



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES  
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA  
INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

# TRABAJO FIN DE GRADO

**Diseño de una estructura mecánica para albergar un motor dc controlado por Arduino. Caracterización del motor.**

---

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Autor:** Guillermo Ferrer López  
**Tutor:** D. Juan Antonio García Fortes  
**Cotutora:** Dña. María Alcázar Martínez Sánchez

MÁLAGA, septiembre de 2019



---

Guillermo Ferrer López, estudiante del Grado en Ingeniería Eléctrica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, **DECLARA QUE:**

El Trabajo de Fin de Grado que presenta para su exposición y defensa titulado

*Diseño de una estructura mecánica para albergar un motor dc controlado por Arduino. Caracterización del motor*

cuyo tutor es D. Juan Antonio García Fortes y cotutora Dña. María Alcázar Martínez Sánchez

**es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.**

Málaga, 5 de septiembre de 2019

Fdo.: Guillermo Ferrer López



Diseño de una estructura mecánica para albergar un motor dc controlado por Arduino. Caracterización del motor.

Guillermo Ferrer López

Septiembre de 2019



# Resumen

En el presente trabajo se va a diseñar y fabricar una estructura mecánica (carcasa) para la protección de un motor de corriente continua controlado por Arduino que permita la conexión de elementos adicionales. Los resultados del TFG se pretenden utilizar en la docencia de diferentes asignaturas del Departamento.

En primer lugar, se diseñan los elementos de la carcasa utilizando el software de diseño 3D SolidWorks cumpliendo con los requerimientos establecidos por el Departamento y se ensamblan los distintos elementos entre sí para mostrar el diseño completo del prototipo antes de proceder a su fabricación.

En segundo lugar, se realiza una introducción teórica a la impresión 3D para seleccionar la tecnología y los materiales que mejor se adapten al modelo diseñado.

En tercer lugar, se exponen los conceptos teóricos sobre modelado de motores de corriente continua necesarios para caracterizar el motor, marca Makeblock, incluido en el equipo que se está desarrollando. Seguidamente se procede con la caracterización del motor utilizando el software MATLAB, una placa Arduino MEGA 2560 y un Motor Shield también de la marca Arduino, obteniéndose así los parámetros necesarios para realizar el modelado del mismo.

Por último, se realiza el control de velocidad del motor para comprobar el funcionamiento del sistema desarrollado.

**Palabras clave:** Arduino, Carcasa, Impresión 3D, Makeblock, Motor Shield, Motor dc, SolidWorks, MATLAB, SIMULINK, Caracterización, Control de velocidad.



# Índice general

Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xxi
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objeto . . . . .	1
1.2 Motivación del trabajo . . . . .	1
<b>2 Diseño y ensamblaje</b>	<b>3</b>
2.1 Introducción . . . . .	3
2.2 Requerimientos . . . . .	3
2.3 Modelado geométrico de los distintos elementos . . . . .	5
2.3.1 Cuerpo principal de la carcasa de protección . . . . .	5
2.3.2 Cubierta de la carcasa . . . . .	12
2.3.3 Acoplamiento con la base . . . . .	13
2.3.4 Elementos auxiliares . . . . .	15
2.3.4.1 Apoyo de silicona . . . . .	15
2.3.4.2 Tornillo para la placa . . . . .	15
2.3.4.3 Tuerca para la placa . . . . .	16
2.3.4.4 Tornillo de sujeción del motor . . . . .	16
2.3.5 Motor de corriente continua . . . . .	16
2.3.6 Modificaciones de modelos ya existentes . . . . .	17
2.3.6.1 Placa Arduino MEGA 2560 . . . . .	17
2.3.6.2 Arduino Motor Shield . . . . .	18
2.4 Ensamblaje completo del modelo . . . . .	18
<b>3 Impresión 3D</b>	<b>23</b>
3.1 Introducción . . . . .	23
3.2 Ventajas y limitaciones de la impresión 3D . . . . .	24
3.2.1 Ventajas . . . . .	24
3.2.2 Limitaciones . . . . .	25
3.3 Clasificación de las diferentes tecnologías de impresión 3D . . . . .	26
3.3.1 Extrusión de material (FDM) . . . . .	29
3.3.2 Estereolitografía (SLA) y Procesamiento Digital de Luz (DLP) . . . . .	29
3.3.3 Sinterizado Selectivo por Láser (SLS) . . . . .	30
3.3.4 Sinterizado Directo de Metal por Láser (DMLS) y Fusión Selectiva por Láser (SLM) . . . . .	31

3.3.5	Proyección de Material (MJ) . . . . .	32
3.3.6	Proyección de Aglomerante (BJ) . . . . .	33
3.4	Criterios de selección del tipo de impresión 3D . . . . .	34
3.4.1	Selección en función del material . . . . .	34
3.4.1.1	Termoplásticos . . . . .	34
3.4.1.2	Termoestables (resinas) . . . . .	36
3.4.1.3	Metales . . . . .	36
3.4.1.4	Otros materiales . . . . .	36
3.4.2	Selección en función de las características de la pieza . . . . .	36
3.4.2.1	Funcionalidad . . . . .	37
3.4.2.2	Apariencia . . . . .	37
3.4.3	Selección en función de las limitaciones del proceso de fabricación . . . . .	38
3.5	Tecnología de impresión elegida: FDM . . . . .	39
3.6	Modificaciones de las piezas . . . . .	40
3.7	Archivo .STL y el Slicer . . . . .	41
3.8	Modelo final impreso . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Caracterización del motor de c.c. de imanes permanentes</b>	<b>45</b>
4.1	Introducción . . . . .	45
4.2	Fundamentos teóricos . . . . .	45
4.2.1	Constante de par ( $k_i$ ) y constante de fuerza contraelectromotriz ( $k_b$ ) . . . . .	46
4.2.2	Comportamiento dinámico y las constantes de tiempo . . . . .	47
4.2.3	Modelado matemático . . . . .	48
4.3	Elección del tiempo de muestreo . . . . .	51
4.4	Método de Estimación de Parámetros . . . . .	53
4.5	Comparación entre modelos y ensayos . . . . .	58
4.5.1	Comparación modelo estimado - datos experimentales . . . . .	59
4.5.2	Comparación modelos previos - datos experimentales . . . . .	60
4.5.3	Resumen comparación entre modelos . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Demostración del funcionamiento del equipo: control de velocidad</b>	<b>65</b>
5.1	Modificaciones del diagrama de bloques y ajuste del controlador PID . . . . .	65
5.2	Respuesta del sistema al control de velocidad . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras de trabajo</b>	<b>73</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	73
6.1.1	Conclusiones generales . . . . .	73
6.1.2	Conclusiones específicas . . . . .	73
6.2	Líneas futuras de trabajo . . . . .	74
<b>A</b>	<b>Modelado geométrico</b>	<b>75</b>
A.1	Modelado del cuerpo principal . . . . .	75
A.2	Modelado de la cubierta . . . . .	99
A.3	Modelado del acoplamiento con la base . . . . .	109
A.4	Modelado de la llave de cierre . . . . .	113
A.5	Modelado de los apoyos adhesivos de silicona . . . . .	115
A.6	Modelado de los elementos de fijación y ensamble . . . . .	116

A.6.1	05 Tornillo placa.SLDPRT . . . . .	116
A.6.2	06 Tuerca placa.SLDPRT . . . . .	116
A.6.3	07 Tornillo motor.SLDPRT . . . . .	117
A.7	Modelado y modificación de elementos adicionales . . . . .	117
A.7.1	Modelado del motor Makeblock . . . . .	118
A.7.2	Modificaciones de la placa Arduino Mega 2560 . . . . .	118
A.7.3	Modificaciones del Motor Shield de Arduino . . . . .	120
A.8	Ensamblaje del modelo . . . . .	121
<b>B</b>	<b>Modificaciones y pruebas de impresión 3D</b>	<b>133</b>
B.1	Introducción . . . . .	133
B.2	Modificaciones del modelo para la impresión en 3D . . . . .	134
B.3	Pruebas de impresión . . . . .	134
B.3.1	Primera prueba de impresión . . . . .	134
B.3.2	Segunda prueba de impresión . . . . .	136
B.3.3	Tercera prueba de impresión . . . . .	138
<b>C</b>	<b>Caracterización del motor</b>	<b>141</b>
C.1	Preparación del equipo y conexiones . . . . .	141
C.2	Comentario sobre el pin $V_{in}$ Connect del Arduino Motor Shield . . . . .	143
C.3	Aclaraciones de SIMULINK y representación de datos . . . . .	144
C.3.1	Aclaraciones del diagrama en SIMULINK . . . . .	144
C.3.2	Representación de los datos . . . . .	145
C.4	Ensayos tiempo de muestreo . . . . .	146
C.4.1	Ensayos experimentales con un único pulso . . . . .	146
C.4.2	Ensayos experimentales con varios pulsos . . . . .	150
C.5	Estimación de los parámetros del motor . . . . .	153
C.5.1	Definición de parámetros . . . . .	153
C.5.2	Creación del diagrama de bloques . . . . .	155
C.5.3	Método de Estimación de Parámetros . . . . .	159
C.5.4	Estimación de parámetros todos los ensayos . . . . .	164
<b>D</b>	<b>Control de velocidad</b>	<b>167</b>
D.1	Modificaciones del diagrama de bloques . . . . .	167
D.2	Ajuste del controlador PID . . . . .	170
D.3	Diagrama de bloques del control de velocidad . . . . .	173
<b>E</b>	<b>Presupuesto</b>	<b>175</b>
<b>F</b>	<b>Nomenclatura motor de c.c.</b>	<b>177</b>
<b>G</b>	<b>Planos</b>	<b>179</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>187</b>



