delta V_m + V_{m_0}$$

Cuando el puente está equilibrado en reposo ($V_{m_0} = 0 \rightarrow$ tensión cuando las galgas no sufren deformación $\rightarrow \epsilon=0$), queda la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} V_{m_0} = 0 &\Rightarrow V_{m_0}^+ - V_{m_0}^- \Rightarrow V_{m_0}^+ = V_{m_0}^- \Rightarrow \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \cdot ES = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot ES \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_{G2} \cdot (R_3 + R_4) = R_4 \cdot (R_{G1} + R_{G2}) \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_{G2} \cdot R_3 + R_{G2} \cdot R_4 = R_4 \cdot R_{G1} + R_4 \cdot R_{G2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_{G2} \cdot R_3 = R_4 \cdot R_{G1} \end{aligned}$$

Al igual que en el montaje anterior, el valor total de resistencia de la galga cuando no sufre deformación es:

$$R_{G1} = R_{G2} = R_0$$

Y como también se debe cumplir la principal condición de funcionamiento, se establece que:

$$R_3 = R_4 = R_0$$

Una vez calculada la tensión inicial se empieza con el análisis de la tensión V_m la cual queda:

$$\begin{aligned} V_m = \Delta V_m + V_{m_0} &= \Delta V_m = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot ES = \\ &= \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{R_0 + \Delta R_{G1} + R_0 + \Delta R_{G2}} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) \cdot ES = \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}} - \frac{1}{2} \right) \cdot ES = \\ &= \left(\frac{(R_0 + \Delta R_{G2}) \cdot 2 - (2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2})}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2})} \right) \cdot ES = \\ &= \frac{2R_0 + 2\Delta R_{G2} - 2R_0 - \Delta R_{G1} - \Delta R_{G2}}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2})} \cdot ES \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_m = \Delta V_m = \frac{\Delta R_{G2} - \Delta R_{G1}}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2})} \cdot ES \end{aligned}$$

Si se analiza la expresión obtenida, se puede apreciar que los incrementos de tensión no son proporcionales a los incrementos de resistencia, es decir, la expresión es no lineal. Aplicando el método de pequeña señal ($\Delta R_{GALGA} \ll R_0 \rightarrow$ desprecia el incremento de resistencia de la galga):

$$V_m = \Delta V_m = \frac{\Delta R_{G2} - \Delta R_{G1}}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2})} \cdot ES = \frac{\Delta R_{G2} - \Delta R_{G1}}{4R_0} \cdot ES =$$

$$= \frac{\Delta R_{\varepsilon_2} + \Delta R_T - (\Delta R_{\varepsilon_1} + \Delta R_T)}{4R_0} \cdot ES \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_m = \Delta V_m = \frac{\Delta R_{\varepsilon_2} - \Delta R_{\varepsilon_1}}{4R_0} \cdot ES$$

A diferencia del montaje en $\frac{1}{4}$ de puente, en este tipo de montaje si se anula el efecto de la variable de influencia, como se dijo al inicio de este apartado y como se ha podido observar en las ecuaciones arriba mostradas.

Una de las características principales que definen un sensor de fuerza, es la sensibilidad, de manera que es lógico esperar que, a mayor sensibilidad, mayor calidad tenga el sensor de fuerza. Por este motivo cuando se trabaja con este tipo de montaje y con el que se verá a continuación, montaje en puente completo, se utiliza un tipo de configuración que permite obtener una mayor sensibilidad denominado montaje en contrafase o *push-pull*, mediante el cual se busca conseguir que las galgas tengan efectos físicos contrarios, es decir, si una galga se estira, la otra se debe encoger en la misma proporción. Un ejemplo demostrativo de este montaje se puede encontrar en la figura 70, donde se ve el efecto que genera en las galgas, en este caso la galga 2 es la que se estira y la 1 la que se encoge, quedando:

$$R_{G1} = R_0 + \Delta R_{G1} = R_0 + \Delta R_{\varepsilon_1}$$

$$R_{G2} = R_0 + \Delta R_{G2} = R_0 + \Delta R_{\varepsilon_2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{\Delta l}{l_0} = -\varepsilon_2$$

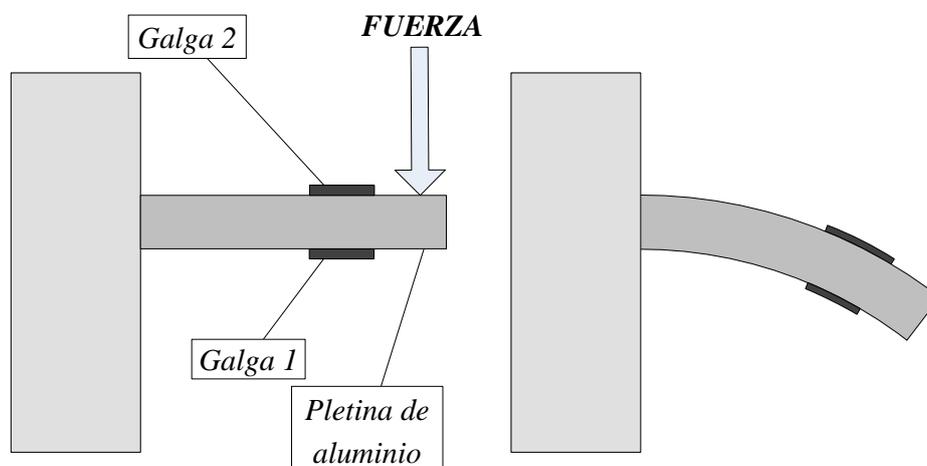


Figura 70 – Representación del montaje en contrafase o *push-pull*

$$\Delta R_{\varepsilon_2} = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2$$

$$\Delta R_{\varepsilon_1} = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_1 = R_0 \cdot k \cdot (-\varepsilon_2) = -\Delta R_{\varepsilon_2}$$

Sustituyendo en la expresión de la tensión de salida del circuito:

$$\begin{aligned} V_m = \Delta V_m &= \frac{\Delta R_{\varepsilon_2} - \Delta R_{\varepsilon_1}}{4R_0} \cdot E_S = \frac{\Delta R_{\varepsilon_2} - (-\Delta R_{\varepsilon_2})}{4R_0} \cdot E_S = \frac{2\Delta R_{\varepsilon_2}}{4R_0} \cdot E_S = \\ &= \frac{\Delta R_{\varepsilon_2}}{2R_0} \cdot E_S = \frac{R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2}{2R_0} \cdot E_S \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow V_m = \Delta V_m = \frac{k \cdot \varepsilon_2}{2} \cdot E_S$$

Comparando ambas expresiones de la tensión de salida del puente de Wheatstone, antes de aplicar el montaje en contrafase o *push-pull* y después, se puede apreciar que la tensión cuando se ha aplicado dicho montaje tendrá valores superiores, por lo que la sensibilidad del circuito será mayor, siendo:

$$\begin{aligned} [S] = V/\Omega = A \rightarrow S &= \frac{\Delta V_m}{\Delta R_{G2}} = \frac{\frac{k \cdot \varepsilon_2}{2} \cdot E_S}{R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2} \Rightarrow S = \frac{E_S}{2R_0} \\ [S] = V/\varepsilon = A \rightarrow S &= \frac{\Delta V_m}{\Delta \varepsilon_2} = \frac{\frac{k \cdot \varepsilon_2}{2} \cdot E_S}{\varepsilon_2} \Rightarrow S = \frac{k \cdot E_S}{2} \end{aligned}$$

Se puede observar que este tipo de montaje es bastante mejor que el primero, montaje en $\frac{1}{4}$ de puente, ya que se elimina el efecto de la variable de influencia y la sensibilidad aumenta notoriamente, siendo dos veces mayor en este tipo de montaje con respecto al montaje en $\frac{1}{4}$ de puente.

3.3.1.3 Montaje en puente completo

Por último se va a explicar la configuración denominada montaje en puente completo, en el cual se emplean cuatro galgas extensiométricas (véase figura 71).

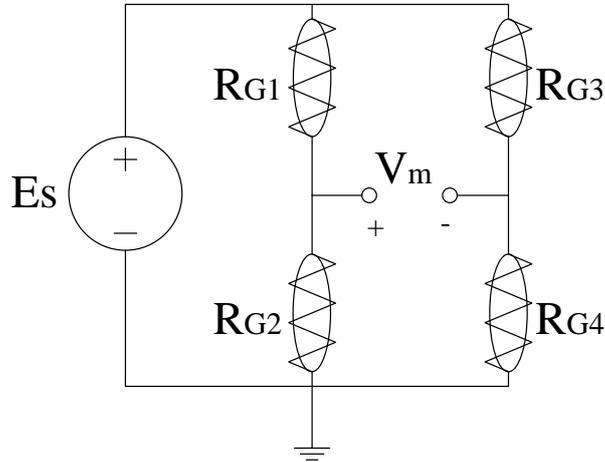


Figura 71 - Puente de Wheatstone con cuatro galgas extensiométricas

Como ya se mencionó anteriormente la tensión de salida del puente es una tensión diferencial, siendo:

$$\Delta V_m = V_m - V_{m_0} \Rightarrow V_m = \Delta V_m + V_{m_0}$$

Por lo que se debe calcular el valor de dicha tensión cuando el puente está en reposo (la deformación en las galgas es nula). A diferencia de los otros montajes, en este caso no es necesario realizar el diseño de las resistencias para cumplir con la condición de reposo, debido a que las cuatro galgas son idénticas. Es importante resaltar el hecho de que las galgas sean idénticas por varios motivos, el primero es que deben coincidir los valores de resistencia nominal de cada galga para cumplir con la condición de reposo. El segundo motivo es que deben tener las mismas dimensiones para que a la hora de realizar el montaje en la pletina, todas sufran la misma deformación y así hacer uso de la característica del montaje en contrafase. Por último, todas deben tener los mismos valores de deformación máxima y deformación mínima, ya que, como se verá en el capítulo siguiente, el diseño de la pletina donde van montadas las galgas se realiza en función de varios parámetros, entre los que están la deformación máxima y mínima de las galgas.

El valor de la tensión de salida del circuito cuando está en reposo es:

$$\begin{aligned} V_{m_0} &= \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - \frac{R_{G4}}{R_{G3} + R_{G4}} \right) \cdot E_s = \\ &= \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{R_0 + \Delta R_{G1} + R_0 + \Delta R_{G2}} - \frac{R_0 + \Delta R_{G4}}{R_0 + \Delta R_{G3} + R_0 + \Delta R_{G4}} \right) \cdot E_s = \end{aligned}$$

$$= \left(\frac{R_0}{R_0 + R_0} - \frac{R_0}{R_0 + R_0} \right) \cdot ES = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) \cdot ES \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{m_0} = 0$$

A continuación se calcula la tensión V_m :

$$V_m = \Delta V_m + V_{m_0} = \Delta V_m = \left(\frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} - \frac{R_{G4}}{R_{G3} + R_{G4}} \right) \cdot ES =$$

$$= \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{R_0 + \Delta R_{G1} + R_0 + \Delta R_{G2}} - \frac{R_0 + \Delta R_{G4}}{R_0 + \Delta R_{G3} + R_0 + \Delta R_{G4}} \right) \cdot ES =$$

$$= \left(\frac{R_0 + \Delta R_{G2}}{2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}} - \frac{R_0 + \Delta R_{G4}}{2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4}} \right) \cdot ES =$$

$$= \left(\frac{(R_0 + \Delta R_{G2}) \cdot (2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4}) - (2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}) \cdot (R_0 + \Delta R_{G4})}{(2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}) \cdot (2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4})} \right) \cdot ES \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (R_0 + \Delta R_{G2}) \cdot (2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4}) =$$

$$= 2R_0^2 + R_0\Delta R_{G3} + R_0\Delta R_{G4} + 2R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G3} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G4}$$

$$(2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}) \cdot (R_0 + \Delta R_{G4}) =$$

$$= 2R_0^2 + 2R_0\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G1} + \Delta R_{G1}\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G4}$$

$$- \frac{2R_0^2 + R_0\Delta R_{G3} + R_0\Delta R_{G4} + 2R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G3} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G4}}{2R_0^2 + 2R_0\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G1} + \Delta R_{G1}\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G4}}$$

$$- \frac{2R_0^2 + 2R_0\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G1} + \Delta R_{G1}\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G4}}{2R_0^2 + 2R_0\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G1} + \Delta R_{G1}\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G4}}$$

$$R_0\Delta R_{G3} - R_0\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G3} - R_0\Delta R_{G1} - \Delta R_{G1}\Delta R_{G4}$$

$$V_m = \Delta V_m = \frac{R_0\Delta R_{G3} - R_0\Delta R_{G4} + R_0\Delta R_{G2} + \Delta R_{G2}\Delta R_{G3} - R_0\Delta R_{G1} - \Delta R_{G1}\Delta R_{G4}}{(2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}) \cdot (2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4})} \cdot ES \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_m = \Delta V_m = \frac{R_0 \cdot (\Delta R_{G2} + \Delta R_{G3} - \Delta R_{G1} - \Delta R_{G4}) + \Delta R_{G2}\Delta R_{G3} - \Delta R_{G1}\Delta R_{G4}}{(2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}) \cdot (2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4})} \cdot ES$$

Estudiando la expresión obtenida de la tensión de salida del puente de Wheatstone con cuatro galgas, se ve claramente que no existe una relación lineal entre las variaciones de tensión ΔV_m y las variaciones de resistencia de las galgas ΔR_i . Como en el resto de los casos para linealizar la expresión se aplica el método de pequeña señal ($\Delta R_{\text{GALGA}} \ll \ll R_0 \rightarrow$ desprecia el incremento de resistencia de la galga), quedando:

$$\begin{aligned}
 V_m = \Delta V_m &= \frac{R_0 \cdot (\Delta R_{G2} + \Delta R_{G3} - \Delta R_{G1} - \Delta R_{G4}) + \Delta R_{G2} \Delta R_{G3} - \Delta R_{G1} \Delta R_{G4}}{(2R_0 + \Delta R_{G1} + \Delta R_{G2}) \cdot (2R_0 + \Delta R_{G3} + \Delta R_{G4})} \cdot E_S = \\
 &= \frac{R_0 \cdot (\Delta R_{G2} + \Delta R_{G3} - \Delta R_{G1} - \Delta R_{G4})}{4R_0^2} \cdot E_S \Rightarrow \\
 \Rightarrow V_m = \Delta V_m &= \frac{(\Delta R_{G2} + \Delta R_{G3} - \Delta R_{G1} - \Delta R_{G4})}{4R_0} \cdot E_S
 \end{aligned}$$

En este instante, como ocurría en el montaje en ½ puente, para conseguir la máxima sensibilidad del circuito se realiza un montaje extra, montaje en contrafase o *push-pull*. Como se explicó en el apartado anterior, el objetivo de este montaje es conseguir que las galgas tengan efectos físicos contrarios para obtener la máxima sensibilidad posible, de manera que analizando la expresión se concluye que la máxima tensión de salida se obtiene cuando las galgas 2 y 3 se estiran y las galgas 1 y 4 se encogen (véase figura 72).

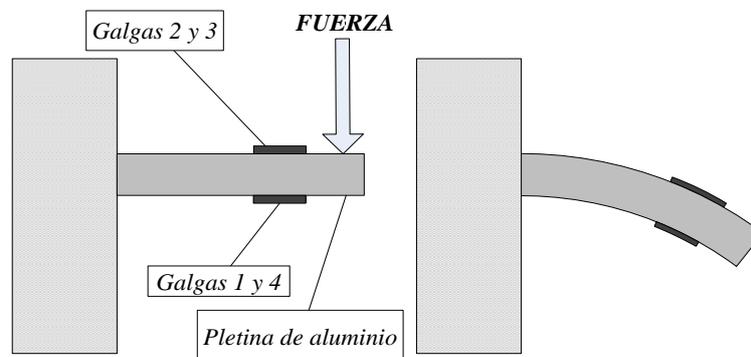


Figura 72 - Representación del montaje en contrafase o *push-pull*

Las galgas 2 y 3 van colocadas de forma paralela, al igual que las galgas 1 y 4. Para una mejor comprensión se realiza una vista en planta del montaje en la figura 73.

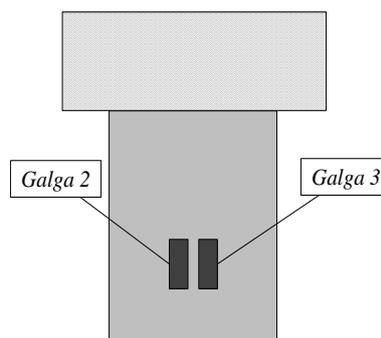


Figura 73 – Vista en planta del montaje en *push-pull*

Con este montaje en contrafase las expresiones de las galgas extensiométricas quedarían de la siguiente manera:

$$R_{G1} = R_{G4} = R_0 + \Delta R_{G1} = R_0 + \Delta R_{\epsilon 1}$$

$$R_{G2} = R_{G3} = R_0 + \Delta R_{G2} = R_0 + \Delta R_{\varepsilon 2}$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_4 = -\frac{\Delta l}{l_0} = -\varepsilon_2$$

$$\Delta R_{\varepsilon 2} = \Delta R_{\varepsilon 3} = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2$$

$$\Delta R_{\varepsilon 1} = \Delta R_{\varepsilon 4} = R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_1 = R_0 \cdot k \cdot (-\varepsilon_2) = -\Delta R_{\varepsilon 2}$$

Sustituyendo estos datos en la expresión de la tensión de salida obtenida después de aplicar pequeña señal, quedaría:

$$\begin{aligned} V_m = \Delta V_m &= \frac{(\Delta R_{G2} + \Delta R_{G3} - \Delta R_{G1} - \Delta R_{G4})}{4R_0} \cdot ES = \frac{2\Delta R_{G2} - (-2\Delta R_{G2})}{4R_0} \cdot ES = \\ &= \frac{4\Delta R_{G2}}{4R_0} \cdot ES = \frac{4R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2}{4R_0} \cdot ES \Rightarrow \\ &\Rightarrow \boxed{V_m = \Delta V_m = k \cdot \varepsilon_2 \cdot ES} \end{aligned}$$

En este caso la tensión de salida del circuito obtenida es la mayor de todos los montajes, por lo que la sensibilidad será la mayor también, como se muestra a continuación. Por este motivo es el montaje elegido para el desarrollo del sensor de fuerza.

$$[S] = V/\Omega = A \rightarrow S = \frac{\Delta V_m}{\Delta R_{G2}} = \frac{k \cdot \varepsilon_2 \cdot ES}{R_0 \cdot k \cdot \varepsilon_2} \Rightarrow \boxed{S = \frac{ES}{R_0}}$$

$$[S] = V/\varepsilon = A \rightarrow S = \frac{\Delta V_m}{\Delta \varepsilon_2} = \frac{k \cdot \varepsilon_2 \cdot ES}{\varepsilon_2} \Rightarrow \boxed{S = k \cdot ES}$$

3.3.2 Amplificación de la señal

El amplificador es un dispositivo electrónico que se emplea para amplificar la señal. Dicha amplificación de señal puede ser necesaria por varios motivos, pero el principal, en la mayoría de los casos, es para poder tratar la señal de una manera más cómoda, ya que, cuando se trabaja con circuitos como el puente de Wheatstone la señal de salida suele ser muy pequeña. En el sensor de fuerza, dicha tensión, medida de forma experimental, con todos los componentes del sensor montados, es de 0.0004 voltios, del orden de mili voltios, por lo que, para poder trabajar con la señal de una manera más cómoda se hace necesario el uso de un amplificador, para ello se emplea el circuito integrado mostrado en la imagen de la izquierda de la figura 74.

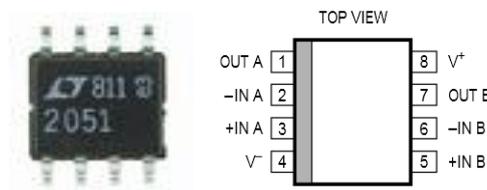


Figura 74 – Circuito integrado LTC2051 [16]

En la imagen de la derecha de la figura 74, se muestra el esquema de los pines del circuito integrado LTC2051. Donde los pines del 1 al 3 son referentes al amplificador A, siendo el pin 1 la salida del amplificador A, el pin 2 es la entrada negativa y el pin 3 es la entrada positiva. Los pines del 5 al 7 hacen referencia al amplificador B, siendo el pin 5 la entrada positiva, el pin 6 la entrada negativa y el pin 7 la salida del amplificador. Los pines 4 y 8 son la alimentación de ambos amplificadores.

La elección del amplificador se hace en función del convertidor analógico-digital. La propia empresa, tanto del amplificador como del convertidor, Linear Technology, aconseja un montaje concreto (ver figura 75 y 76) para amplificar la señal que después irá al convertidor, no obstante, una de las principales aplicaciones del LTC2051, que aparece en su hoja de características [16], es la amplificación de medidas de deformación (“*Strain Gauge Amplifiers*”).

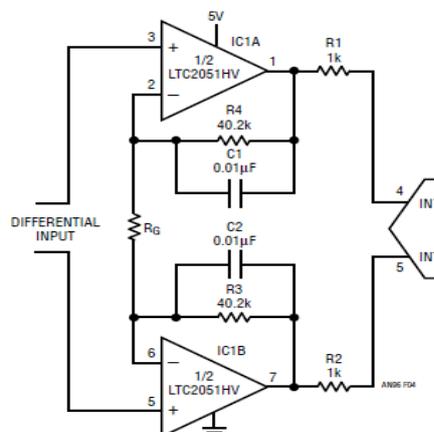


Figura 75 - Esquema del amplificador diferencial de bajo nivel de ruido [17]

R_G	GAIN	FRACTION OF ADC SPAN USED	NOISE AT AMPLIFIER OUTPUT (μV_{RMS})	NOISE REFERRED TO INPUT (μV_{RMS})
(None)	1	1/500	6	6
82.5k	2	1/250	6	3
20.6k	5	1/100	6	1.2
9.15k	10	1/50	7	0.7
4.33k	20	1/25	9.5	0.475
2.11k	40	1/12	15	0.375
1.04k	80	1/6	26	0.325

Figura 76 – Valor de la ganancia y del ruido de la señal de salida y entrada en función de R_G [17]

3.3.3 Convertidor Analógico-Digital

El convertidor analógico-digital, como su nombre indica, es un dispositivo electrónico que se emplea para convertir una señal de entrada analógica continua en el tiempo, normalmente de voltaje aunque también puede ser de corriente, en una señal de salida digital, es decir, una señal digital en código binario. Dado que las magnitudes físicas son analógicas y generalmente el procesado de información se realiza de manera digital, se hace necesario el uso de este tipo de dispositivo. El proceso de conversión analógica a digital consta de dos fases: cuantificación y codificación. En la fase de cuantificación se muestrea la señal a la entrada y se van obteniendo valores analógicos, a los cuales se les asigna un valor o estado, que dependerá del número de bits del Conversor Analógico Digital. Una vez obtenido el valor cuantificado se procede a la codificación en binario, es decir, una palabra digital compuesta por unos y ceros, el número de bits está condicionado al número de líneas de salida del Conversor Analógico Digital.

A continuación se van a dar unas breves explicaciones de dos convertidores. El primero de ellos es el más común en cuanto a uso y el segundo es el empleado para el desarrollo del sensor de fuerza descrito en el presente documento.

3.3.3.1 Convertidor Analógico Digital tipo SAR

Es el más común en convertidores integrados cuando la exactitud requerida no es determinante, ya que su diseño supone un equilibrio entre velocidad y complejidad. Se caracteriza por incluir un registro de aproximaciones sucesivas (SAR; Successive Approximation Register) que contiene las distintas aproximaciones de la palabra digital.

Este método de conversión es útil cuando la resolución no es un parámetro que limite en exceso el diseño, ya que ofrece velocidad a bajo coste con resoluciones de 8, 10, 12, 14 y 16 bits. El tiempo de conversión resulta de multiplicar el número de bits más 1 por el

periodo del reloj, que suele ser interno al circuito integrado, aunque existen modelos que permiten emplear reloj externo. Esto se debe a que la palabra digital final no pasa al registro de salida hasta el siguiente flanco de reloj, en el que también se informa del fin de la conversión. Por ejemplo, para un periodo de reloj de $1\mu\text{s}$, los tiempos de conversión son de $9\mu\text{s}$ y $13\mu\text{s}$ para resoluciones de 8 y 12 bits, respectivamente.

El proceso de conversión es propio de un circuito realimentado, en el que se compara la señal a convertir con los distintos acercamientos de la palabra digital; por lo que a veces se le denomina “convertidor con realimentación”. [18]

A continuación se muestra una imagen, figura 77, de un convertidor analógico digital (CAD) de aproximaciones sucesivas (SAR) de 20 bits de la empresa Linear Technology.



Figura 77 – CAD tipo SAR [19]

3.3.3.2 Convertidor Analógico Digital tipo Sigma-Delta

Son apropiados para aplicaciones con requisitos de resolución elevados (hasta 21 bits en algunos modelos) que involucren frecuencias bajas-medias (audio y voz entre 10 Hz y 100 kHz).

El comparador de alta velocidad compara la salida del integrador con cero. El CDA de 1 bit toma el “0” ó el “1” de la salida del comparador y genera una tensión analógica que se resta a la señal de interés. La diferencia es integrada y comparada con cero. Por ejemplo, para una entrada positiva, la salida del comparador es una secuencia de “1” hasta que la salida del comparador pasa por cero. Cuanto más positiva sea la entrada mayor es la serie de “1” producida. Para entrada nula, en la salida del comparador se alternan los “1” con los “0”. En este circuito la frecuencia de muestreo puede ser muy elevada comparada con la de la señal de entrada, por lo que el filtro “antialiasing” es muy simple. Tampoco es necesario el circuito S&H. [18]

Como se mencionó anteriormente, el empleo de este dispositivo viene determinado por el laboratorio de robótica de la Universidad, ya que es el más adecuado para conectar con la fase de captación y procesado de los datos. El Conversor Analógico Digital seleccionado es un convertidor especial analógico-digital sigma delta de 24 bits de la empresa Linear Technology, denominado LTC2440 (ver figura 78, imagen de la izquierda, la imagen derecha corresponde con la vista en planta del LTC2440).

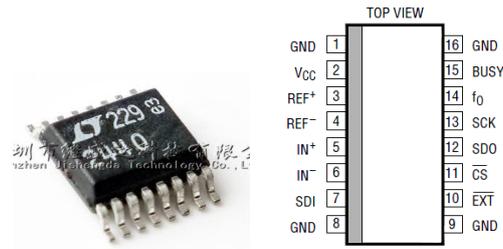


Figura 78 – Convertidor analógico-digital Sigma Delta de 24 bits [20]

Las funciones de los pines mostrados en la figura anterior, se explican a continuación. Los pines 1, 8, 9 y 16 son los pines de tierra conectados internamente para un óptimo flujo de corriente y desacoplamiento de tensión. El pin 2 es el positivo de alimentación con derivación a tierra a través del pin 1. Los pines 3 y 4 son REF^+ y REF^- , respectivamente, entrada diferencial de referencia. La tensión en estos pines puede tener cualquier valor entre GND y VCC, siempre y cuando la entrada positiva de referencia, REF^+ , se mantiene más positiva que la entrada negativa de referencia, REF^- , por lo menos 0,1V. Los pines 5 y 6 son IN^+ y IN^- , respectivamente. Corresponden con la entrada analógica diferencial. La tensión en estos pines puede tener cualquier valor entre $GND - 0,3 V$ y $VCC + 0,3V$. El pin 7, SDI o serial de entrada de datos. Este pin se utiliza para seleccionar la velocidad / resolución del convertidor. El pin 10, \overline{EXT} , este pin se utiliza para seleccionar SCK internamente o externamente para la salida de datos. El pin 11, \overline{CS} corresponde con la entrada digital activa LOW, un LOW (es decir un 0) en este pin permite la salida digital SDO y activa la conversión analógica-digital. El pin 12 es el SDO, salida digital de tres-estados. Durante el período de salida de datos, este pin se utiliza como salida de datos en serie. Pin 13, SCK, reloj digital bidireccional. El modo de operación del reloj de serie se determina por el nivel de lógica aplicada a la clavija \overline{EXT} . El pin 14, f_0 es el pin de control de frecuencia. Entrada digital que controla el reloj de conversión interna. Cuando f_0 está conectado a VCC o GND, el convertidor utiliza su oscilador interno funcionando a 9MHz. Por último, el pin 15, BUSY, es el indicador del progreso de la conversión, este pin es ALTO (da como salida un 1) mientras que la conversión está en curso y pasa a BAJO (da como salida un 0) que indica la conversión es completa y los datos están listos.[20]

3.4 Procesamiento de la señal, registro y/o presentación

Para el bloque de procesamiento de señal se emplea el microcontrolador STM32F4 (ver figura 79), mediante el cual se capturan los datos y se preparan para ser registrados y presentados. Para realizar estas dos funciones (registrar y presentar) se hace uso del programa Matlab.

Como se mencionó anteriormente, se ha hecho uso de una herramienta muy sofisticada, creada por el grupo de investigación Robotics Lab, la cual se encarga de la adquisición de datos, dicha función se realiza mediante un hardware de adquisición de señales

analógicas diferenciales desarrollado en el citado grupo de investigación. Para la realización del firmware del controlador embebido se emplea una herramienta de programación visual fruto de la tesis doctoral de Antonio Flores Caballero [1].



Figura 79 - Microcontrolador STM32F4 [21]

Cabe destacar que, tanto la etapa de acondicionamiento de la señal, la cual consta del amplificador y el convertidor analógico-digital, como la etapa de procesamiento de la señal son montajes ya desarrollados en el laboratorio del departamento, Robotics Lab, por lo que dichas fases del trabajo se han utilizado, no diseñado, para comprobar el correcto funcionamiento del sistema diseñado.



4 DISEÑO DE LA PLETINA

4.1 Aspectos generales

El diseño de la pletina donde se van a montar las galgas juega un papel importante dentro del diseño del sensor de fuerza. Por un lado, la pletina debe soportar una fuerza máxima de 56 N, esta especificación viene dada por la fuerza máxima que puede ejercer un cable de SMA de diámetro entorno a 8 o 12 milésimas de pulgada. Otro motivo de la importancia del diseño de la pletina se debe a la configuración escogida en el capítulo 3, ya que, al trabajar con un montaje en contrafase o *push-pull*, tanto la pletina como las galgas extensiométricas están sometidas a esfuerzos de flexión. Dichos esfuerzos de flexión son generados por las fuerzas que se aplican al sensor, las cuales se quieren medir. La fuerza aplicada genera deformaciones, tanto en la pletina como en las galgas extensiométricas. Por ello la deformación sufrida en la pletina y en las galgas debe estar dentro de la zona elástica de sus respectivas gráficas de tensión-deformación, para todo el rango de medida del sensor de fuerza.

Esta condición es muy importante que se cumpla, de lo contrario el sensor no funcionará de manera correcta. El motivo principal es que, como se comentó anteriormente, cuando no se ejerce ninguna fuerza sobre el sensor, éste no debe dar lecturas de fuerzas. En el caso de que la deformación de la pletina supere la zona elástica de su gráfica de tensión-deformación, es decir, entre en la zona plástica, implicaría que la deformación es permanente. Provocando así, la alteración del estado de reposo del sensor de fuerza, ya que, al quedar la pletina deformada, las galgas extensiométricas apreciarían dicha deformación variando su resistencia, y a su vez, variaría la tensión de salida del circuito, generando que el sensor de una lectura de fuerza, aún en ausencia de ésta.

Otro aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de la pletina, que también altera el estado de reposo del sensor de fuerza, son las deformaciones de las galgas. Al igual que en el caso anterior, si la deformación que sufren las galgas entra en la zona plástica, éstas quedarán deformadas de manera permanente, implicando un mal funcionamiento del sensor puesto que darían lecturas incluso si la fuerza aplicada es nula.

Debido a estos aspectos y para garantizar un correcto funcionamiento del sensor de fuerza, se ha realizado el diseño de la pletina con el programa ABAQUS, ya que, carezco de los conocimientos necesarios sobre análisis estructural para realizar el diseño de la pletina de forma teórica.

4.2 Elección de la pletina

Para poder realizar el diseño más óptimo de la pletina, se deben tener en cuenta las características del material del cual se compone ésta y las características de las galgas extensiométricas que van montadas en dicha pletina. Siendo las características mencionadas las limitaciones del diseño.

El tipo de material que se va a utilizar para la pletina y la empresa proveedora de éste, es una condición previa al diseño del sensor de fuerza, impuesta por el Departamento de Tecnología Electrónica, para el cual se realiza el presente Trabajo Fin de Grado. Siendo dicho material una aleación formada por aluminio, magnesio y silicio, denominada normalmente como aluminio 6063, de la empresa Alumafel. La denominación de esta aleación varía en función del país, en la figura 80 se muestra una tabla, realizada por la empresa Alumafel, con las equivalencias internacionales más características.

ALUMAFEL	EUROPA	USA	ESPAÑA	FRANCIA	ALEMANIA	G.B.	ITALIA	SUECIA	SUIZA	JAPON
DCA	EN 573	AA	UNE 38.337	AFNOR	DIN	BS	UNI	SIS	VSM	JIS
SIMAGAL 63	EN AW 6063	6063	L-3441	A-GS	AlMgSi0,5 3.3206	H 9		4104	AlMgSi0,5	

Figura 80 – Tabla de equivalencias internacionales de la empresa Alumafel

Antes de empezar a explicar las limitaciones que supone el uso de este material en el diseño de la pletina del sensor de fuerza, hay que destacar que, para poder escoger las dimensiones de la pletina normalizada, ha sido necesario realizar varios diseños con el programa ABAQUS, hasta encontrar uno que se ajustara a las limitaciones impuestas por las características de las galgas extensiométricas y las características del aluminio 6063.

La primera limitación que se encuentra es la dimensión de la pletina normalizada, de la cual se obtendrá la pletina del sensor de fuerza. Una de las características mecánicas de un sensor es el tamaño y el peso, por lo que, teniendo en cuenta las dimensiones de las galgas extensiométricas, las dimensiones de la pletina normalizada son las marcadas en la figura 81.



**Perfiles normalizados
PLETINAS**



Código	a mm	b mm	Aleación	M lx cm ⁴	M ly cm ⁴	W x cm ³	W y cm ³
1.03.100	10	2,5	6060/6063-T5	0,001	0,021	0,010	0,042
1.03.120	15	3,0	6060/6063-T5	0,003	0,084	0,023	0,113
1.03.210	20	2,0	6060/6063-T5	0,001	0,133	0,013	0,133
1.03.212	20	3,0	6060/6063-T5	0,005	0,200	0,030	0,200
1.03.214	20	4,0	6060/6063-T5	0,011	0,267	0,053	0,267
1.03.216	20	5,0	6060/6063-T5	0,021	0,333	0,083	0,333
1.03.228	20	10,0	6060/6063-T5	0,167	0,667	0,333	0,667
1.03.240	25	2,0	6060/6063-T5	0,002	0,260	0,017	0,208
1.03.242	25	3,0	6060/6063-T5	0,006	0,391	0,038	0,313
1.03.244	25	4,0	6060/6063-T5	0,013	0,521	0,067	0,417
1.03.246	25	5,0	6060/6063-T5	0,026	0,651	0,104	0,521
1.03.256	25	12,0	6060/6063-T5	0,360	1,563	0,600	1,250
21.82.006.256.03	25	12,0	6082-T6	0,360	1,563	0,600	1,250
1.03.280	30	3,0	6060/6063-T5	0,007	0,675	0,045	0,450
1.03.282	30	4,0	6060/6063-T5	0,016	0,900	0,080	0,600

Figura 81 – Catálogo de pletinas normalizadas de la empresa Alumafel

Como se puede apreciar en la figura anterior, la pletina seleccionada tiene un estado de tratamiento T5. El valor del estado de tratamiento es un factor determinante, ya que define las características mecánicas del aluminio 6063, la carga en rotura y el límite elástico (véase figura 82).

Estado de tratamiento	Dimensiones mm e ⁽²⁾	Rm Mpa		Rp0,2 Mpa		A %	A _{50 mm} %
		mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	mín.
T4 ⁽⁴⁾	≤ 25	130		65		14	12
T5	≤ 3	175		130		8	6
	3 < e ≤ 25	160		110		7	5
T6 ⁽⁴⁾	≤ 10	215		170		8	6
	10 < e ≤ 25	195		160		8	6
T64 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾	≤ 15	180		120		12	10
T66 ⁽⁴⁾	≤ 10	245		200		8	6
	10 < e ≤ 25	225		180		8	6

Figura 82 – Características mecánicas del aluminio 6063 de la empresa Alumafel en función del estado de tratamiento

Cabe destacar, que en realidad el valor que se emplea es el límite elástico, debido a que es el valor de la tensión que determina el cambio de deformación elástica a deformación plástica.

En último lugar se encuentra la figura 83, en la cual se muestran las características físicas del aluminio 6063, de las cuales se deben tener en cuenta la densidad, el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, de cara al diseño de la pletina en el programa basado en el método de elementos finitos ABAQUS.

PROPIEDADES FÍSICAS	
Peso específico Kg/dm ³	2,69
Intervalo de fusión °C	615-655
Coefficiente de dilatación lineal °C ⁻¹ x 10 ⁻⁶ (20/100°C)	23,4
Módulo de elasticidad (Mpa) ⁽²⁾	70.000
Coefficiente de Poisson	0,33
Conductividad térmica Estado O W/(m x °C) a 20°C	218
Estado T6/T8	201
Resistividad eléctrica Estado O 10 ⁻³ μΩ x m a 20°C	29
Estado T6/T8	32
Calor específico J/(Kg x °C) (0 a 100°C)	900

Figura 83 – Propiedades físicas del aluminio 6063 de la empresa Alumafel

4.3 Diseño de la pletina en ABAQUS

En este apartado se va a explicar la metodología seguida con el programa ABAQUS, empleado para el diseño de la pletina donde van montadas las galgas extensiométricas. Se ha escogido este programa porque es una herramienta muy potente para el análisis estructural, mediante la cual se podrá realizar un diseño que garantice el correcto funcionamiento para el rango de medida del sensor de fuerza.

El software comercial ABAQUS fue creado por David Hibbitt, Dr. Bengt Karlsson y P. Sorensen en la década de los setenta. Su principio de funcionamiento se basa en el método matemático de elementos finitos. El cual sirve para resolver ecuaciones diferenciales asociadas a problemas físicos con geometrías complejas.

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero estructuralista resolver infinidad de problemas. Sin embargo, es un método que no proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que, en realidad, posibilita obtener una solución aproximada que, mediante un análisis, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico. Su idea básica no puede ser más sencilla: dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras, el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, de manera que suponemos que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales). A continuación se determinan las matrices de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esa manera, se puede determinar, de una forma aproximada, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento [22].

El software ABAQUS permite realizar simulaciones virtuales mediante simulación realista.

El método de elementos finitos debido a la cantidad de cálculos que realiza, es un método usado en ordenadores. En los análisis realizados con programas comerciales basados en este método, se diferencian tres fases [23]:

- **Pre-proceso:** esta fase es la fase inicial, en la que se definen todos los aspectos que describen el proceso del modelo. Si el análisis a realizar es estructural se deben definir ciertos aspectos como la geometría del modelo, discretizar dicha geometría en un número de “elementos finitos”, especificar las propiedades del material, condiciones de contorno, cargas que actúan, etc.

- **Procesamiento o solución:** en esta fase se resuelve las ecuaciones planteadas en la fase anterior (fase de pre-proceso). El programa permite al usuario poder seguir los distintos pasos de la resolución de ecuaciones.
- **Post-proceso:** en esta fase, fase final, es en la que se pueden ver los resultados de las simulaciones, pudiendo realizar un análisis de estas y decidir si es necesario modificar el modelo.

La clasificación realizada, es una clasificación genérica de cómo trabajan los programas basados en este método. A continuación se va a adaptar dicha clasificación al programa ABAQUS, empleado para el diseño de la pletina del sensor de fuerza.

- **Pre-proceso:** esta fase se realiza con una herramienta gráfica denominada ABAQUS/CAE. Dicha herramienta es un programa compuesto por nueve módulos, mediante los cuales se definen los aspectos que definen al proceso del modelo (geometría, discretización de la geometría, propiedades de los materiales, etc.).
- **Procesamiento o solución:** al igual que en la clasificación anterior, en esta fase se resuelven las ecuaciones generadas en la fase de pre-proceso. El programa ABAQUS ofrece dos métodos de resolución en función de si las condiciones son estáticas o dinámicas. En el primer caso se emplea ABAQUS/Standard y en el segundo ABAQUS/Explicit.
- **Post-procesado:** en la fase final, para observar los resultados obtenidos de forma gráfica se emplea ABAQUS/VIEWER. Esta herramienta gráfica es uno de los módulos que componen ABAQUS/CAE.

Antes de empezar con las explicaciones de cómo realizar la pletina en los distintos módulos de ABAQUS/CAE hay que resaltar tres aspectos importantes. El primero es que el archivo que crea ABAQUS/CAE se guarda en un archivo con extensión cae, en este documento se denomina “pletina.cae”. El segundo aspecto importante es el archivo que se debe generar para que el procesador del programa realice el análisis, este archivo de entrada tiene extensión inp, para el presente documento se define como “pletina.inp”. El último punto a destacar es que el programa ABAQUS, al trabajar basándose en un método numérico, no tiene unidades, por lo que se deben introducir las unidades de las características que definen al modelo en unidades del sistema internacional. A continuación se explican los distintos módulos empleados [23] y la metodología seguida en el programa ABAQUS, para el desarrollo del diseño de la pletina del sensor de fuerza.

4.3.1 Módulo PART

El módulo PART es el primer módulo en el que se trabaja. En este módulo se deben definir todas las partes o piezas que van a componer el modelo. Para este proyecto solo se define una, la pletina donde van montadas las galgas extensiométricas, por lo que solo habrá una “part”.

Lo primero que hay que hacer es abrir el programa, apareciendo la pantalla principal del programa (véase figura 84). Cabe destacar que inicialmente sale una ventana con el nombre “Start Session” (permite empezar un tutorial, abrir un modelo ya creado, etc.), la cual cerramos.

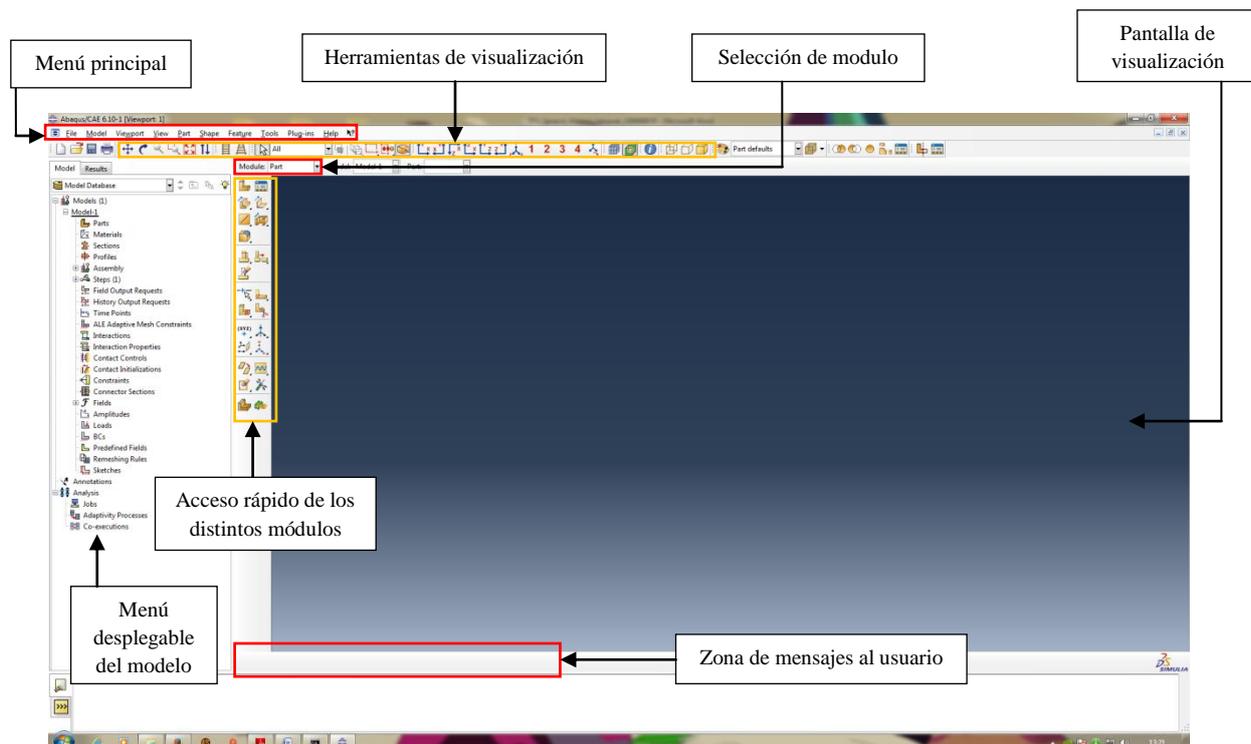


Figura 84 – Pantalla principal de ABAQUS/CAE

Una vez abierta la pantalla principal, para poder definir las dimensiones de la pletina se debe ir al menú principal y seleccionar *Part* → *Create*. De manera que aparecerá un cuadro de diálogo como el de la figura 85. Dicho cuadro de diálogo sirve para definir los parámetros iniciales de la “part” o pieza, el primero es el nombre, para este proyecto es Pletina. En segundo lugar hay que seleccionar el espacio de modelado, *Modeling Space* → *3D*, será un espacio tridimensional, ya que las deformaciones que sufre la placa son normales a la superficie. En tercer lugar se selecciona el tipo de “part” o pieza, *Type* → *Deformable*. En el siguiente parámetro, *Base Feature*, se definen, la forma, *Shape* → *Shell*, debido a que se trata de una placa bidimensional, y el tipo, *Type* → *Planar*, este parámetro indica cómo se va a generar la geometría del modelo. Por último se debe indicar un tamaño aproximado, *Approximate size*, de la pieza a diseñar,

para la pletina bastará con poner 0,5 (equivale a 50 centímetros), y se pincha en continuar.

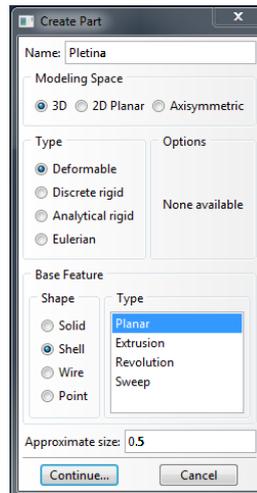


Figura 85 – Cuadro de diálogo para crear una “part”

Al continuar se abre la pantalla de visualización del programa del módulo Sketch (es un módulo adicional de ABAQUS/CAE), en esta pantalla aparece un cuadrado de lado igual al valor introducido anteriormente en *Approximate size*, dicho cuadrado tiene un tramado cuadrículado que es donde se realizará el dibujo de la pletina. Para trabajar con una mayor precisión a la hora de realizar el dibujo de la pletina (en el módulo Sketch) se aumenta el número de decimales en las opciones del dibujante, para ello se debe seleccionar del menú principal *Edit* → *Sketcher Options*, aparecerá un cuadro de diálogo donde se selecciona *Dimensions* → *Decimal places* → 4 → *Apply* → *Ok* (véase figura 86).

Una vez realizado el ajuste arriba indicado, se procede a la realización del dibujo mediante las opciones de acceso rápido del módulo Sketch (o módulo de dibujo).

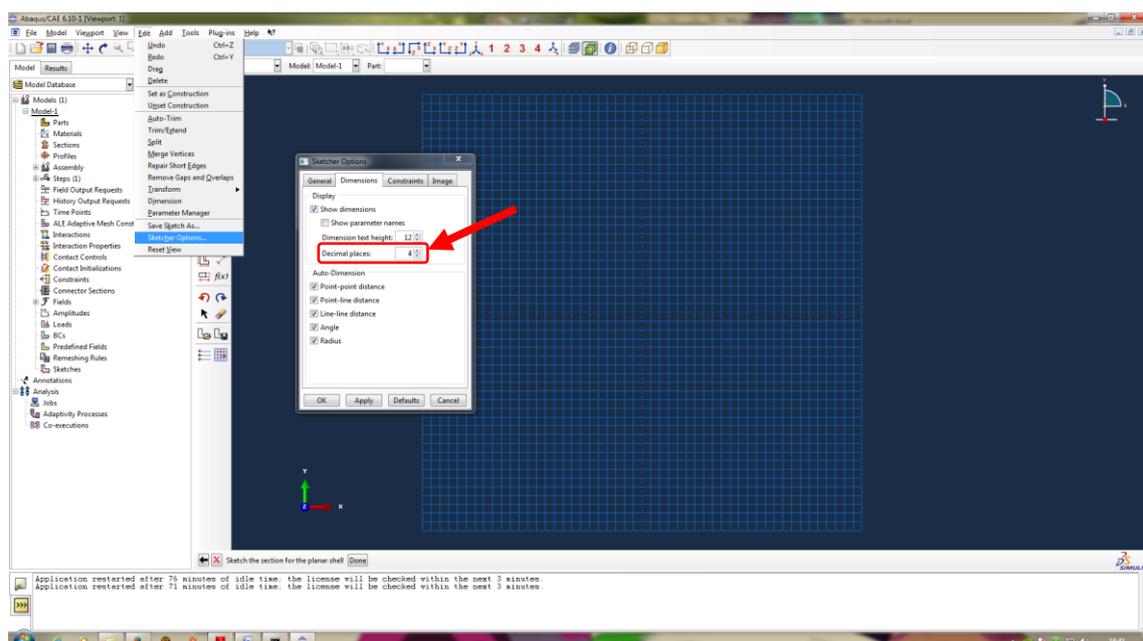


Figura 86 – Pantalla de visualización del módulo SKETCH y el cuadro de diálogo de las opciones de éste (módulo PART)

Cuando se ha terminado el dibujo, se debe seleccionar de la zona de mensajes dirigidos al usuario, “Done”, como se muestra en la figura 87.

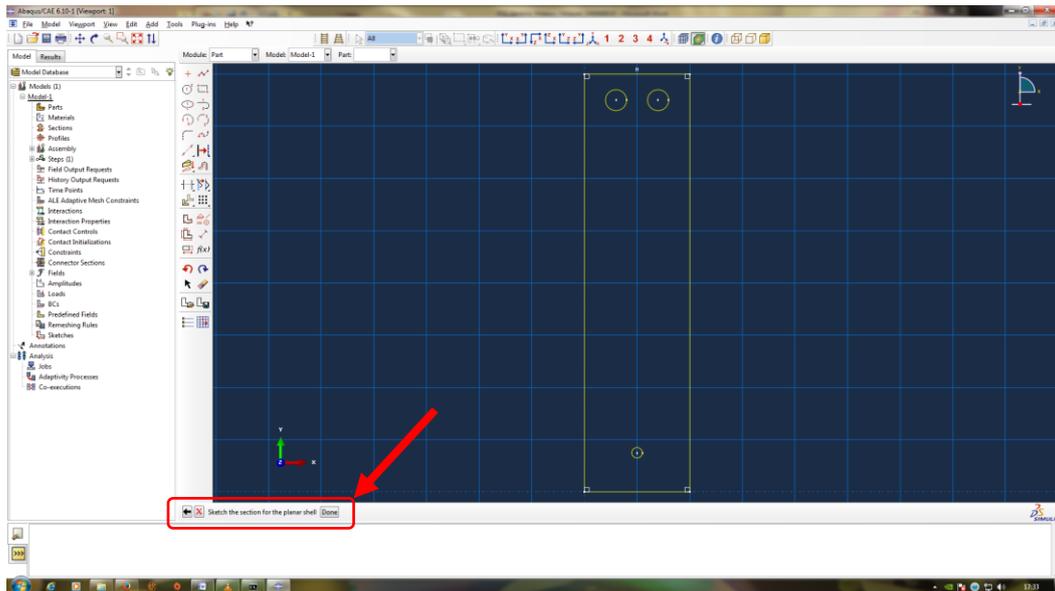


Figura 87 - Pantalla de visualización del módulo SKETCH

Antes de pasar al siguiente módulo, se debe hacer un estudio previo para determinar las zonas de actuación de las fuerzas que actúan sobre la pletina de aluminio, es decir, hay que indicar al programa en que zonas o regiones se produce el apoyo de la pletina, la región de anclaje y la región donde se ejerce la fuerza a medir. Para definir estas zonas se deben crear particiones de la “part” (en este caso pletina de aluminio). Para crear una partición se pueden emplear todos los módulos de ABAQUS/CAE a excepción del módulo JOB y el módulo VISUALIZATION.

Las particiones referentes, tanto a las cargas como a las condiciones de contorno (estos dos conceptos se explican en el apartado del módulo LOAD), se definen al mismo tiempo, en primer lugar, del menú principal se selecciona (dentro del módulo PART); *Tools* → *Partition*, automáticamente aparece un cuadro de diálogo (ver figura 88).

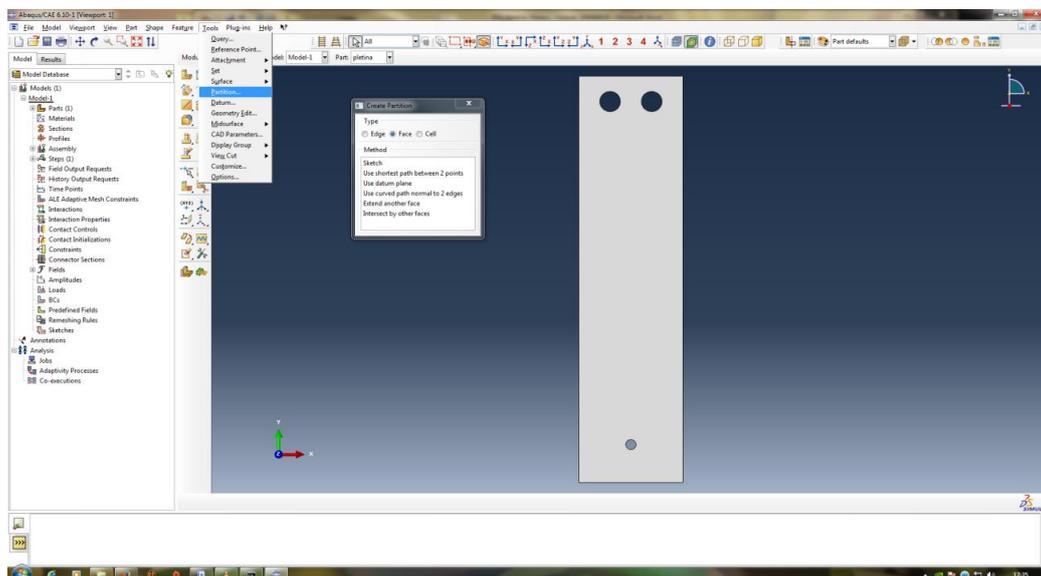


Figura 88 – Pantalla de visualización del módulo PART con el cuadro de diálogo para crear “partitions”

El cuadro de diálogo que aparece, figura 89, permite escoger el tipo de partición o particiones que se van a realizar, es decir, si la partición es en un borde (o canto), en una cara o en una celda de la “part” y el método que se va a emplear. En el caso de la pletina de aluminio las particiones se realizan en una cara y el método es el módulo SKETCH, por lo que se escoge; *Type* → *Face* y luego *Method* → *Sketch*, al seleccionar estas opciones, en la zona de mensajes al usuario aparece un mensaje en el que pide que se seleccione un borde o eje vertical en el lado derecho.

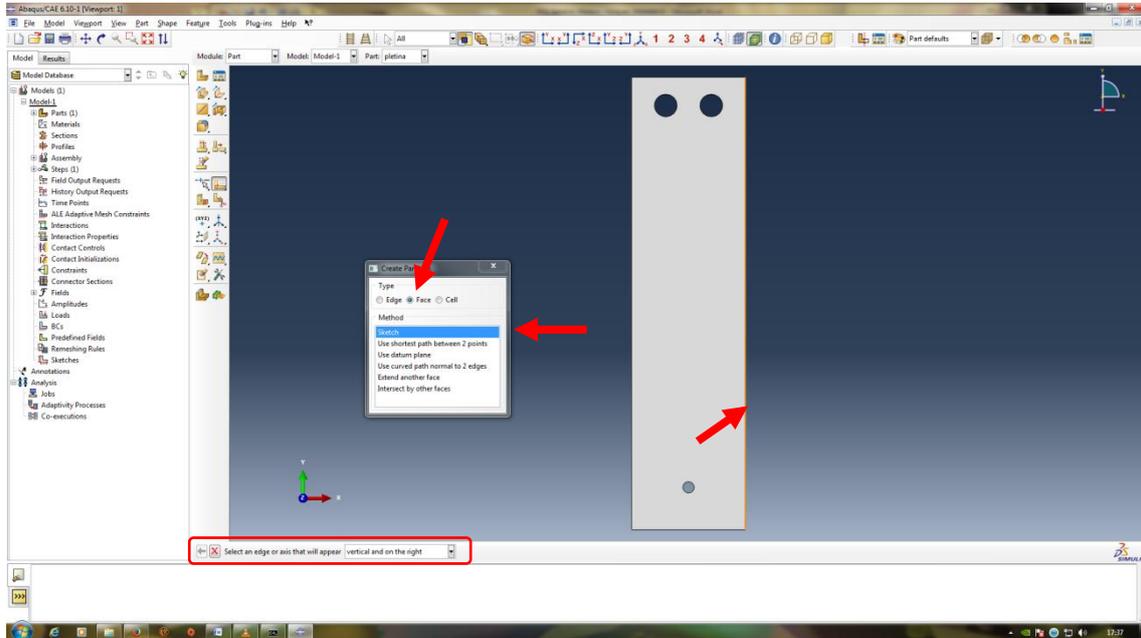


Figura 89 – Selección de opciones del cuadro de diálogo para crear una “partición” (módulo PART)

Una vez seleccionado el borde, el programa abre el módulo SKETCH de forma automática. En este módulo es donde se definen las distintas particiones de la pletina, para ello se emplean los botones de acceso rápido de dicho módulo. Cuando se terminan de definir dichas particiones se selecciona, de la zona de mensajes al usuario, ver figura 90, “Done” dos veces y se cierra el cuadro de diálogo para crear “partitions”.

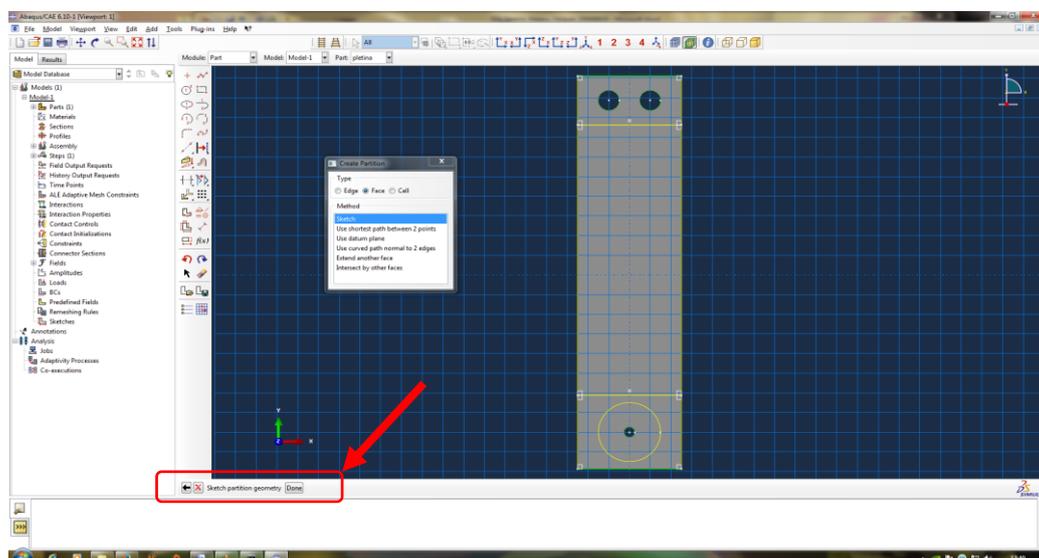


Figura 90 – Pantalla de visualización del módulo SKETCH para definir particiones (módulo PART)

Seguidamente aparecerá la pantalla de visualización del módulo PART en la que deben aparecer todas las “parts” con su geometría definida, además de las “partitions”. Es importante destacar que desde el menú principal seleccionando *Part* → *Manager*, aparece un cuadro de diálogo en el que se muestran todas las “parts” creadas. En este cuadro de diálogo se da la opción de poder modificar, borrar, bloquear, etc. alguna “part”, en caso de ser necesaria alguna de las acciones mencionadas (véase figura 91).

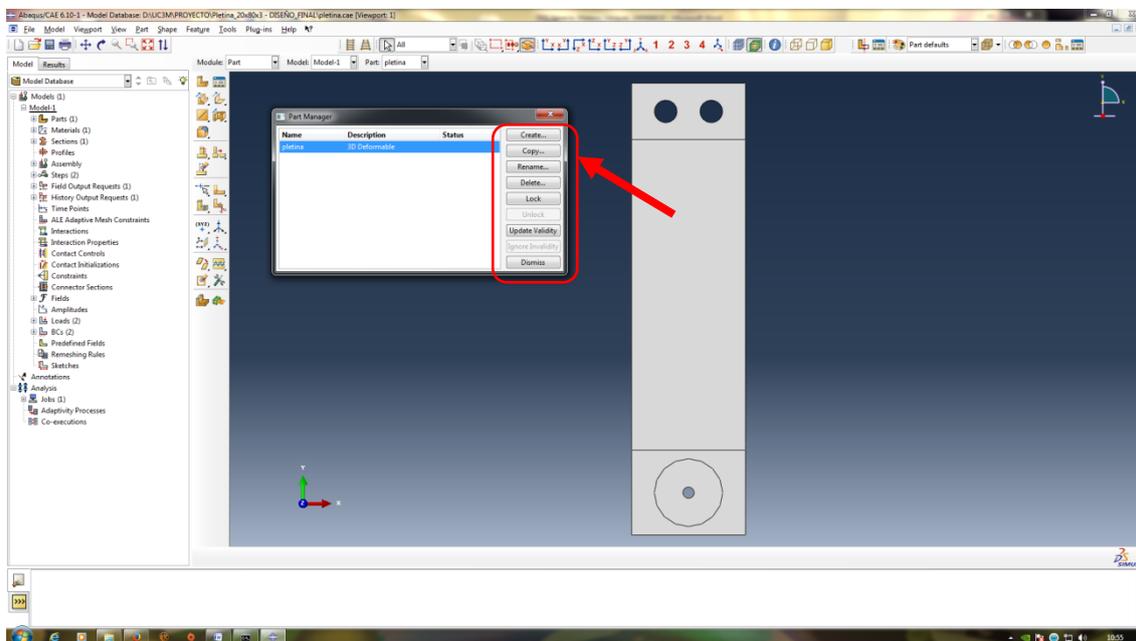


Figura 91 – Pantalla de visualización del módulo PART con el cuadro de diálogo del Part Manager

Al finalizar este módulo se debe pasar al siguiente módulo de trabajo, para ello se pincha la pestaña de selección de módulo y se escoge el módulo PROPERTY.

4.3.2 Módulo PROPERTY

El segundo módulo de trabajo es el módulo PROPERTY, en el cual se definen las propiedades de los diferentes materiales que componen el modelo (en el caso de la pletina solo hay uno, el Aluminio) y se asignan dichas propiedades a las “parts” creadas.

El primer paso que se debe hacer es definir las propiedades del material a usar, para ello, en el menú principal se selecciona *Material* → *Create*. Instantáneamente aparece un cuadro de diálogo en el que hay diversos parámetros a rellenar (véase figura 92).

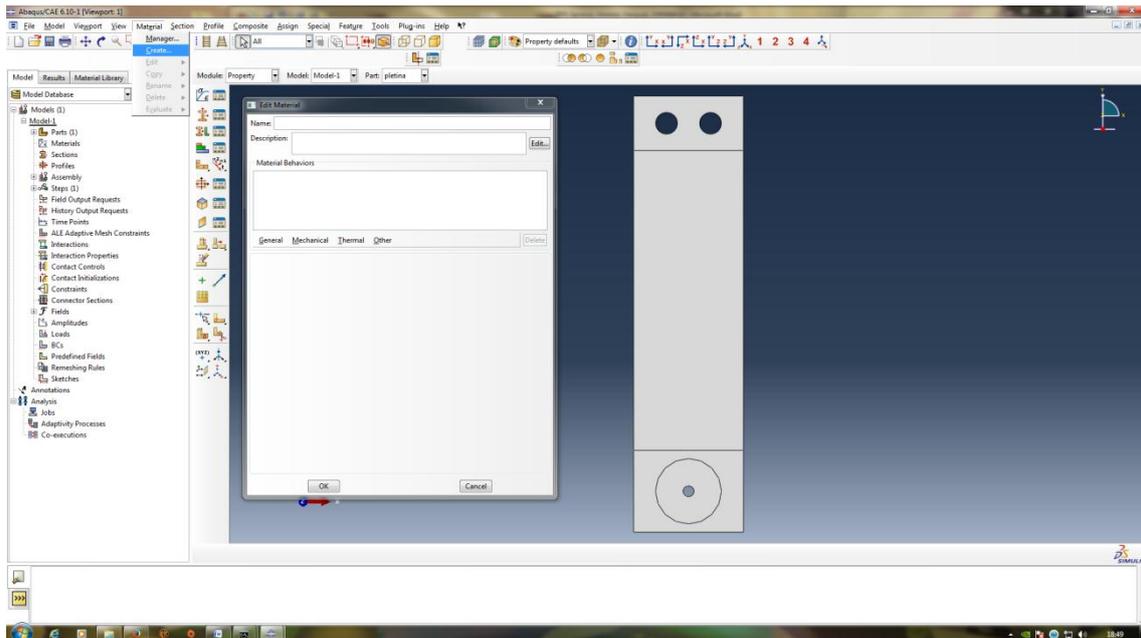


Figura 92 – Pantalla de visualización del módulo PROPERTY para la creación de un material

El primer parámetro es el nombre, como la pletina es de aluminio, al material se denominará Aluminio. A continuación la primera propiedad que se define es la densidad, seleccionar; *General* → *Density* → 2690 → *Ok* (véase figura 93, se recuerda que el programa trabaja solo con números, por lo que los valores deben ir en unidades del sistema internacional, en este caso kg/m^3).

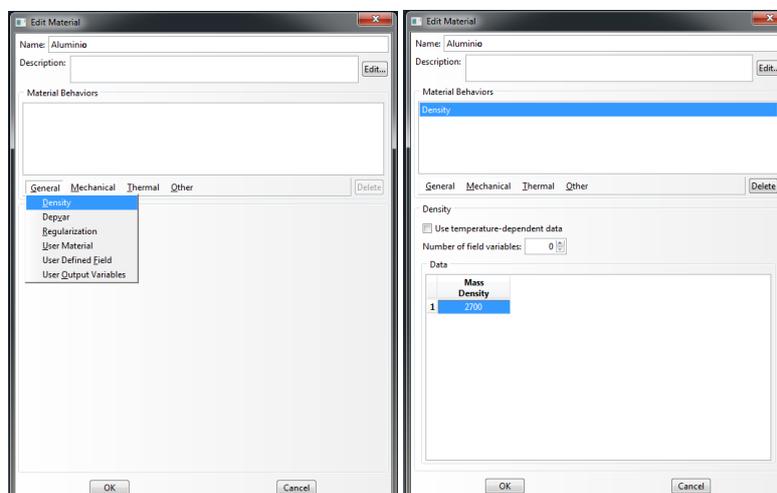


Figura 93- Cuadro de diálogo de selección de propiedad I del material (módulo PROPERTY)

La siguiente propiedad que se debe definir es la que hace referencia al comportamiento elástico del material. Para lo cual, se selecciona del cuadro de diálogo de selección de propiedad del material; *Mechanical* → *Elasticity* → *Elastic* → $70e9$ (*Young's Modulus*) y 0.33 (*Poisson's Ratio*) → *Ok*, como se aprecia en la figura 94.

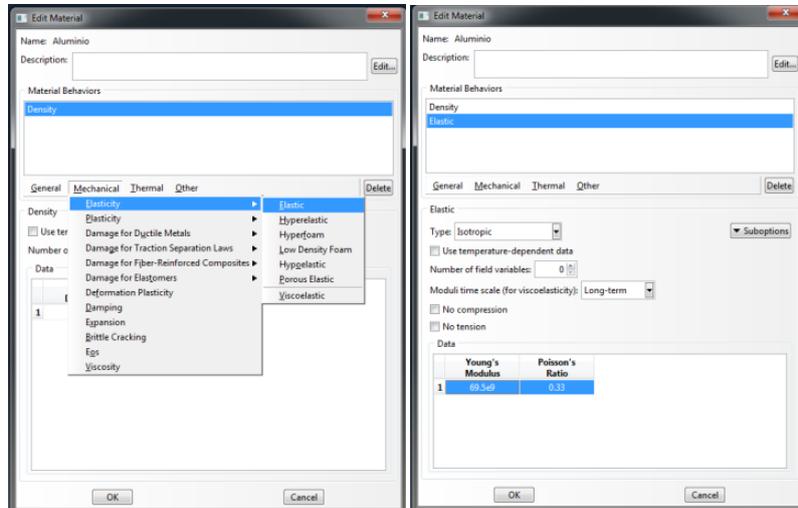


Figura 94 - Cuadro de diálogo de selección de propiedad II del material (módulo PROPERTY)

El programa ABAQUS no permite asignar un material directamente a una “part”, por lo que, una vez definidas las propiedades del material, se debe crear una sección. Al crear una sección lo que se hace es dar una serie de propiedades (tanto del material como de la geometría) a una región. De manera que, se asigna el material a la sección creada y finalmente se asigna la sección a la “part”. El primer paso para crear una sección es seleccionar en el menú principal; *Section* → *Create*, como en la figura 95.

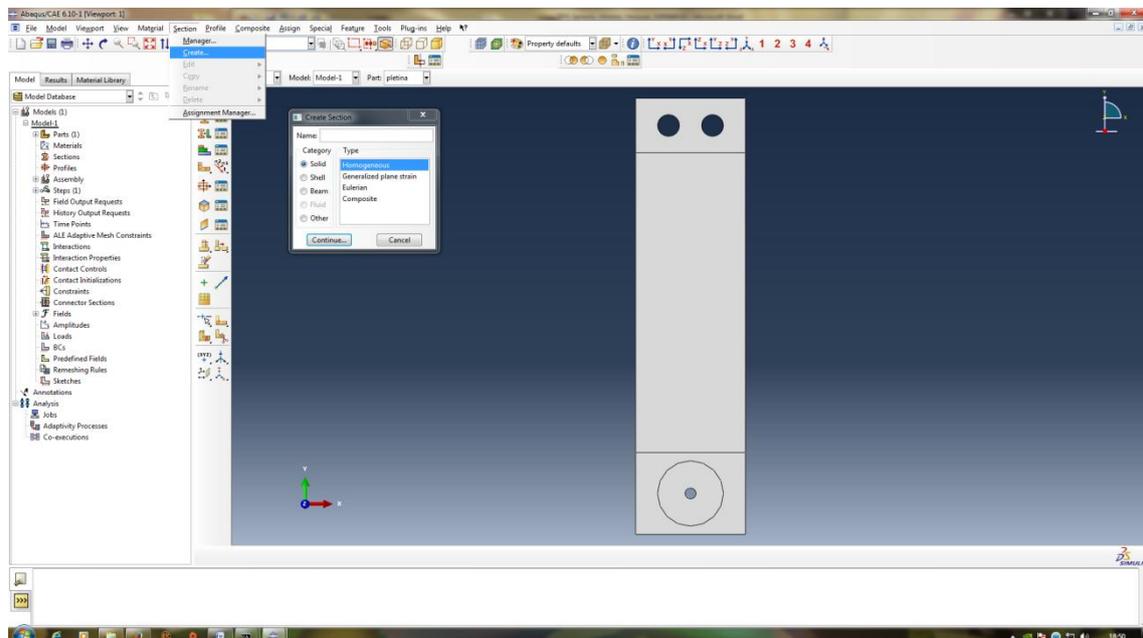


Figura 95 – Pantalla de visualización del módulo PROPERTY para la creación de una sección

En el cuadro de diálogo que aparece, figura 96, se debe definir el nombre de la sección (e3) y escoger la categoría de ésta, es evidente que la categoría debe tener coherencia

con el tipo de geometría escogida en el módulo PART, por lo que, para la pletina se escoge; *Category* → *Shell* y en *Type* → *Homogeneous* → *Continue*.

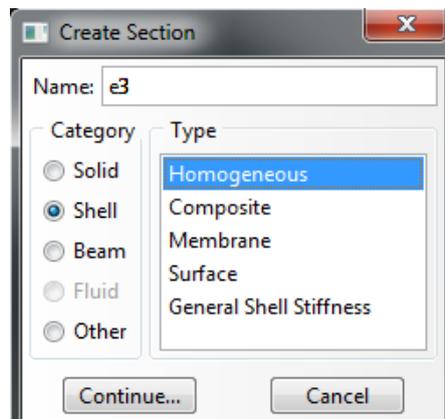


Figura 96 – Cuadro de diálogo I para crear una sección

Al continuar aparece automáticamente el segundo cuadro de diálogo que hay que rellenar, figura 97. De este cuadro de diálogo se rellenan los siguientes parámetros; *Basic* → *Shell thickness* → *Value* → *0.003* y en *Material* → *Aluminio* → *Ok*. El primer parámetro es el espesor de la pletina, que son 3 milímetros (en el sistema internacional 0.003 metros) y a continuación se asigna un material a la sección (para este proyecto solo hay un material, el Aluminio).

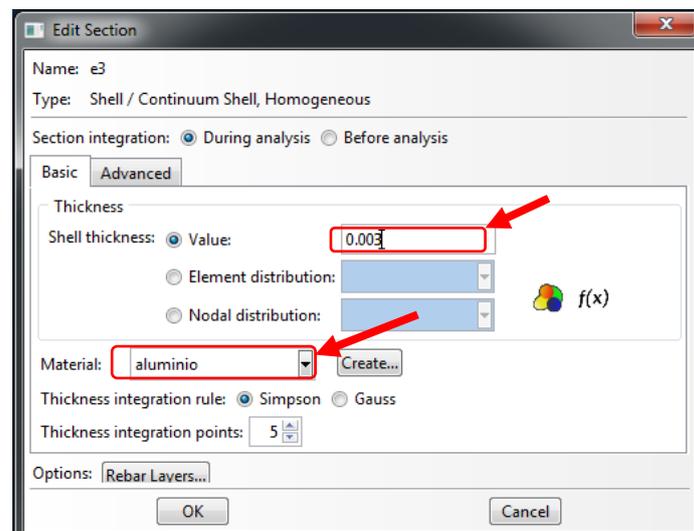


Figura 97 - Cuadro de diálogo II para editar una sección

La última acción que se ejecuta en este módulo es la asignación de una sección a una “part”, figura 98. En el menú principal; *Assign* → *Section*, a continuación en la zona de mensajes al usuario, el programa pide que se seleccione una región para ser asignada a una sección (“*select the regions to be assigned a section*”), por lo que se selecciona la “part” o pletina. Cuando se selecciona la pletina, ésta debe cambiar de color, de esta manera se indica que esta seleccionada. Luego se pincha en “Done” (que significa hecho, terminado), apareciendo un cuadro de diálogo en el que el único parámetro que se debe definir es la sección, como solo hay una debe aparecer e3, que es el nombre de la sección creada, por último se selecciona la pestaña de “Ok” del cuadro de diálogo. Un

ejemplo del cuadro de diálogo para editar la asignación de una sección se puede ver en la figura 99.