# Índice de figuras

2.1	Cuerpo principal de la carcasa de protección. . . . .	5
2.2	Orificios para tornillos. . . . .	6
2.3	Orificios tuercas. . . . .	6
2.4	Detalle orificios tuercas. . . . .	6
2.5	Soportes extremos de la placa Arduino. . . . .	7
2.6	Orificios fijación motor. . . . .	7
2.7	Orificio conexión USB. . . . .	7
2.8	Saliente conexión USB. . . . .	7
2.9	Soportes para los conductores. . . . .	8
2.10	Ventilación placas. . . . .	8
2.11	Ventilación motor. . . . .	8
2.12	Ventilación lateral anterior. . . . .	8
2.13	Ventilación lateral posterior. . . . .	8
2.14	Orificio para conexiones futuras. . . . .	9
2.15	Unión antigua carcasa. . . . .	9
2.16	Unión antigua carcasa con transparencia. . . . .	9
2.17	Orificio unión cubierta carcasa. . . . .	10
2.18	Llave de unión entre la cubierta y la carcasa. . . . .	10
2.19	Corte transversal de la unión. . . . .	10
2.20	Vista transparente de la unión. . . . .	10
2.21	Plataforma soporte laboratorio. . . . .	11
2.22	Surcos directamente en la carcasa. . . . .	11
2.23	Carcasa y surcos por separado. . . . .	11
2.24	Orificios para el acoplamiento. . . . .	11
2.25	Cubierta de la carcasa. . . . .	12
2.26	Orificio para la unión con el cuerpo principal. . . . .	12
2.27	Logos EII e ISA sobre el entramado. . . . .	13
2.28	Escalón para el ajuste inferior. . . . .	13
2.29	Cubierta de la carcasa. . . . .	13
2.30	Orificios para las tuercas y apoyos. . . . .	14
2.31	Carcasa con apoyos de silicona. . . . .	14
2.32	Carcasa con apoyos de silicona y surcos. . . . .	14
2.33	Surcos en detalle. . . . .	15
2.34	Apoyo de silicona. . . . .	15
2.35	Tornillo placa. . . . .	15
2.36	Tuerca placa. . . . .	16

2.37	Tornillo sujeción motor. . . . .	16
2.38	Vista frontal del motor. . . . .	16
2.39	Vista trasera del motor. . . . .	16
2.40	Placa Arduino original. . . . .	17
2.41	Placa Arduino modificada. . . . .	17
2.42	Motor Shield original. . . . .	18
2.43	Motor Shield modificado. . . . .	18
2.44	Placa Arduino en posición. . . . .	19
2.45	Detalle de la entrada USB. . . . .	19
2.46	Tornillos en la placa Arduino. . . . .	19
2.47	Tuercas de la placa Arduino. . . . .	19
2.48	Motor Shield sobre la placa Arduino. . . . .	20
2.49	Tornillos de la unión del acoplamiento base. . . . .	20
2.50	Acoplamiento base, tuercas y apoyos de silicona. . . . .	20
2.51	Motor de corriente continua fijado en posición. . . . .	21
2.52	Llave posicionada y sin girar. . . . .	21
2.53	Ensamblaje sin la cubierta. . . . .	21
2.54	Llave posicionada girada. . . . .	22
2.55	Ensamblaje completo. . . . .	22
2.56	Vista explosionada del ensamblaje. . . . .	22
3.1	Esquema del proceso de impresión 3D [1]. . . . .	23
3.2	Muestras de materiales para impresión 3D [2]. . . . .	24
3.3	Esquema de las capas en una pieza impresa en 3D [3]. . . . .	25
3.4	Representación cualitativa coste - piezas producidas [3]. . . . .	25
3.5	Vista esquemática del uso de los soportes [4]. . . . .	26
3.6	Esquema extrusión de material [5]. . . . .	27
3.7	Fotopolimerización en tanque o cuba [5]. . . . .	27
3.8	Fusión en lecho de polvo [5]. . . . .	27
3.9	Proyección de material [5]. . . . .	28
3.10	Proyección de aglomerante [5]. . . . .	28
3.11	Deposición de energía focalizada [5]. . . . .	28
3.12	Laminado de hojas [5]. . . . .	28
3.13	Proceso de impresión FDM [6]. . . . .	29
3.14	Proceso de impresión SLA [7]. . . . .	30
3.15	Proceso de impresión SLS [8]. . . . .	31
3.16	Proceso de impresión SLM/DMLS [9]. . . . .	32
3.17	Proceso de impresión SLS [10]. . . . .	32
3.18	Proceso de impresión BJ [11]. . . . .	33
3.19	Esquema de selección en función del material [12]. . . . .	34
3.20	Pirámide de los termoplásticos [13]. . . . .	35
3.21	Esquema de selección en función de las propiedades de la pieza [14]. . . . .	37
3.22	Esquema de selección en función de la apariencia de la pieza [15]. . . . .	37
3.23	Comparación cualitativa de los materiales en impresión FDM [16]. . . . .	39
3.24	Junta de sujeción del motor sin modificar. . . . .	40
3.25	Junta de sujeción del motor modificada. . . . .	40

3.26	Sujeción USB sin modificar. . . . .	40
3.27	Sujeción USB modificada. . . . .	40
3.28	Sujeción cables sin modificar. . . . .	40
3.29	Sujeción cables modificada. . . . .	40
3.30	Soporte cierre sin modificar. . . . .	41
3.31	Soporte cierre modificado. . . . .	41
3.32	Posición inicial de impresión del cuerpo principal. . . . .	41
3.33	Posición final de impresión del cuerpo principal y del acoplamiento. . . . .	41
3.34	Posición inicial de impresión de la cubierta. . . . .	41
3.35	Posición final de impresión de la cubierta. . . . .	41
3.36	Cuerpo principal en el <i> slicer </i> . . . . .	42
3.37	Cubierta en el <i> slicer </i> . . . . .	42
3.38	Acoplamiento y llaves en el <i> slicer </i> . . . . .	42
3.39	Vista superior del modelo terminado. . . . .	43
3.40	Vista superior sin cubierta. . . . .	43
3.41	Conexiones del modelo. . . . .	43
3.42	Conexión USB con conector. . . . .	43
3.43	Vista del motor y de la ventilación lateral. . . . .	43
3.44	Vista inferior. . . . .	43
4.1	Respuesta de un motor de c.c. ante un cambio en la tensión de entrada [17]. . . . .	47
4.2	Modelo motor de c.c. [18]. . . . .	48
4.3	Diagrama de bloques con la posición como salida [18]. . . . .	49
4.4	Diagrama de bloques con la velocidad como salida [18] (figura adaptada). . . . .	50
4.5	Bloque <i>S-Function</i> . . . . .	51
4.6	Diagrama en SIMULINK. . . . .	51
4.7	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,05s$ . . . . .	52
4.8	FFT. $T_{muestreo} = 0,05s$ . . . . .	52
4.9	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,001s$ . . . . .	53
4.10	FFT. $T_{muestreo} = 0,001s$ . . . . .	53
4.11	Lecturas de los ensayos experimentales. . . . .	54
4.12	Diagrama de bloques del sistema. . . . .	54
4.13	Herramienta para la estimación de parámetros. . . . .	55
4.14	Estimación convergida. . . . .	55
4.15	Parámetros estimados. . . . .	55
4.16	Cilindro macizo [19]. . . . .	56
4.17	Caja reductora del motor [20]. . . . .	57
4.18	Cilindro hueco [21]. . . . .	58
4.19	Modelo teórico - ensayo 5,36 V. . . . .	59
4.20	Modelo teórico - ensayo 6,30 V. . . . .	59
4.21	Modelo teórico - ensayo 7,64 V. . . . .	59
4.22	Modelo teórico - ensayo 9,28 V. . . . .	59
4.23	Modelo previo 1 - ensayo 5,36 V. . . . .	61
4.24	Modelo previo 1 - ensayo 6,30 V. . . . .	61
4.25	Modelo previo 1 - ensayo 7,64 V. . . . .	61
4.26	Modelo previo 1 - ensayo 9,28 V. . . . .	61

4.27	Modelos - ensayo 5,36 V. . . . .	62
4.28	Modelos - ensayo 6,30 V. . . . .	62
4.29	Modelos - ensayo 7,64 V. . . . .	63
4.30	Modelos - ensayo 9,28 V. . . . .	63
5.1	Diagrama de bloques para el control de velocidad. . . . .	65
5.2	Señal rampa comparada. . . . .	66
5.3	Resultado de la comparación de la señal tipo rampa con una constante. . . . .	67
5.4	Bloque constructor de señales. . . . .	67
5.5	Definición de la señal de referencia variable. . . . .	68
5.6	Salida escalada del bloque de definición de señales. . . . .	68
5.7	Bloque producto. . . . .	68
5.8	Bloques comentados anteriores unidos entre sí. . . . .	69
5.9	Señal de velocidad de referencia. . . . .	69
5.10	Diagrama de bloques con PID para respuesta teórica. . . . .	70
5.11	Respuesta simulada del sistema en el control de velocidad. . . . .	70
5.12	Respuesta experimental del sistema en el control de velocidad. . . . .	71
A.1	Extrusión del cuerpo principal. . . . .	75
A.2	Corte espacio conexión USB. . . . .	76
A.3	Redondeo aristas exteriores. . . . .	76
A.4	Redondeo aristas espacio USB. . . . .	76
A.5	Cara seleccionada para operación de vaciado. . . . .	77
A.6	Vaciado cuerpo principal. . . . .	77
A.7	Cara seleccionada para corte. . . . .	77
A.8	Corte espacio conector USB. . . . .	77
A.9	Croquis refuerzo espacio conector USB. . . . .	78
A.10	Relaciones. . . . .	78
A.11	Extruir refuerzo espacio conector USB. . . . .	78
A.12	Cortar ampliación espacio conector USB. . . . .	78
A.13	Relación <i>Igual</i> . . . . .	79
A.14	Cotas posición apoyos. . . . .	79
A.15	Extruir apoyos gruesos. . . . .	80
A.16	Extruir apoyos finos. . . . .	80
A.17	Taladros apoyos placa Arduino. . . . .	80
A.18	Herramienta <i>Polígono</i> . . . . .	81
A.19	Parámetros de la herramienta <i>Polígono</i> . . . . .	81
A.20	Croquis fijaciones tuercas. . . . .	81
A.21	Corte fijaciones tuercas (1). . . . .	82
A.22	Corte fijaciones tuercas (2). . . . .	82
A.23	Croquis de los apoyos del acoplamiento base. . . . .	82
A.24	Extruir apoyos del acoplamiento base. . . . .	83
A.25	Cortar taladros de los apoyos del acoplamiento base. . . . .	83
A.26	Croquis topes traseros de la placa Arduino. . . . .	83
A.27	Extruir topes traseros de la placa Arduino. . . . .	83
A.28	Redondeo de los apoyos y elementos auxiliares. . . . .	84
A.29	Aristas de las fijaciones de las tuercas. . . . .	84