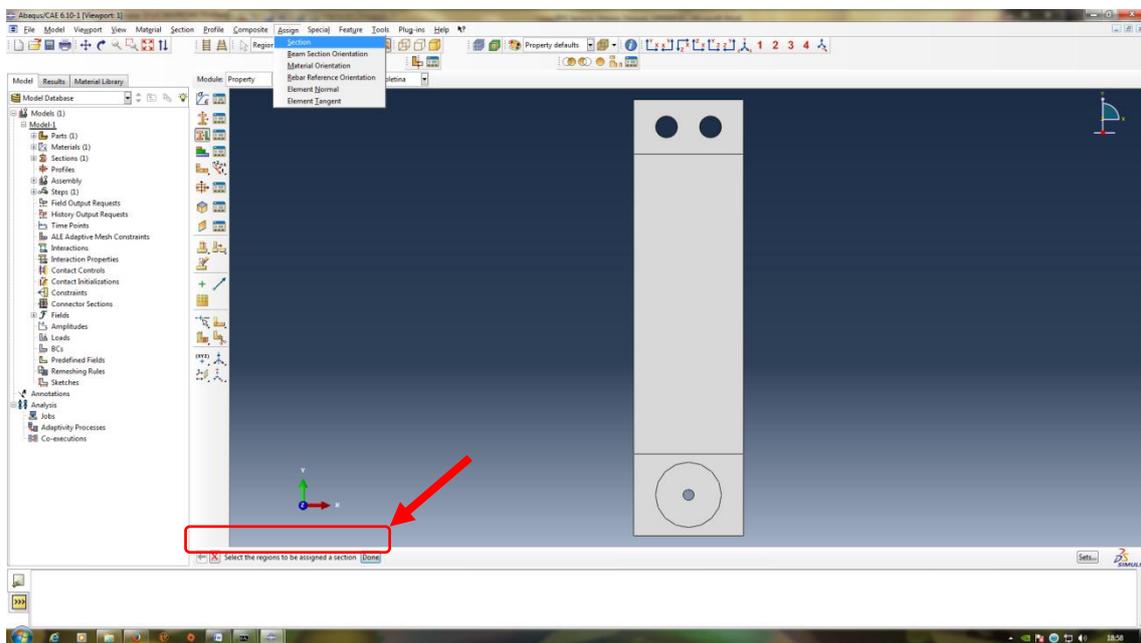


Figura 98 - Pantalla de visualización del módulo PROPERTY para la asignación de una sección

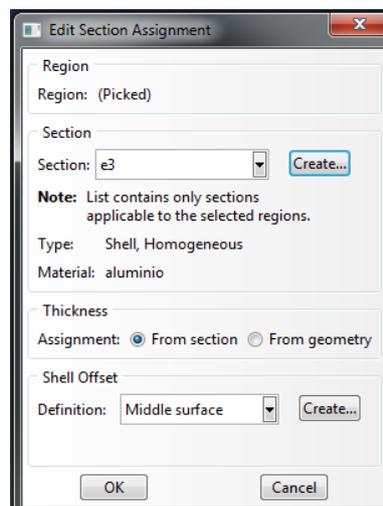


Figura 99 – Cuadro de diálogo para editar la asignación de secciones (módulo PROPERTY)

Antes de cambiar de módulo, es importante añadir que la pletina o “part” debe haber cambiado de color, así indica de forma visual que tiene una sección asignada y que, como pasaba con el módulo anterior, el módulo PROPERTY también permite la opción de modificar tanto los materiales creados como las secciones. Para ello del menú principal se debe seleccionar; en el primer caso: *Material* → *Manager*, y para el segundo caso: *Section* → *Manager*.

4.3.3 Módulo ASSEMBLY

En este módulo, como su nombre indica, es donde se ensamblan las distintas “parts” creadas en el módulo PART. El objetivo de este módulo es convertir la “part” en una “instance”. La ventaja de esta forma de trabajo es que se pueden crear tantas “instances” como piezas iguales tenga el modelo, a partir de una sola pieza o “part”. Para crear una “instance”, del menú principal se selecciona; *Instance* → *Create*, automáticamente aparece un cuadro de diálogo y el color de la pieza cambia a azul (véase figura 100).

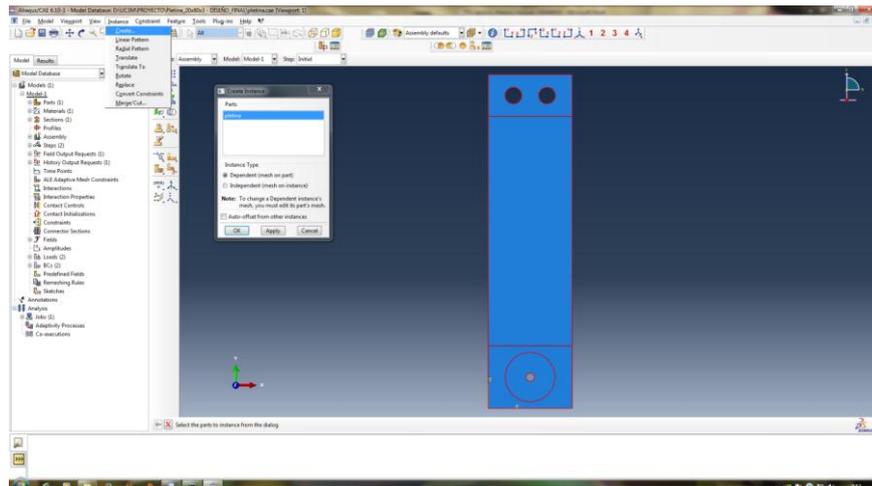


Figura 100 - Pantalla de visualización del módulo ASSEMBLY para crear una “instance”

El cuadro de diálogo da a escoger el tipo de instancia (“*Instance Type*”) que se quiere que tenga la “part”. Como se puede ver en la figura 101, hay dos opciones, dependiente o independiente.

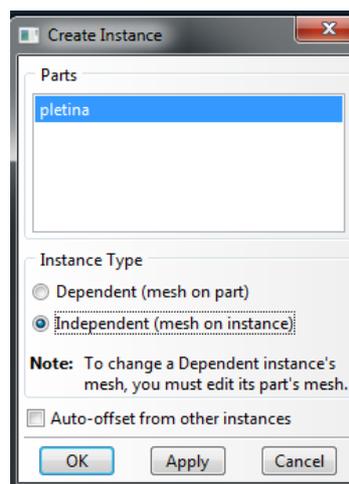


Figura 101 – Cuadro de diálogo para crear una “instance” (módulo ASSEMBLY)

Para la pletina de aluminio se selecciona; *Pletina* → *Independent* → *Ok*, esto se debe a que la “part” será particionada para que el análisis sea más realista (el concepto de partición se ve en la explicación del módulo LOAD). La diferencia es que, en caso de seleccionar dependiente el método de discretización por elementos finitos o mallado se

aplica a la “part” (el concepto de discretización por elementos finitos o mallado se ve más detenidamente en la explicación del módulo MESH), por lo que todas las “instances” creadas de esa “part” compartirán dicha discretización o mallado. Por el contrario, si se selecciona independiente, habrá que realizar el método de discretización por elementos finitos a cada “instance” creada.

4.3.4 Módulo STEP

En este módulo se define el tipo de análisis al que se va a someter la pletina de aluminio. Seleccionando del menú principal; *Step* → *Create* aparecerá el primer cuadro de diálogo para editar el “step” (véase figura 102).

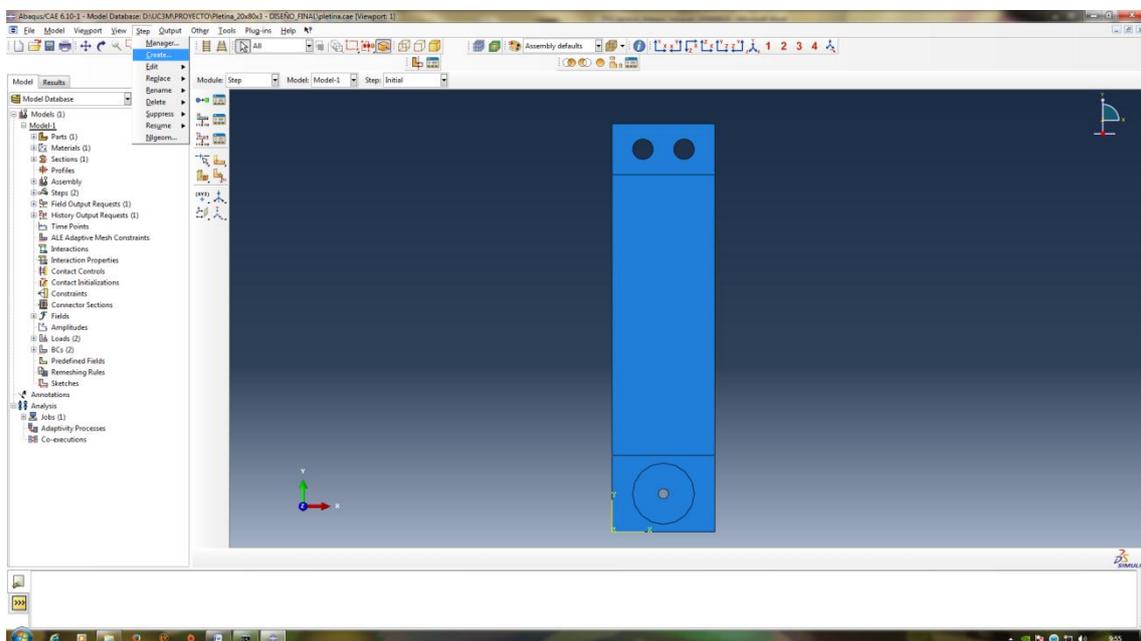


Figura 102 - Pantalla de visualización para crear un “step” (en el módulo STEP)

Del cuadro de diálogo I que aparece, figura 103, se rellenan los siguientes parámetros, lo primero es dar un nombre al “step”, en este caso *Carga_Dinámica*, a continuación se define el tipo de procedimiento; *Procedure type* → *General*. Luego se escoge el tipo de análisis, para el caso del a pletina de aluminio se selecciona *Dynamic, Implicit* → *Continue*.

Una vez seleccionado continuar aparece el segundo cuadro de diálogo, figura 104, para editar el “step”. Primero se selecciona la pestaña con el nombre *Basic*; *Time period* → *1* y en segundo lugar se selecciona la pestaña *Other*; *Default load variation with time* → *Ramp linearly over step* → *Ok*.

El módulo STEP también tiene un Manager de los “steps” creados donde se pueden modificar los parámetros de estos, en el menú principal; *Step* → *Manager*.

A continuación se va a explicar el módulo LOAD, pero hay que destacar que existe un módulo anterior, el módulo INTERACTION. Dicho módulo no se explica en este documento, ya que no ha sido empleado en el diseño de la pletina de aluminio. No obstante, el módulo INTERACTION es donde se definen las interacciones entre las distintas “parts” del modelo.

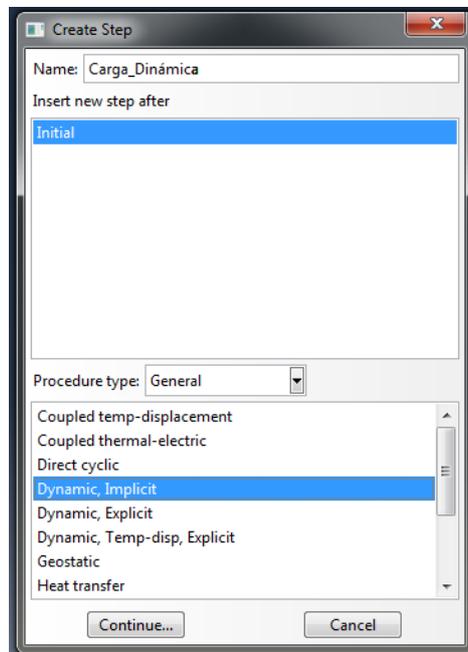


Figura 103 – Cuadro de diálogo I para crear un “step” (en el módulo STEP)

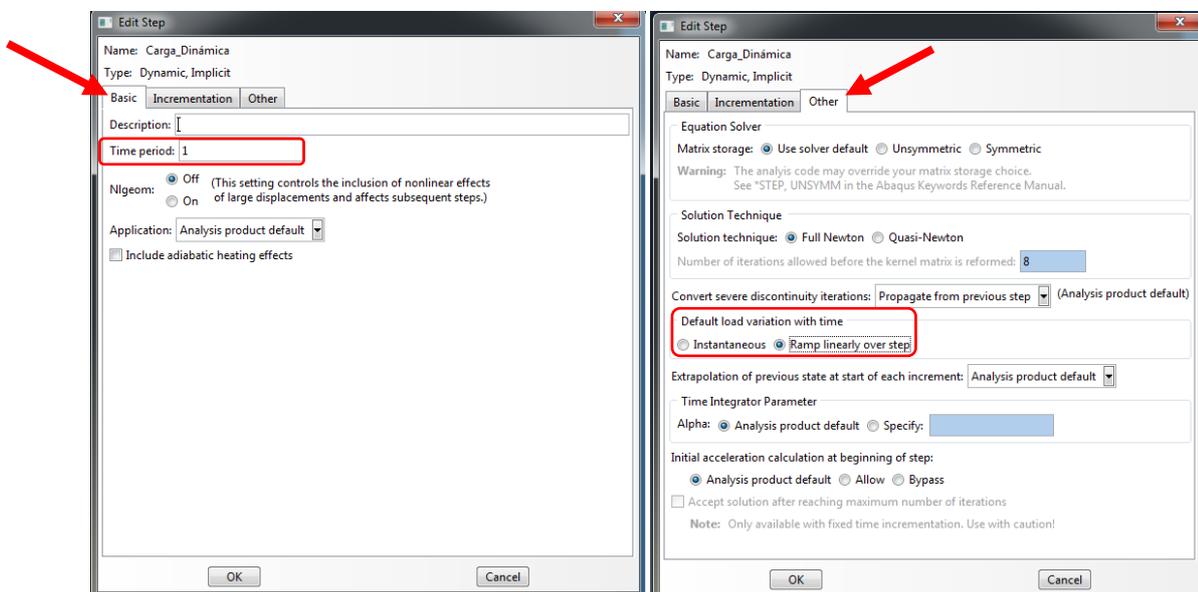


Figura 104 - Cuadro de diálogo II para crear un “step” (en el módulo STEP)

4.3.5 Módulo LOAD

El módulo LOAD, es el módulo encargado de definir las condiciones de contorno y las cargas presentes en la pletina de aluminio. Las cargas que actúan en la estructura son la fuerza de la gravedad y la fuerza que se quiere medir con el sensor. Por el contrario, las condiciones de contorno sirven para indicar al programa características de zonas, bordes o puntos de la pletina, en los cuales se deben cumplir ciertas condiciones, es decir, sirven para indicar que la velocidad en un punto es nula, que ciertas zonas de la pletina trabajan como apoyos, empotramientos, etc. Para trabajar en este módulo se debe seleccionar de la pestaña de selección de módulo el módulo LOAD.

En primer lugar se definen las condiciones de contorno seleccionando del menú principal; *BC* → *Create* (ver figura 105).

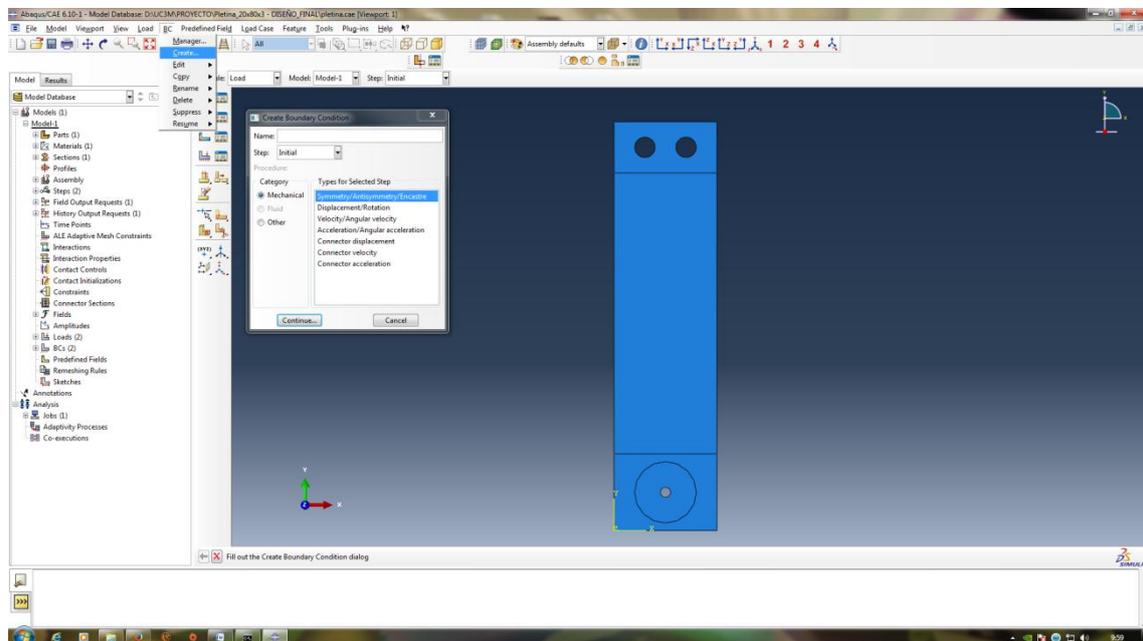


Figura 105 – Pantalla de visualización del módulo LOAD para crear una BC (condición de contorno)

Automáticamente aparece el cuadro de diálogo para crear las condiciones de contorno, figura 106. En primer lugar se indica el nombre de la condición de contorno; *Name* → *Apoyo*. En segundo lugar se indica el “step” donde se aplicará la condición de contorno; *Step* → *Carga_Dinámica*. El siguiente parámetro es la categoría (*Category*), la cual permite escoger entre mecánica y otras (potencial eléctrico, presión acústica, etc.). Para la pletina de aluminio solo se definen las condiciones de contorno mecánicas, por lo que, se selecciona; *Category* → *Mechanical* → *Symmetry/Antisymmetry/Encastre* → *Continue*. Se escoge la primera opción porque es donde se definen los apoyos y los anclajes de la pletina de aluminio.

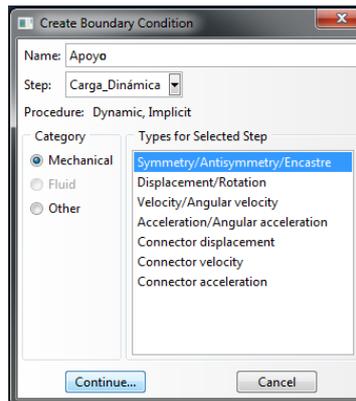


Figura 106 – Cuadro de diálogo para crear condiciones de contorno (en el módulo LOAD)

Cuando se cierra el cuadro de diálogo (después de seleccionar *Continue*), el programa pide al usuario que seleccione la región para la condición de contorno (*Select regions for the boundary condition*), se selecciona la región y se pincha en “Done” (véase figura 107).

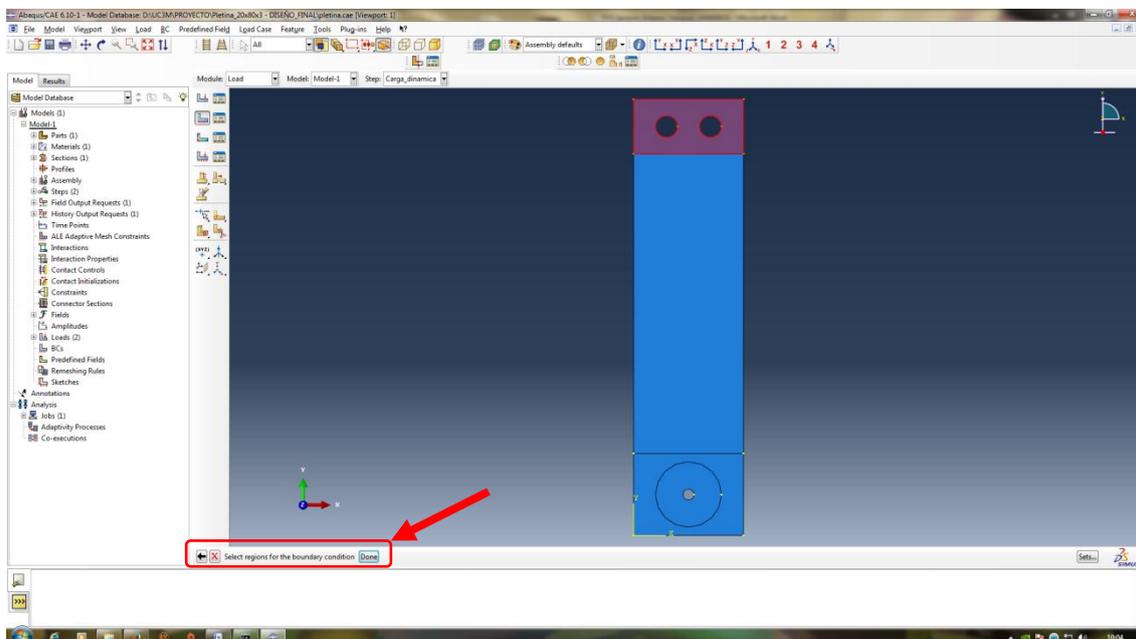


Figura 107 – Pantalla de visualización para definir regiones para condiciones de contorno (en el módulo LOAD)

En el siguiente cuadro de diálogo, figura 108, se determina el tipo de condición de contorno, la región seleccionada va a tener las características de un apoyo simple, es decir no se puede desplazar en ninguno de los ejes. Para determinar esta característica en el programa se selecciona; *PINNED* → *Ok*.

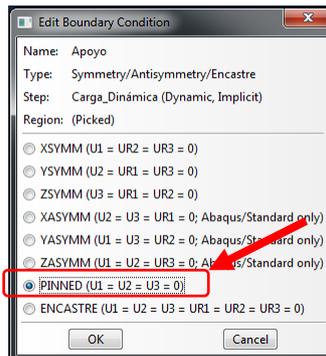


Figura 108 – Cuadro de diálogo para editar el tipo de condición de contorno (en el módulo LOAD)

La siguiente condición de contorno se define prácticamente de la misma forma que la anterior, salvo algunos aspectos. Antes de comentar los aspectos es importante destacar que, en las tres circunferencias de la región de la condición anterior, es donde se realizará el anclaje del sensor de fuerza, mediante tres tornillos, por lo que, se impedirá el desplazamiento en todos los ejes y los giros.

La primera diferencia con respecto al caso anterior es el nombre, en este caso se llama Anclaje. El segundo aspecto es la selección de la región en la que se define la condición de contorno, como se ha mencionado son las tres circunferencias, para seleccionarlas se pincha en el perímetro de una circunferencia, a continuación, mientras se mantiene pulsada la tecla de mayúsculas del teclado, se seleccionan las otras dos circunferencias, finalmente se selecciona “Done”. El último aspecto a tener en cuenta es el tipo de condición de contorno, como las circunferencias no se van a desplazar ni a girar, se puede decir que se comportarán como un empotramiento, por ello, del cuadro de diálogo de selección del tipo de condición de contorno, se selecciona; *ENCASTRE* → *Ok*. En la figura siguiente, figura 109, se muestra como quedan definidas las condiciones de contorno en la pletina. Esta figura también muestra como realizar el paso siguiente, crear las fuerzas que actúan en la placa, seleccionando del menú principal; *Load* → *Create*.

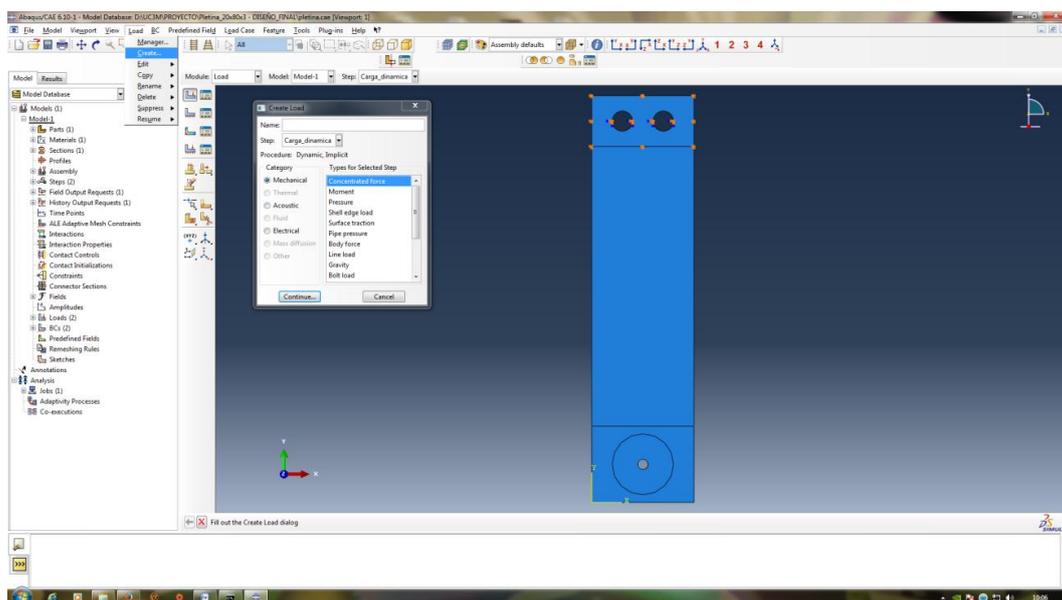


Figura 109 – Pantalla de visualización para crear “loads” (en el módulo LOAD)

La primera fuerza o “load” que se define es la gravedad. En el cuadro de diálogo I, figura 110, se define el nombre; *Name* → *Gravedad*; lo siguiente es escoger el “step”; *Step* → *Carga_Dinámica*. El último parámetro que se escoge antes de continuar es la categoría de la fuerza y el tipo de ésta. Al igual que en las condiciones de contorno, ofrece distintas categorías. Para la pletina de aluminio se selecciona; *Category* → *Mechanical* → *Gravity* → *Continue*.

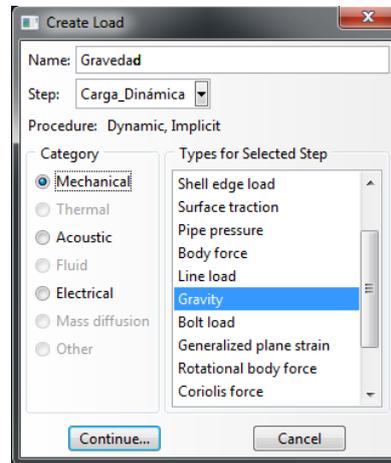


Figura 110 – Cuadro de diálogo I para crear la fuerza de gravedad (módulo LOAD)

Al continuar aparece un segundo cuadro de diálogo, figura 111. En primer lugar se edita la región (*Edit Region*), como la fuerza que se está definiendo es la gravedad, afectará a toda la pletina, por lo que se debe seleccionar toda la pletina

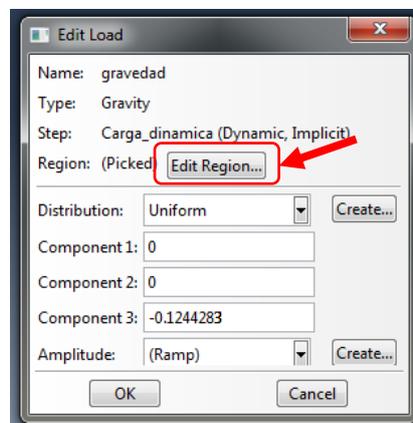


Figura 111 - Cuadro de diálogo II para editar la fuerza de gravedad (módulo LOAD)

En segundo lugar se deben introducir los valores de la fuerza en sus respectivas componentes. En el caso de la pletina, su disposición física real será paralela al suelo, esto implica que la gravedad solo tiene la componente Z, luego es la única componente que se rellena. Para obtener el valor de la fuerza que genera la gravedad sobre la pletina de aluminio se hace lo siguiente:

$$F = m \cdot g$$

$$d = \frac{m}{V} \Rightarrow m = d \cdot V$$

Siendo: $d = 2690 \text{ Kg}/\text{m}^3$ y $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$

En primer lugar se calcula el volumen de la pletina de aluminio:

$$V_{PLETINA} = V_{PLETINA \text{ ENTERA}} - (2 \cdot V_{CILINDRO \text{ GRANDE}} + V_{CILINDRO \text{ PEQUEÑO}})$$

$$V_{PLETINA \text{ ENTERA}} = l^3 = 2 \cdot 10^{-2} \times 8 \cdot 10^{-2} \times 3 \cdot 10^{-3} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{CILINDRO \text{ GRANDE}} = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 3,76991 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V_{CILINDRO \text{ PEQUEÑO}} = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 9,424778 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$V_{PLETINA} = 4,8 \cdot 10^{-6} - (2 \cdot 3,76991 \cdot 10^{-8} + 9,424778 \cdot 10^{-9}) = 4,715177 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Luego, la masa de la pletina será:

$$m = d \cdot V = 2690 \cdot 4,715177 \cdot 10^{-6} = 0,01268383 \text{ Kg}$$

Por último se calcula el valor de la fuerza:

$$F = m \cdot g = 0,01268383 \cdot 9,81 \Rightarrow F = 0,1244283 \text{ (N)}$$

Cabe destacar que la gravedad tiene signo negativo, ya que, va en sentido opuesto a la componente Z del eje de coordenadas del programa.

La segunda fuerza que se va a crear se corresponde con la fuerza máxima que puede medir el sensor de fuerza. Se escoge dicha fuerza, ya que, el objetivo de usar el programa ABAQUS es garantizar que la pletina sufrirá deformaciones dentro de la zona elástica, es decir, que el valor de la tensión que genera dicha fuerza no supere el valor del límite elástico de la pletina de aluminio. El procedimiento para crear esta fuerza es parecido al anterior. Del menú principal; *Load* → *Create*. En el cuadro de diálogo I, se define el nombre; *Name* → *Fuerza_max*; se escoge el “step”; *Step* → *Carga_Dinámica*. Por último se escoge *Category* → *Mechanical* → *Surface traction* → *Continue*. Como en el caso anterior, aparece un mensaje al usuario en el que pide que se seleccione la región donde va a actuar dicha fuerza, se selecciona la región y se clikea en “Done” (véase figura 112).

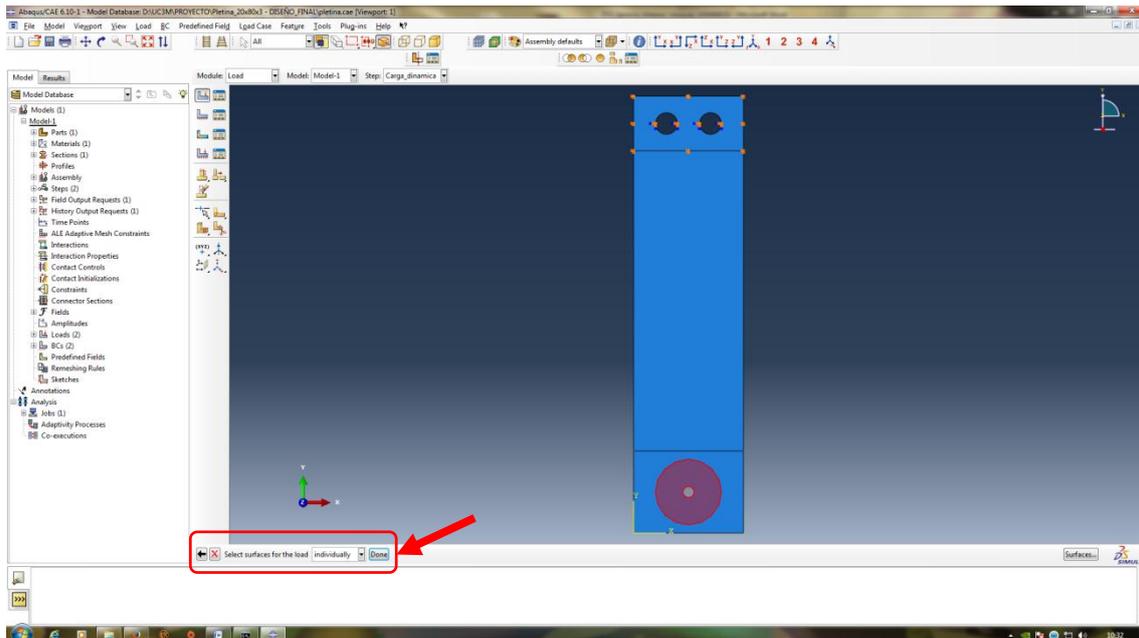


Figura 112 - Pantalla de visualización para definir la región de actuación de la fuerza a controlar por el sensor (en el módulo LOAD)

A continuación aparece otro mensaje al usuario en el que pide que se escoja un lado para la cara interna, se selecciona “Brown”. Al seleccionar la pestaña de “Brown” aparece el cuadro de diálogo II para editar la fuerza máxima, figura 113. En el cual se definen los siguientes parámetros; *Distribution* → *Uniform*; *Traction* → *General*; *Amplitude* → *(Ramp)*; *Traction is defined per unit* → *deformed area*. En cuanto a la dirección del vector, se cliquea en “Edit” y a continuación aparece un mensaje al usuario pidiendo el primer punto del vector, se escoge; 0.0, 0.0, 0.0 se da a la tecla de entrar del teclado y, acto seguido vuelve a aparecer otro mensaje pidiendo el segundo punto, en este caso se introduce; 0.0, 0.0, -1. El último parámetro a introducir es el valor de la fuerza máxima, como se trata de una fuerza en una superficie se puede hablar de tensión. Los cálculos realizados son los siguientes:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{56 (N)}{\pi \cdot (r_{grande}^2 - r_{pequeño}^2)} = \frac{56 (N)}{\pi \cdot ((6 \cdot 10^{-3})^2 - (1 \cdot 10^{-3})^2)} = \frac{56 (N)}{1,099557 \cdot 10^{-3} (m^2)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sigma = 509295,8179 (Pa) \sim 510000 (Pa)$$

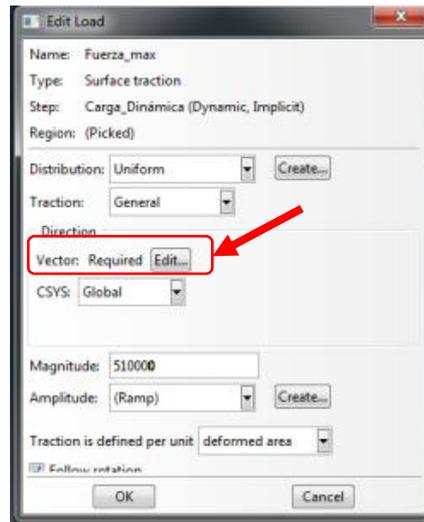


Figura 113 – Cuadro de diálogo II para editar la fuerza máxima (módulo LOAD)

En la figura 114 se muestra una representación de la pletina de aluminio con las condiciones de contorno representadas en naranja, la fuerza que genera la gravedad representada con vectores amarillos y la fuerza máxima que mide el sensor representada con vectores morados.

Es importante mencionar que al igual que los módulos anteriores, en el módulo LOAD se puede acceder a un listado de todas las condiciones de contorno y fuerzas creadas, desde el cual se pueden modificar los parámetros de dichas condiciones y fuerzas. Para acceder al listado de condiciones de contorno se selecciona del menú principal; *BC* → *Manager* y para las fuerzas; *Load* → *Manager*.

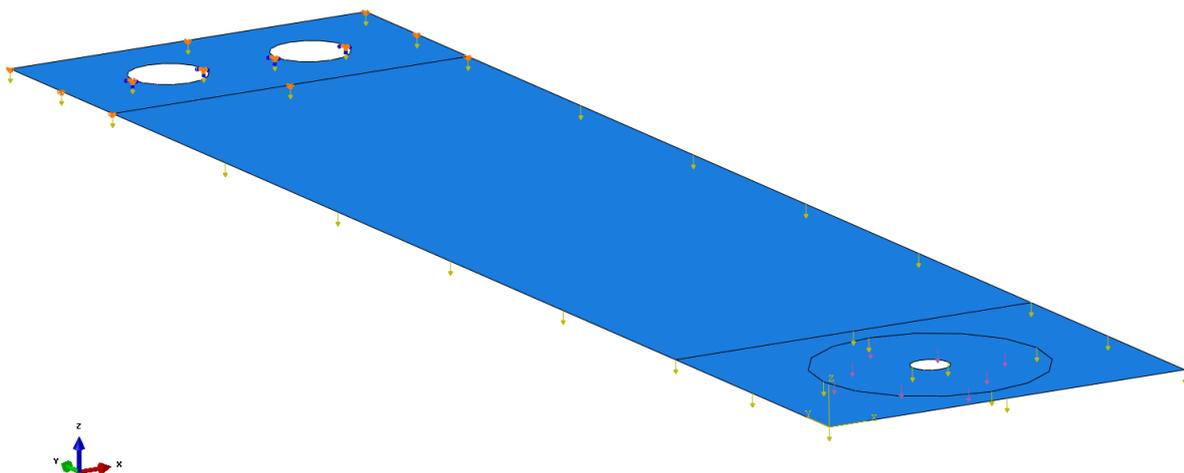


Figura 114 – Representación de las condiciones de contorno y las fuerzas aplicadas sobre la pletina

4.3.6 Módulo MESH

Como se mencionó anteriormente, en el módulo MESH es donde se aplica el método de elementos finitos o se realiza el mallado del modelo. Es muy importante tener en cuenta que el modelo que se define en ABAQUS de la realidad, es un modelo discreto, y por el contrario, la realidad es continua. Esto implica que para un análisis correcto mediante elementos finitos, el número de elementos empleados en la discretización para obtener una solución con buena precisión debería ser muy elevado (del orden de centenas de miles o incluso millones, dependiendo de la necesidad de precisión que se requiera). El inconveniente que plantea esto, es la manipulación de esa cantidad de información, por lo que se hace imprescindible el uso de ordenadores muy potentes. Cuando no se dispone de los medios adecuados para poder realizar mallados con tantos elementos, es necesario realizar un estudio de sensibilidad del mallado. De esta forma se obtiene un mallado adecuado, es decir, un mallado realizado con el mínimo número de elementos que permiten obtener una solución precisa. Para realizar el mallado es necesario haber explicado los módulos que faltan, por lo que, el estudio de sensibilidad de la malla se realizará al final de la explicación de todos los módulos.

Lo primero que hay que hacer es, en la pantalla de visualización del módulo MESH, figura 115, seleccionar el tipo de objeto donde se va a realizar el mallado. Para esto hay que tener en cuenta el tipo de “instance” que se creó en el módulo ASSEMBLY. Si la “instance” es dependiente se trabajaría con el objeto “Part”, mientras que, si la “instance” es independiente el objeto de trabajo es “Assembly”. Para la pletina de aluminio la “instance” es independiente.

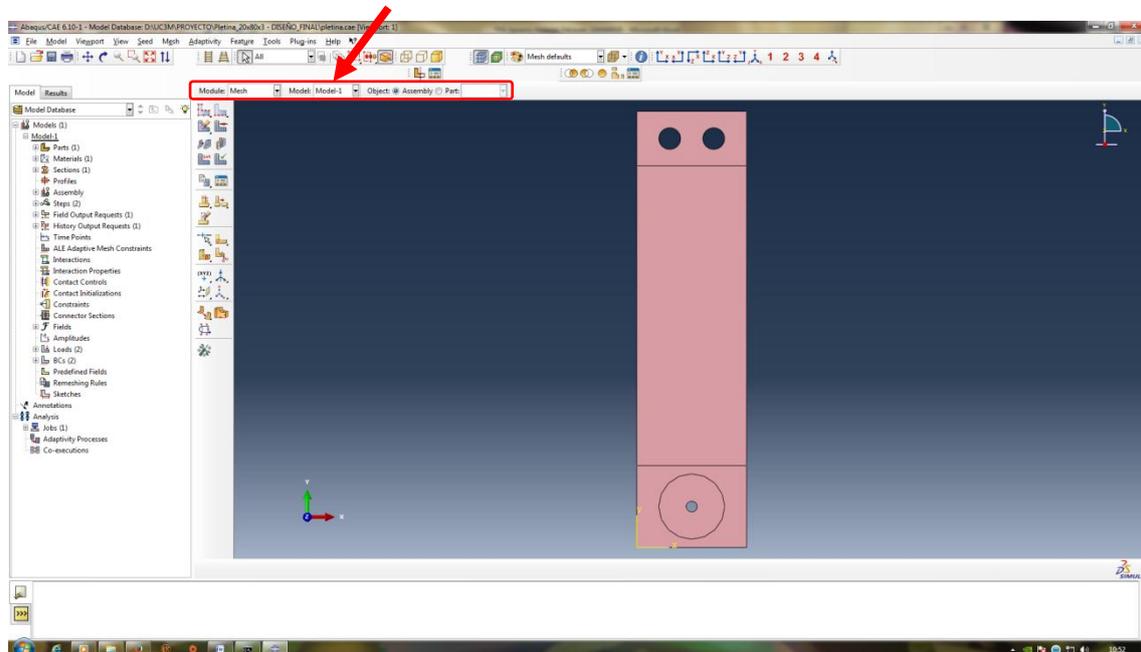


Figura 115 – Pantalla de visualización del módulo MESH

Una vez seleccionado el objeto de trabajo, hay que definir el formato de los elementos del mallado para cada partición. Seleccionando del menú principal; *Mesh* → *Controls*, posteriormente en la zona de mensajes al usuario pide que se seleccione una región, en

el caso de la figura 116 se ha seleccionado la zona central de la pletina de aluminio (rectángulo rojo). Cuando se ha seleccionado la región, en la zona de mensajes al usuario se cliquee en “Done”.

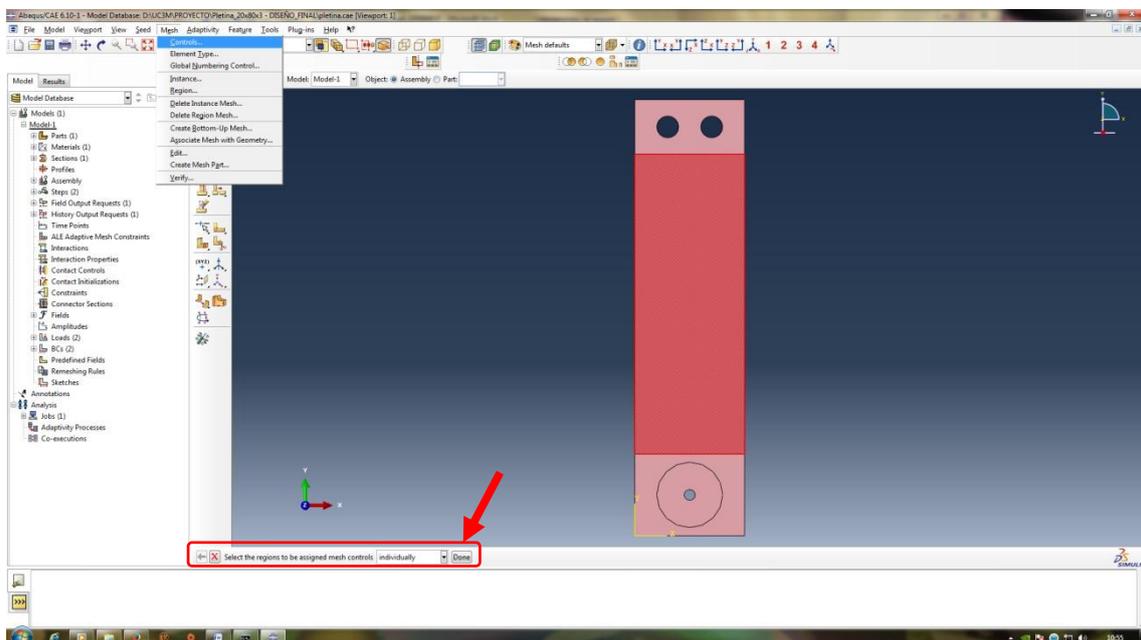


Figura 116 – Pantalla de visualización del módulo MESH para definir el formato de los elementos del mallado

Automáticamente aparece un cuadro de diálogo, figura 117, en el cual se definen dichos elementos. El primer parámetro a definir es la forma del elemento del mallado, el programa permite tres tipos de formas, la primera es “Quad”, esta forma utiliza elementos rectangulares para definir el mallado. La segunda es “Quad-dominated”, con esta forma la mayoría de los elementos son rectangulares pero si existen zonas complejas emplea elementos triangulares. Por último, la tercera forma es “Tri”, con esta opción los elementos del mallado son triangulares. Como la región seleccionada es un rectángulo sin formas complejas se selecciona; *Element Shape* → *Quad*.

El segundo parámetro a definir es la técnica que va a emplear el programa para realizar el mallado. Permite escoger entre tres opciones, “Free”, es una técnica. “Structured”, es una técnica estructurada y la última es “Sweep”, es una técnica orientada. De manera que se selecciona; *Technique* → *Structured*.

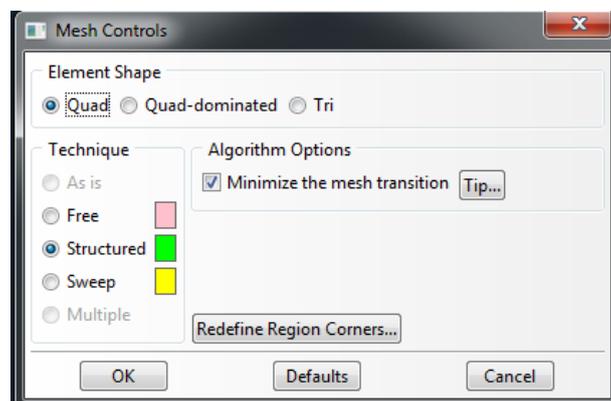


Figura 117 – Cuadro de diálogo para definir el formato de los elementos del mallado (módulo MESH)

La selección de los elemento del mallado en el resto de regiones de la pletina de aluminio, se realiza de la misma forma que la explicada para la región central rectangular de dicha pletina. Por lo que, se selecciona del menú principal; *Mesh* → *Controls*, se selecciona la región, se clikea en “Done” y aparece el cuadro de diálogo de la figura 107. En las regiones que quedan por definir, a diferencia de la anterior, no permiten escoger la técnica del mallado, como se puede ver en la figura 118, la opción por defecto es “Free”. Por lo que, el único parámetro que se puede definir es la forma de los elementos, y como las regiones tienen todas formas circulares, se selecciona: *Element Shape* → *Quad-dominated*. La opción del algoritmo (“Algorithm”), no se a modificado en ninguno de los casos, es decir, se ha dejado la opción por defecto del programa.

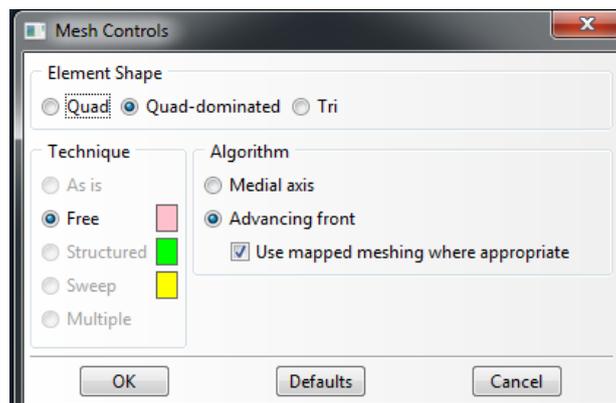


Figura 118 - Cuadro de diálogo para definir el formato de los elementos del mallado (módulo MESH)

El siguiente paso es definir el tipo de elemento, para ello del menú principal se selecciona; *Mesh* → *Element Type*, en la zona de mensajes al usuario pide que se seleccione la región donde se van a definir el tipo de elementos, al seleccionar la región central de la pletina de aluminio, dicha región queda coloreada (véase figura 119), a continuación se clikea en “Done”.

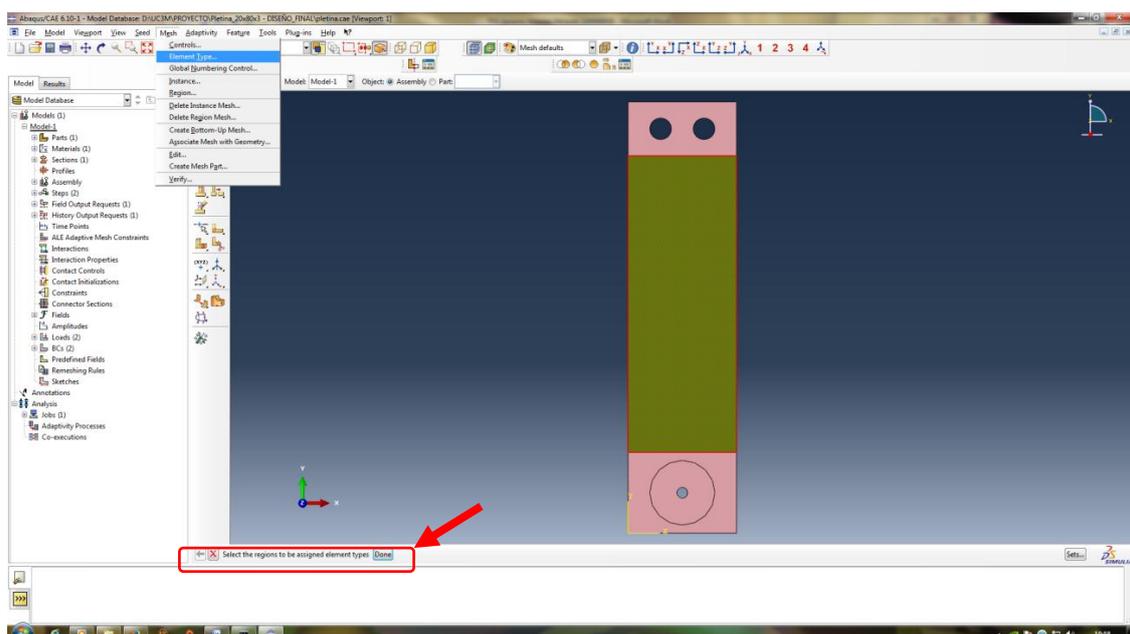


Figura 119 - Pantalla de visualización del módulo MESH para definir el tipo de los elementos del mallado

Al seleccionar “Done” aparece un cuadro de diálogo donde se definen el tipo de elementos, figura 120. En primer lugar hay que escoger el elemento de biblioteca (“Element Library”), el programa ABAQUS permite escoger entre dos opciones para realizar el procesamiento o solución del modelo, la primera es el procesador ABAQUS/Standard y la segunda el procesador ABAQUS/Explicit.

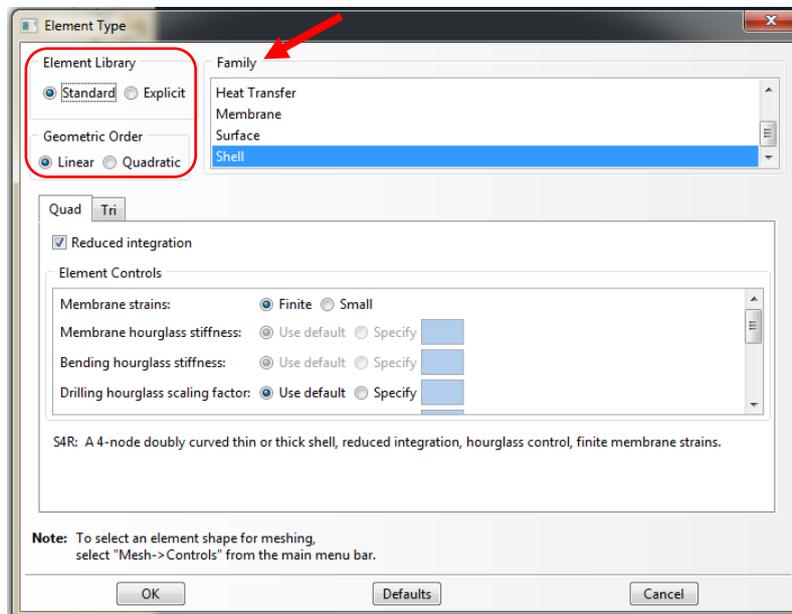


Figura 120 – Cuadro de diálogo para definir el tipo de elemento del mallado (módulo MESH)

La primera opción es un método numérico implícito y se emplea normalmente en problemas con condiciones estáticas, mientras que, la segunda opción, es un método numérico explícito y se emplea habitualmente a problemas con condiciones dinámicas. Para la elección del método hay que tener claro qué tipo de análisis se escogió cuando se creó el “step”. En el caso de la pletina de aluminio se escogió un análisis dinámico implícito, por lo que cabría esperar que se escogiese la opción de ABAQUS/Explicit. Por el contrario, la opción seleccionada es la primera, ya que, según el manual de usuario del Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes en un análisis dinámico implícito se selecciona la opción de ABAQUS/Standard [24]. De modo que se selecciona; *Element Library* → *Standard*. El siguiente parámetro a definir es el orden de la geometría; *Geometric Order* → *Linear*. Por último se escoge la familia del elemento; *Family* → *Shell*. El resto de parámetros se dejan con la configuración por defecto de ABAQUS.

Una vez definidos todos los parámetros de los elementos del mallado, se debe determinar el número de elementos que se va utilizar para discretizar la pletina de aluminio. En el menú principal se selecciona; *Seed* → *Instance* (véase figura 121).

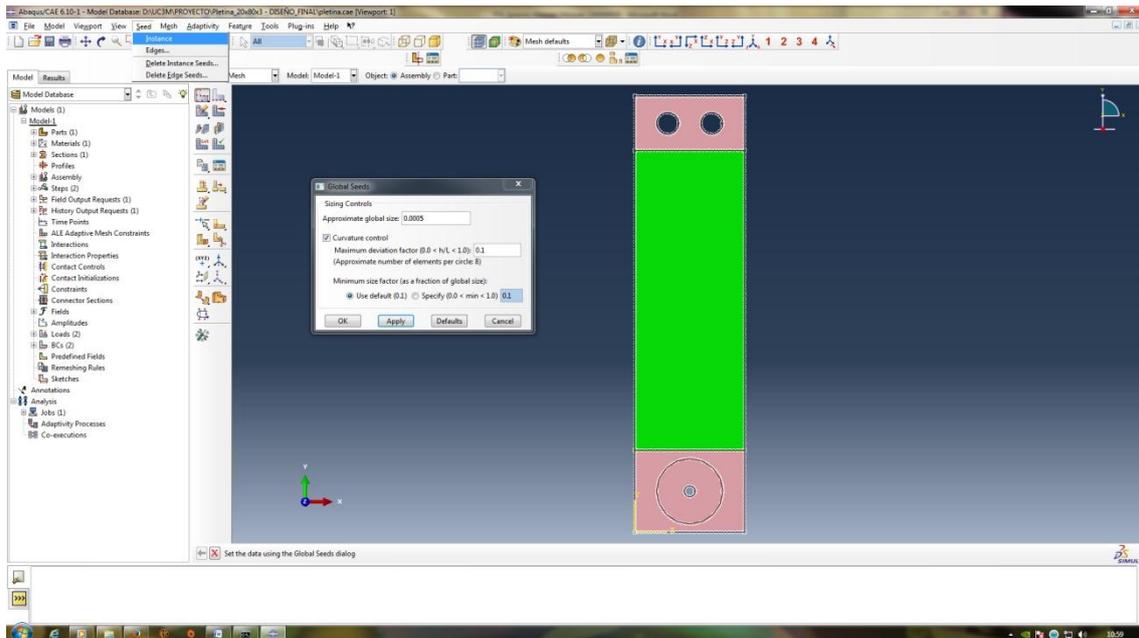


Figura 121 – Pantalla de visualización para definir número de elementos de la discretización (módulo MESH)

Cabe destacar que es posible elegir otra opción para definir el número de elementos, debajo de “Instance” se puede ver la opción denominada “Edges”. Con esta opción lo que se hace es definir el número de elementos en los ejes de la placa, permitiendo poder realizar un mallado en zonas concretas. El número de elementos se puede definir mediante el tamaño de los elementos o mediante el número de éstos.

En el cuadro de diálogo que aparece, figura 122, se define el tamaño aproximado para ello se introduce en; *Approximate global size* → 0.0005 → Ok. Introduciendo este valor, lo que se hace es que, cada 0’0005 milímetros de distancia en cada eje habrá un nodo. Por ejemplo el rectángulo central tiene unas dimensiones de 30x45 milímetros, por lo que habrá un nodo cada 0’0005 milímetros, o lo que es lo mismo, el mallado está compuesto por 60x90 elementos. Es importante añadir que esto no sucede en las otras regiones, debido a la presencia de formas circulares, por eso el parámetro se denomina tamaño general aproximado. El resto de parámetros se dejan con sus valores por defecto.

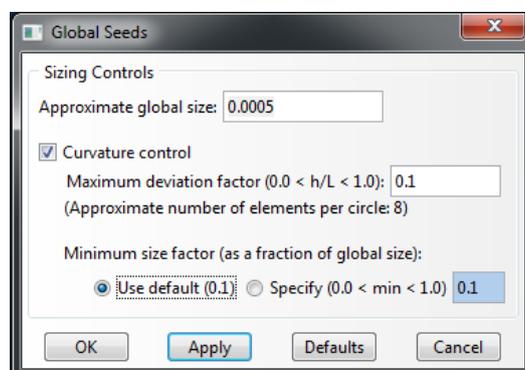


Figura 122 – Cuadro de diálogo para determinar el tamaño de los elementos del mallado (módulo MESH)

El siguiente y último paso, figura 123, es donde se realiza el mallado, para lo cual hay que seleccionar del menú principal; *Mesh* → *Instance*, automáticamente aparece un mensaje al usuario en el que pregunta si se está de acuerdo en realizar el mallado en la “instance” de la “part”, se selecciona “Yes” y el programa realiza el mallado de la pletina de aluminio.

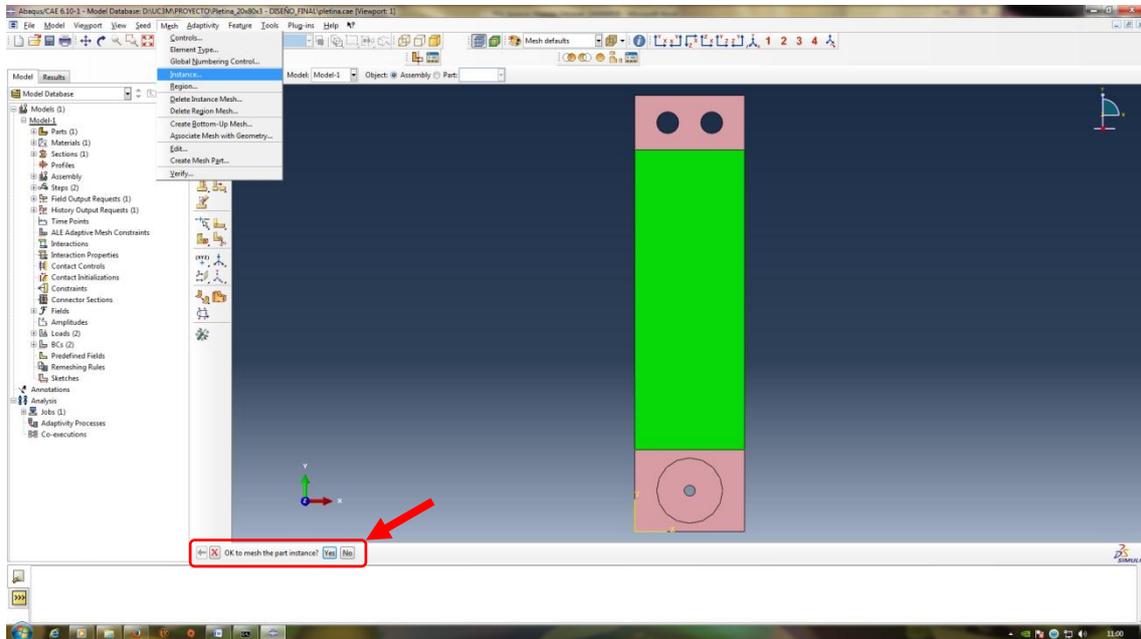


Figura 123 – Pantalla de visualización para realizar el mallado de la “instance” (módulo MESH)

En la siguiente figura, figura 124, se muestra la pantalla de visualización con el mallado de la pletina de aluminio. En el área de mensajes, aparece un mensaje indicando el número de elementos que componen dicho mallado. En este caso el mallado está compuesto por 6666 elementos.

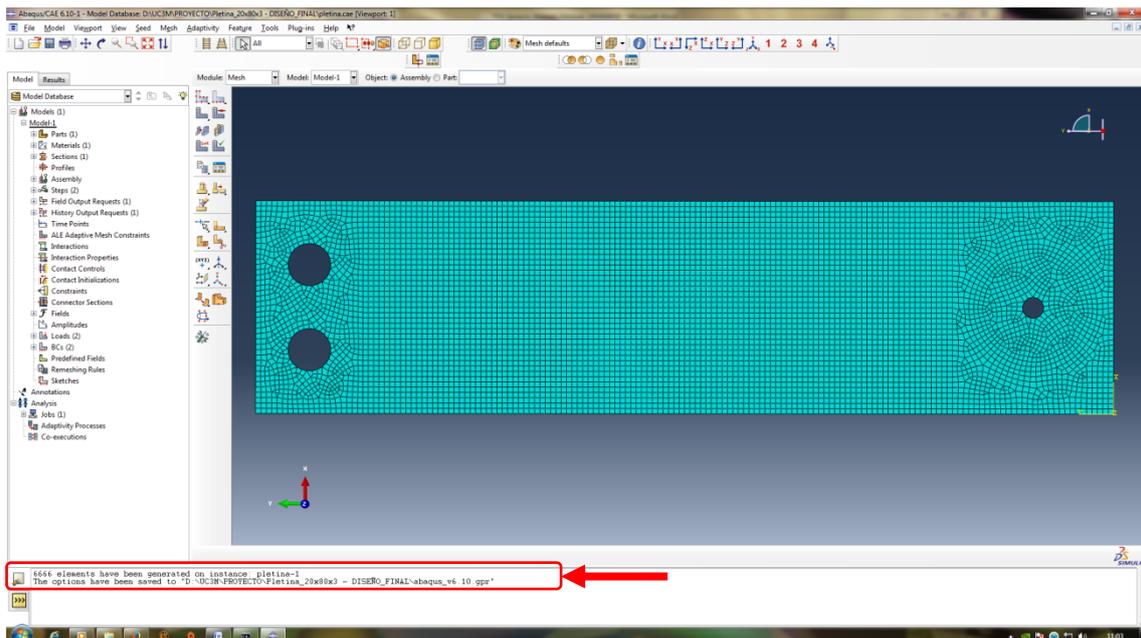


Figura 124 – Pantalla de visualización con el mallado de la pletina de aluminio (módulo MESH)

4.3.7 Módulo JOB

Como ya se dijo anteriormente, los programas comerciales que se basan en el método de elementos finitos, se pueden dividir en tres fases: pre-proceso, proceso y post-proceso. El módulo JOB es el último módulo de la primera fase, pre-proceso (los módulos anteriores sirven para definir el modelo), y es el encargado de relacionar dicha fase con las otras dos fases, proceso y post-proceso. También es encarga de generar las ecuaciones que se resolverán mediante el método de elementos finitos.

La relación entre la primera fase con las otras dos fases, se realiza a través de una serie de archivos que se generan en este módulo. Antes de empezar a trabajar en el módulo JOB, es recomendable crear una carpeta de trabajo donde se generarán dichos archivos.

El primer paso es crear la mencionada carpeta de trabajo, para ello se selecciona del menú principal; *File* → *Set work directory*, se abre una ventana desde la cual se determina la ruta de la carpeta de trabajo. En este proyecto, dicha carpeta de trabajo se ha creado dentro de la carpeta donde se guarda el archivo con extensión *.cae*.

Una vez creada la carpeta de trabajo, se empiezan a generar los archivos mencionados arriba. Para generar los archivos hay que crear un caso de trabajo, figura 125, en el menú principal se selecciona; *Job* → *Create*, automáticamente aparece un cuadro de diálogo para crear el “job”.

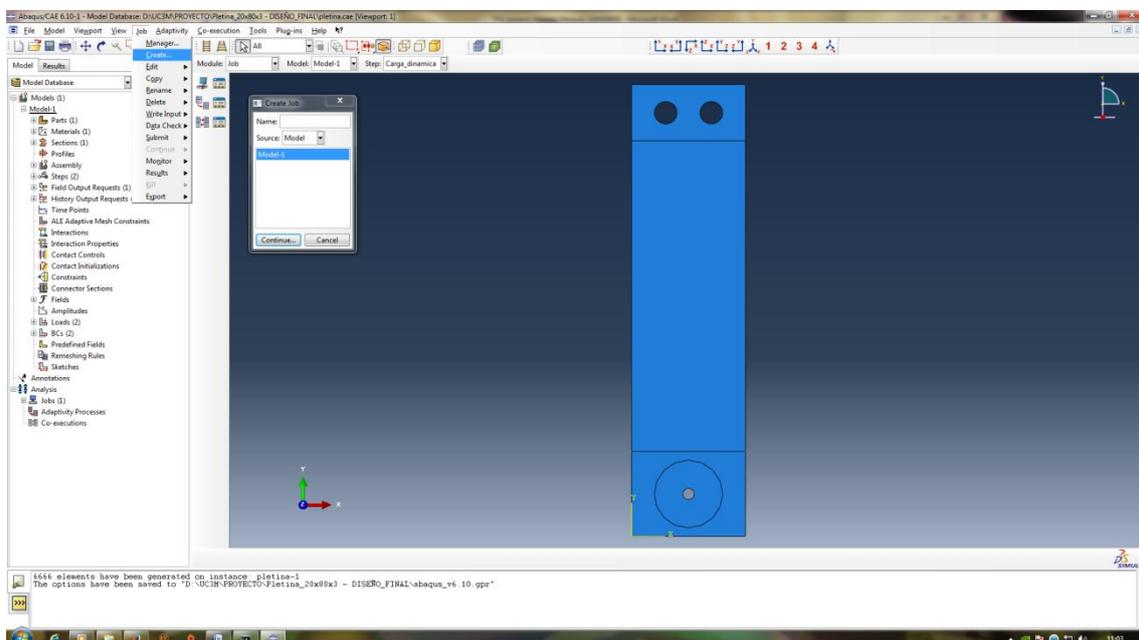


Figura 125 – Pantalla de visualización para crear el “job” en el módulo JOB

En el cuadro de diálogo I, figura 126, el único parámetro que se determina es el nombre del “job”, en este caso; *Name* → *e3* → *Continue*. Se define al “job” con este nombre, debido a que, durante el diseño de la pletina fue necesario probar con distintos grosores de placa (una vez determinada la geometría final), por lo que, en el módulo PROPERTY se definieron distintas secciones (“sections”). Para poder realizar las distintas

simulaciones en función de sus espesores o secciones, fue necesario crear un “job” por cada sección definida. La forma de trabajo fue la siguiente, una vez realizado el modelo, se vuelve al módulo PROPERTY y se define una nueva sección, se asigna esa sección al material y a la pletina (como se explica en el apartado del módulo PROPERTY). A continuación se va al módulo JOB y se crea un caso de trabajo para esa sección determinada, de esta manera cuando se realiza la simulación de este “job” se sabe a qué sección corresponde.

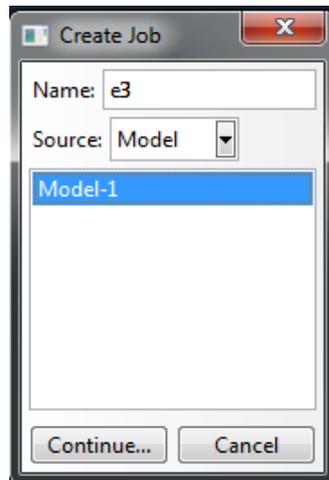


Figura 126 – Cuadro de diálogo I para crear el “job” (módulo JOB)

Al seleccionar la pestaña de “Continue” aparece un segundo cuadro de diálogo (figura 127) en el que no se varían los parámetros, es decir, se dejan las opciones por defecto del programa y se clikea en “Ok”.

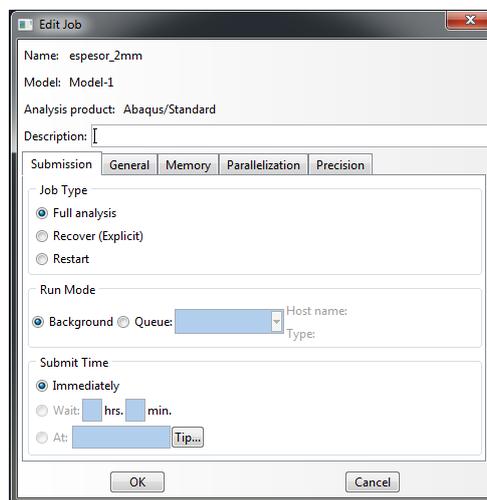


Figura 127 - Cuadro de diálogo II para crear el “job” (módulo JOB)

Cuando ya está creado el caso de trabajo, es decir, el “job”, se debe entregar (“Submit”) dicho caso al procesador (para la pletina es el procesador de ABAQUS/Standard) para que resuelva el problema mediante el método de elementos finitos.

Para entregar el caso de trabajo al procesador, figura 128, se selecciona del menú principal; *Job* → *Submit* → *e3*.

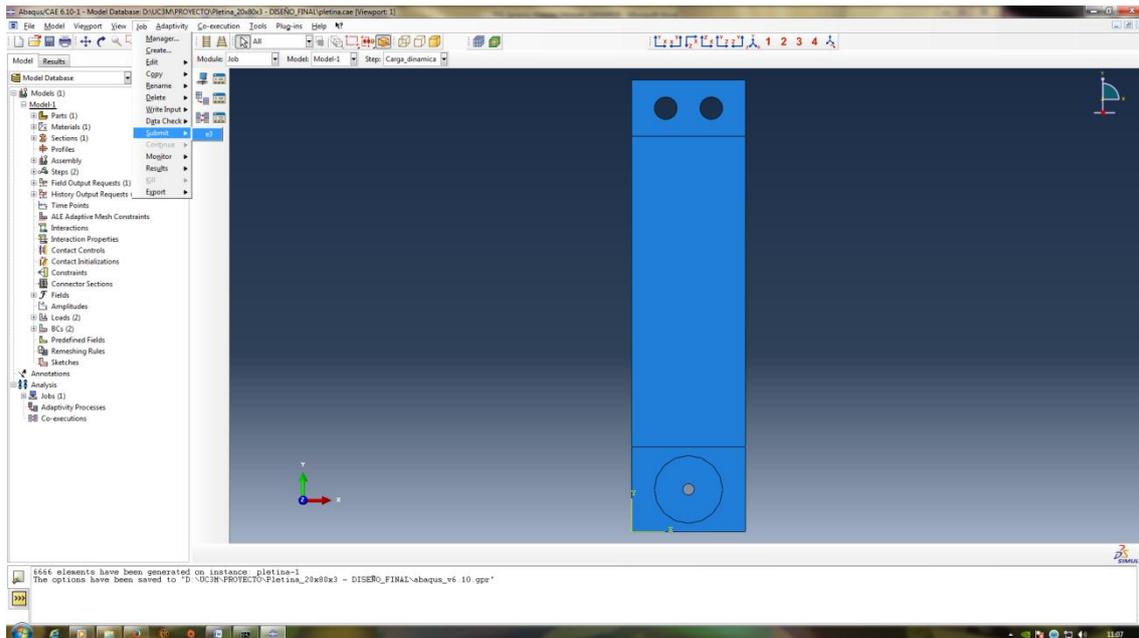


Figura 128 – Pantalla de visualización para entregar el “job” al procesador de ABAQUS

En el momento en el que se entrega el caso, el programa genera una serie de mensajes en los que informa al usuario del proceso. En el área de mensajes, figura 129, se puede observar que el primer mensaje (“The job input file "e3.inp" has been submitted for analysis”) informa de que el “job” ha sido entregado para el análisis. El segundo mensaje (“Job e3: Analysis Input File Processor completed successfully”) indica que se ha creado el archivo de entrada del procesador. El tercer mensaje (“Job e3: Abaqus/Standard completed successfully”) indica que el procesador ha recibido el archivo de entrada y lo está procesando. Por último, el cuarto mensaje (“Job e3 completed successfully”) indica que el proceso se ha completado exitosamente. Como ya se explicó anteriormente, la resolución del problema por el método de elementos finitos se realiza en la segunda fase, denominada procesamiento o solución. En esta fase el procesador del programa (en el caso de la pletina ABAQUS/Standard) resuelve las ecuaciones aplicando el método mencionado. Para ver los pasos que ha seguido el procesador en la resolución del problema se puede abrir el monitor correspondiente al caso de trabajo entregado, para ello se selecciona del menú principal; *Job* → *Monitor* → → *e3*. El programa abre una ventana en la que se muestra el monitor para el caso de trabajo de e3 (véase figura 130).