A.30	Detalle aristas de las fijaciones de las tuercas. . . . .	84
A.31	Posición de los taladros de fijación del motor. . . . .	85
A.32	Resultado operación corte taladros fijación motor. . . . .	85
A.33	Croquis refuerzo fijación motor. . . . .	85
A.34	Extruir refuerzo fijación motor. . . . .	85
A.35	Cortar hueco refuerzo fijación motor. . . . .	86
A.36	Definición del plano soporte del apoyo motor. . . . .	86
A.37	Croquis soporte apoyo motor. . . . .	86
A.38	Extruir soporte apoyo motor. . . . .	86
A.39	Redondeo arista soporte motor. . . . .	86
A.40	Croquis de la ventilación inferior de las placas. . . . .	87
A.41	Herramienta <i>Simetría de entidades</i> . . . . .	87
A.42	Primera simetría de la ventilación. . . . .	87
A.43	Segunda simetría de la ventilación. . . . .	87
A.44	Croquis de la ventilación terminado. . . . .	88
A.45	Cortar ventilación inferior de las placas. . . . .	88
A.46	Herramienta <i>Matriz lineal de croquis</i> . . . . .	88
A.47	Aplicación de la matriz lineal. . . . .	88
A.48	Cortar la ventilación inferior del motor. . . . .	89
A.49	Croquis inicial de la ventilación del lateral frontal. . . . .	89
A.50	Parámetros de la matriz lineal. . . . .	89
A.51	Cortar la ventilación del lateral frontal. . . . .	90
A.52	Croquis de la ventilación del lateral trasero. . . . .	90
A.53	Cortar ventilación del lateral trasero. . . . .	90
A.54	Definición del plano de los soportes. . . . .	90
A.55	Croquis de los soportes. . . . .	91
A.56	Extruir los soportes del acoplamiento de cierre. . . . .	91
A.57	Simetrías de los soportes del acoplamiento de cierre. . . . .	91
A.58	Parámetros del taladro. . . . .	92
A.59	Posiciones de los taladros. . . . .	92
A.60	Modelo antes de validar los taladros. . . . .	92
A.61	Croquis de la ranura. . . . .	93
A.62	Cortar ranura. . . . .	93
A.63	Resultado de la simetría. . . . .	93
A.64	Perímetro inferior de la operación <i>Recubrir</i> . . . . .	93
A.65	Perímetro superior de la operación <i>Recubrir</i> . . . . .	94
A.66	Resultado de la operación <i>Recubrir</i> . . . . .	94
A.67	Corte en la pieza. . . . .	94
A.68	Operación <i>Convertir entidades</i> . . . . .	94
A.69	Cara seleccionada. . . . .	95
A.70	Resultado de convertir entidades. . . . .	95
A.71	Extruir relleno. . . . .	95
A.72	Comparación del corte de la figura A.67 antes y después del relleno. . . . .	96
A.73	Definición de los planos. . . . .	96
A.74	Croquis de la sujeción pequeña. . . . .	96
A.75	Extruir sujeción pequeña. . . . .	96

A.76	Extruir cilindro de la sujeción pequeña. . . . .	97
A.77	Cortar ventilación de la sujeción pequeña. . . . .	97
A.78	Simetría de la sujeción pequeña. . . . .	97
A.79	Nueva definición de planos. . . . .	97
A.80	Modelo con la sujeción grande. . . . .	98
A.81	Modelo con todas las sujeciones. . . . .	98
A.82	Croquis para la salida de conexiones futuras. . . . .	98
A.83	Modelo terminado del cuerpo principal de la carcasa. . . . .	98
A.84	Croquis con las dimensiones de la cubierta. . . . .	99
A.85	Escalón de la cubierta. . . . .	99
A.86	Redondeo de las aristas del escalón. . . . .	100
A.87	Redondeo de las aristas de la parte superior. . . . .	100
A.88	Croquis del corte de la cubierta. . . . .	100
A.89	Equidistancia en dirección contraria. . . . .	100
A.90	Equidistancia en la dirección correcta. . . . .	100
A.91	Selección de la cara a cortar. . . . .	101
A.92	Corte de la cubierta. . . . .	101
A.93	Redondeo de las aristas laterales. . . . .	101
A.94	Redondeo de la arista central. . . . .	101
A.95	Disposición del croquis. . . . .	102
A.96	Sentido de corte. . . . .	102
A.97	Pestaña de dirección (1). . . . .	102
A.98	Pestaña de dirección (2). . . . .	102
A.99	Malla de protección. . . . .	103
A.100	Vista inferior de la malla. . . . .	103
A.101	Croquis borde parte trasera. . . . .	103
A.102	Resultado de la reconstrucción de la parte trasera. . . . .	103
A.103	Croquis ISA. . . . .	104
A.104	Herramienta <i>Girar entidades</i> . . . . .	104
A.105	Croquis tras el giro. . . . .	104
A.106	Posición del croquis ISA. . . . .	105
A.107	Extrusión croquis ISA. . . . .	105
A.108	Croquis EII. . . . .	106
A.109	Corte croquis EII. . . . .	106
A.110	Croquis del soporte. . . . .	106
A.111	Extruir soporte. . . . .	106
A.112	Soportes tras la simetría. . . . .	107
A.113	Redondeo del radio de los soportes. . . . .	107
A.114	Parámetros de los taladros. . . . .	107
A.115	Croquis de la ranura. . . . .	108
A.116	Ranura del cierre del soporte. . . . .	108
A.117	Ranuras en todas las esquinas. . . . .	108
A.118	Desfase del croquis. . . . .	108
A.119	Corte hacia el exterior. . . . .	108
A.120	Modelo terminado de la cubierta. . . . .	109
A.121	Croquis del rectángulo. . . . .	109

A.122	Extrusión del croquis. . . . .	109
A.123	Recortar esquina. . . . .	110
A.124	Redondeo esquinas grandes. . . . .	110
A.125	Redondeo aristas del corte. . . . .	110
A.126	Croquis de los surcos. . . . .	110
A.127	Extrusión de los surcos. . . . .	111
A.128	Redondeo de las aristas de los surcos. . . . .	111
A.129	Croquis del corte de los surcos. . . . .	111
A.130	Resultado del corte de los surcos. . . . .	111
A.131	Modelo con ventilación. . . . .	112
A.132	Taladros de la sujeción. . . . .	112
A.133	Taladros efectuados. . . . .	112
A.134	Resultado tras efectuar el corte para las tuercas. . . . .	112
A.135	Croquis huecos apoyos silicona. . . . .	113
A.136	Modelo terminado del acoplamiento con la base. . . . .	113
A.137	Croquis principal de la llave. . . . .	113
A.138	Extrusión del croquis de la llave. . . . .	113
A.139	Vista del croquis. . . . .	114
A.140	Operación de <i>Corte de revolución</i> . . . . .	114
A.141	Proceso de aplicación de la operación de corte de revolución. . . . .	114
A.142	Resultado de la operación. . . . .	114
A.143	Croquis para el suavizado de las aristas. . . . .	114
A.144	Corte de revolución superior. . . . .	114
A.145	Modelo terminado de la llave. . . . .	115
A.146	Croquis del apoyo de silicona. . . . .	115
A.147	Operación <i>Revolución</i> . . . . .	115
A.148	Modelo terminado del apoyo adhesivo de silicona. . . . .	115
A.149	Tornillo placa. . . . .	116
A.150	Tuerca placa. . . . .	116
A.151	Tornillo motor. . . . .	117
A.152	Reductora del motor. . . . .	118
A.153	Unión del eje. . . . .	118
A.154	Protector del sensor. . . . .	118
A.155	Longitud del motor. . . . .	118
A.156	Modificación del botón de reinicio. . . . .	119
A.157	Modificación de los pines superiores. . . . .	119
A.158	Modificación de los pines inferiores. . . . .	119
A.159	Modificación de los taladros. . . . .	119
A.160	Modificación del botón de reinicio del Motor Shield. . . . .	120
A.161	Modificación de los pines de conexión. . . . .	120
A.162	Modificación chaflán. . . . .	120
A.163	Modificación de los pines superiores del Motor Shield. . . . .	121
A.164	Modificación de los pines inferiores del Motor Shield. . . . .	121
A.165	Modificación de los taladros del Motor Shield. . . . .	121
A.166	Ventana de nuevo ensamblaje. . . . .	122
A.167	Herramienta de <i>Relación de posición</i> . . . . .	122