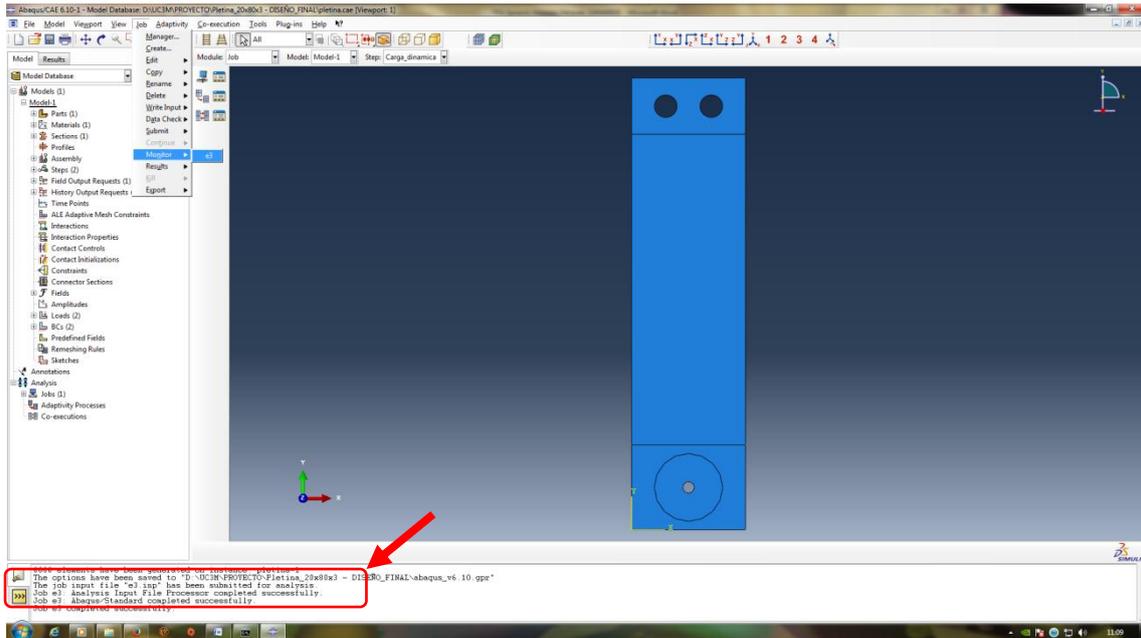


Figura 129 – Pantalla de visualización para abrir monitor y ver los mensajes del proceso (módulo JOB)

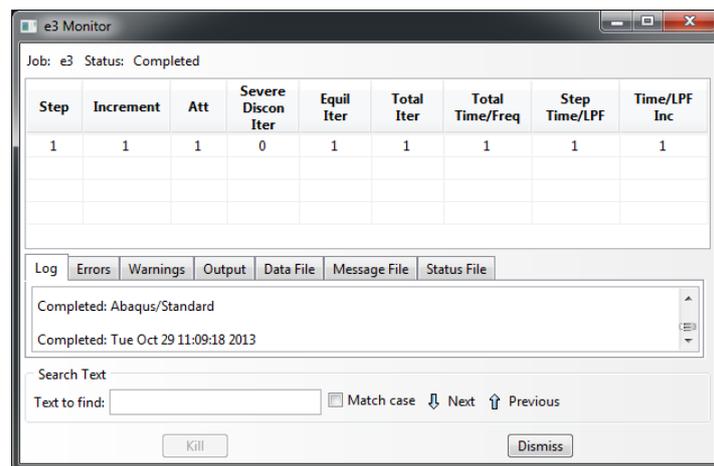


Figura 130 – Monitor del “job” entregado al procesador ABAQUS/Standard (módulo JOB)

4.3.8 Módulo VISUALIZATION

El último módulo, el módulo VISUALIZATION, es en el que se muestran las distintas simulaciones realizadas por el programa. Como pasaba en el módulo JOB, también hay que indicar el caso de trabajo que queremos simular en este módulo, el cual debe coincidir con el entregado al procesador en el módulo JOB, ya que, es el caso para el que se han resuelto las ecuaciones de problema por el método de elementos finitos.

El archivo con los resultados del análisis se puede abrir de dos maneras. La primera opción se realiza desde el módulo JOB, del cual, en el menú principal se selecciona; *Job* → *Results* → *e3* (ver figura 131), automáticamente el programa abre la pantalla de visualización del módulo VISUALIZATION.

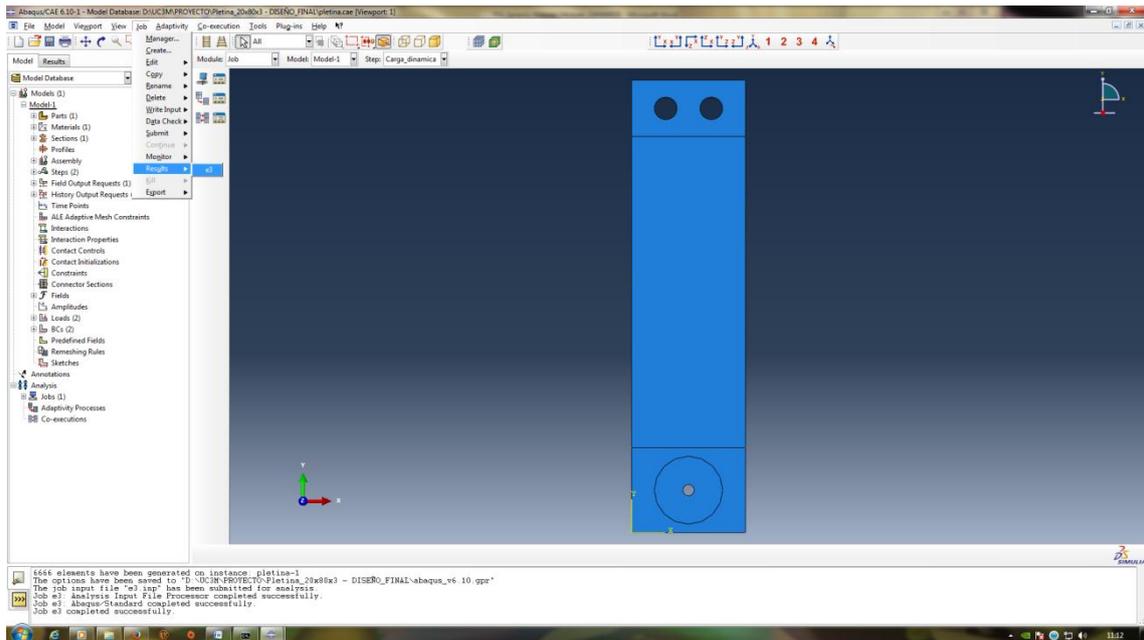


Figura 131 – Pantalla de visualización del módulo JOB para cambiar al módulo VISUALIZATION

La segunda opción se realiza desde el módulo VISUALIZATION, en el menú principal se selecciona: *File* → *Open* → *e3.odb*. La carpeta donde se han generado los archivos con extensión *.odb* es la misma carpeta en la que se ha guardado el archivo con extensión *.cae*.

Una vez abierta la pantalla de visualización con la pletina, figura 132, se selecciona el tipo de análisis que se quiere realizar.

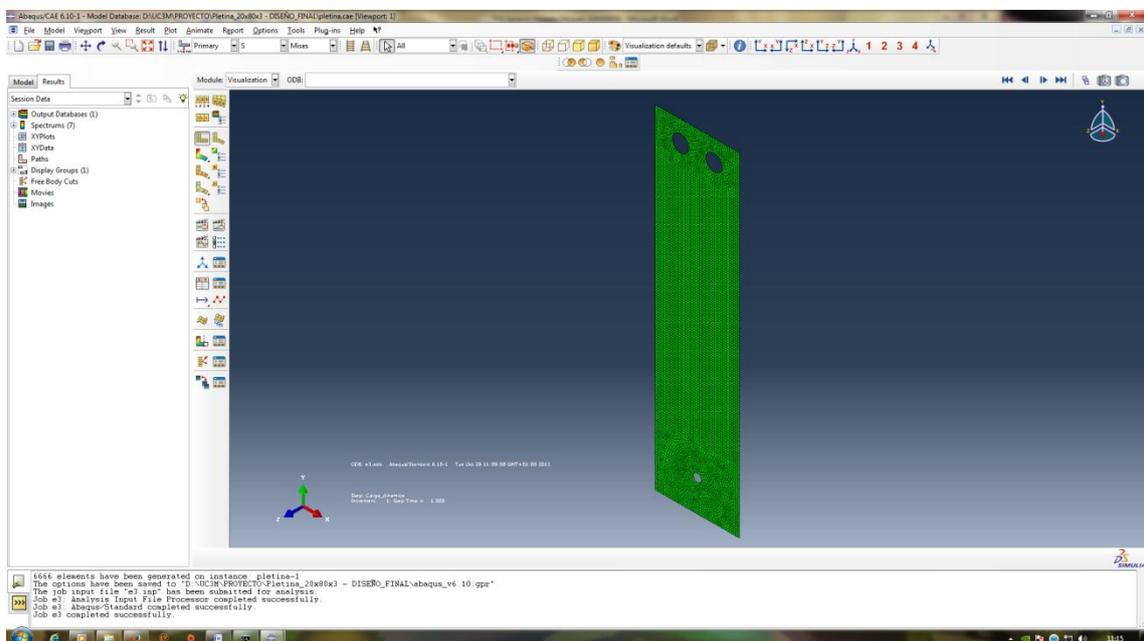


Figura 132 – Pantalla de visualización del módulo VISUALIZATION con la representación de la pletina

En el caso de la pletina, el primer análisis que se realiza es de tensión, de esta manera se podrá comprobar que las deformaciones que sufre la pletina están dentro de la zona elástica de la gráfica tensión-deformación. Como este análisis muestra la deformación

que sufre la pletina, se selecciona del menú principal; *Plot* → *Contours* → *On Deformed Shape*, de esta manera aparece la pletina deformada con distintas regiones de colores que indican la tensión de Von Mises en cada región (véase figura 133). Como ya se ha dicho, con este análisis se busca garantizar que la deformación que sufre la placa sea una deformación elástica. Por lo que analizando la tabla de las diferentes tensiones de Von Mises, se puede apreciar que la máxima tensión sufrida, para la máxima fuerza que va a medir el sensor, es de $1.134e+08$ Pa, o lo que es lo mismo 113.4 MPa, está por debajo del valor del límite elástico del material de la pletina, el cual es de 130 MPa, implicando que la pletina tenga un comportamiento elástico. No obstante se debe tener mucho cuidado, ya que, el valor es cercano, así que habrá que realizar las medidas con cierta delicadeza.

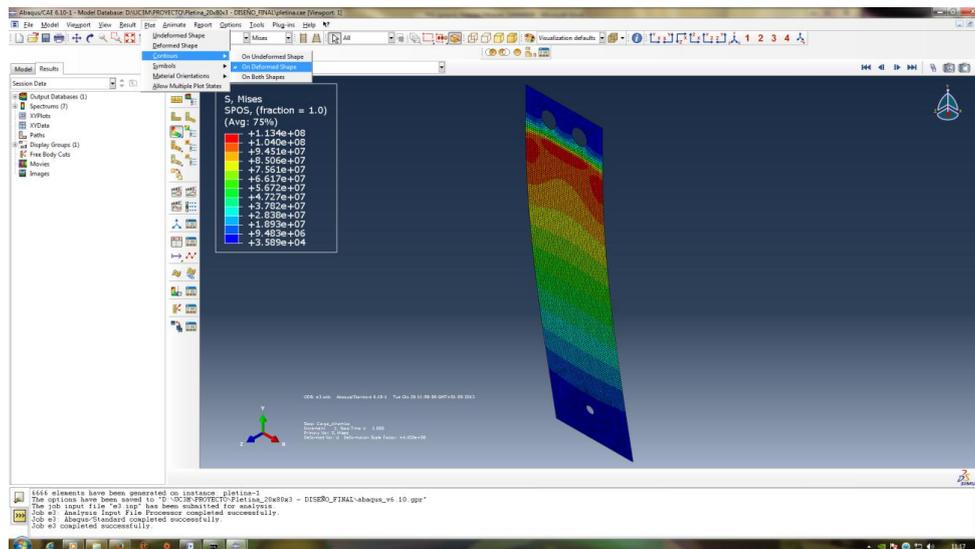


Figura 133 – Pantalla de visualización del análisis de la tensión de Von Mises (módulo VISUALIZATION)

El siguiente análisis de interés para el diseño de la pletina, es el análisis de deformaciones, el cual diferencia regiones de colores en la pletina en función de las deformaciones que sufre dicha región. Para cambiar de análisis se selecciona del menú principal; *Result* → *Field Output* (véase figura 124).

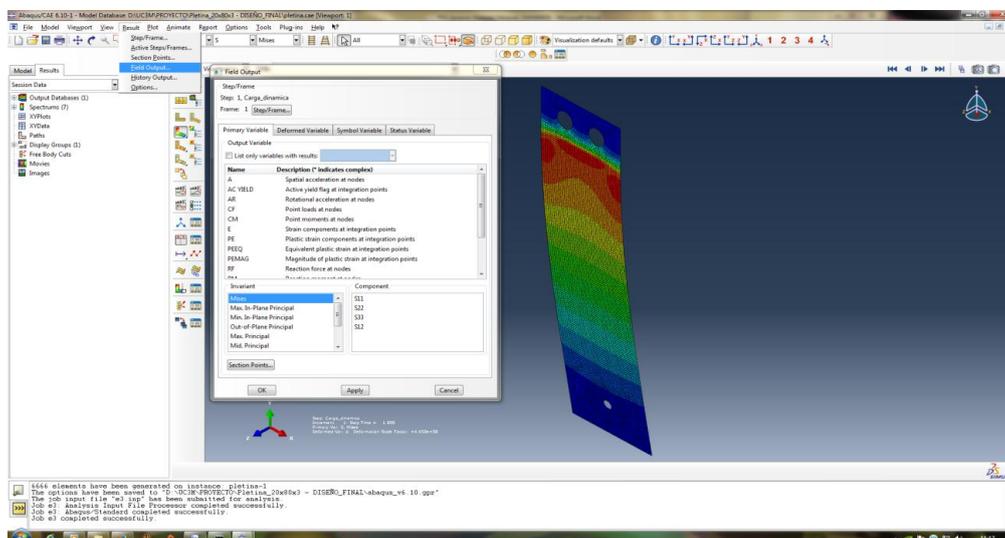


Figura 134 - Pantalla de visualización para cambiar de análisis (módulo VISUALIZATION)

A continuación aparece un cuadro de diálogo, figura 135, en el que se muestran todos los análisis que se pueden realizar. En el caso de la pletina, de la pestaña variable primaria; *Primary Variable* → *E* → *Ok*, este análisis mide la deformación de los componentes en los puntos de integración. El resto de parámetros se dejan con la configuración por defecto del programa.

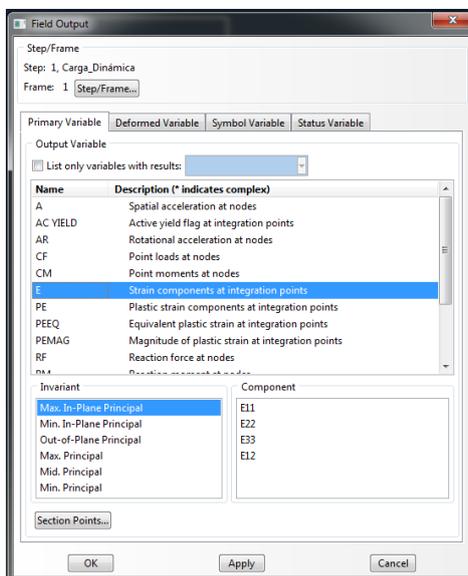


Figura 135 – Cuadro de diálogo para cambiar el tipo de análisis (módulo VISUALIZATION)

Al igual que en el análisis anterior, en este caso también hay que realizar un estudio de la tabla de deformaciones. Las galgas extensiométricas tienen un valor de deformación máximo, el cual, si es superado, la deformación de la galga deja de ser una deformación elástica por lo que el sensor no funcionaría correctamente. De la hoja de características de las galgas extensiométricas se obtiene el valor máximo de deformación de éstas. Dicho valor es $2.381e-03 \epsilon$, y analizando la tabla del programa, se comprueba que la deformación máxima toma un valor de $1.651e-03$ (ver figura 136). Como dicho valor es inferior, se confirma que la galga no se romperá o deformará de manera permanente.

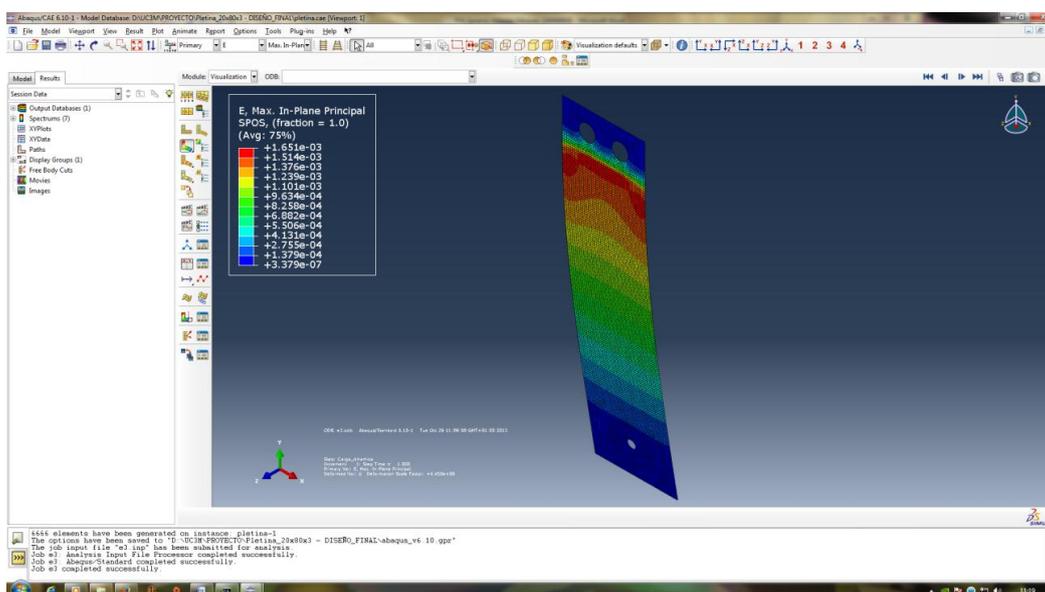


Figura 136 - Pantalla de visualización del análisis de la deformación (módulo VISUALIZATION)

A continuación se muestra una representación, figura 137, de la pletina en reposo, es decir, cuando la fuerza a medir es cero, y de la flexión que experimenta la pletina cuando es sometida a la fuerza máxima de 56 N, es decir, para una tensión de 510000 Pa.

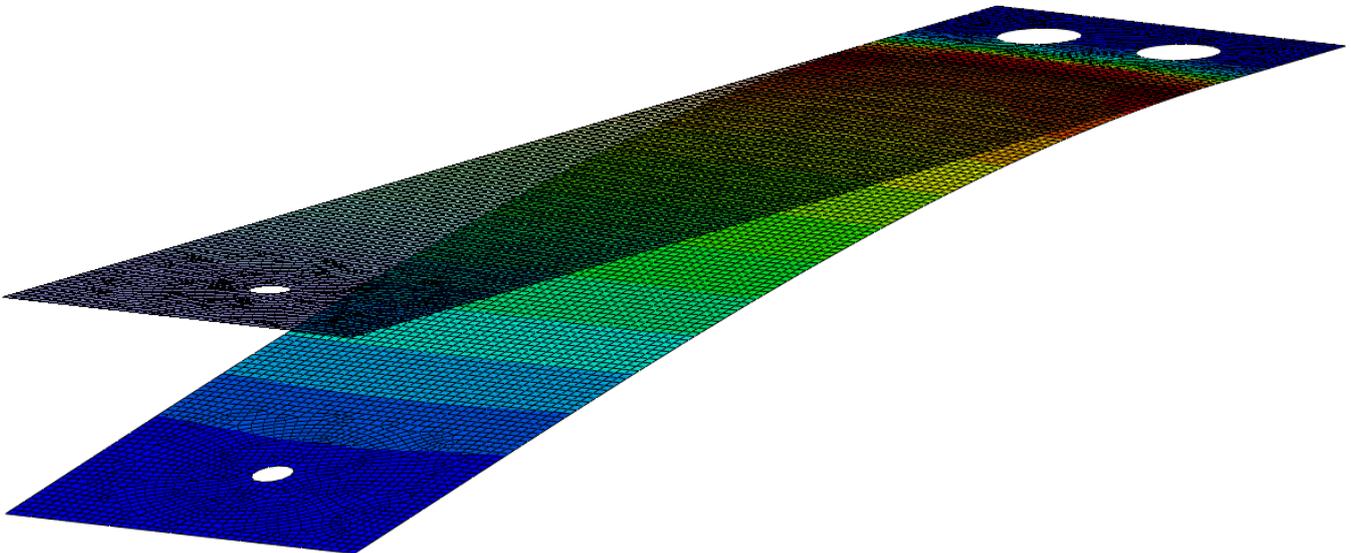


Figura 137 – Simulación de la flexión de la pletina generada por la fuerza máxima

4.4 Estudio de sensibilidad del mallado

Como se explicó en el apartado del módulo MESH, es necesario realizar un estudio de sensibilidad del mallado. De esta forma se obtiene un mallado adecuado, es decir, un mallado realizado con el mínimo número de elementos que permiten obtener una solución precisa y semejante a la realidad. Dicho estudio consiste en realizar el mallado cada vez con un número mayor de elementos, y ver en las simulaciones la tensión máxima de Von Mises que aparece en la pletina para ese número de elementos (véase la tabla 2). Cabe destacar que para ver las simulaciones, una vez realizado el mallado, en el módulo JOB se debe entregar (Submit) el caso, para que el programa muestre la simulación con los cambios pertinentes.

NÚMERO DE ELEMENTOS DEL MALLADO	MÁXIMA TENSIÓN DE VON MISES (Pa)
54	5.079E+07
61	5.562E+07
101	8.945E+07
152	1.085E+08
252	1.017E+08
457	1.058E+08
756	1.086E+08
1110	1.097E+08
1365	1.105E+08

1696	1.109E+08
2996	1.125E+08
4603	1.131E+08
6666	1.134E+08
8068	1.136E+08
9166	1.138E+08
10088	1.139E+08
10343	1.139E+08
11829	1.142E+08
13512	1.143E+08
15768	1.144E+08
18393	1.147E+08

Tabla 2 – Relación entre el número de elementos del mallado y su tensión máxima de Von Mises (Pa)

El análisis de los resultados se realiza mediante una representación de estos como la mostrada en la figura 138. Para determinar el número de elementos del mallado más adecuado, se debe ver el incremento de la máxima tensión de Von Mises del número de elementos objeto de estudio con respecto al último valor dicha tensión de la tabla 2. De esta manera se puede calcular la variación, en porcentaje, de la tensión. Para garantizar que la elección es correcta dicho porcentaje de variación debe ser de 0.7% o inferior.

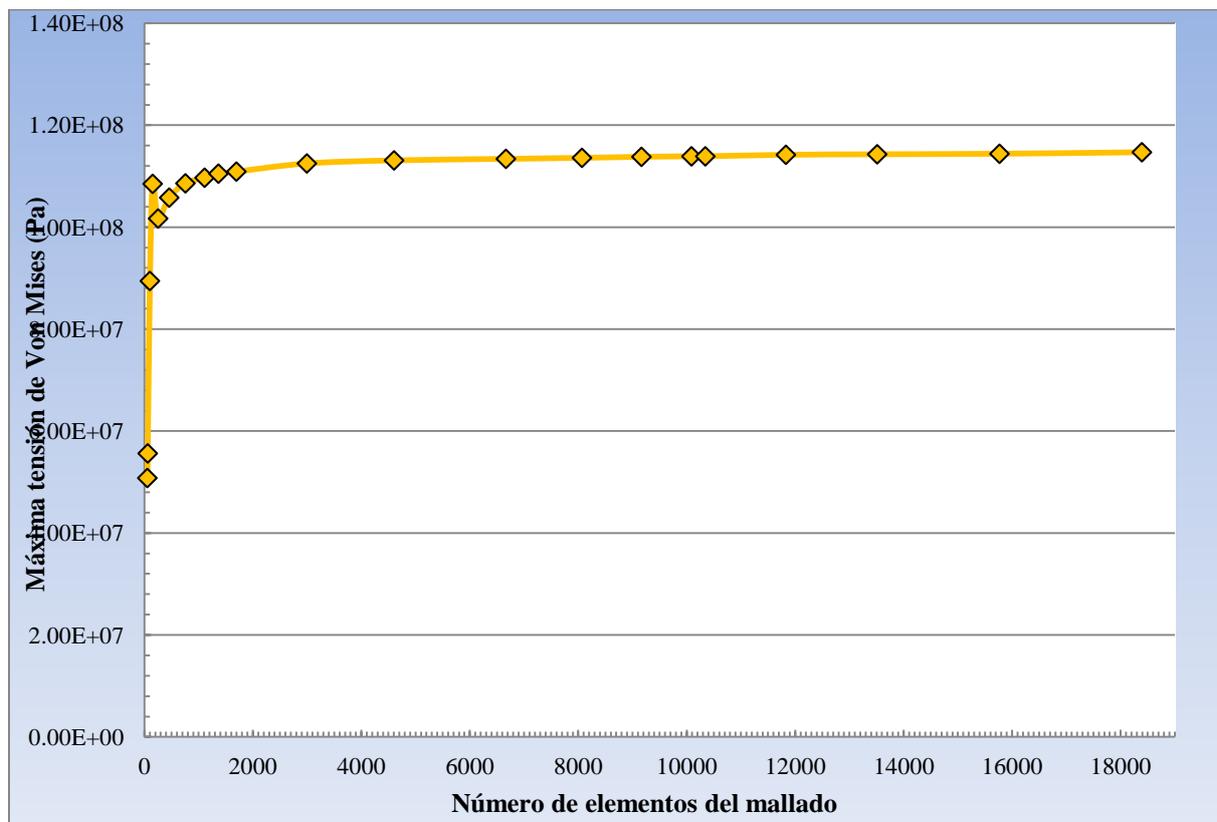


Figura 138 – Representación de la tensión de Von Mises máxima frente al número de elementos del mallado



5 MONTAJE Y VALIDACIÓN DEL SENSOR DE FUERZA

5.1 Condiciones iniciales

En este capítulo se van a explicar, por un lado los distintos desarrollos y procedimientos seguidos en el montaje del sensor de fuerza y, por otro, la validación de los datos del sensor de fuerza. En la primera parte, la que corresponde con el montaje, se van a explicar también los distintos diseños de los accesorios del sensor.

Antes de preparar las superficies de la pletina, se debe decidir la zona de colocación, para ello hay que tener en cuenta la longitud de las galgas, la cual se obtiene de la hoja de características, donde hay que escoger el valor de la base donde van la galga en sí, y la zona donde se van a colocar éstas. La ubicación se obtiene del análisis de deformaciones que se realizó en el capítulo 4, diseño de la pletina, y más concretamente del punto 4.3.8, módulo de visualización, en el cual se muestra una simulación de la pletina soportando la fuerza máxima, con un valor de 56N (ver figura 139), determinada por la fuerza máxima que resiste el cable de SMA de diámetro en torno a 8 o 12 milésimas de pulgada (las unidades en sistema americano, ya que el fabricante es americano).

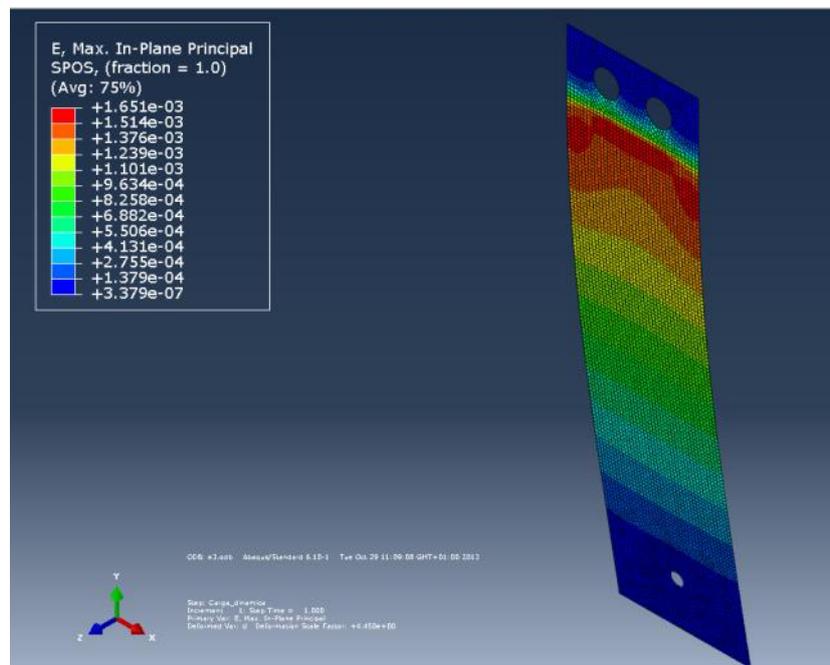


Figura 139 – Simulación de la pletina soportando la fuerza máxima (56N).

Abaqus realiza la simulación, por el método de elementos finitos, y muestra la pletina con las deformaciones generadas por la fuerza máxima. Como se puede ver en la figura anterior, figura 139, la representación de Abaqus es similar a un mapa de isotermas, en este caso, para Abaqus las zonas de color rojo son las zonas críticas, zonas donde la tensión, producida por la fuerza máxima, genera una mayor deformación. Esta conclusión se obtiene analizando los datos de la tabla de la figura 139, como se explicó en el capítulo 3, las galgas no deben superar el límite de deformación máxima (dato que se obtiene de la hoja de características), ya que éstas deben de trabajar en la zona de deformación elástica para así no quedar deformadas de forma permanente. Por ello el

objetivo del estudio de deformaciones en Abaqus es garantizar que las galgas no superen dicho límite. Una vez cumplido esto, la zona de ubicación de las galgas seleccionada es la zona donde se producen mayores deformaciones, por dos motivos, el primero porque de esta manera el rango de medición de las galgas será mayor, facilitando la adquisición de datos, y el segundo porque de esta manera la posición ocupada por las galgas es la que se encuentra más cerca al cuerpo del sistema, minimizando la longitud del cableado.

Es importante resaltar que una vez definido el modelo de la pletina mediante Abaqus, se realizó un plano de alzado y planta, para que los técnicos del taller de la Universidad Carlos III de Madrid realizasen el mecanizado de la pletina.

5.1.1 Montaje del sensor de fuerza

Este apartado se divide en varias partes, la primera corresponde con la preparación de las superficies de la pletina, la cual consta de tres fases. La segunda corresponde a la colocación de las galgas en ambas superficies.

5.1.1.1 Preparación de las superficies de la pletina de aluminio

El principal objetivo que se busca con la preparación de las superficies de la pletina de aluminio, es conseguir que las galgas estén lo más próximas a la superficie de medición para que la toma de datos sea lo más cercana a la realidad, por lo que la superficie de contacto entre la galga y la pletina de aluminio debe ser lo más lisa posible (véase figura 140). Por ello, es importante garantizar que no exista ningún agente extraño entre las galgas y la superficie de contacto. Esto se realiza lijando la superficie.

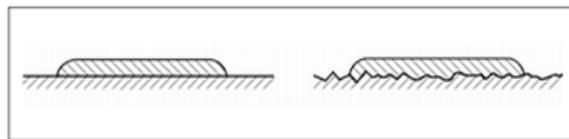


Figura 140 – Superficie ideal para medición (izq.) y superficie irregular para mediciones (dcha.)[26]

La preparación de las superficies, se puede resumir en tres pasos: devastado, pulido y limpieza. Éste procedimiento se ha obtenido de la Universidad de Alberta, Canadá [25], ya que tras investigar diferentes métodos de preparación, éste resultó ser el más económico. Hay que recordar que este proyecto es un prototipo de bajo coste, motivo por el cual se buscaron las soluciones más económicas. A continuación se describen los tres pasos:

- *Devastado*: se le denominó de esta manera para diferenciarlo del segundo paso (pulido), ya que no es un desbastado como tal, sino que se trata de un lijado

inicial mediante el cual eliminamos las asperezas en irregularidades (sin arañar en exceso la pletina) que pudieran tener en la zona de contacto con las galgas extensiométricas. Para lijar la superficie se ha empleado un papel de lija de grano 150, se corresponde con un tipo de lija fina. El proceso de lijado se realiza practicando pequeñas circunferencias, siempre en el mismo sentido y sin ejercer mucha presión (ver figura 141). Por seguridad, se lija una superficie mayor que la de contacto de las galgas con la pletina, de esta manera se obtiene una mayor uniformidad en la superficie. Este primer paso termina cuando se aprecia un cambio de color de la zona lijada con el resto de la pletina.

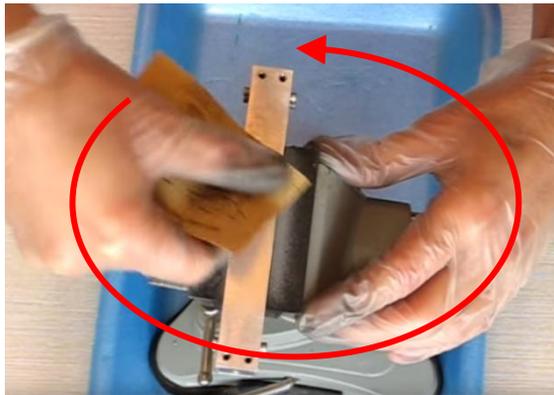


Figura 141 – Proceso de devastado, indicando dirección y sentido de lijado. [25]

- ***Pulido:*** el proceso de pulido se realiza con una lija de agua, o lo que es lo mismo, una lija fina o muy fina, en este caso es una lija de grano 400. El grado más fino ayuda a eliminar pequeños rayones provocados por grados gruesos de papel abrasivo, es decir, los generados en el paso anterior. La definición de “lijas de agua” viene del modo de uso de este tipo de lijas, ya que antes de realizar el proceso de lijado se vierte un poco de agua en la superficie. De esta manera se obtiene un acabado muy fino, con el objeto de que la lija nunca se emboce. La forma, dirección y presión del lijado debe coincidir con las del paso anterior, en la medida de lo posible, ya que al lijar a mano es muy difícil, sino imposible, ejercer la misma presión y mismo radio de circunferencia durante el proceso de lijado. En este proceso se genera más suciedad por el empleo del agua, pero la cantidad de viruta es menor (ver figura 142). En ambos pasos, devastado y pulido, se han empleado lijas consideradas finas, ya que, como se mencionó, la superficie de contacto debe ser lo más lisa posible, este tipo de granos se emplean porque son eficaces para eliminar la contaminación de partículas de la superficie. El motivo de usar dos tipos de grano es para quitar las partículas generadas en el primer paso y conseguir un acabado más fino. No se emplearon otras lijas más abrasivas porque el grosor de la plancha de aluminio que se compró se correspondía con el grosor de la pletina del sensor y, porque el acabado que presentaba era aceptable (no presentaba irregularidades visibles al ojo humano ni palpables al tacto). Por estos motivos solo se vio necesario obtener un acabado más fino.

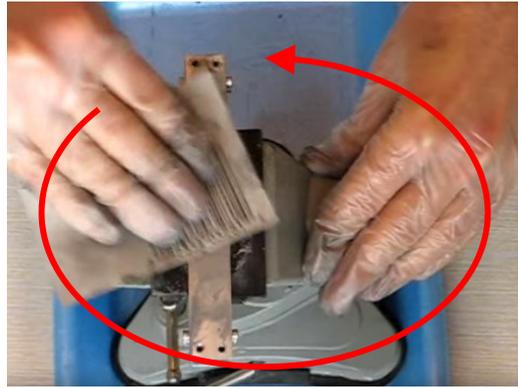


Figura 142 - Proceso de pulido, indicando dirección y sentido de lijado. [25]

- Limpieza: para la limpieza de la pletina, en primer lugar se echa un poco de agua sobre la superficie lijada y con un poco de “papel de cocina”, se seca la pletina realizando movimientos rectilíneos, siempre en la misma dirección (ver figura 143), es muy importante asegurarse de limpiar toda la viruta generada en los pasos anteriores, este proceso, para garantizar la eliminación de partículas, se fue repitiendo hasta que se dejaron de ver restos de partículas en el papel de secado, fue necesario realizarlo 5 veces.

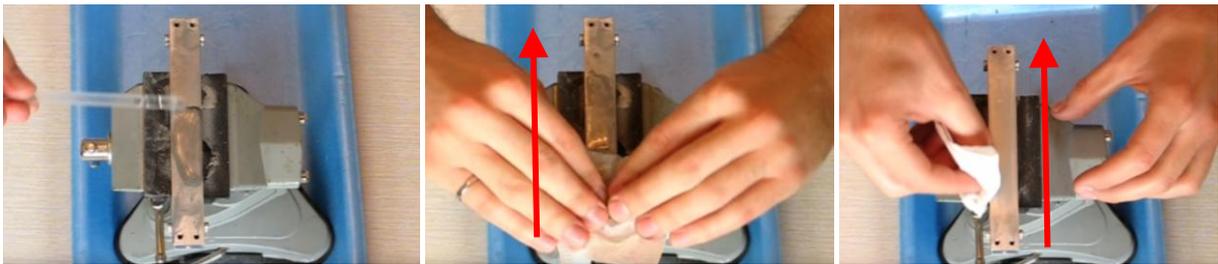


Figura 143 - Primer paso del proceso de limpieza, indicando dirección y sentido de secado. [25]

En segundo lugar, cuando la superficie está totalmente limpia, se repite el proceso de limpieza descrito anteriormente, pero esta vez se emplea una gasa que no deja residuos y alcohol isopropílico, el cual es un remedio muy económico y eficaz, y es de rápida evaporación permitiendo limpiar sin dejar residuos. Al igual que el procedimiento anterior, éste se repitió varias veces hasta comprobar que no quedaban residuos en la gasa empleada para el secado, como se puede apreciar en la figura siguiente, figura 144.

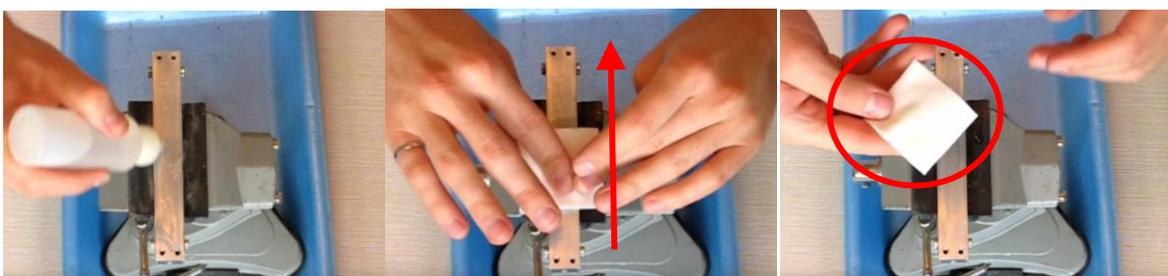


Figura 144 - Segundo paso del proceso de limpieza, indicando dirección y sentido de secado. [25]

5.1.1.2 Colocación de las galgas extensiométricas

El primer paso es marcar la zona donde se van a colocar las galgas. Este proceso es importante, por lo que hay que ser muy cuidadoso. Esto se debe a que la disposición de las galgas tiene que ser lo más simétrica posible, con respecto a todas las galgas, es decir, las galgas de una cara de la pletina deben ser simétricas con respecto al eje longitudinal de la pletina y, a su vez, simétricas con respecto a las de la otra cara de la pletina. El objetivo de la disposición de las galgas, como se dijo en capítulos anteriores, es que todas sufran la misma deformación en valores absolutos, es decir, el incremento longitudinal de las galgas de la cara superior debe ser el mismo que el incremento longitudinal de las galgas de la cara inferior, en valores absolutos (“lo que se estiran las de arriba es lo que se encogen las de abajo”). Cabe destacar que lo ideal es que ambas galgas de una misma cara sufran la misma deformación. Al realizar el montaje a mano en una pletina mecanizada manualmente (prototipo de sensor de fuerza de bajo coste), es de esperar que perfectamente simétricas no estén, implicando que las deformaciones de las galgas no sean idénticas, de ahí la importancia del marcado de la zona de ubicación.

A la hora de marcar se empleó una escuadra calibrada, como la de la figura 145. La referencia que se tomó a la hora de marcar, para ambas caras, fue la arista más cercana a los puntos de anclaje de la pletina.

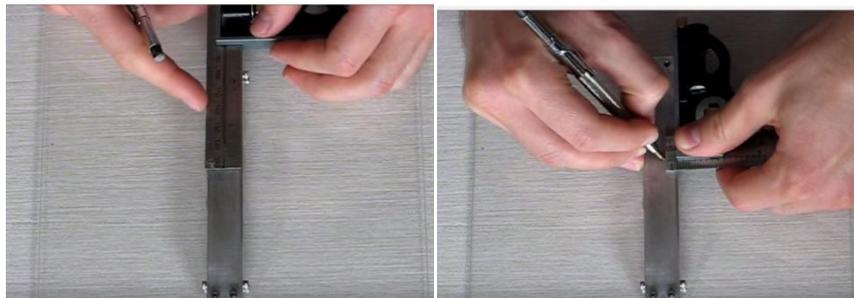


Figura 145 – Proceso de marcado de la zona de ubicación de las galgas. [25]

Una vez marcada la zona, es necesario volver a limpiar la superficie con alcohol isopropílico, ya que al tocar la pletina con las manos y los accesorios de marcado se vuelve a contaminar de partículas (grasa de las manos, restos de mina del portaminas y de la escuadra) la superficie de contacto. El secado de la superficie se realiza en la misma dirección y sentido que en pasos anteriores y con el mismo objetivo, no dejar restos de partículas en la gasa empleada (véase figura 146).

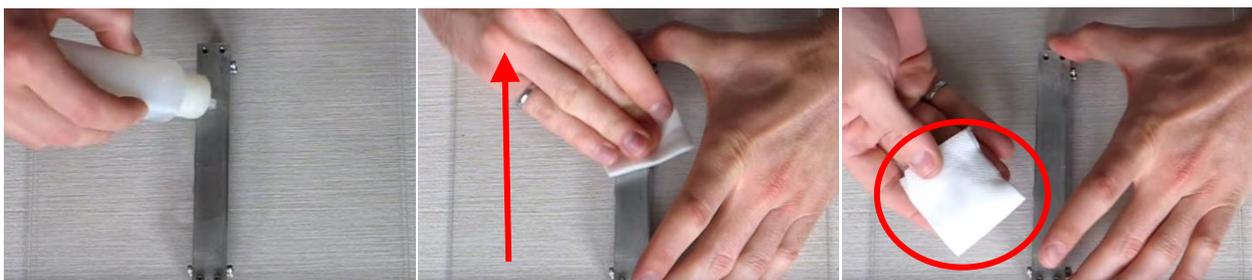


Figura 146 – Proceso de limpieza después de marcar la zona, indicando dirección y sentido del secado [25]

Cabe destacar que una vez secada la pletina, las marcas realizadas no desaparecen por completo. Es muy importante no tocar la pletina con las manos y mantenerla libre de suciedad, incluso evitar hablar cerca de ésta, después de realizar el proceso de limpieza, ya que es la última vez que se va a realizar dicho proceso.

A continuación se procede a colocar las galgas, las cuales no se deben manipular con las manos por el motivo dicho anteriormente, para ello se emplean unas pinzas (previamente limpiadas con alcohol isopropílico). Las patillas de conexión de las galgas se cortan antes de colocarlas a la longitud adecuada para que pueda soldarse en la roseta (véase figura 147) y para manipular sobre la superficie de la pletina lo menos posible.

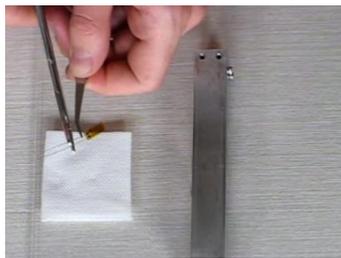


Figura 147 – Corte de las patillas de conexión de las galgas. [25]

El siguiente paso es presentar las galgas sobre la pletina, asegurando que se encuentran en la zona delimitada anteriormente. Antes de aplicar el pegamento para fijar las galgas, y para garantizar que éstas no se mueven de la zona, se realiza lo siguiente, se corta un trozo de celo y se adhiere con mucho cuidado sobre las galgas y la pletina, fijándolo lo más firme y tenso posible, para evitar desplazar las galgas se empieza a pegar por una de las aristas laterales, como se aprecia en la figura 148.



Figura 148 –Adhesión del celo a las galgas y a la pletina. [25]

Una vez fijado el celo, se despega en el sentido inverso del paso anterior, de tal manera que las galgas se quedan adheridas al trozo de celo manteniendo la separación con la que se habían dispuesto (ver figura 149), así se puede aplicar el pegamento a la superficie de la pletina sin alterar la posición de las galgas.



Figura 149 – Despegado del celo con las galgas adheridas a éste. [25]

Como ya se ha garantizado que las galgas van a mantener su disposición inicial, se procede a aplicar el adhesivo sobre la superficie de la pletina. El adhesivo seleccionado es Loctite 496. La cantidad empleada fueron 3 gotas, es necesario esparcirlo por toda la superficie lo más uniformemente posible. Seguidamente, y de forma muy cuidadosa, se vuelve a depositar el celo con las galgas sobre la superficie fijándolo firmemente durante un intervalo de 3 a 5 minutos, para que el adhesivo, en su totalidad, seque correctamente. Durante este tiempo es importante realizar una presión leve y constante sobre las galgas, cubriendo a éstas con un trozo del mismo material empleado para esparcir el adhesivo para evitar un posible contacto con la pletina. Estos pasos se muestran en la figura 150.



Figura 150 – Pasos para el pegado de las galgas extensiométricas. [25]

Pasado este tiempo se retira el celo de la superficie de la pletina y de las galgas extensiométricas, como se aprecia en la figura 151.

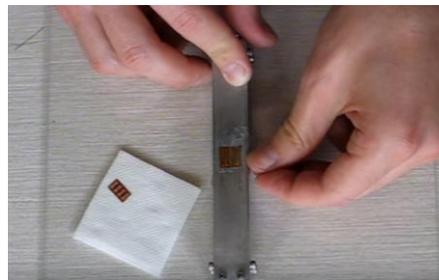


Figura 151 – Retirada del celo de la pletina y galgas. [25]

El siguiente paso consiste en pegar las bases para soldar o rosetas. Al igual que se hizo con las galgas, en primer lugar se disponen las bases en la zona en la que se van a pegar, a unos 3 milímetros del extremo de las galgas donde se encuentran las patillas de conexión. A continuación se procede exactamente igual, salvo que el celo se pega longitudinalmente con respecto a la pletina y a las galgas (cubriendo sobradamente la superficie de éstas y de las rosetas), y la dirección y sentido de despegado del celo debe ser hacia las patillas, de esta manera se asegura que las patillas no se doblan o tiran de la galga por no despegarse correctamente (ver figura 152). Cabe destacar que una vez que se ha retirado el celo de las galgas, cuando se empiezan a ver las patillas es aconsejable ejercer un poco de presión sobre éstas para evitar que se deterioren.

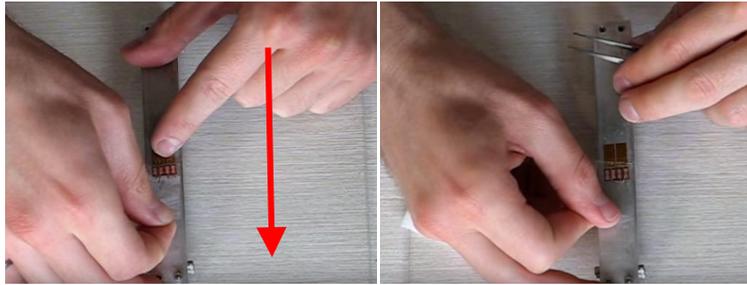


Figura 152 – Retirada del celo de las galgas y de las rosetas, indicando dirección y sentido. [25]

Por último se procede con el proceso de soldadura de las patillas a las rosetas o base de conexión. El soldar las patillas a la mencionada base es muy aconsejable, ya que en caso de que los cables que conectan con el amplificador sufran un tirón, las galgas no se dañarían. Para mejorar la soldadura se empleó una pasta para soldar de la compañía Tasovisión, y se denomina pasta flux, la cual funde mejor el estaño, desoxida las piezas y limpia el soldador. En la figura 153 se muestra una imagen de la pletina durante la finalización del proceso de conexiónado del puente de Wheatstone, como se puede apreciar falta por soldar un terminal de una de las galgas extensiométricas.

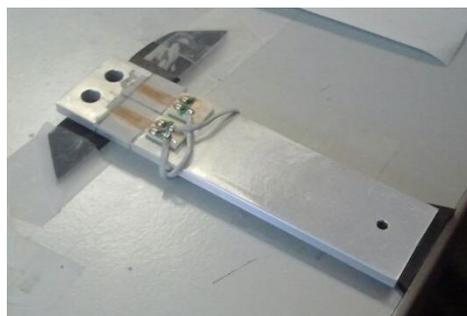


Figura 153 – Pletina durante el proceso de soldadura del puente Wheatstone.

Para realizar el conexionado del amplificador con el convertidor analógico-digital se siguieron las respectivas hojas de características. Como se puede apreciar en la figura 154, para facilitar el proceso de soldadura entre ambos elementos y los componentes que requerían las hojas de características, se emplearon los “packages” que proponen éstas. A parte de utilizar los mencionados “packages”, como base para soldar todos los componentes se empleó una placa de fibra de vidrio discontinua, como la mostrada en la figura 155.

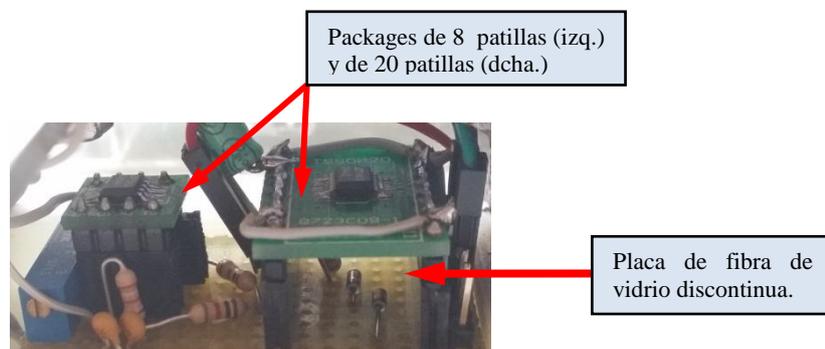


Figura 154 – “Packages” y placa de fibra de fibra de vidrio empleadas en el montaje del sensor de fuerza.

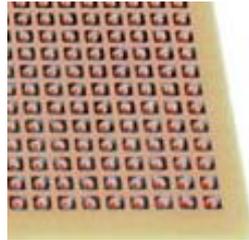


Figura 155 – Detalle de una placa discontinua de fibra de vidrio discontinua. [27]

Observando la figura 154, se pueden ver unos pines conectados a ambos “packages”, el objetivo del uso de estos pines es poder conectar todos los componentes en el menor espacio posible. La conexión se podía haber realizado optimizando mucho más el espacio entre componentes, pero se decidió así para evitar un calentamiento excesivo de los mismos y poder realizar el mantenimiento lo más cómodamente posible, en caso de que hiciese falta. El cableado de las conexiones se encuentra en la cara inferior de la fibra de vidrio discontinua, que es la cara mostrada en la figura 155, la cara superior no tiene cobre, ya que no es donde se realiza la soldadura, su aspecto es el mostrado en la figura 154.

5.1.1.3 Diseño de la pieza de sujeción de la pletina

En este apartado se van a explicar los diferentes diseños que se tuvieron que realizar para obtener un mejor rendimiento del sensor. El objetivo del sensor de fuerza, objeto de este trabajo fin de grado, es poder controlar en fuerza el banco de pruebas de los SMA's, para poder obtener en función de la intensidad que circula por éstos la fuerza que van a ejercer (mirando a un futuro no muy lejano, un ejemplo de una de las muchas aplicaciones de los SMA's, puede ser controlar la fuerza que ejerce una mano robótica, la cual mueve sus articulaciones mediante dichos cables). Por ello los diseños vienen determinados por el uso del banco de pruebas, inclusive el diseño de la pletina, el cual se ideó pensando cómo se engancharía el cable de SMA a la misma.

El primer diseño, que en este caso no se puede considerar como tal, ya que lo que realmente se hizo fue pensar que estructura sería más adecuada para el uso del sensor de fuerza en el laboratorio de la universidad, fue la pieza que soporta la pletina de aluminio. Es importante resaltar, que en un primer momento, se realizaron pruebas con el sensor sin la pieza de sujeción, lo que se hizo fue sujetar la pletina de aluminio con una mordaza a la mesa del laboratorio, como se puede apreciar en la figura 156.



Figura 156 – Prueba del sensor de fuerza fijado en la mesa.

En la figura anterior se puede ver que la pletina no está en contacto ni con la mesa ni con la mordaza, el objetivo era evitar dañar la pletina. Pero después de estar probando durante un día se llegó a la conclusión de que no era nada factible, porque resultó ser tan sensible a los movimientos, que cada vez que un compañero del laboratorio hiciese un movimiento (desplazara la silla, abriera la puerta, anduviese por el laboratorio...), el sensor lo detectaba, daba igual la distancia a la que se encontrase. Por lo que se concluyó que era necesario sujetar la pletina de una forma más robusta que evitase la influencia de los movimientos descritos. Hay que recordar que el presupuesto que había para realizar el montaje del sensor de fuerza era prácticamente nulo, por lo que se optó por comprar un retal de perfil en U, en Hierros Segovia. El perfil que se escogió fue un perfil UPN 80, el uso habitual de este tipo de perfil se da en la construcción como soportes o pilares, donde las siglas UPN significan: Perfil Normalizado con sección transversal en forma de "U". Son de acero laminados en caliente, en la figura 157 se muestra la pieza de sujeción empleada (perfil UPN 80). El número 80 es la medida en milímetros que se corresponde con la medida h de la figura 157.

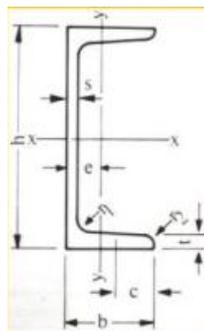


Figura 157 –Dimensiones de un perfil UPN 80. [28]

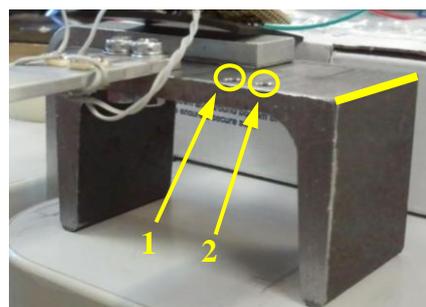


Figura 158 – Pieza de sujeción del sensor de fuerza.

El resto de medidas y los momentos de inercia con respecto a los ejes, aparecen definidos en la tabla 3. Donde I_x e I_y son los momentos de inercia respecto de sus ejes, S_x y S_y son los momentos de resistencia y R_x y R_y son los radios de inercia referidos al eje de flexión correspondiente. Las medidas que realmente fueron empleadas para el posterior diseño, pieza de sujeción, fueron las dimensiones. En la figura 158 se muestra el perfil empleado, el cual tiene una profundidad de 40 mm.

Tabla 3 – Dimensiones y momentos de inercia del perfil UPN 80. [28]

UPN	DIMENSIONES (mm)							Área cm ²	Peso Kg/m	MOMENTOS RESPECTO A LOS EJES					
	EJE X-X		EJE Y-Y												
	I_x m ⁴	S_x cm ³	R_x cm	I_y cm ⁴	S_y cm ³	R_y cm									
80	80	45	6.0	8.0	8.0	4.0	14.5	11.0	8.65	106	26.5	3.10	19.4	6.35	1.33

Los únicos mecanizados que hubo que realizar al perfil, fueron en primer lugar los agujeros donde se sujetarían las pletinas, se decidió capacitar al perfil para poder soportar otro sensor en un futuro, ya que por las dimensiones lo permitían. En segundo lugar, para garantizar un contacto entre pletina y perfil lo más perfecto posible, se lijó la cara superior del perfil. La superficie de apoyo de la pletina con el perfil, se definió cuando se realizó el diseño de la pletina en Abaqus, la cual es de 15x20 mm². La distancia del centro del agujero 1 con respecto a la arista marcada en la figura 158, es de 29 mm y el agujero 2 con respecto a la misma arista es de 21 mm. De esa manera se deja una distancia entre pletinas de 10 mm y la distancia del centro de los agujeros a la arista de contacto con la pletina es también de 10 mm.

5.1.1.4 Diseño del soporte para el Amplificador y el Conversor Analógico-Digital

Al igual que ocurrió en el apartado anterior, una vez obtenida la pieza de sujeción de la pletina, se realizaron pruebas para ver el efecto de la pieza. Como se esperaba, el efecto producido por los movimientos en el laboratorio se anuló, aunque si se producía un movimiento brusco cerca del sensor o un golpe en la mesa donde estaba sujeto, éste seguía apreciando dicho movimiento, eso sí, la influencia era mucho menor. En la figura siguiente, figura 159, se puede ver la disposición del sensor con la pieza de sujeción.

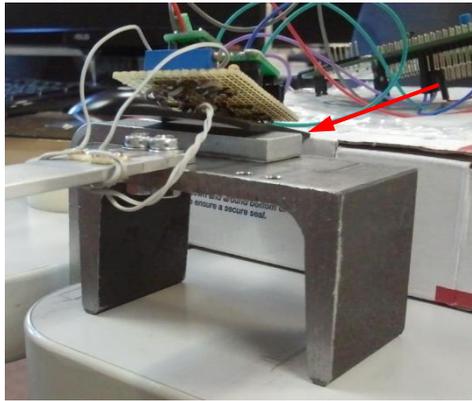


Figura 159 – Prueba del sensor de fuerza con la pieza de sujeción y aislamiento de caucho.

Las pruebas realizadas en este punto del proyecto, duraron 3-4 días. Como se observa en la figura anterior, debido a la longitud de los cables de alimentación del puente Wheatstone y los de conexión de éste con el amplificador, se tenía que colocar la placa de fibra de vidrio discontinua (en la cual se soldaron la etapa de amplificación y de conversión) encima de la pieza de sujeción. Esto generó diferentes problemas, en primer lugar y para evitar cortocircuitos se evitó el contacto de la base de la placa de fibra de vidrio con la pieza de sujeción o la mordaza, ya que ambos elementos son metálicos y podían generar dicho problema. Para ello se empleó un trozo de caucho como aislamiento, como se aprecia en la figura anterior indicado. El siguiente problema fue el que generó el diseño de la pieza objeto de este apartado. El problema venía generado porque cuando se terminaban de realizar las pruebas con el sensor, éste se guardaba en el armario del laboratorio para evitar posibles daños de terceros. Esto implicaba que, al día siguiente, cuando se montaba el sensor, la disposición de la circuitería de la placa de fibra de vidrio no era exactamente igual, ya que en función de su posición los cables de alimentación y conexión con el amplificador del puente de Wheatstone, variaban su longitud y forma de ejercer tensión en el puente, implicando que para un mismo peso daba medidas distintas. Estas medidas no variaban en exceso, pero generarían rango de tolerancias de las medidas del sensor no deseado y dificultarían el estudio del comportamiento del sensor de fuerza, por lo que no se decidió no dejar el sistema de esa manera.

El objetivo que se buscó, fue fijar la circuitería para evitar los problemas descritos en el párrafo anterior. Para ello se hizo uso de los recursos del laboratorio y se utilizó la impresora 3D para producir una pieza de sujeción para la placa de fibra de vidrio. La cual se ubicaría debajo de la pieza de sujeción, para aprovechar el espacio y proteger la circuitería.

La impresora 3D admite distintas formas para introducir los parámetros para que realice las piezas que deseemos. Una forma es mediante coordenadas introducidas en el software que conecta la impresora con el PC y la otra es volcando en dicho software un archivo tipo CAD, generado en Solidworks o Autocad. La forma elegida fue mediante Autocad, para facilitar el diseño de la pieza lo que se hizo fue, dibujar un perfil UPN 80

en tres dimensiones (ver figura 160), ya que disponemos de todas las medidas necesarias para dibujar el perfil en la tabla 3.

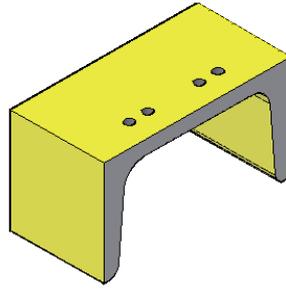


Figura 160 – Perfil UPN 80 dibujada en Autocad.

Una vez dibujado el perfil, mediante la funciones de 3D de Autocad, el primer paso es generar un sólido con la altura que deseemos y con las dimensiones de sus lados como las de la cara superior del perfil, superficie de contacto entre pletina y perfil. La altura de la pieza de soporte, 19 mm, está determinada por los rangos de trabajo de la impresora 3D, es decir, el grosor mínimo recomendable que se puede dar a la pieza para que la impresora la realice correctamente es de 3 mm. De manera que, se decidió que el grosor de la base de la pieza de soporte sería de 4 mm y el grosor de sus paredes de 3 mm. Quedando el cajeadado con una profundidad de 15 mm. Cuando se han definido las dimensiones del sólido 80x40x19 mm, es el momento de hacer uso de las funciones de 3D de Autocad, y más concretamente con la función “Diferencia”. Cabe destacar que, no se va a realizar una descripción tan descriptiva como la de Abaqus del capítulo 4, diseño de la pletina, ya que a diferencia de ese capítulo, Autocad es un programa muy utilizado del cual se pueden obtener tutoriales y manuales fácilmente, por lo que, la descripción del diseño de la pieza de soporte se realizará de forma visual. En la figura 161 se muestra el sólido y la pletina con la ubicación y forma exterior que tendrá la pieza de soporte. Los pasos seguidos son los siguientes, cuando se ha dibujado el sólido, del que se obtiene la pieza de soporte, se ubica centrado con respecto de la base de la pieza de sujeción de la pletina, y posteriormente se desplaza en el eje Z 4 milímetros. Esta operación se realiza para que la forma exterior de la pieza de soporte se a trapezoidal y evitar que las caras exteriores sean curvadas. Haciendo esto también se consigue que la pieza quede encajada con el perfil, asegurando de esta manera que el cableado se mantenga lo más estático posible.

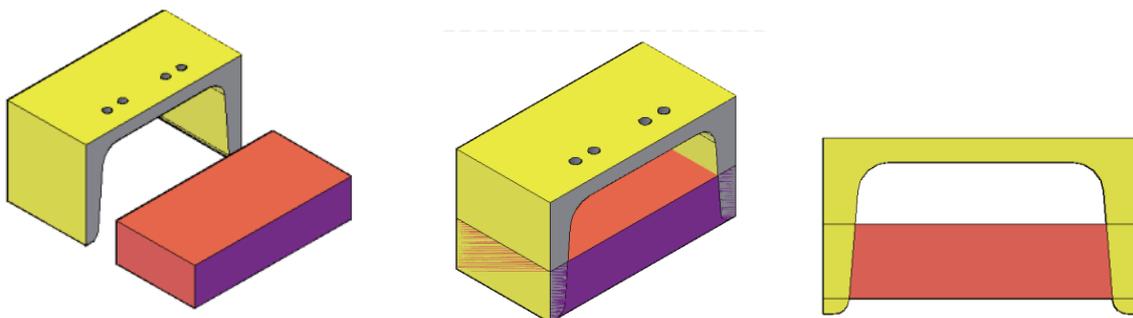


Figura 161 – Evolución del diseño de la pieza de sujeción mediante Autocad.

Una vez situado el sólido en la ubicación final, se utiliza la función “Diferencia”, de Autocad, del sólido con respecto de la pletina, obteniendo así la forma exterior final de la pieza buscada (ver figura 162). Como se puede concluir, la función “Diferencia” es, a grandes rasgos, como realizar una resta, pero en vez de usar números se usan sólidos.

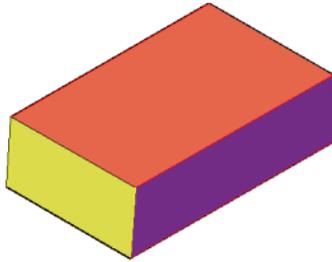


Figura 162 – Forma exterior final de la pieza de soporte.

El último paso es realizar el cajeadado de la pieza de sujeción del amplificador y convertidor. La forma de actuar es la misma que en el paso anterior. Lo primero es definir el sólido o volumen que se va a “restar” a la pieza de la figura 162. Como se dijo anteriormente, la profundidad del cajeadado que se decidió era de 15 mm y el grosor de las paredes de 3 mm. Por lo que el sólido o volumen debe tener unas dimensiones de 57.7541x34x15 mm, como se puede observar, la medida de la base del sólido es bastante peculiar, esto se debe a la forma trapezoidal de la pieza. También es importante resaltar que las dimensiones finales de la pieza se obtuvieron una vez diseñada ésta, motivo por el cual se empleó Autocad, para facilitar el diseño, ya que, lo que se hizo, fue dibujar un rectángulo en el interior de la cara superior de la figura 162, de tal manera que todos los lados de dicho rectángulo quedasen a 3 mm de las aristas de la cara superior. Una vez realizado el rectángulo se genera el sólido con la altura decidida anteriormente, 15 mm, y se procede a realizar la “resta” de volúmenes mediante la función “Diferencia”. El resultado final se puede ver en la figura 163.

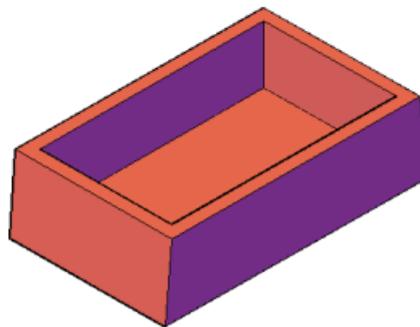


Figura 163 – Diseño pieza de soporte del amplificador y el convertidor mediante Autocad.

Definida la pieza en Autocad, se vuelca el archivo que .dwg, el cual genera Autocad, en el software de control de la impresora 3D. Ésta permite seleccionar la resistencia de la pieza ofreciendo diferentes valores de densidades empleadas en la fabricación. Para el caso del sensor de fuerza se empleó el máximo permitido por la impresora, implicando

un acabado final más fino, ya que al trabajar con los parámetros de máxima densidad, la impresora realiza los movimientos muy lentamente. Cabe destacar que, en un primer momento la densidad definida fue muy baja, por lo que el acabado final no era el deseado, implicando el descarte de éste y procediendo a realizar una segunda pieza. En la figura 164 se puede ver una imagen general de la impresora 3D durante la fabricación de la pieza de soporte y el resultado final de ésta.

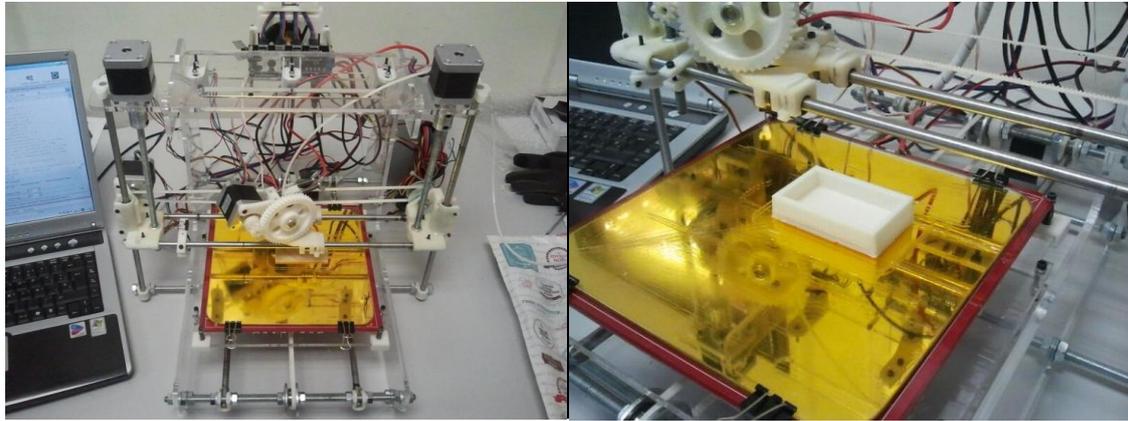


Figura 164 – Proceso de fabricación de la pieza de soporte en la impresora 3D (izq.) y resultado final de la pieza.

En la figura 165, se muestra el sensor de fuerza con la pieza de soporte ubicada en la pieza de sujeción de la pletina (izquierda) y un detalle, en el cual se desplazó hacia fuera la pieza de soporte para poder ver mejor la ubicación de la placa de fibra de vidrio (derecha). Como cabía esperar, al realizar el diseño de la pieza sin aplicar tolerancias, inicialmente la pieza no ajustaba correctamente, por lo que hubo que lijar un poco las caras de contacto de ésta con la pieza de sujeción de la pletina. Igualmente, la placa de fibra de vidrio tuvo que ser reducida en dimensiones para poder depositarla adecuadamente en la pieza de soporte.

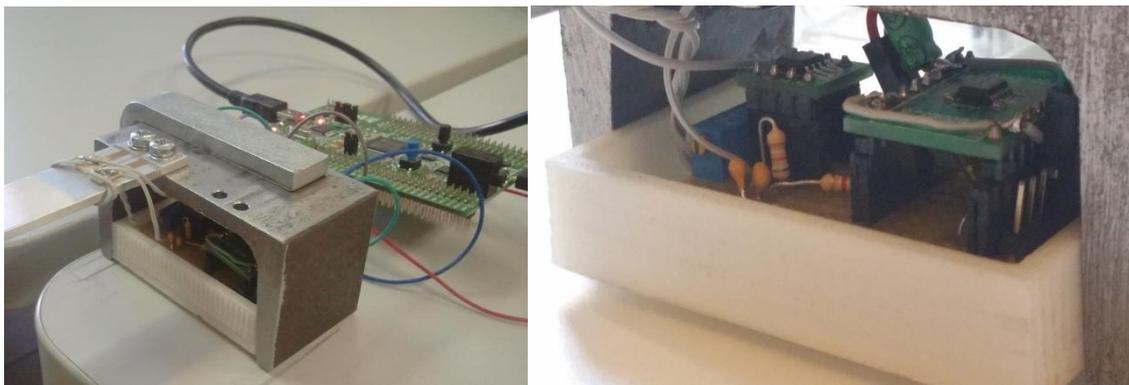


Figura 165 – Sensor de fuerza con pieza de sujeción de la pletina y pieza de soporte de la circuitería (izq.) y detalle de ésta (dcha.)

5.1.1.5 Diseño de la pieza de sujeción de los pesos

Siguiendo la tónica de pasos anteriores, una vez montada la pieza de soporte del amplificador y conversor en el sensor, se estuvieron realizando pruebas con éste durante una semana. Durante este tiempo se pudo apreciar la mejoría en la toma de datos del reposo, es decir, cuando no se aplicaba ninguna fuerza en el sensor, daba igual que fuera en días distintos, las variaciones que presentaba eran muy pequeñas. Esto implicó una gran ventaja a la hora de manipular a éste, se podía desmontar y montar cada vez que se fuera a usar asegurando que la circuitería permanecía fija, y por consiguiente, no se veía afectada la medida del reposo. Aun así, la manipulación del sensor se realizaba con mucho cuidado.

El problema que se empezó a observar, una vez más afectando a las medidas tomadas por el sensor, al realizar medidas aplicando fuerzas, fue que la pieza que se improvisó como sujeción de los pesos donde se colgarían éstos, para el estudio del comportamiento del sensor, no mantenía una posición fija. Esto implicaba que al realizar la toma de medidas, en la cual era necesario manipular la pieza de sujeción para poder cambiar de peso, dicha pieza se veía desplazada con respecto a la medida anterior. Generando que para un mismo peso, la medida obtenida era distinta. En la figura 166 se muestra la pieza improvisada de sujeción del cable empleada para realizar las primeras pruebas al sensor de fuerza.



Figura 166 – Pieza improvisada de sujeción del cable.

Esto supuso otro problema que solventar, ya que cuando se fuera a usar el sensor para su objetivo final, controlar en fuerza el banco de pruebas de los SMA's, el SMA permanecería siempre en la misma posición, ya que se dispondría de tal manera que quedase lo suficientemente tenso para garantizar su ubicación en todas las medidas realizadas con el sensor de fuerza. Por ello, la pieza de la figura 166 empleada durante las primeras pruebas del sensor no era apta, de la cual a simple vista se deduce que su diseño no es factible. El hecho de que no mantuviese su posición implicaba que el momento de fuerzas generado en la pletina variase, implicando a su vez que las deformaciones sufridas en la misma variasen también. Otro aspecto importante es el reparto de la fuerza sobre la pletina, y éste debe ser lo más uniforme posible, el hecho de que el peso ejerciese más fuerza por un lado de la base de la pieza que por otro, implicaba que la medida se viera afectada.

Para realizar el diseño de la pieza de sujeción de los pesos se utilizó Autocad, por el mismo motivo que para la pieza de soporte, la facilidad de trabajo con la impresora 3D, (usando los mismos parámetros que para la fabricación de la pieza de soporte) y el aprovechamiento de los recursos del laboratorio de robótica de la universidad. El punto de partida para el diseño de la pieza, una vez más, viene determinado por el diseño que se realizó de la pletina en Abaqus, en el cual se definió que el diámetro exterior de la superficie donde se ejerce la fuerza en la pletina es de 12 milímetros, y el diámetro interior es de 2 milímetros. Otro punto a tener en cuenta, es que los pesos que se iban a utilizar para realizar el estudio del comportamiento del sensor, están pensados para ir colgados, por lo que el diseño debía cubrir esa necesidad también. Con esos dos puntos iniciales se realizaron diferentes diseños, de los cuales el seleccionado fue el mostrado en la figura 167.

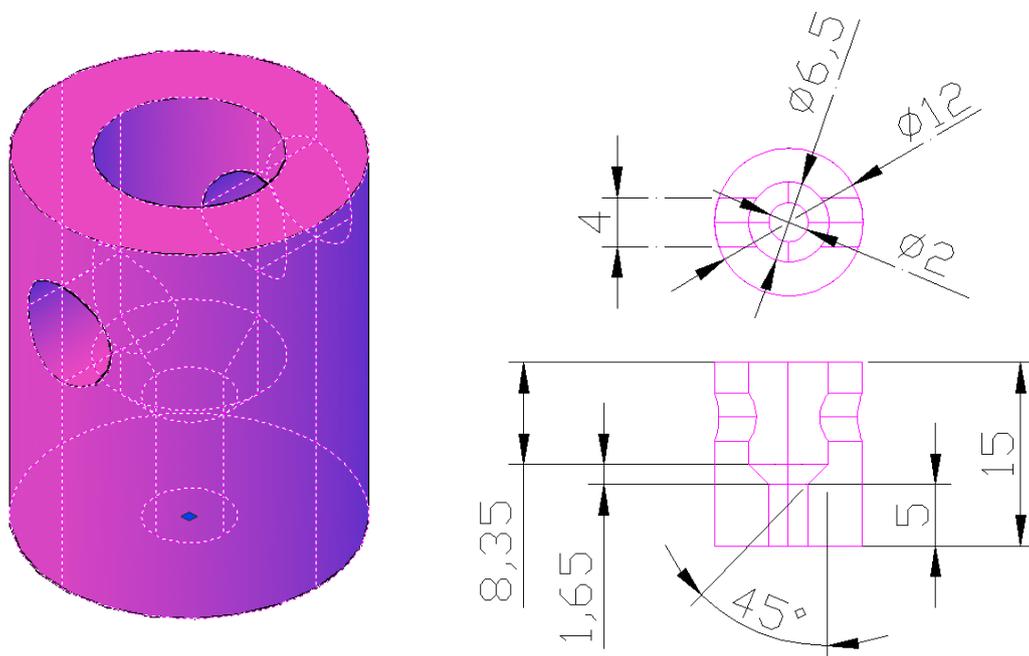


Figura 167 – Diseño de la pieza de sujeción del cable y planta y alzado acotadas en mm de la misma.