A.168	Flotar. . . . .	122
A.169	Coincidir orígenes. . . . .	123
A.170	Fijar. . . . .	123
A.171	Pieza fijada. . . . .	123
A.172	Insertar componentes. . . . .	124
A.173	Orientación original de la placa Arduino. . . . .	124
A.174	Orientación deseada de la placa Arduino. . . . .	124
A.175	Cara interior del taladro de la placa. . . . .	125
A.176	Cara interior del taladro de la carcasa. . . . .	125
A.177	Cara superior del soporte. . . . .	125
A.178	Placa Arduino en posición. . . . .	125
A.179	Bloquear rotación. . . . .	126
A.180	Tornillo en posición. . . . .	126
A.181	Posición intermedia de la tuerca. . . . .	126
A.182	Selección de la arista. . . . .	127
A.183	Tornillos y tuercas en posición. . . . .	127
A.184	Caras laterales de los pines. . . . .	128
A.185	Cara del extremo del pin. . . . .	128
A.186	Modelo con Motor Shield. . . . .	128
A.187	Caras interiores de los taladros del motor. . . . .	129
A.188	Modelo con el motor. . . . .	129
A.189	Modelo con los tornillos de sujeción del motor. . . . .	129
A.190	Modelo con el acoplamiento base. . . . .	130
A.191	Modelo con todos los tornillos. . . . .	130
A.192	Selección de elementos. . . . .	130
A.193	Selección de las caras planas. . . . .	130
A.194	Modelo con los apoyos de silicona. . . . .	131
A.195	Selección de las caras laterales. . . . .	131
A.196	Selección de las caras frontales. . . . .	131
A.197	Selección de caras de la carcasa y el cierre. . . . .	132
A.198	Modelo con la cubierta. . . . .	132
A.199	Selección caras curvas. . . . .	132
A.200	Selección de otras dos caras. . . . .	132
A.201	Ensamblaje completo terminado. . . . .	132
A.202	Ensamblaje con la superficie del laboratorio. . . . .	132
B.1	Soportes en ángulos mayores de 45° [22]. . . . .	133
B.2	Vista superior de la primera prueba. . . . .	135
B.3	Vista inferior de la primera prueba. . . . .	135
B.4	Vista general modelo impreso. . . . .	135
B.5	Vista superior de la cubierta. . . . .	135
B.6	Vista inferior de la cubierta y llave. . . . .	135
B.7	Llave sin tolerancia tenida en cuenta. . . . .	136
B.8	Puentes en la cara inferior. . . . .	136
B.9	Vista superior de la segunda prueba. . . . .	136
B.10	Vista inferior de la segunda prueba. . . . .	136

B.11	Vista general del modelo impreso (1).	137
B.12	Vista general del modelo impreso (2).	137
B.13	Vista de los puentes de la cara inferior (1).	137
B.14	Vista de los puentes de la cara inferior (2).	137
B.15	Fractura del taladro para la sujeción del motor.	137
B.16	Vista superior de la tercera prueba.	138
B.17	Vista inferior de la tercera prueba.	138
B.18	Vista general del modelo impreso (1).	138
B.19	Vista general del modelo impreso (2).	138
B.20	Entramado de la estructura interna y puentes.	139
C.1	Mensaje de detección del Aruino en MATLAB.	142
C.2	Dispositivo serie USB.	142
C.3	Modificar puerto COM.	143
C.4	<i>Solder pads</i> en el diagrama.	144
C.5	<i>Solder pads</i> en la placa.	144
C.6	Esquema completo SIMULINK.	144
C.7	Esquema del <i>encoder</i> .	144
C.8	Generador de pulsos.	145
C.9	Ganancia.	145
C.10	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,5s$ .	147
C.11	FFT. $T_{muestreo} = 0,5s$ .	147
C.12	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,1s$ .	148
C.13	FFT. $T_{muestreo} = 0,1s$ .	148
C.14	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,05s$ .	148
C.15	FFT. $T_{muestreo} = 0,05s$ .	148
C.16	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,01s$ .	148
C.17	FFT. $T_{muestreo} = 0,01s$ .	148
C.18	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,005s$ .	149
C.19	FFT. $T_{muestreo} = 0,005s$ .	149
C.20	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,001s$ .	149
C.21	FFT. $T_{muestreo} = 0,001s$ .	149
C.22	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,5s$ .	150
C.23	FFT. $T_{muestreo} = 0,5s$ .	150
C.24	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,1s$ .	151
C.25	FFT. $T_{muestreo} = 0,1s$ .	151
C.26	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,05s$ .	151
C.27	FFT. $T_{muestreo} = 0,05s$ .	151
C.28	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,01s$ .	151
C.29	FFT. $T_{muestreo} = 0,01s$ .	151
C.30	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,005s$ .	152
C.31	FFT. $T_{muestreo} = 0,005s$ .	152
C.32	Velocidad. $T_{muestreo} = 0,001s$ .	152
C.33	FFT. $T_{muestreo} = 0,001s$ .	152
C.34	Icono de SIMULINK.	153
C.35	Nuevo proyecto de SIMULINK.	153

C.36	Icono del <i>Model Explorer</i> . . . . .	154
C.37	Ventana del <i>Model Explorer</i> . . . . .	154
C.38	<i>Model Workspace</i> . . . . .	155
C.39	Añadir variable. . . . .	155
C.40	Nombres de las variables. . . . .	155
C.41	<i>Library Browser</i> . . . . .	155
C.42	Bloque función de transferencia. . . . .	156
C.43	Parámetros función de transferencia. . . . .	156
C.44	Bloque ganancia. . . . .	156
C.45	Bloque constante. . . . .	157
C.46	Bloque división. . . . .	157
C.47	Bloque suma. . . . .	157
C.48	Parámetros bloque suma. . . . .	158
C.49	Bloque generador de pulsos. . . . .	158
C.50	Parámetros generador de pulsos. . . . .	158
C.51	Bloque salida. . . . .	159
C.52	Diagrama de bloques. . . . .	159
C.53	Desplegable <i>Analysis</i> . . . . .	160
C.54	Ventana <i>Parameter Estimation</i> . . . . .	160
C.55	Introducir lecturas de los ensayos. . . . .	160
C.56	Introducir lecturas de los ensayos. . . . .	161
C.57	Seleccionar parámetros. . . . .	161
C.58	Parámetros seleccionados. . . . .	161
C.59	Valores iniciales y cotas. . . . .	161
C.60	Añadir gráficas. . . . .	162
C.61	Inicial estimación. . . . .	162
C.62	Proceso convergido. . . . .	163
C.63	Valores estimados. . . . .	163
C.64	Proceso convergido (5,36 V). . . . .	164
C.65	Valores estimados (5,36 V). . . . .	164
C.66	Proceso convergido (6,30 V). . . . .	164
C.67	Valores estimados (6,30 V). . . . .	164
C.68	Proceso convergido (7,64 V). . . . .	165
C.69	Valores estimados (7,64 V). . . . .	165
C.70	Proceso convergido (9,28 V). . . . .	165
C.71	Valores estimados (9,28 V). . . . .	165
D.1	Señal rampa comparada. . . . .	167
D.2	Bloque rampa. . . . .	167
D.3	Parámetros bloque rampa. . . . .	168
D.4	Bloque comparación con una constante. . . . .	168
D.5	Parámetros bloque de comparación. . . . .	168
D.6	Bloque constructor de señales. . . . .	169
D.7	Definición de la señal de referencia variable. . . . .	169
D.8	Bloque producto. . . . .	169
D.9	Bloques comentados unidos entre sí. . . . .	170

D.10	Diagrama de bloques con PID para respuesta teórica. . . . .	170
D.11	Bloque controlador PID. . . . .	170
D.12	Parámetros bloque controlador. . . . .	171
D.13	$P = 0,9; I = 5; D = 0; N = 10$ . . . . .	171
D.14	$P = 2,5; I = 10; D = 0; N = 10$ . . . . .	171
D.15	$P = 2; I = 5; D = 0,05; N = 10$ . . . . .	172
D.16	$P = 2; I = 8; D = 0,05; N = 10$ . . . . .	172
D.17	$P = 2; I = 12; D = 0,05; N = 10$ . . . . .	172
D.18	$P = 2; I = 12; D = 0; N = 10$ . . . . .	172
D.19	Respuesta simulada del sistema en el control de velocidad. . . . .	173
D.20	Diagrama de bloques para el control de velocidad. . . . .	173
D.21	Respuesta experimental del sistema en el control de velocidad. . . . .	174
F.1	Modelo motor c.c. [23]. . . . .	177
F.2	Modelo motor c.c. [18]. . . . .	177



# Índice de tablas

3.1	Termoplásticos usados en la impresión 3D. . . . .	35
3.2	Metales usados en la impresión 3D. . . . .	36
3.3	Limitaciones de la impresión 3D [24]. . . . .	38
4.1	Datos recogidos en los ensayos experimentales de un pulso. . . . .	52
4.2	Valores de las variables estimadas. . . . .	56
4.3	Errores modelo estimado - datos experimentales. . . . .	60
4.4	Errores modelo <i>System Identification Toolbox</i> - datos experimentales. . . . .	62
4.5	Errores modelo constante de tiempo - datos experimentales. . . . .	62
4.6	Tabla resumen de la comparación de los métodos. . . . .	63
C.1	Datos recogidos en los ensayos experimentales de un pulso. . . . .	147
C.2	Datos recogidos en los ensayos experimentales de varios pulsos. . . . .	150
E.1	Presupuesto del material utilizado. . . . .	175
F.1	Nomenclatura utilizada para las variables y parámetros del motor. . . . .	178



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Objeto

En este trabajo se busca diseñar y construir una estructura mecánica para la protección de un motor de corriente continua controlado por Arduino que permitirá la conexión de elementos adicionales. Del mismo modo, se hallarán los parámetros característicos del motor.

Los resultados del presente TFG se pretenden utilizar, en conjunto con los resultados del TFM de otro alumno [25], en la docencia de diferentes asignaturas del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Málaga, mediante la implantación de un equipo de prácticas. Se pretende que dicho equipo de prácticas tenga un coste menor que el actualmente utilizado y que, además, sea fácil de modificar y de adaptar a las distintas necesidades que puedan surgir a lo largo del tiempo.

En la primera parte se mostrará el proceso de diseño, cumpliendo con los requerimientos establecidos por el Departamento, y las modificaciones de la estructura mecánica que albergará al motor y a las placas de control utilizando SolidWorks. Del mismo modo, se hará una introducción a la impresión 3D y se presentarán las distintas impresiones realizadas.

En la segunda parte se hará una introducción al modelado de motores de corriente continua. A continuación, se llevará a cabo la caracterización del motor, donde se obtendrán los parámetros necesarios para el control de velocidad del mismo y se compararán con los obtenidos en [25].

Por último, se realizarán varias pruebas para comprobar el correcto funcionamiento del equipo implementado.

### 1.2. Motivación del trabajo

La motivación principal del presente trabajo consiste en obtener los créditos necesarios para finalizar el Grado en Ingeniería Eléctrica al superar la asignatura de Trabajo de Fin de Grado.

Del mismo modo, ha presentado la oportunidad de conocer el proceso de creación de un producto desde la concepción del diseño inicial hasta la fabricación, pasando por las diferentes revisiones y modificaciones del mismo.

Igualmente ha permitido profundizar aún más en el uso de herramientas como SolidWorks, MATLAB y  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ , así como de dar el salto del campo teórico de la Ingeniería a un aspecto más práctico, obteniendo unos elementos físicos y tangibles al terminar el trabajo.

Por último, se ha posibilitado que el esfuerzo por el trabajo realizado y los resultados obtenidos sirvan para algo más que para aprobar una asignatura: facilitar un equipo de prácticas para los alumnos de la Universidad de Málaga.

# Capítulo 2

## Diseño y ensamblaje

### 2.1. Introducción

En este capítulo se muestra el proceso de diseño y ensamblaje de la carcasa protectora del motor y las placas de control. Para ello se detallan los requerimientos, los modelos finales de las piezas que conforman el ensamblaje completo y las modificaciones hechas a los modelos geométricos ya existentes de las placas.

### 2.2. Requerimientos

La carcasa de protección va a estar destinada a formar parte de un equipo de prácticas de laboratorio en varias asignaturas. Como tal, será propenso a ser manipulado por un alumnado que, como es normal, no estará completamente familiarizado con los equipos de prácticas, siendo posible la aparición de fallos por desconocimiento, mal uso de los equipos, un manejo inadecuado, errores de montaje o por diversos accidentes que puedan ocurrir en el transcurso de las mismas.

El objetivo principal de la carcasa será, por tanto, **proteger** los elementos que ésta encierra contra golpes y caídas. Deberán estar protegidos el motor de corriente continua, la placa Arduino y el Arduino Motor Shield.

Teniendo en mente que se trata de un equipo de prácticas, no sería muy acertado encubrir todos los elementos dentro de una carcasa de una forma completamente oculta a los alumnos para evitar los fallos antes mencionados. Esto disminuiría la posibilidad de que el alumnado comprenda el funcionamiento de los distintos elementos del equipo y las prácticas sean todo lo provechosas que pudieran ser. Por lo tanto, también se busca que los elementos sean **visibles** desde el exterior.

Igualmente, para agilizar la preparación, reparación y mantenimiento del equipo de prácticas, los elementos interiores deberán ser **fácilmente accesibles** y **desmontables**, garantizando al mismo tiempo una **seguridad** para evitar el acceso al interior por accidente o descuido.

También se plantea la posibilidad de añadir y conectar en un futuro **elementos adicionales** al equipo. Esto se hará acoplando la carcasa a una base, disponible en el laboratorio, en la que se pueden añadir más elementos, por lo tanto hace falta definir este **acoplamiento carcasa-base**.

Por otro lado, al estar trabajando con elementos eléctricos y electrónicos, la generación de calor residual es inevitable, por lo tanto se deberá facilitar la **ventilación** de los elementos interiores.

A modo de resumen se listan los diferentes requerimientos:

- Protección de los elementos interiores frente a golpes, caídas y accidentes.
- Facilitar la visibilidad de los elementos interiores.
- Acceso a los componentes interiores de manera fácil pero segura.
- Desmontaje y desensamblaje rápido de los elementos interiores.
- Permitir la conexión de elementos adicionales.
- Definición del acoplamiento entre la carcasa y el soporte del laboratorio.
- Ventilación de los elementos interiores.

## 2.3. Modelado geométrico de los distintos elementos

A continuación, se comentan las características principales de cada una de las piezas que se han modelado en el desarrollo del presente TFG. En el Anexo A se muestra con mayor detalle el modelado paso a paso de cada una de las piezas.

### 2.3.1. Cuerpo principal de la carcasa de protección

En primer lugar, se va a modelar el cuerpo principal de la carcasa de protección (figura 2.1). Es la primera y principal de todas las piezas ya que en el interior de la misma es donde irán ensamblados los elementos que se quieren proteger y sobre la cuál se irán añadiendo el resto de las piezas de la carcasa a lo largo del proceso de ensamblaje.

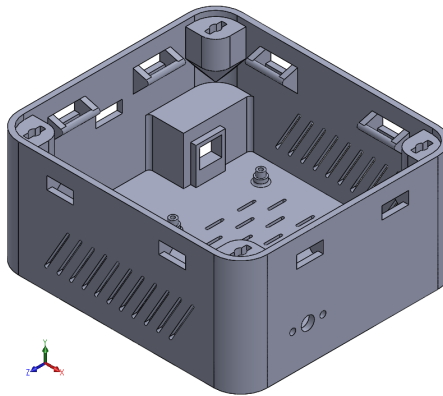


Figura 2.1: Cuerpo principal de la carcasa de protección.

Las funciones que cumple esta pieza de entre los requerimientos son:

- Protección del motor y de las placas de control.
- Desmontaje y desensamblaje rápido de los elementos que protege.
- Permitir la conexión de elementos adicionales.
- Definir parte del acoplamiento entre la carcasa y la base del laboratorio, así como entre la carcasa y el cierre superior de la misma.
- Ventilación de los elementos interiores.

A continuación, se van a mostrar las características constructivas principales.

Para realizar un ensamblaje sencillo, seguro y rápido de montar y desmontar entre la placa Arduino y el cuerpo de la carcasa se ha decidido realizar una unión atornillada. En la figura 2.2 se pueden ver resaltados en azul los orificios practicados para tal fin.

Con el objetivo de alargar la vida útil de la carcasa, se ha decidido no realizar el ajuste de los tornillos enroscándolos en el propio orificio, lo que provocaría un desgaste y holguras según se realizaran montajes y desmontajes del equipo. La solución implementada consiste

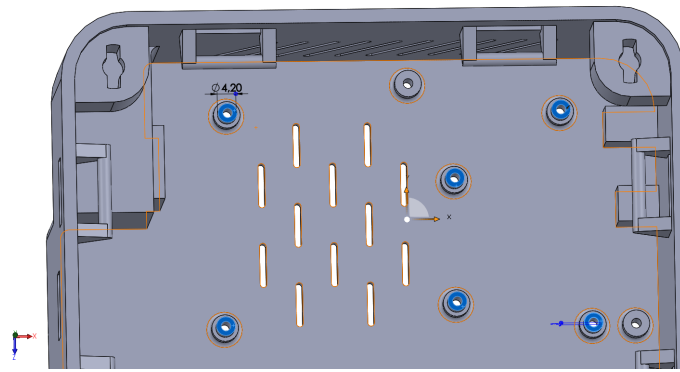


Figura 2.2: Orificios para tornillos.

en realizar unos orificios algo mayores que el diámetro del tornillo y fijarlos en posición con el uso de tuercas en el extremo opuesto de la cabeza.

Las tuercas deben ir alojadas en un orificio con forma hexagonal y con un tamaño similar a las mismas con el objetivo de que éstas no giren y se mantengan en posición a la hora de apretar y aflojar los tornillos. Por lo tanto, se han diseñado unos orificios como los que se pueden ver en la figura 2.3 en la cara inferior de la carcasa, quedando resuelto el problema de la fijación de la placa a la carcasa. En la figura 2.4 se puede ver uno de los orificios con más detalle.

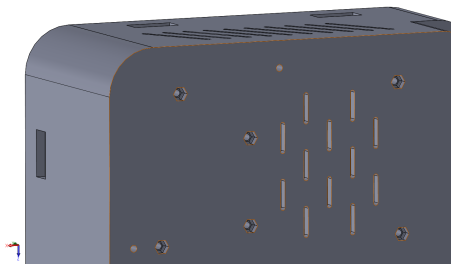


Figura 2.3: Orificios tuercas.

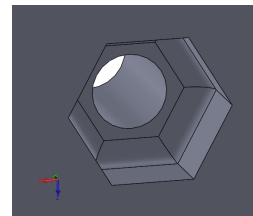


Figura 2.4: Detalle orificios tuercas.

Una vez fijada en posición la placa, para evitar que las uniones atornilladas sufran<sup>1</sup> esfuerzos transversales que puedan provocar un deterioro excesivo al montar y desmontar la placa o al conectar y desconectar el cable USB a la entrada de la misma, se han dispuesto dos soportes en una de las paredes de la carcasa (figura 2.5). Tendrán la función de dar más resistencia al conjunto y evitar los problemas anteriormente citados.

Al igual que la placa, hace falta fijar en posición el motor de corriente continua. Con ese fin se han dispuesto tres orificios en una de las paredes laterales (figura 2.6).

El orificio central tiene la finalidad de permitir el paso del eje del motor, mientras que los otros dos orificios se han practicado para introducir a través de ellos los tornillos que fijarán al motor en posición. Se puede apreciar también en la esquina inferior derecha de la

<sup>1</sup>No tanto los tornillos en sí como la superficie impresa en plástico que los rodea.

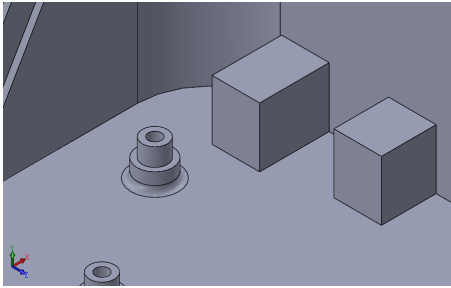


Figura 2.5: Soportes extremos de la placa Arduino.

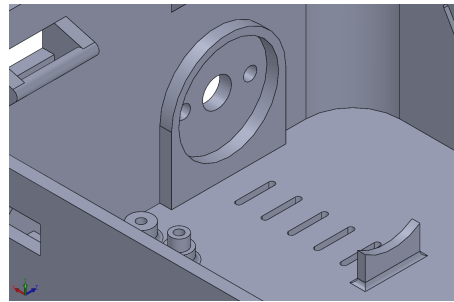


Figura 2.6: Orificios fijación motor.

figura 2.6 que existe un elementos de soporte. Su función será la de evitar que el motor actúe como un voladizo y disminuir el esfuerzo flector provocado en la pared por el propio peso del mismo, alargando consecuentemente la vida útil de la carcasa.