La pieza esta pensada de tal manera que los pesos se cuelgan de un cordón formado por dos hilos de nylon, y éste está sujeto a un pasador que se introduce por los orificios laterales de la pieza. Como pasador se empleó un tornillo roscado de cabeza plana, el cual se limó en su parte central para evitar dañar al cordón formado por hilos de nylon. Otra medida de seguridad que se tomó, era proteger la superficie de contacto de la pieza con la pletina, ya que con un uso prolongado y repetitivo como sería el estudio del comportamiento del sensor, cabía la posibilidad de que dicha zona quedase deformada. Para evitarlo se empleó un trozo de goma (caucho), como arandela de separación entre ambas superficies, con las dimensiones de la superficie de apoyo definidas en Abaqus. En la figura siguiente, figura 168, se muestra la pieza de sujeción de los pesos.



Figura 168 – Pieza de sujeción de los pesos montada en la pletina de aluminio.

Los hilos de nylon que forman el cordón (hilo de nylon para pescar de 0.5 mm y con un peso máximo de trabajo en tracción de 13.90 Kg), se introdujeron en una camisa termo-retráctil y ésta a su vez en una camisa de cable para sonido. En la figura 169 se muestra la disposición final del sensor de fuerza (izquierda) y un detalle del cordón de nylon en el cual se aprecia la camisa termo-retráctil. La camisa del cable ayudaba a mantener la posición de la pieza estática en los cambios de peso.

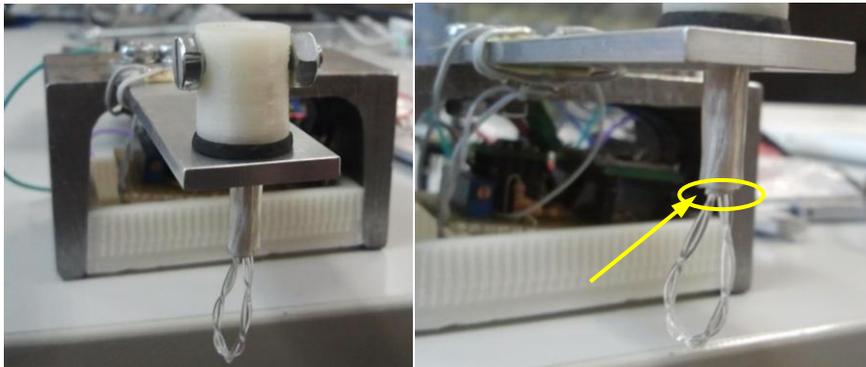


Figura 169 – Disposición final del sensor (izq.) y detalle de la camisa termo-retráctil (dcha.)

Cabe destacar que el diseño del cordón se vio alterado durante la toma de datos, debido a que al realizar bastantes medidas durante un rato prolongado en el tiempo, el nylon se salía de la camisa, por lo que hubo que fijar con una abrazadera de metal la camisa. Esto sucedía cuando se trabajaba con pesos comprendidos entre 1 Kg y 2Kg.

Las medidas adoptadas descritas en los apartados anteriores, hicieron que el sensor tuviese un comportamiento mucho más estable, por lo que, después de realizar pruebas con el sensor durante 3 días aproximadamente y comprobar que el margen de variación del reposos era bastante pequeño, se decidió empezar a tomar medidas para validar el sensor de fuerza.

En la figura 170 se muestra un explosionado del sensor de fuerza con los elementos de sujeción diseñados, salvo la circuitería. En la figura 171 se muestra un corte (A-A) y la planta de la pletina de aluminio acotado en milímetros, en el cual R2 es igual a 2 mm y R1 es igual a 1 milímetro.

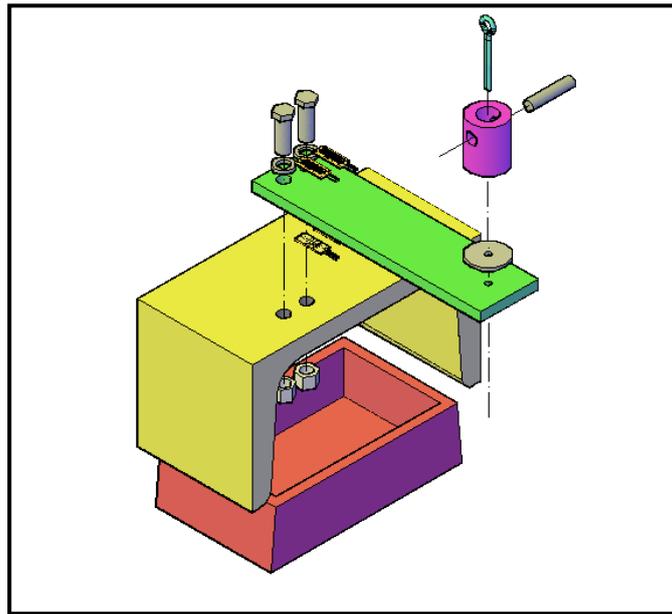


Figura 170 – Explosionado del sensor de fuerza sin la circuitería.

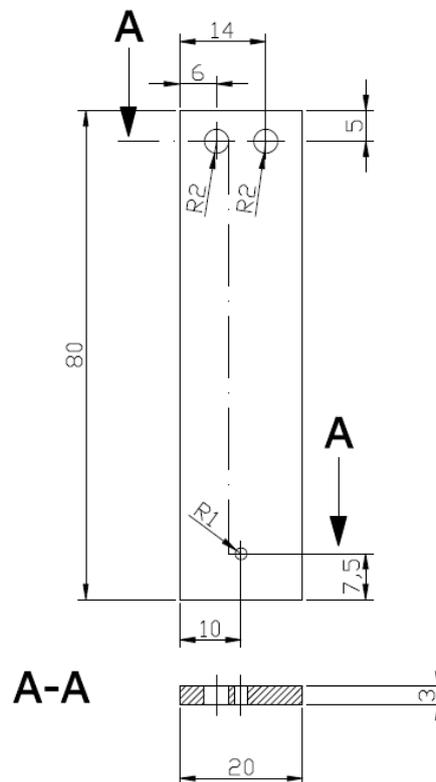


Figura 171 – Planta y corte A-A de la pletina de aluminio acotada en mm.

5.1.2 Validación del sensor de fuerza

Para la validación de datos se hizo uso de la herramienta creada por el grupo de investigación Robotics Lab, la cual se encarga de la adquisición de datos y para la realización del firmware del controlador embebido se emplea una herramienta de programación visual fruto de la tesis doctoral de Antonio Flores Caballero [1].

En el capítulo 3 diseño del sensor de fuerza, y más concretamente en el apartado 3.1 descripción general, se explicaban los distintos pasos o procesos necesarios, que a grandes rasgos consisten en obtener a partir de una magnitud física del entorno, una magnitud eléctrica para poder tratarla electrónicamente hasta quedar registrada para el posterior análisis. Los dos últimos pasos: procesamiento de la señal y registro y/o presentación, se engloban dentro de la adquisición de datos del presente trabajo fin de grado, debido al uso de las herramientas empleadas, mencionadas en el primer párrafo. Dichas herramientas se encargan de desarrollar las operaciones necesarias para preparar los datos y poder proceder al registro de los valores obtenidos (mediante el ordenador) y a la presentación de éstos en formato digital para poder ser supervisados y analizados posteriormente mediante el programa Matlab.

Para hacer uso de Matlab como software para realizar los cálculos matemáticos complejos para permitir la visualización de los mismos, y Simulink, herramienta interna de Matlab para el manejo del entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos, es necesario la configuración de Matlab y la configuración del ordenador encargado de mostrar los datos. El empleo de la herramienta Simulink se debe a la posibilidad de obtener los datos de las simulaciones y sus correspondientes gráficas y de generar el diagrama de bloques y su correspondiente código C para compilarlo en el programa Keil μ Vision 5 (software que cuenta con la arquitectura del microcontrolador STM32F4, permitiendo obtener el máximo rendimiento de éste) y enviarlo a la placa controladora, STM32F4, que se emplea en el banco de pruebas de las SMA's. Cabe destacar que poder realizar todas estas conexiones entre software y hardware es fruto de la mencionada tesis doctoral de Antonio Flores Caballero.

Antes de explicar cómo se procede con la captación de datos, se va a explicar cómo se realizaron las medidas y el tipo de pesos empleados. En la figura 172 se muestra una perspectiva general del sensor de fuerza.

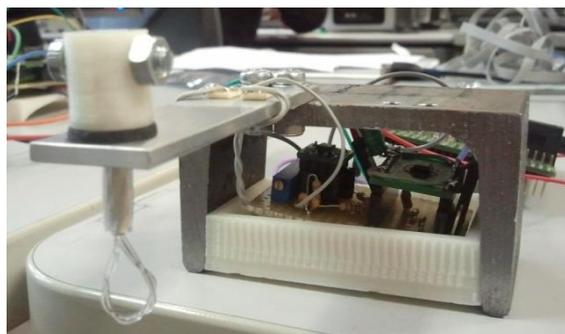


Figura 172 – Perspectiva general del sensor de fuerza.

Como se explicó en el punto anterior, para realizar la toma de medidas con el sensor de fuerza, se cuelgan los pesos del cordón formado por el nylon, debido al tipo de enganche de los pesos utilizados. Dicha toma de medidas se realizó de 5 gramos en 5 gramos, desde el reposo, 0 gramos, hasta un peso total de 2000 gramos, este rango viene determinado por las pesas utilizadas, ya que la suma total de todas ellas es de 2000 gramos. En la figura 173 y en la figura 174 se muestran las pesas de precisión y el resto de pesas empleadas para la toma de medidas, respectivamente.



Figura 173 – Pesas de precisión para la toma de medidas.



Figura 174 – Pesas adaptadas para la toma de medidas.

Con respecto a la figura 174 hay varias aclaraciones que hacer, a las tres primeras pesas, fotografías empezando por la izquierda, hubo que adaptarlas para poder realizar las medidas, de tal manera que éstas se pudiesen colgar del sensor pero, a su vez, se pudiesen colgar el resto de pesas de ellas. Para ello se emplearon unos clips forrados con cinta aislante en la zona de contacto con el cable que las soporta y con el cordón de nylon, para evitar posibles daños. Otro aspecto a resaltar sobre estas pesas es que, se tuvo en cuenta el peso de los cables y de los elementos de enganche para conseguir que las tres pesas sumasen 1500 gramos, como se puede apreciar en la figura 174. La otra aclaración con respecto a la figura 174 son las dos últimas fotos, empezando por la izquierda, el uso de la adaptación de estas piezas a pesas vino determinado por un lado por la obtención de un peso de 2000 gramos y por otro, por el empleo de las pesas descritas anteriormente, ya que son necesarias para la secuencia empleada en la toma de medidas, la cual es la siguiente:

1. Utilizar las pesas de precisión realizando medidas de 5 en 5 gramos, la primera medida corresponde al reposo, es decir, sin ninguna pesa, después se usa la pesa de 5 gramos, a continuación la de 10 gramos y así hasta utilizar todas las pesas para obtener un peso de 515 gramos, cabe destacar que fue necesario el uso de ambas piezas adaptadas como pesas.
2. Cambiar las pesas de precisión y poner la pesa de 515 gramos para poder volver a utilizar las pesas de precisión.
3. Con la pesa de 515 gramos colocada en el sensor, se vuelven a emplear las pesas de precisión, realizando medidas de 5 en 5 gramos, en este caso es necesario el

- uso de la pieza adaptada como pesa de 20 gramos para obtener un peso de 500 gramos.
4. Cambiar las pesas de precisión y poner la pesa de 500 gramos colgada de la de 515 gramos para poder volver a utilizar las pesas de precisión.
 5. Con las pesas de 515 gramos y la de 500 gramos colocadas en el sensor, se vuelven a emplear las pesas de precisión, realizando medidas de 5 en 5 gramos, para obtener un peso de 485 gramos.
 6. Cambiar las pesas de precisión y poner la pesa de 485 gramos colgada de la de 500 gramos para poder volver a utilizar las pesas de precisión.
 7. Por último, se vuelven a realizar las medidas de 5 en 5 gramos hasta obtener un peso de 500 gramos y conseguir de esta manera tener un peso total colgado del sensor de fuerza de 2000 gramos. Para este paso fue necesario el uso de la pieza adaptada como pesa de 20 gramos.

Una vez definida la secuencia de uso de las pesas para realizar la captación de datos, se procede a abrir el programa Matlab. Antes de abrir dicho programa es necesario que el sensor esté conectado al dispositivo empleado para la captación de datos, y éste conectado al ordenador, ya que sino el programa no reconoce el puerto USB mediante el cual se vuelca la información del sensor de fuerza al ordenador. En caso de conectarlo antes de abrir el programa Matlab, éste no reconocerá la conexión mediante USB del microcontrolador STM32F4 y Matlab implicando que, al intentar realizar una simulación desde Simulink, aparecerá un mensaje de error. Este error se suele solventar cerrando el programa, desconectando el cable USB del ordenador que conecta con el dispositivo de captación de datos y, a su vez, desconectando éste del sensor de fuerza. A continuación se vuelve a rearmar el sistema y ya estaría listo para trabajar. Existe la posibilidad de que haciendo esto siga sin reconocer la conexión, en este caso hay que ver la dirección que se ha asignado al puerto USB en Simulink y cambiarla en el ordenador, más adelante se explica con más detalle (dicha asignación de dirección se realiza automáticamente).

Cuando se ha realizado la conexión en el orden correcto, se procede a abrir el programa Matlab, una vez abierto se deben buscar los archivos *.mdl*, modelos de Simulink, mediante los cuales se conecta Matlab con el microcontrolador y, a su vez, permite realizar la visualización de los datos medidos con el sensor de fuerza. Para abrir los archivos se despliega la barra del buscador y se selecciona el archivo que previamente fue guardado en el ordenador, como se puede apreciar en la figura 175. Dichos archivos son parte de la tesis doctoral del tutor de este proyecto, por un lado se debe abrir el archivo del sensor de fuerza denominado "*sensor_fuerza_2440.mdl*" y por otro, el archivo denominado "*sensor_fuerza_2440_Host.mdl*", más adelante se explican brevemente. Cabe destacar que ambos archivos deben estar guardados en la misma carpeta para poder visualizarlos desde la zona de la interfaz de Matlab denominada "*Current folder*", situada en la parte izquierda de la pantalla (en la figura 176 se señala dicha zona).

con recuadros de colores, rojo y azul. Los bloques de Simulink que se observan son los siguientes, en orden descendente, “Scope, Display, To workspace y Gain”, si se usan varios de estos bloques en el mismo espacio de modelo de Simulink, se deben nombrar de forma distinta, de ahí que los nombres de los bloques del recuadro rojo tengan un 1 al final.

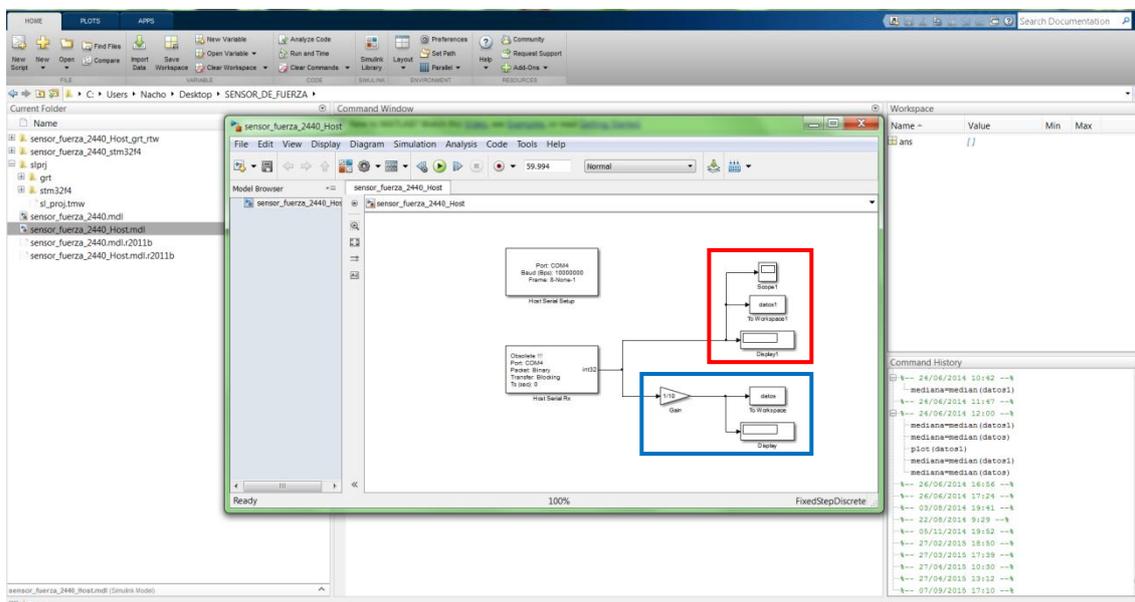


Figura 177 - Modelo Simulink mediante el cual se realizan las simulaciones y se capturan los datos.

El bloque “Scope” muestra señales de dominio de tiempo con respecto al tiempo de simulación, o lo que es lo mismo, muestra las señales generadas durante la simulación. Si hacemos doble clic sobre dicho bloque o pinchando en él y luego se aprieta el botón derecho del ratón se despliega una ventana de opciones, seleccionamos open y se abre la ventana de visualización de la simulación (ver figura 177).

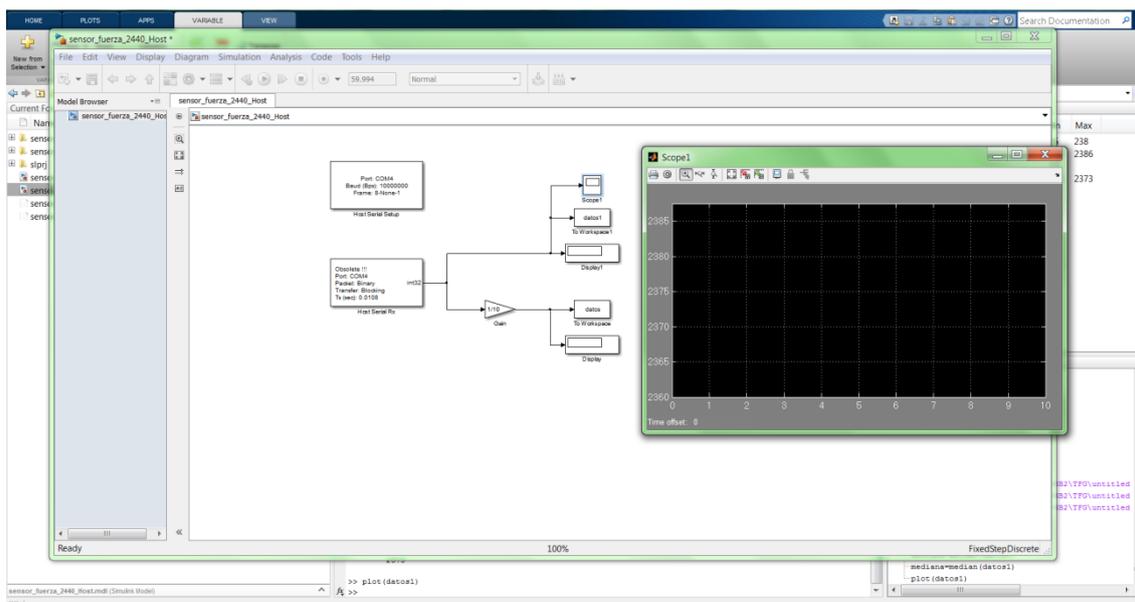


Figura 178 – Ventana de visualización de las simulaciones en Matlab-Simulink.

El siguiente elemento es el denominado “*Display*”, este bloque se encarga de mostrar por pantalla el valor de su entrada, en el caso de las simulaciones la duración de cada una de éstas era de 60 segundos y tomaba 5556 datos, de manera que cuando la simulación estaba en marcha el “*Display*” cambiaba de valor constantemente.

El bloque “*To Workspace*” envía su entrada al espacio de trabajo “*Workspace*” de MatLab. Este bloque envía los valores de la entrada a una variable de tipo “*array*” con el nombre especificado para el bloque (datos y datos1), de manera que generará una tabla con todos los valores de la medida durante el tiempo de simulación.

Por último se encuentra el bloque “*Gain*”, ganancia en castellano, multiplica la entrada por un valor constante. En el caso del modelo del sensor de fuerza se multiplica por 0.1, ya que en el caso del “*Display1*” se pudo comprobar que los tres primeros dígitos variaban casi siempre entorno a 4 unidades, por lo que se decidió que para facilitar el manejo de los datos y representar las gráficas, el cuarto dígito se podía despreciar, de ahí el uso de dicho bloque.

No obstante se guardaron ambos datos de todas las simulaciones.

Durante la realización de la toma de datos debido a la excesiva precisión del convertor de 24 bits la señal leída fue dividida entre 16. Dado que el convertor obtiene un dato de tensión (diferencial en este caso) de 24 bits, que son 16 millones de valores, y el sistema tiene un ruido inherente de un nivel de decenas de microvoltios, pues el convertor ADC percibía ese ruido perfectamente, de manera que emplear 24 bits hacía muy difícil distinguir cuando estaba el sensor en reposo. De ahí la decisión de eliminar los cuatro últimos bits (dividiendo entre 16), gracias a esto se observó que se obviaba bastante ruido, y se seguía obteniendo una señal bastante buena.

En la figura 179 se señala el bloque de ganancia introducido, con un valor de 0.0625, que es lo mismo que 1/16.

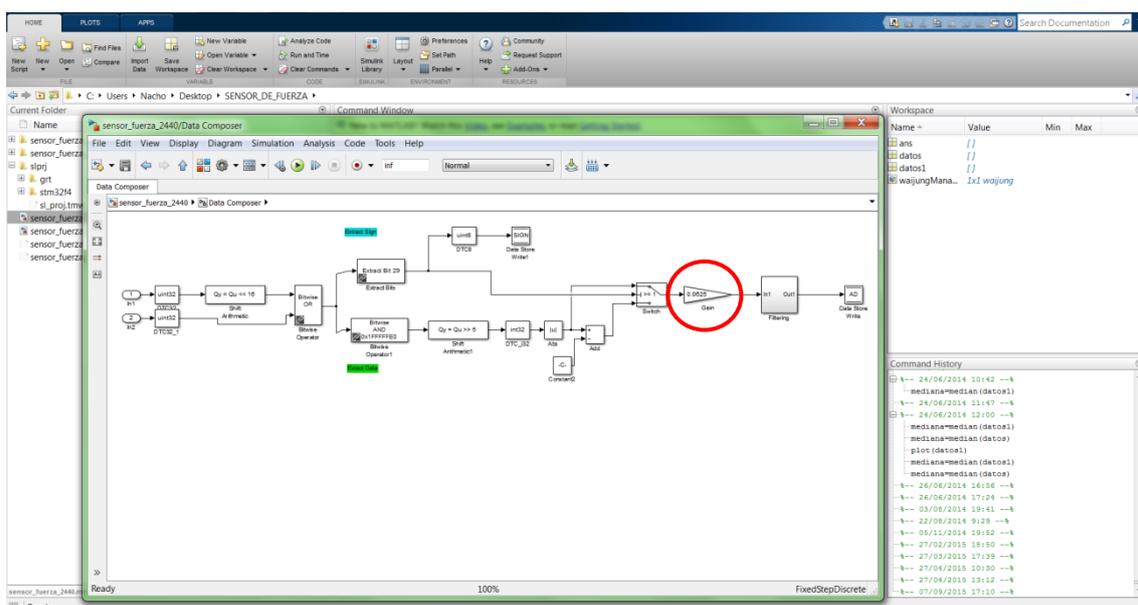


Figura 179 – Visualización del bloque “*Data Composer*” del modelo “*sensor_fuerza_2440*”.

Otro aspecto que se detectó durante la toma de datos, fue que el sensor de fuerza presenta histéresis, este fenómeno implica que para un mismo valor de la magnitud de entrada se encuentran dos posibles valores de la salida, el valor de la salida depende de la zona de la curva en la que se encuentra, es decir, en la zona ascendente o en la zona descendente. La histéresis es un efecto en el cual la fuerza restauradora de un elástico es mayor cuando está siendo estirado, que cuando está siendo contraído. Este resultado se puede explicar debido a que cuando la longitud de la banda elástica es mayor, aumenta el número de enlaces moleculares disponibles para quebrarse [29]. Por lo que hubo que obtener ambas gráficas de comportamiento, denominadas curva de subida y curva de bajada. En primer lugar se realizó la curva de subida y a continuación se realizó la curva de bajada, las cuales están formadas por 401 medidas, datos, cada una.

El último aspecto que se detectó durante la toma de medidas, el cual influía en estas, fue la temperatura. Este fenómeno tardó en ser detectado, ya que durante las primeras pruebas con el sensor, en el laboratorio no había mucha gente por lo que la frecuencia de abrir/cerrar la puerta era muy baja, a esto se le añade el hecho de que al haber poca gente implicaba el uso de pocos equipos, por lo que la temperatura se mantenía más o menos constante. De manera que durante las primeras horas de la mañana, el sensor se comportaba de la forma esperada, pero llegaba un momento en el que se apreciaba que las medidas perdían la tendencia habitual. Cuando pasaba esto, en el laboratorio se apreciaba un incremento de temperatura considerable con respecto al inicio del día. Por lo que era necesario compensar (y medir) el valor obtenido del ADC con la temperatura.

Esto implicó un problema añadido importante, ya que al no disponer de un espacio climatizado, hubo que decidir cómo lidiar dicha influencia. La conclusión a la que se llegó fue realizar las medidas en varios días, trabajando en el mismo intervalo del día, evitando así realizar la toma de medidas cuando en el laboratorio había mucha actividad y evitar en la medida de lo posible el efecto de la temperatura.

Para ir obteniendo las curvas, lo que se hizo fue de cada medida se fue guardando un archivo por cada variable del *“Workspace”*, es decir, para datos y datos1, obteniendo 401 archivos por cada curva. Para la representación de las curvas se decidió realizar a éstas con la mediana de los datos obtenidos por cada medida, ya que la mediana representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados, por lo que es mejor que la media porque no tiene en cuenta los valores extremos, es mejor para despreciar los llamados "outliers" o datos anormales, también es empleada para datos asimétricos.

La forma de proceder fue la siguiente, se abre el programa Matlab y desde el buscador se accede a la carpeta donde se han guardado los archivos, una carpeta por cada curva, se abre el primer archivo. Una vez abierto, en el entorno del *“Workspace”* se ve el nombre del archivo en cuestión, a continuación se crea una variable en dicho entorno con el nombre de mediana, pulsando con el botón derecho del ratón sobre dicho entorno, también se pueden abrir en forma de tabla las variables datos y datos 1, como se puede ver en la figura 180.

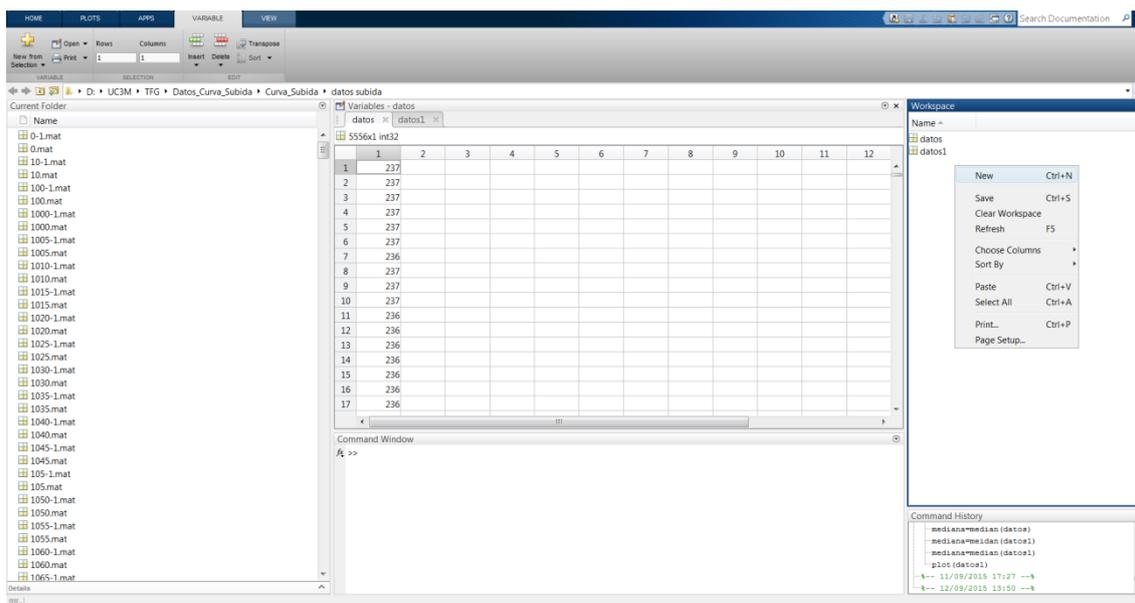


Figura 180 – Crear variable en el entorno de “workspace” de Matlab.

El último paso, para obtener la mediana de los valores de la variable “datos”, se escribe en el entorno de “Comand Window” lo siguiente:

mediana = median (datos) (y se pulsa “Enter”)

de esta manera se obtiene el valor de la mediana (ver figura 181). Para poder generar las gráficas mediante Matlab, es necesario pasarle los valores como una tabla, para ello se generó una tabla en Excel con el valor del peso empleado para la medida y el valor de la mediana obtenido. Este proceso se hizo para todas las medidas de ambas curvas.

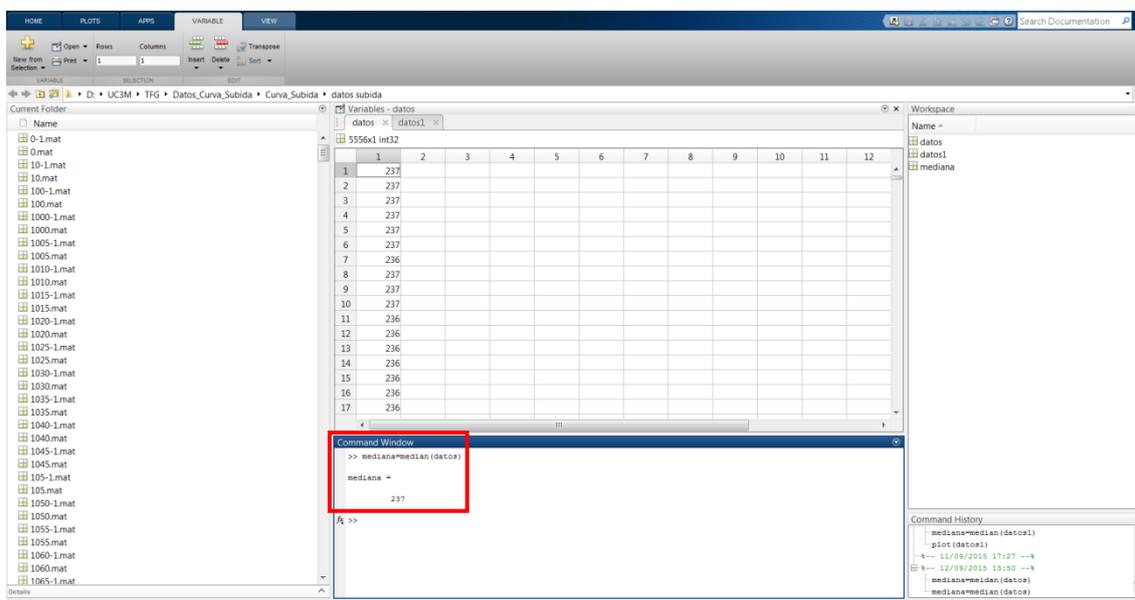


Figura 181 – Obtener valor de la mediana mediante Matlab.

Tabla 4 – Valores de la mediana de la curva de subida (izq.) y de la curva de bajada (dcha.).