En otra de las paredes también se ha practicado un orificio para facilitar la conexión de la placa Arduino al ordenador mediante un cable USB (figura 2.7). Para que la conexión y desconexión sea cómoda se ha dispuesto por encima del orificio un saliente, permitiendo así que se pueda manipular la conexión con comodidad (ver figura 2.8).

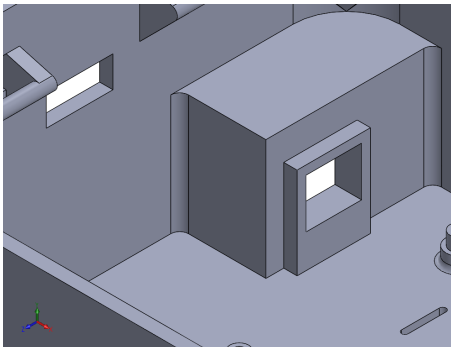


Figura 2.7: Orificio conexión USB.

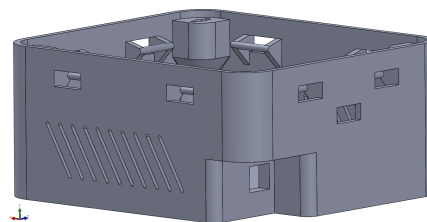


Figura 2.8: Saliente conexión USB.

Por último, para mantener ordenadas las conexiones dentro de la carcasa, se han diseñado una serie de soportes en los que, mediante bridas, se podrán fijar los conductores en el perímetro interior de la carcasa (figura 2.9). Esto, además del mayor orden ya mencionado, facilitará la visibilidad de los elementos interiores de la carcasa desde el exterior, cumpliendo así con los requerimientos fijados por el Departamento.

Por otro lado, uno de los requerimientos fijados en el apartado 2.2 consistía en permitir la ventilación de los elementos interiores para que se evacúe el calor que se generado en el interior de la carcasa. Para ello se han realizado una serie de aberturas dispuestas en varias de las caras de la carcasa.

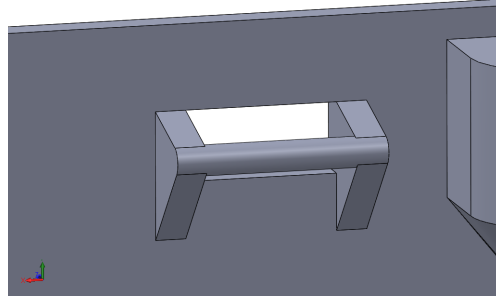


Figura 2.9: Soportes para los conductores.

Las primeras de ellas se han realizado en la cara inferior, destinadas a la ventilación de las placas (figura 2.10) y del motor (figura 2.11).

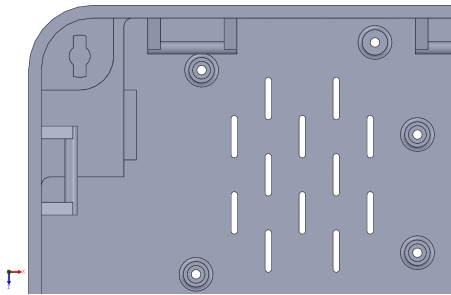


Figura 2.10: Ventilación placas.

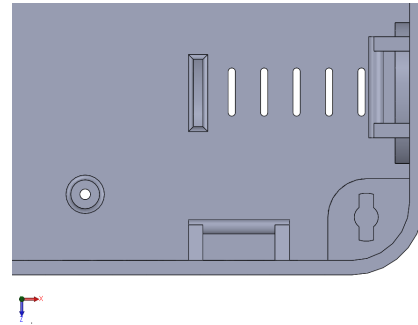


Figura 2.11: Ventilación motor.

Del mismo modo se han realizado más aberturas en la paredes laterales (figuras 2.12 y 2.13).

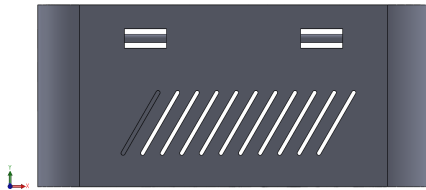


Figura 2.12: Ventilación lateral anterior.

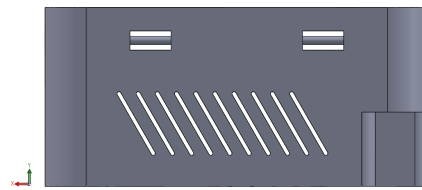


Figura 2.13: Ventilación lateral posterior.

Estos orificios se ven también acompañados por los orificios que se practicaron a la hora de diseñar los soportes que se encargan de mantener los cables organizados dentro de la carcasa (ver figura 2.9).

Otro orificio que se ha practicado para cumplir con el requerimiento de posibles ampliaciones futuras y conexas se puede ver en el centro de la figura 2.14. Desde ahí se pondrán introducir y extraer conectores que estén unidos a los distintos pines de la placa Arduino o del Motor Shield.

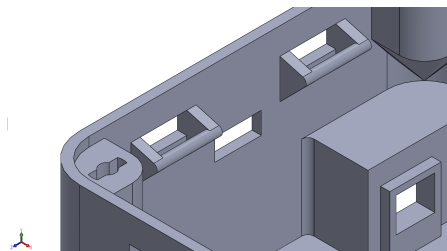


Figura 2.14: Orificio para conexiones futuras.

Hasta ahora, la carcasa se ha visto descubierta, es decir, sin ningún elemento que la proteja en su cara superior. De esto se encargará la cubierta (apartado 2.3.2). Dicha cubierta debe ir acoplada con el resto del cuerpo de la carcasa. Uno de los requerimientos exigidos era la necesidad de que se accediera de una manera rápida, pero segura, a los elementos interiores. En un principio se barajó la posibilidad de definir una uniones con bridas como la que se puede ver en las figuras 2.15 y 2.16.

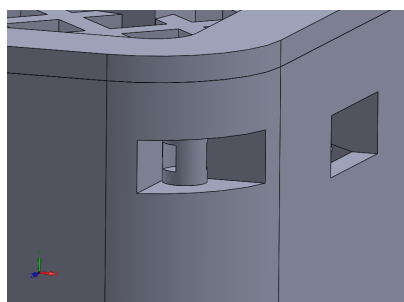


Figura 2.15: Unión antigua carcasa.

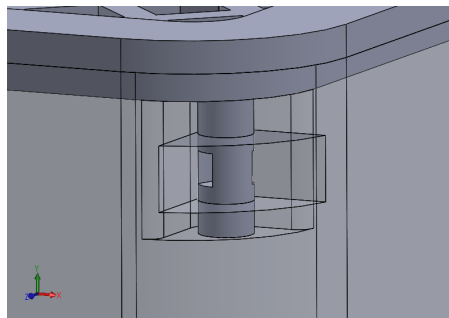


Figura 2.16: Unión antigua carcasa con transparencia.

Esta unión permite acceder a los elementos interiores y es segura, evitando así una manipulación indebida de los componentes que protege, pero el hecho de estar fijada mediante bridas implica que cada vez que se quiera desmontar hará falta disponer tanto de una tijera como de nuevas bridas. Además, esta unión será manipulada muchas más veces que la que fija los cables alrededor del perímetro de la carcasa<sup>2</sup> y, como la carcasa también es de plástico, se puede ver dañada tanto por el propio proceso de montaje y desmontaje como por un descuido con la tijera o un ajuste excesivo de las bridas.

Unido a estos inconvenientes, se encuentra el propio proceso de impresión en 3D. Como se comenta en el Capítulo 3, a la hora de imprimir una pieza es necesario escoger qué cara de la misma apoyará sobre la superficie de impresión. El diseño de esta unión, mediante bridas, complica excesivamente el proceso de impresión, además de provocar un acabado con menor calidad de caras que van a estar directamente expuestas a la vista del alumnado. Por lo tanto, finalmente se ha optado por realizar una unión con elementos móviles (figura 2.17).

<sup>2</sup>Razón por la que en esta última unión se han mantenido las bridas.

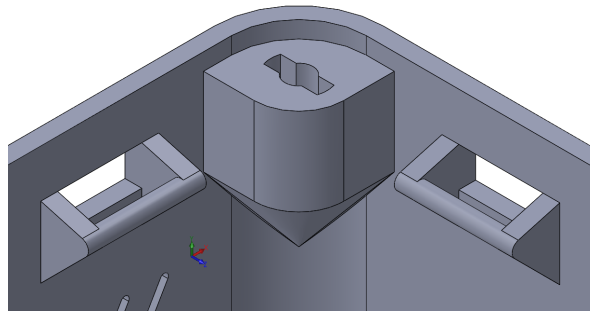


Figura 2.17: Orificio unión cubierta carcasa.

En dicha unión irá introducida una pieza como la que se puede ver en la figura 2.18 que, tras rotarla, fijará la cubierta en posición, impidiendo que ésta se mueva. Hay un total de cuatro fijaciones en la carcasa.

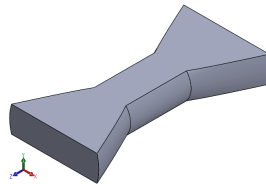


Figura 2.18: Llave de unión entre la cubierta y la carcasa.

El interior de la unión se puede ver con mayor detalle en las figuras 2.19 y 2.20.

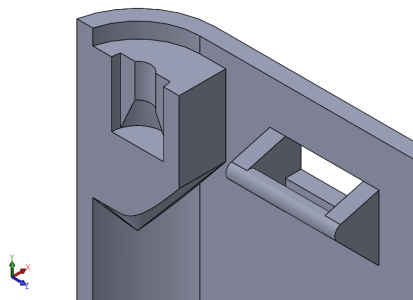


Figura 2.19: Corte transversal de la unión.