PESO (gr)	MEDIANA (Uds.)
0	237
5	247
10	257
15	267
20	278
25	288
30	298
35	308
40	319
45	329
50	339
55	349
60	360
65	370
70	380
75	390
80	401
85	411
90	421
95	431
100	442
105	452
110	462
115	472
120	483
125	493
130	503
135	513
140	524
145	534
150	545
155	555
160	565
165	575
170	586
175	596
180	607
185	617
190	627
195	637
200	648
205	658
210	668
215	678
220	689
225	699
230	709

PESO (gr)	MEDIANA (Uds.)
2000	4393
1995	4384
1990	4375
1985	4365
1980	4355
1975	4345
1970	4336
1965	4326
1960	4316
1955	4306
1950	4296
1945	4286
1940	4276
1935	4266
1930	4256
1925	4246
1920	4236
1915	4226
1910	4216
1905	4206
1900	4196
1895	4187
1890	4178
1885	4167
1880	4157
1875	4147
1870	4137
1865	4127
1860	4117
1855	4107
1850	4097
1845	4087
1840	4077
1835	4067
1830	4057
1825	4046
1820	4036
1815	4026
1810	4016
1805	4006
1800	3996
1795	3985
1790	3975
1785	3965
1780	3955
1775	3944
1770	3934

235	720
240	730
245	740
250	751
255	761
260	771
265	781
270	792
275	802
280	812
285	823
290	833
295	843
300	854
305	864
310	874
315	884
320	895
325	905
330	915
335	925
340	936
345	946
350	956
355	966
360	977
365	987
370	997
375	1007
380	1018
385	1028
390	1038
395	1049
400	1059
405	1069
410	1079
415	1090
420	1100
425	1110
430	1121
435	1131
440	1141
445	1152
450	1162
455	1173
460	1183
465	1193
470	1203

1765	3924
1760	3914
1755	3903
1750	3893
1745	3883
1740	3873
1735	3862
1730	3852
1725	3842
1720	3832
1715	3822
1710	3812
1705	3802
1700	3792
1695	3781
1690	3771
1685	3761
1680	3751
1675	3741
1670	3730
1665	3720
1660	3710
1655	3699
1650	3689
1645	3679
1640	3669
1635	3658
1630	3649
1625	3638
1620	3628
1615	3618
1610	3608
1605	3597
1600	3587
1595	3577
1590	3567
1585	3556
1580	3546
1575	3535
1570	3525
1565	3514
1560	3504
1555	3493
1550	3483
1545	3472
1540	3462
1535	3452
1530	3442

475	1213
480	1224
485	1234
490	1244
495	1255
500	1265
505	1275
510	1285
515	1295
520	1305
525	1316
530	1326
535	1337
540	1347
545	1358
550	1368
555	1379
560	1389
565	1400
570	1410
575	1420
580	1430
585	1441
590	1451
595	1462
600	1472
605	1482
610	1493
615	1503
620	1513
625	1524
630	1534
635	1545
640	1555
645	1565
650	1575
655	1586
660	1596
665	1607
670	1617
675	1628
680	1638
685	1648
690	1658
695	1669
700	1679
705	1689
710	1699

1525	3432
1520	3421
1515	3410
1510	3400
1505	3390
1500	3380
1495	3369
1490	3359
1485	3349
1480	3338
1475	3328
1470	3318
1465	3307
1460	3297
1455	3287
1450	3276
1445	3266
1440	3255
1435	3245
1430	3234
1425	3224
1420	3214
1415	3204
1410	3194
1405	3184
1400	3174
1395	3164
1390	3153
1385	3143
1380	3132
1375	3122
1370	3111
1365	3101
1360	3090
1355	3080
1350	3069
1345	3059
1340	3049
1335	3038
1330	3028
1325	3018
1320	3007
1315	2997
1310	2987
1305	2976
1300	2966
1295	2956
1290	2945

715	1709
720	1719
725	1730
730	1740
735	1750
740	1761
745	1771
750	1782
755	1792
760	1802
765	1813
770	1824
775	1835
780	1845
785	1856
790	1866
795	1876
800	1886
805	1897
810	1907
815	1918
820	1928
825	1938
830	1948
835	1959
840	1969
845	1980
850	1990
855	2000
860	2011
865	2021
870	2031
875	2042
880	2052
885	2063
890	2073
895	2083
900	2093
905	2104
910	2114
915	2124
920	2134
925	2145
930	2155
935	2166
940	2176
945	2186
950	2197

1285	2935
1280	2924
1275	2914
1270	2904
1265	2893
1260	2883
1255	2873
1250	2862
1245	2852
1240	2841
1235	2830
1230	2819
1225	2809
1220	2799
1215	2789
1210	2778
1205	2768
1200	2758
1195	2747
1190	2737
1185	2727
1180	2716
1175	2706
1170	2695
1165	2685
1160	2674
1155	2664
1150	2653
1145	2643
1140	2633
1135	2623
1130	2612
1125	2602
1120	2592
1115	2582
1110	2571
1105	2561
1100	2551
1095	2541
1090	2530
1085	2520
1080	2509
1075	2499
1070	2489
1065	2478
1060	2468
1055	2458
1050	2447

955	2207
960	2217
965	2228
970	2238
975	2249
980	2259
985	2270
990	2280
995	2290
1000	2300
1005	2311
1010	2321
1015	2332
1020	2342
1025	2352
1030	2362
1035	2373
1040	2384
1045	2395
1050	2405
1055	2416
1060	2426
1065	2437
1070	2447
1075	2457
1080	2467
1085	2478
1090	2488
1095	2498
1100	2508
1105	2519
1110	2529
1115	2540
1120	2550
1125	2561
1130	2571
1135	2582
1140	2592
1145	2602
1150	2613
1155	2623
1160	2633
1165	2644
1170	2654
1175	2665
1180	2675
1185	2686
1190	2696

1045	2437
1040	2427
1035	2417
1030	2406
1025	2396
1020	2385
1015	2375
1010	2364
1005	2354
1000	2344
995	2333
990	2323
985	2313
980	2302
975	2293
970	2283
965	2273
960	2263
955	2253
950	2243
945	2233
940	2222
935	2212
930	2201
925	2191
920	2181
915	2171
910	2161
905	2151
900	2140
895	2130
890	2120
885	2110
880	2099
875	2089
870	2078
865	2068
860	2057
855	2047
850	2037
845	2026
840	2016
835	2006
830	1995
825	1985
820	1974
815	1964
810	1953

1195	2707
1200	2717
1205	2727
1210	2737
1215	2747
1220	2757
1225	2767
1230	2778
1235	2788
1240	2799
1245	2809
1250	2819
1255	2830
1260	2840
1265	2851
1270	2861
1275	2871
1280	2881
1285	2892
1290	2902
1295	2913
1300	2924
1305	2934
1310	2944
1315	2955
1320	2966
1325	2977
1330	2987
1335	2998
1340	3008
1345	3019
1350	3029
1355	3040
1360	3050
1365	3061
1370	3071
1375	3082
1380	3092
1385	3103
1390	3113
1395	3123
1400	3133
1405	3144
1410	3154
1415	3164
1420	3174
1425	3184
1430	3194

805	1943
800	1933
795	1922
790	1911
785	1901
780	1890
775	1880
770	1869
765	1858
760	1848
755	1837
750	1826
745	1816
740	1806
735	1795
730	1785
725	1774
720	1764
715	1754
710	1743
705	1732
700	1722
695	1711
690	1701
685	1691
680	1680
675	1670
670	1659
665	1648
660	1638
655	1628
650	1617
645	1607
640	1596
635	1586
630	1575
625	1565
620	1554
615	1544
610	1533
605	1523
600	1512
595	1502
590	1492
585	1481
580	1470
575	1460
570	1450

1435	3205
1440	3215
1445	3225
1450	3235
1455	3246
1460	3256
1465	3267
1470	3277
1475	3287
1480	3298
1485	3308
1490	3319
1495	3330
1500	3340
1505	3350
1510	3361
1515	3371
1520	3382
1525	3393
1530	3403
1535	3413
1540	3424
1545	3434
1550	3445
1555	3456
1560	3467
1565	3477
1570	3488
1575	3499
1580	3509
1585	3519
1590	3530
1595	3540
1600	3550
1605	3561
1610	3571
1615	3581
1620	3592
1625	3602
1630	3613
1635	3624
1640	3634
1645	3645
1650	3655
1655	3666
1660	3677
1665	3687
1670	3698

565	1439
560	1429
555	1418
550	1408
545	1397
540	1387
535	1376
530	1365
525	1355
520	1345
515	1335
510	1325
505	1314
500	1304
495	1293
490	1283
485	1272
480	1262
475	1251
470	1241
465	1230
460	1220
455	1210
450	1200
445	1189
440	1179
435	1168
430	1158
425	1147
420	1137
415	1126
410	1116
405	1105
400	1095
395	1085
390	1075
385	1065
380	1054
375	1044
370	1034
365	1023
360	1012
355	1002
350	992
345	981
340	971
335	960
330	950

1675	3708
1680	3718
1685	3729
1690	3739
1695	3749
1700	3759
1705	3769
1710	3780
1715	3790
1720	3801
1725	3811
1730	3821
1735	3832
1740	3842
1745	3852
1750	3862
1755	3873
1760	3883
1765	3893
1770	3904
1775	3914
1780	3925
1785	3935
1790	3946
1795	3957
1800	3968
1805	3978
1810	3989
1815	4000
1820	4010
1825	4020
1830	4031
1835	4041
1840	4052
1845	4063
1850	4074
1855	4084
1860	4095
1865	4106
1870	4116
1875	4126
1880	4136
1885	4147
1890	4157
1895	4168
1900	4179
1905	4189
1910	4200

325	939
320	929
315	918
310	908
305	897
300	887
295	876
290	866
285	856
280	845
275	834
270	824
265	813
260	803
255	792
250	782
245	771
240	761
235	750
230	740
225	729
220	719
215	708
210	698
205	687
200	677
195	666
190	655
185	645
180	634
175	624
170	613
165	602
160	592
155	582
150	571
145	560
140	550
135	539
130	529
125	518
120	508
115	497
110	487
105	476
100	466
95	455
90	445

1915	4211	85	434
1920	4222	80	424
1925	4232	75	413
1930	4243	70	403
1935	4253	65	392
1940	4264	60	382
1945	4274	55	371
1950	4285	50	361
1955	4296	45	350
1960	4307	40	340
1965	4317	35	329
1970	4328	30	318
1975	4341	25	307
1980	4351	20	297
1985	4362	15	286
1990	4372	10	276
1995	4382	5	265
2000	4393	0	255

Una vez generadas las tablas en Excel, mediante la función “*Curve Fitting*”, se obtuvieron las gráficas mostradas en las figuras 186 y 187 (mostradas más adelante), donde las unidades del eje X son los gramos y las del eje Y la medida del valor digital de salida del conversor A/D, para ambas gráficas. Para obtener dichas gráficas se debe crear una variable en el entorno de “*Workspace*”, la cual se denominó “*sensor*”, si abrimos dicha variable en el entorno del “*variables*” se abre una ventana semejante a un archivo de Excel. En la primer columna de esta ventana se introducen los valores obtenidos de las medianas y en la columna de al lado se introducen los valores de los pesos correspondientes a esas medianas. El uso del programa Excel se debe a que facilita la introducción de los datos en Matlab, ya que se pueden copiar columnas de datos enteras.

A continuación en el entorno de “*Comand Window*” se escribe lo siguiente (ver figura 182):

```
gramos = sensor (:,2);
```

```
output = sensor (:,1);
```

```
cftool (y se pulsa “Enter”)
```

Introduciendo estas sentencias lo que se está haciendo es crear una variable con el nombre “*gramos*” y se le da todos los valores de la columna 2. Para la variable “*output*” ocurre exactamente lo mismo pero con los datos de la columna 1. Por último, al escribir “*cftool*” se abre la herramienta “*Curve Fitting*”, mediante la cual se generan las gráficas de comportamiento del sensor de fuerza.

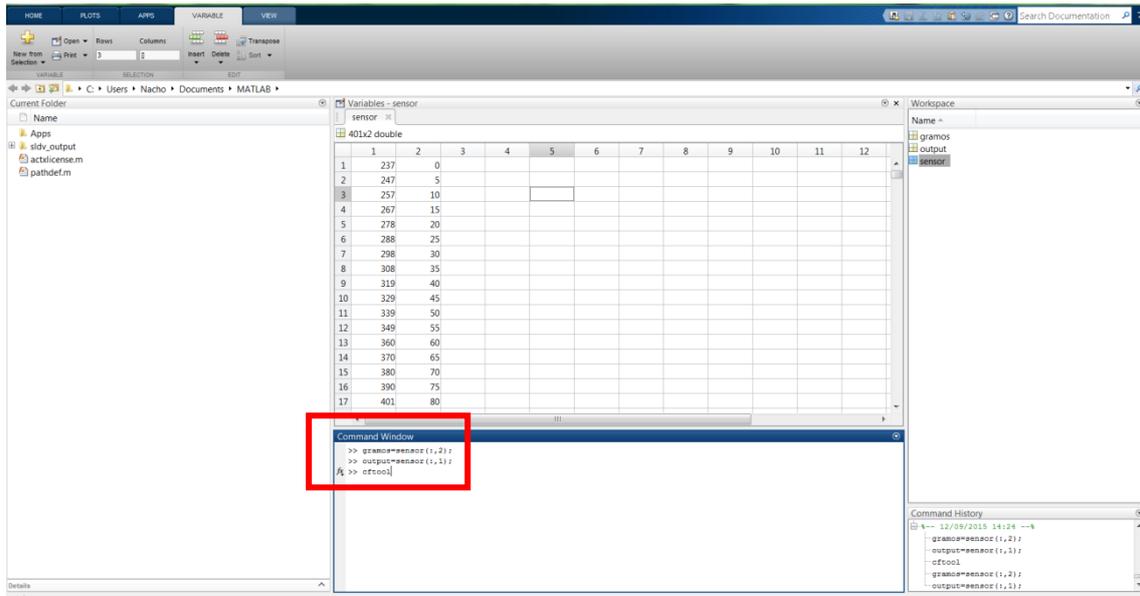


Figura 182 – Creación de variable para poder utilizar la herramienta “Curve Fitting” de Matlab.

Al pulsar “Enter” automáticamente aparece la ventana mostrada en la figura 183, de la cual se deben configurar una serie de parámetros para obtener las gráficas. En primer lugar de la zona señalada en azul, donde pone “X data” se debe desplegar la pestaña y seleccionar “gramos” y en la pestaña de “Y data” se selecciona la variable “output” (variables creadas anteriormente). Después, de la zona señalada en rojo se despliega la primera pestaña, la cual ofrece una serie de opciones que son los distintos tipos de gráficas que puede generar Matlab para las variables definidas, de dichas opciones se selecciona “Polynomial”, ya que este tipo de rectas ajusta muy bien curvas que pueden tener cambios bruscos o algo no lineales, también sirve muy bien para curvas bastante lineales.

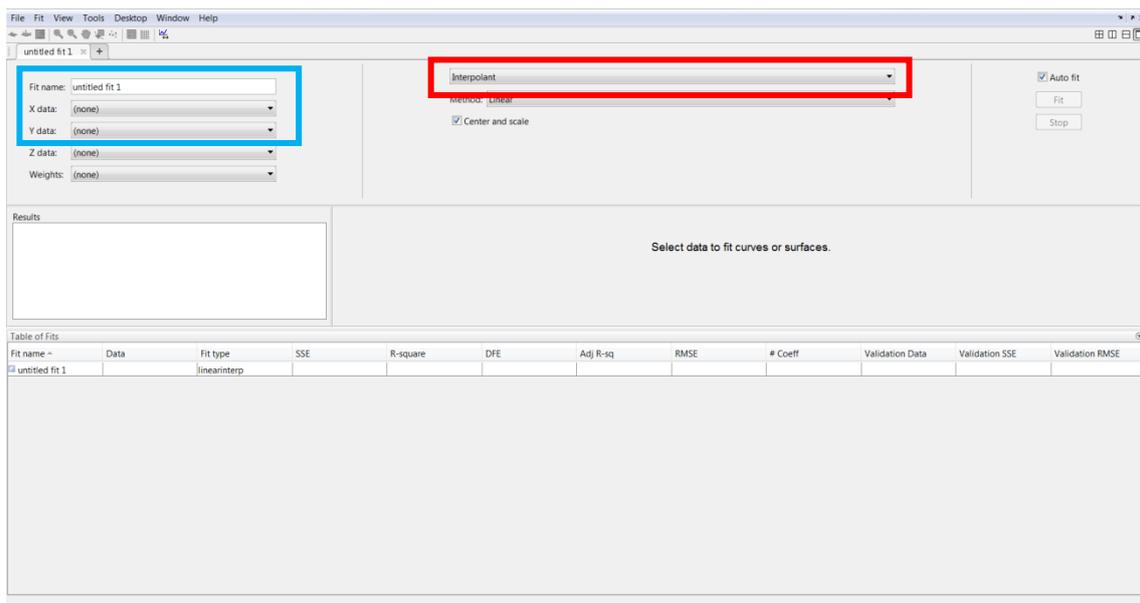


Figura 183 – Ventana de la herramienta “Curve Fitting” de Matlab.

El programa genera de forma automáticamente la gráfica, la cual se puede ver en la figura 184. Como se puede observar Matlab genera también una recta de ajuste de la gráfica generada en función de las variables. Para poder guardar la gráfica como un archivo “.jpg” se selecciona con el ratón de la barra de herramientas de la parte superior de la ventana “File → Print to Figure”.

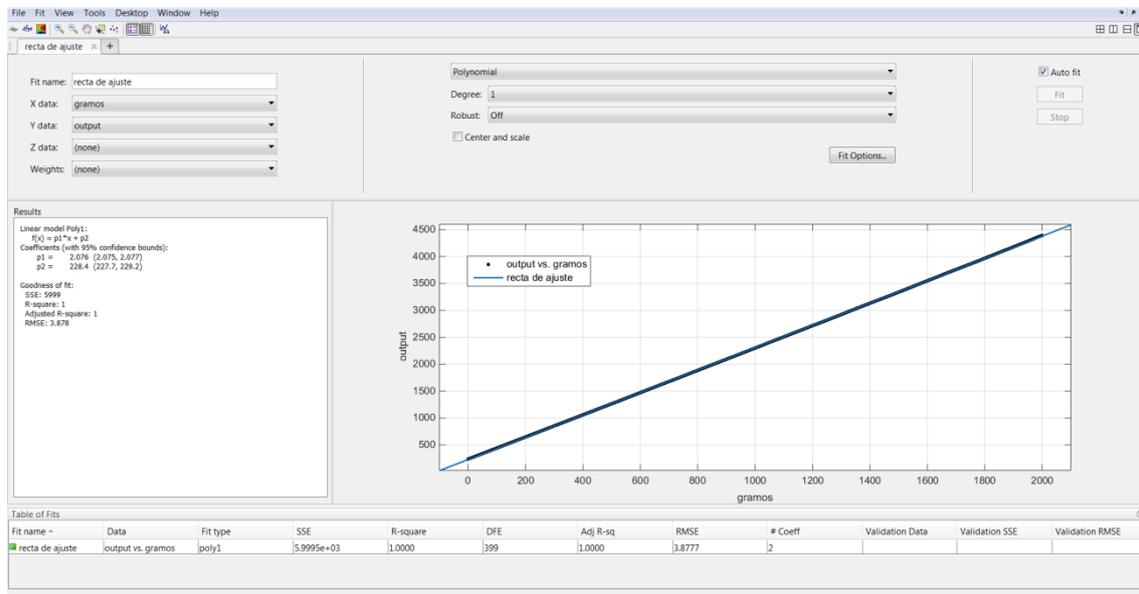


Figura 184 – Representación de la gráfica de subida en “Curve Fitting” de Matlab.

Acto seguido se abre una nueva ventana mostrando la gráfica. Para poder guardarla como archivo “.jpg” se debe seleccionar con el ratón de la barra de herramientas de la parte superior de la nueva ventana “File → Save As...” (Ver figura 185). A continuación se escoge donde guardar el tipo de archivo.

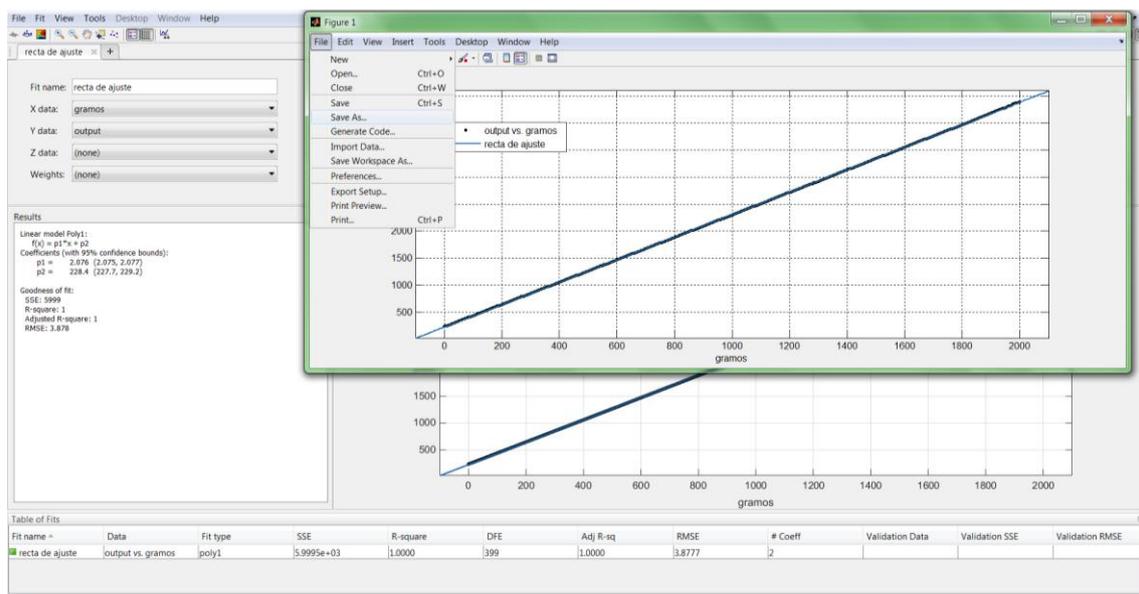


Figura 185 – Visualización de la gráfica generada para guardarla como archivo “.jpg”.

Los pasos descritos anteriormente para obtener la curva de subida del sensor de fuerza, se deben realizar exactamente de la misma manera para obtener la curva de bajada del

sensor. La propia herramienta “*Curve Fitting*” permite escoger el grado del polinomio empleado, de la zona donde se selecciona el tipo de recta, debajo se puede seleccionar el grado del polinomio. Para poder escoger grados mayores de 2 es necesario seleccionar la casilla de “*Center and scale*”. El programa con cada representación genera una recta de ajuste y muestra los parámetros de dicha recta. Para escoger el grado se realizaron simulaciones con todos los posibles grados, a continuación se muestran los datos arrojados por el programa para las rectas de grado 1, 2 y 9.

CURVA DE SUBIDA

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Where x is normalized by mean 1000 and STD 579.5

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 1203 (1203, 1203)$$

$$p2 = 2304 (2304, 2305)$$

Goodness of fit:

SSE: 5999

R-square: 1

Adjusted R-square: 1

RMSE: 3.878

Linear model Poly2:

$$f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3$$

Where x is normalized by mean 1000 and STD 579.5

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$p1 = 4.188 (4.077, 4.298)$$

$$p2 = 1203 (1203, 1203)$$

$$p3 = 2300 (2300, 2300)$$

Goodness of fit:

SSE: 401.8

R-square: 1

Adjusted R-square: 1

RMSE: 1.005

Linear model Poly9:

$$f(x) = p1*x^9 + p2*x^8 + p3*x^7 + p4*x^6 + p5*x^5 + p6*x^4 + p7*x^3 + p8*x^2 + p9*x + p10$$

Where x is normalized by mean 1000 and STD 579.5

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = -0.07821 (-0.2821, 0.1257)
 p2 = 0.5782 (0.4017, 0.7548)
 p3 = 0.9564 (-0.3445, 2.257)
 p4 = -3.031 (-4.026, -2.035)
 p5 = -2.71 (-5.518, 0.09718)
 p6 = 5.458 (3.669, 7.248)
 p7 = 2.37 (0.03002, 4.71)
 p8 = 0.1802 (-0.9249, 1.285)
 p9 = 1202 (1202, 1203)
 p10 = 2301 (2301, 2301)

Goodness of fit:

SSE: 189.1
 R-square: 1
 Adjusted R-square: 1
RMSE: 0.6954

CURVA DE BAJADA

Linear model Poly1:

$$f(x) = p1*x + p2$$

Where x is normalized by mean 1000 and STD 579.5

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = 1202 (1201, 1202)
 p2 = 2340 (2340, 2341)

Goodness of fit:

SSE: 1.243e+04
 R-square: 1
 Adjusted R-square: 1
 RMSE: 5.582

Linear model Poly2:

$$f(x) = p1*x^2 + p2*x + p3$$

Where x is normalized by mean 1000 and STD 579.5

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = -5.851 (-6.065, -5.637)

p2 = 1202 (1201, 1202)

p3 = 2346 (2346, 2346)

Goodness of fit:

SSE: 1503

R-square: 1

Adjusted R-square: 1

RMSE: 1.943

Linear model Poly9:

$$f(x) = p1*x^9 + p2*x^8 + p3*x^7 + p4*x^6 + p5*x^5 + p6*x^4 + p7*x^3 + p8*x^2 + p9*x + p10$$

Where x is normalized by mean 1000 and STD 579.5

Coefficients (with 95% confidence bounds):

p1 = -1.798 (-2.032, -1.565)

p2 = 0.3806 (0.1779, 0.5832)

p3 = 12.41 (10.92, 13.91)

p4 = -2.918 (-4.06, -1.776)

p5 = -30.24 (-33.46, -27.01)

p6 = 5.318 (3.264, 7.371)

p7 = 28.96 (26.27, 31.64)

p8 = -7.005 (-8.273, -5.737)

p9 = 1194 (1193, 1195)

p10 = 2345 (2345, 2345)

Goodness of fit:

SSE: 249

R-square: 1

Adjusted R-square: 1

RMSE: 0.798

Para cada recta se define el tipo de polinomio en función de su grado y se dan los valores de los coeficientes con un intervalo de confianza del 95% (“*coefficients with 95% confidence bounds*”), es decir, el 95% de los intervalos obtenidos de las muestras contendrán el valor verdadero del parámetro de la recta. El otro dato que arroja el programa es la bondad del ajuste (“*goodness of fit*”), esto indica si el ajuste de la recta es suficientemente bueno. Analizando los valores se observa que los únicos datos que varían son el SSE y el RMSE.

El MSE, error cuadrático medio, es usado para determinar la medida en la que el modelo no se ajusta a la información, o si el quitar ciertos términos puede simplificar el modelo de maneras benéficas. El MSE proporciona una forma para elegir el mejor estimador: un MSE mínimo, indica una variación mínima, y por lo tanto indica un buen estimador, de manera que tener un valor 0 sería el ideal, extrapolando al RMSE éste también debe buscar un valor lo más cercano al cero para ser un buen estimador. Por otro lado el SSE al ser la suma de errores cuadráticos el objetivo para un mejor ajuste es reducir éstos al máximo.

Según la estadística cuanto menores sean los valores de SSE y el RMSE, en castellano suma de errores residuales y raíz del error cuadrático de la media, respectivamente, mejor será el modelo de la recta de ajuste, por lo que el grado de la recta polinomial seleccionado fue el que cumplía con estos dos parámetros. A continuación se muestran dos tablas, tabla 5 y tabla 6, las cuales recogen los valores de SSE y RMSE para los distintos grados de la recta de ajuste de las distintas curvas del sensor.

Tabla 5 – Valores de los estimadores para los distintos grados para la recta de subida.

CURVA DE SUBIDA									
GRADO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SSE	5999	401,8	364,5	274,1	230,6	226,4	209,4	189,4	189,1
RMSE	3,878	1,005	0,9582	0,8319	0,764	0,758	0,73	0,695	0,6954

Tabla 6 - Valores de los estimadores para los distintos grados para la recta de bajada.

CURVA DE BAJADA									
GRADO	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SSE	1,243e+04	1503	1319	849	552,5	485,8	403,1	394,4	249
RMSE	5,582	1,943	1,822	1,464	1,183	1,11	1,013	1,003	0,798

Analizando las tablas, se puede concluir que la recta la mejor recta de ajuste es la recta polinomial de grado 9, para ambas curvas del sensor.

En las figuras siguientes, figura 186 y figura 187, se muestran las gráficas del comportamiento del sensor obtenidas en función de la captación de datos. Observando dichas gráficas se puede concluir que la respuesta del sensor de fuerza era la esperada para un circuito de puente de Wheatstone completo (con 4 galgas extensiométricas), ya que este tipo de circuitos dan una señal muy linealizada.

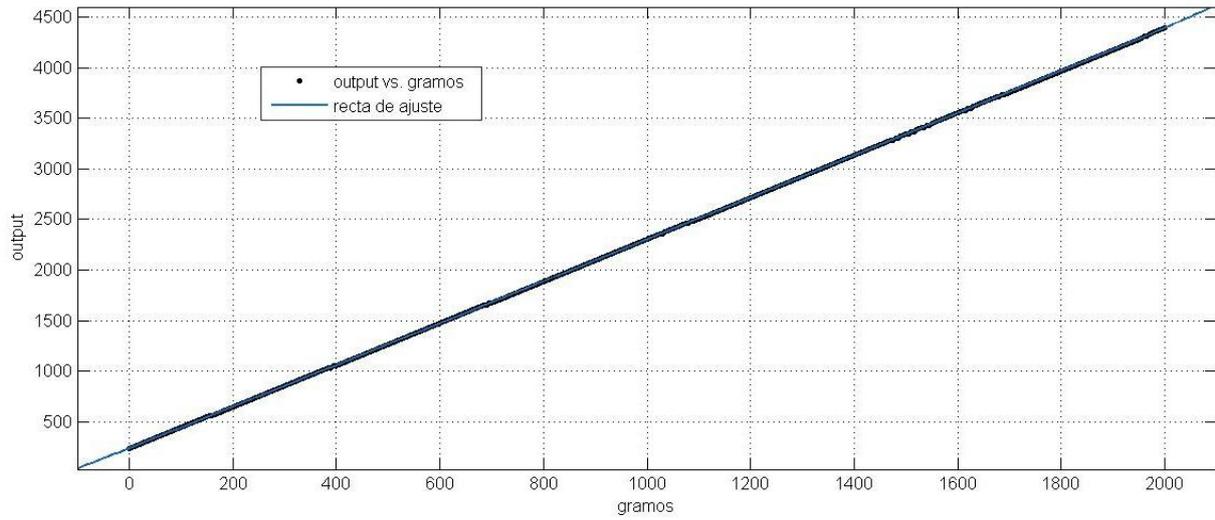


Figura 186 – Representación de la curva de subida con recta de ajuste polinomial de grado 9 mediante Matlab.

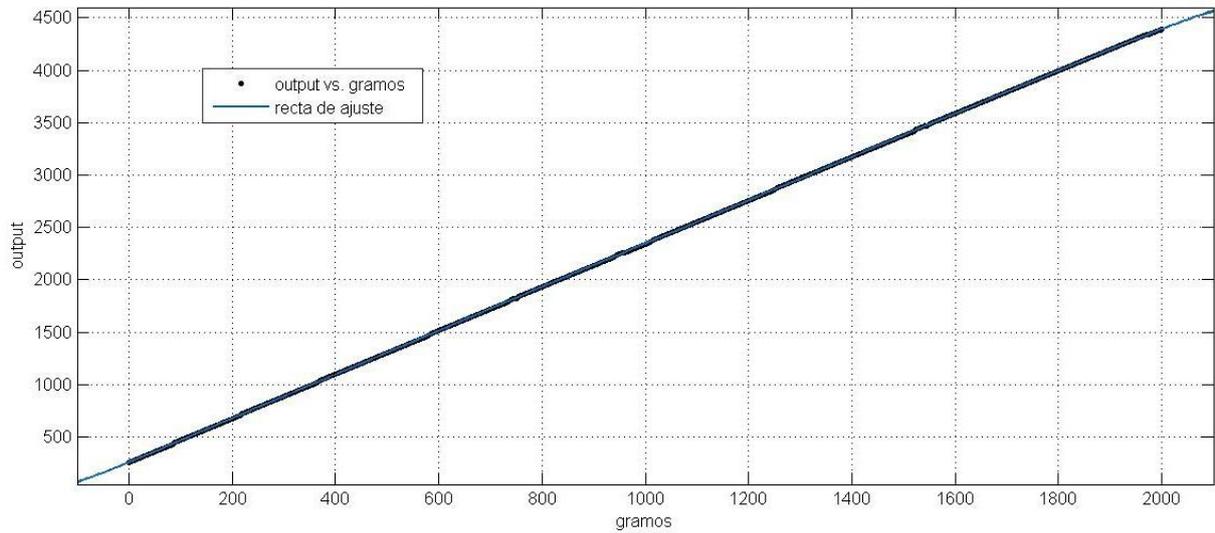


Figura 187 – Representación de la curva de bajada con recta de ajuste polinomial de grado 9 mediante Matlab.



6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se recogen, en primer lugar, las conclusiones obtenidas del estudio del sensor de fuerza, y en segundo lugar, los posibles trabajos futuros relacionados con el mismo.

Las conclusiones más importantes obtenidas tras realizar la puesta en marcha del sensor de fuerza y de los diseños realizados para el presente Trabajo Fin de Grado son:

- **Diseño e implementación del circuito puente de Wheatstone:**

Este circuito ha realizado sin problemas el fin para el cual fue diseñado. No obstante, para garantizar que las galgas sufren la misma deformación sería necesario realizar su colocación en la pletina de manera robotizada.

- **Diseño de la pletina de aluminio:**

El diseño de la pletina ha conseguido alcanzar los objetivos del trabajo fin de grado. No obstante, realizar el mecanizado de manera robotizada mejoraría la señal obtenida, ya que se pudo comprobar que la excesiva sensibilidad de las galgas es capaz de percibir pequeñas diferencias de tensiones, por lo que, para garantizar que las tensiones de la pletina influyan lo menos posible sería conveniente realizar el mecanizado mediante control numérico y emplear un material lo más puro posible, en este caso un aluminio de alta pureza, de esta manera el comportamiento elástico de la pletina mejoraría, implicando una mejora en la toma de medidas.

- **Diseño de la pieza de sujeción de la pletina:**

La pieza de soporte de la pletina ha cumplido con los objetivos para los que se pensó. Al igual que en el caso anterior, sería necesario realizar dicha pieza mediante control numérico o un sistema similar, para así garantizar que la superficie de contacto con la pletina sea lo más lisa posible, evitando de esta manera la influencia de tensiones no deseadas.

- **Diseño del soporte para el amplificador y el conversor analógico-digital:**

Aunque el soporte cumplió con su cometido, soportar la placa de fibra de vidrio discontinua en la que se soldó la etapa de acondicionamiento del sensor, se podría realizar un diseño que permitiera la circulación de aire para evitar la influencia de la temperatura de los componentes, en concreto del conversor analógico-digital.

- **Diseño de la pieza de sujeción de los pesos:**

Mediante la pieza de sujeción de los pesos se ha conseguido realizar la captura de datos del sensor de fuerza. No obstante, como ya se comentó anteriormente, el diseño tuvo una ligera modificación durante la toma de medidas, debido al uso tan continuo de éste, el nylon empezó a ceder un poco. Cabe destacar que la pieza cumplió satisfactoriamente con su cometido, ya que una vez obtenidas las curvas de comportamiento, dicha pieza se dejaría de usar.

- **Validación experimental del sensor de fuerza:**

Gracias al trabajo realizado en este Trabajo Fin de Grado, se ha conseguido poner de manifiesto las ventajas de este tipo sensor basado en galgas extensiométricas, como la linealidad de la señal, la sensibilidad del sistema, lo económico que resulta (salvo la etapa de captación de datos, tesis doctoral de Antonio Flores Caballero) y la relativa facilidad de montaje. Analizando ambas gráficas se puede concluir que la respuesta del sensor es bastante buena, ya que presenta una linealidad muy alta (característica que se sabía con antelación debido al uso del puente de Wheatstone completo), característica deseable en un sensor, ya que al presentar una relación directamente proporcional entre la magnitud física y la magnitud digital, permite realizar estimaciones de lo que puede pasar antes de tomar las medidas. No obstante, a pesar de las ventajas mencionadas, se pudo comprobar durante la etapa de pruebas del sensor que para mantener su estabilidad en las medidas, el sensor no debe moverse una vez ubicado. Aunque su uso para el que se ha diseñado y montado es un sistema estático, siempre es deseable poder darle una gama más amplia de aplicaciones.

De la elaboración de este Trabajo Fin de Grado se pueden desarrollar algunos trabajos directamente relacionados. A continuación se citan los más característicos:

- “Robotizar el diseño/montaje del sensor de fuerza”. En primer lugar, para evitar la influencia de tensiones en la pletina en la toma de medidas, debido a la sensibilidad del sensor, se deberían realizar los distintos mecanizados mediante control numérico, ya que de esta manera se puede garantizar que los esfuerzos generados sobre la pletina durante su mecanizado son idénticos, y con un aluminio de alta pureza. Para el montaje de la pletina sería necesario usar una llave dinamométrica, debido a que durante la toma de medidas se pudo comprobar que dependiendo de los giros realizados en los tornillos de agarre de la pletina con la pieza de sujeción, estos influían en la medida resultante. En segundo lugar, mejorar el acondicionamiento de la señal, reduciendo el nivel de ruido, realizando el montaje de la circuitería sobre una placa PCB, de manera que se eliminaría el uso de cables (factor principal del ruido) y se podría disminuir la temperatura de funcionamiento de los componentes. Otro aspecto de mejora sería realizar un diseño de un encapsulado, el cual proteja al sensor y permita un uso de este más cómodo.
- El principio de funcionamiento del sensor de fuerza con el sistema de captación de datos en tiempo real, se puede emplear para el control (en fuerza) de aplicaciones con exoesqueletos, prótesis o sistemas robotizados. Pudiendo realizar en todo momento un control de los esfuerzos generados en el sistema de estudio y determinar si se está trabajando en los rangos adecuados en función del objeto de estudio o del tipo de trabajo. Pudiendo desarrollar en Matlab un modelo de control que diera el aviso cuando el sistema está trabajando en los límites de fuerza permitidos, definidos previamente.

-



7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Hardware de adquisición de señales analógicas diferenciales:
<http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/20665>
- [2] Estudios e información sobre la Robótica: robótica y aplicaciones:
<http://www.monografias.com/trabajos10/robap/robap.shtml>
- [3] Estudio e información sobre el concepto de Biomedicina:
<http://www.loyzaga.com/biomedicina/>
- [4] Clasificación de los robots:
http://wiki.webdearde.com/index.php/TIPOS_DE_ROBOTS#CLASIFICADOS_POR_FUNCION
- [5] Definición de sensor y transductor:
<http://www.dccia.ua.es/dccia/inf/ asignaturas/ROB/optativos/Sensores/intro.html#clasificaciones>
- [6] Balcells J., Romeral, J.L.; Autómatas programables; ed. Marcombo.
- [7] R. Pallás Areny, Sensores y Acondicionadores de señal, Ed. Marcombo.
- [8] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors, AIP Press.
- [9] Definición de sensores internos y externos:
<http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf>
<http://www.dccia.ua.es/dccia/inf/ asignaturas/ROB/optativos/Sensores/internos.html>
- [10] Imágenes de los sensores:
<http://www.sensotec-instruments.com/Castellano/Transductores%20y%20Transmisores%20de%20Desplazamiento.htm>
http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/january_05/Resolver_Sensors.htm
http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Sensores-de-distancia_36/Sensores-de-distancia-LVDT_55/

<http://www.ti.com/product/lm2907-n>

<http://www.maccon.de/de/sensoren/magnetische-encoder/inductosyn.html>

<http://www.usdigital.com/>

http://www.automatica.cat/El_Encoders_Abs.htm

<http://www.directindustry.es/>

http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Aceler%C3%B3metros---Sensores-de-aceleraci%C3%B3n_49/

- [11] Representación de un electrodo en un array táctil:

<http://www.intechopen.com/books/high-performance-polymers-polyimides-based-from-chemistry-to-applications/sensor-applications-of-polyimides#article-front>

- [12] Imagen de un sensor táctil de array (piel artificial):

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424709005354>

- [13] Definición e imágenes del “Pressure Sensor Platform”:

<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/6/10273/htm>

- [14] Imágenes de los modelos de sensor de muñeca JR3:

<http://www.jr3.com/index.html>

- [15] Definición del módulo de Poisson:

Ortiz Berrocal, L., *Elasticidad*, McGraw-Hill, 1998, [ISBN 84-481-2046-9](#).

- [16] Hoja de características de LTC2051:

<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/20512fd.pdf>

- [17] Nota de aplicación 96. Técnicas de medidas con puente de Wheatstone y un convertidor analógico-digital Sigma-Delta:

<http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an96fa.pdf>

- [18] Definición del Conversor Analógico Digital SAR y Sigma-Delta:

http://www2.uca.es/grup-invest/instrument_electro/ppjjgdr/Electronics_Instrum/Electronics_Instrum_Files/temas/T11_CAD.pdf

- [19] Imagen de un convertidor analógico digital tipo SAR:
<http://www.linearnews.com/press/LTC2378-20/LTC2378-20.html>
- [20] Hoja de características de LTC2440:
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/2440fd.pdf>
- [21] Imagen del microcontrolador STM32F4 discovery:
<http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419>
- [22] Introducción al método de elementos finitos:
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Ingeniería Estructural
Carlos Navarro Ugena, José Luis Pérez Castellanos
Universidad Carlos III de Madrid
- [23] Manual de ABAQUS:
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Carlos Santiuste Romero
Universidad Carlos III de Madrid
- [24] Manual de usuario:
Abaqus programa de elementos finitos
Maylett Y. Uzcátegui Flores
Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes
- [25] Strain Gauge Installatation Tutorial
Telerobotic and Biorobotic Systems Group
Matthew Dyck with Joshua Hoffmann
University of Alberta
<http://www.ece.ualberta.ca/~tbs/pmwiki/index.php?n=Research.Videos>
- [26] Imagen de preparación de la superficie de la pletina:
<http://www.midebien.com/consejos-practicos-para-medir-bien/como-instalar-una-galga-extensiometrica>
- [27] Imagen de una placa de fibra de vidrio discontinua:
<http://www.electronicaembajadores.com/Productos/Detalle/9/CN21BD1/placa-fibra-vidrio-discontinua-50-x-100-mm>

- [28] Imagen y dimensiones y momentos de inercia con respecto a los ejes del perfil UPN 80:
<http://www.materialeslosandes.com/vigasipn.html>
- [29] Fenómeno de histéresis elástica en un resorte:
F.V. Peinado. Departamento de Física, Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Nacional de Ingeniería. Lima – Perú
<http://myslide.es/documents/fenomeno-de-histeresis-elastica-en-un-resorte-articulodocx.html>