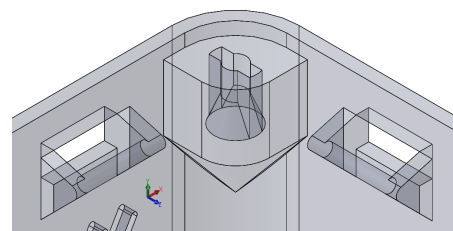


Figura 2.20: Vista transparente de la unión.

Otro de los requerimientos exigidos consiste en un acoplamiento entre la carcasa y una base con pequeños cilindros que se encuentra en el laboratorio (ver figura 2.21). La forma idónea de acoplar las piezas a esta plataforma se basa en una serie de surcos.

En el diseño inicial, se pensó en acoplar los surcos directamente en la cara inferior de la carcasa, tal y como se puede ver en la figura 2.22, pero por motivos de funcionalidad y por

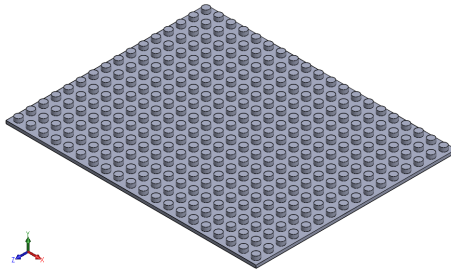


Figura 2.21: Plataforma soporte laboratorio.

restricciones técnicas de la impresión en 3D (ver Capítulo 3) se decidió separar el acoplamiento a la plataforma y la propia carcasa en dos partes diferenciadas (figura 2.23).

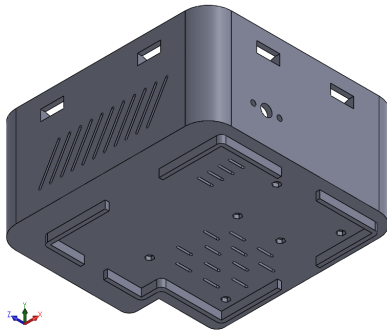


Figura 2.22: Surcos directamente en la carcasa.

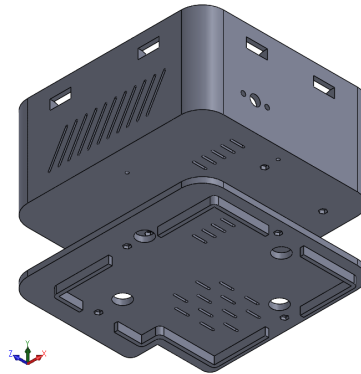


Figura 2.23: Carcasa y surcos por separado.

La forma en que se unen ambas partes, carcasa y acoplamiento con los surcos, se realiza mediante uniones atornilladas. Por tanto, son necesarios unos orificios en el fondo de la carcasa tal y como se ven destacados en azul en la figura 2.24.

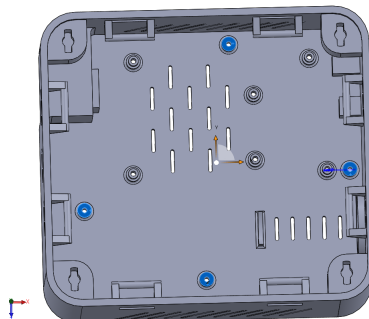


Figura 2.24: Orificios para el acoplamiento.

Los planos del cuerpo principal de la carcasa se pueden ver en el Anexo G, planos 1 y 2.

### 2.3.2. Cubierta de la carcasa

La siguiente pieza en ser diseñada es la cubierta de la carcasa. Ésta se encarga de cumplir el requerimiento de proteger los elementos interiores. Del mismo modo, gracias a las uniones diseñadas en el apartado 2.3.1, la cubierta se une al cuerpo principal de una manera segura pero a la vez sencilla de deshacer, facilitando así el desmontaje de manera rápida y segura.

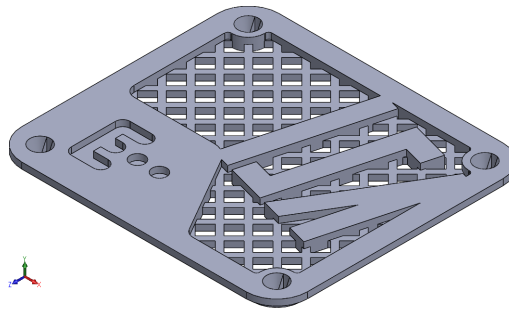


Figura 2.25: Cubierta de la carcasa.

Por lo tanto, se pueden listar las funciones de esta pieza como sigue:

- Protección del motor y de las placas de control.
- Desmontaje y desensamblaje rápido de los elementos que protege.
- Facilitar la visibilidad de los elementos interiores.
- Definir la otra parte del acoplamiento entre la carcasa y el cierre superior de la misma.
- Ventilación de los elementos interiores.

La extensión de los soportes que se muestran en la figura 2.17, se puede ver en la cubierta en la figura 2.26. La cara troncocónica permite que la llave (figura 2.18) pueda rotar con facilidad y que, una vez en posición, evite que se separe la cubierta del cuerpo principal.

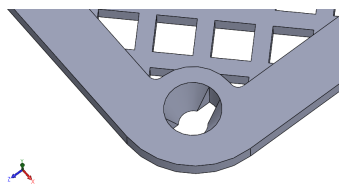


Figura 2.26: Orificio para la unión con el cuerpo principal.

Por otro lado, como se comentó en el apartado de los requerimientos, se busca que los elementos interiores de la carcasa sean visibles desde el exterior. Para cumplir este requerimiento se decide crear un entramado en la cara superior de la cubierta, donde también se decide plasmar el logo de la Escuela de Ingenierías Industriales y el del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática (figura 2.27).

Para facilitar el acoplamiento entre la cubierta y la carcasa, también se crea un reborde por todo el perímetro inferior de la carcasa, quedando así garantizada la unión en la posición deseada (figura 2.28).

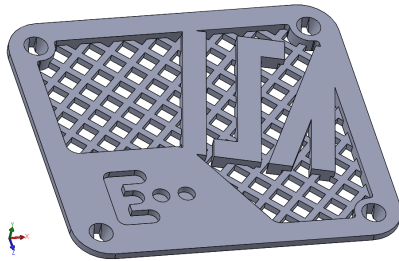


Figura 2.27: Logos EII e ISA sobre el entramado.

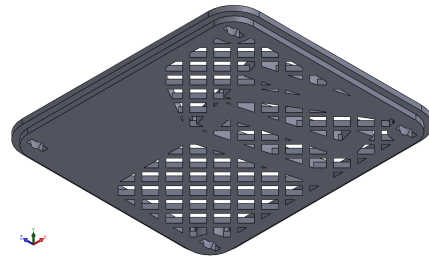


Figura 2.28: Escalón para el ajuste inferior.

El plano de la cubierta se encuentra en el Anexo G, plano 3. El plano con las dimensiones de los logos está en el mismo Anexo, plano 6.

### 2.3.3. Acoplamiento con la base

Modelados el cuerpo principal de la carcasa y la cubierta, se procede con el modelado del acoplamiento entre la carcasa y la plataforma de la manera que se ha expuesto en la última parte del apartado 2.3.1.

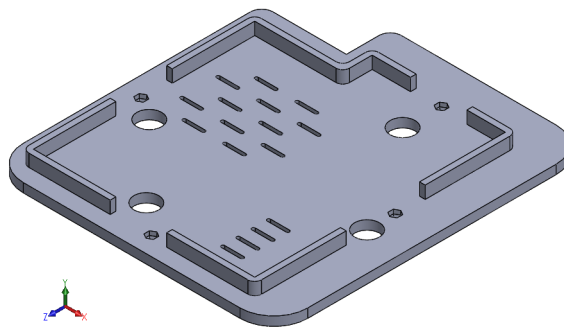


Figura 2.29: Cubierta de la carcasa.

De entre los requerimientos, esta pieza cumple con:

- Facilitar la conexión de elementos adicionales.
- Definir el acoplamiento entre la carcasa y el soporte del laboratorio.

Se puede ver en la figura 2.23 cómo esta pieza irá acoplada al cuerpo principal de la carcasa. Si se tratara de una pieza sin ninguna ventilación, a la hora de acoplar la carcasa al acoplamiento, la ventilación de ésta primera se vería completamente taponada. Por lo tanto, hace falta cortar unas ranuras exactamente iguales que las de la cara inferior de la carcasa, pero en el acoplamiento (ver figura 2.29).

La unión entre estas dos piezas se ha definido mediante uniones atornilladas con tuercas, al igual que la fijación de la placa Arduino en la carcasa, por lo tanto es necesario crear unos orificios para emplazar las tuercas, por la misma razón que se explicó en el apartado 2.3.1 (ver orificios en la figura 2.30).

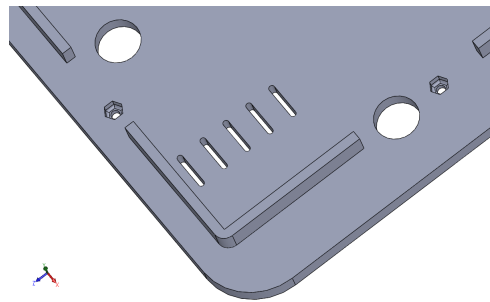


Figura 2.30: Orificios para las tuercas y apoyos.

Entre otras, una de las razones por las que se decidió separar las surcos de unión entre la carcasa y el soporte del laboratorio en el proceso de diseño fue para poder apoyar la carcasa en superficies planas sin que ésta resbalase. Para ello se disponen cuatro apoyos de silicona (apartado 2.3.4.1) de la manera que se ve en la figura 2.31. Si no se tuvieran en cuenta, haría falta despegarlos cada vez que se deseara acoplar la carcasa al soporte del laboratorio. Para solventar esta situación, se realizan cuatro orificios circulares en la pieza del acoplamiento (ver figura 2.29), quedando ambas piezas acopladas como en la figura 2.32.

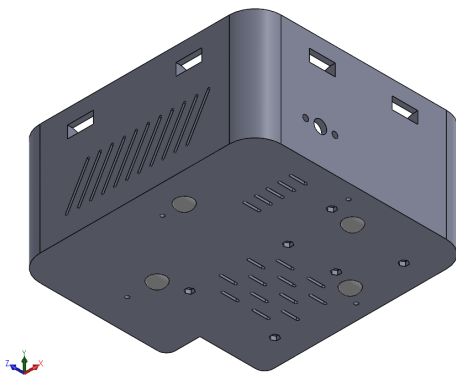


Figura 2.31: Carcasa con apoyos de silicona.

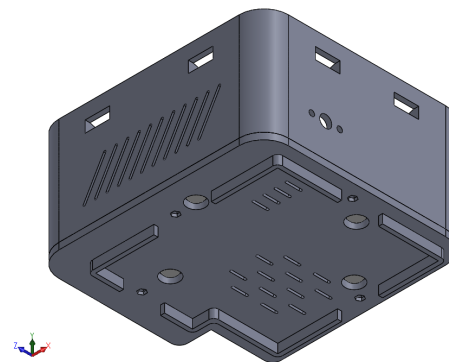


Figura 2.32: Carcasa con apoyos de silicona y surcos.

En la figura 2.33 se pueden ver con más detalle los surcos que unirán la carcasa a una superficie como la de la figura 2.21.

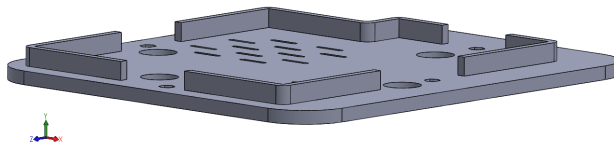


Figura 2.33: Surcos en detalle.

El plano de esta pieza se encuentra en el Anexo G, plano 4.

### 2.3.4. Elementos auxiliares

Dentro de este apartado se recogen los elementos que son necesarios para poder ensamblar unas piezas con otras y para complementar la carcasa. Se distinguen:

#### 2.3.4.1. Apoyo de silicona

Se adhieren a la cara inferior de la carcasa, coincidiendo con los huecos dispuestos en la pieza del acoplamiento (figura 2.32). Su función consiste en evitar que la carcasa se deslice cuando ésta se apoye en una superficie plana sin el acoplamiento con la base. Adicionalmente, permite que la ventilación inferior cumpla su función en esta posición, ya que de lo contrario, la superficie inferior, al ser coincidente con la superficie de apoyo, no podría evacuar ningún calor.

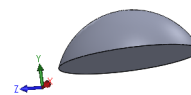
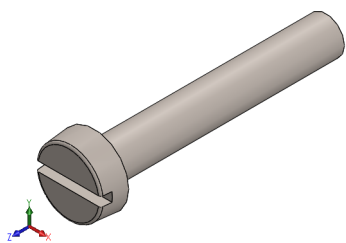


Figura 2.34: Apoyo de silicona.

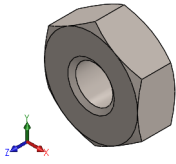
#### 2.3.4.2. Tornillo para la placa



Estos tornillos garantizan que la placa de Arduino esté fija y en posición dentro de la carcasa. Es el mismo tipo de tornillo utilizado para fijar la pieza del acoplamiento con la base y el cuerpo principal de la carcasa.

Figura 2.35: Tornillo placa.

### 2.3.4.3. Tuerca para la placa



Tuerca que va junto con el tornillo del apartado 2.3.4.2 acoplado en el extremo opuesto a la cabeza del mismo.

Figura 2.36: Tuerca placa.

### 2.3.4.4. Tornillo de sujeción del motor

Este tornillo se usa exclusivamente para mantener el motor en posición dentro de la carcasa. La cara inferior de la cabeza debe ser plana, para evitar dañar las paredes de la carcasa al apretarlo.

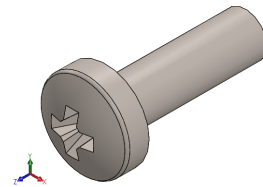


Figura 2.37: Tornillo sujeción motor.

## 2.3.5. Motor de corriente continua

Con el objetivo de tener un modelo geométrico lo más real posible, facilitando así el diseño de todos los componentes de la carcasa y mostrando una mejor vista del conjunto ensamblado, se ha realizado un modelo del motor de corriente continua utilizado.

El modelo terminado, que recoge las dimensiones principales del componente, se puede ver en las figuras 2.38 y 2.39.

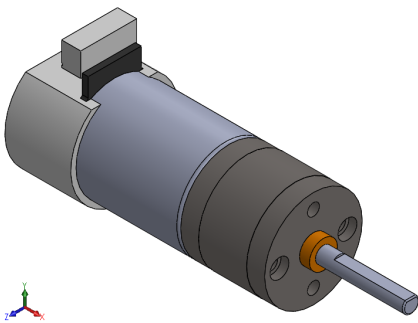


Figura 2.38: Vista frontal del motor.

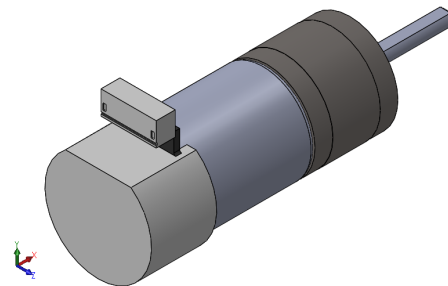


Figura 2.39: Vista trasera del motor.

### 2.3.6. Modificaciones de modelos ya existentes

Así como el modelado de todas las piezas mostradas hasta ahora se ha realizado desde cero, para el modelado de la placa Arduino y el del Motor Shield se ha partido de modelos disponibles en la red<sup>3</sup>.

Al tratarse de modelos antiguos no se corresponden exactamente con los componentes que se usan en este TFG, por lo tanto es necesario realizar varias modificaciones a los mismos. Estas modificaciones se explican más detenidamente en el Anexo A, en los apartados A.7.2 y A.7.3.

#### 2.3.6.1. Placa Arduino MEGA 2560

En este modelo se realizan las siguientes modificaciones:

- Se cambia la posición del botón de reinicio.
- Se modifican las hileras superior e inferior de pines, haciendo que tenga el mismo número de pines que la placa Arduino utilizada.
- Se corrige la posición de los orificios circulares en la placa.

En las figuras 2.40 y 2.41 se puede ver el modelo antes y después de realizar las modificaciones ya mencionadas.

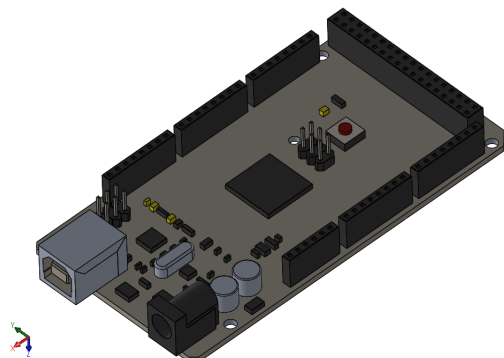


Figura 2.40: Placa Arduino original.

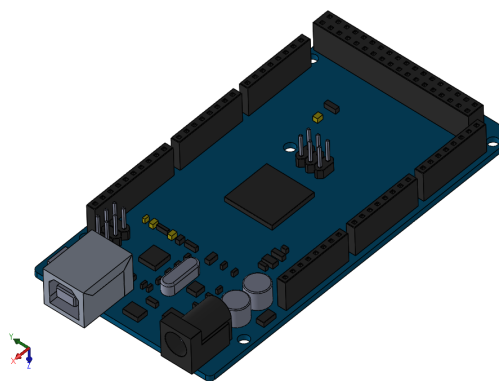


Figura 2.41: Placa Arduino modificada.

---

<sup>3</sup>Ver [26] - Arduino MEGA 2560 y [27] - Arduino Motor Shield

### 2.3.6.2. Arduino Motor Shield

Los cambios aplicados al modelo son:

- Cambio en las dimensiones del botón de reinicio.
- Modificación de la forma de los pines, pasando a ser de sección cuadrada.
- Achaflanado de la entrada superior para la conexión de pines.
- Corrección de la posición y geometría de los agujeros de conexión de los pines para que se acoplen sin problema con los de la placa Arduino.
- Corrección de la posición de los taladros del Motor Shield.

La diferencia entre el modelo antes y después de las modificaciones se puede ver en las figuras 2.42 y 2.43.

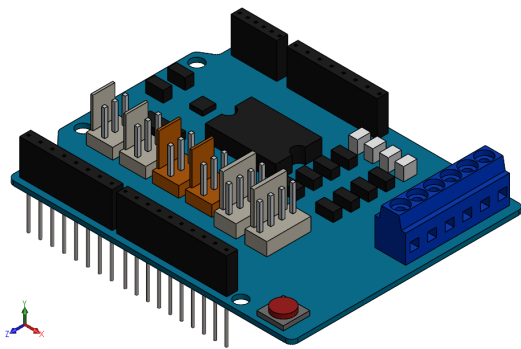


Figura 2.42: Motor Shield original.

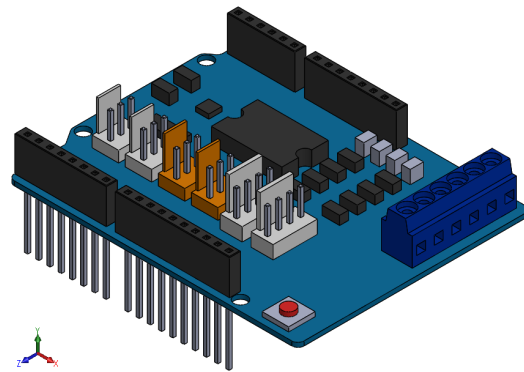


Figura 2.43: Motor Shield modificado.

## 2.4. Ensamblaje completo del modelo

En este apartado se muestra cómo deben quedar ensambladas todas las piezas modeladas a lo largo del apartado 2.3. En el apartado A.8 del Anexo A se muestra con más detalle cómo definir las relaciones entre las piezas en SolidWorks para conformar el ensamblaje completo. Igualmente, en el plano 7 del Anexo G se muestra una vista explosionada del ensamblaje.

Para empezar, se dispone la placa Arduino dentro de la carcasa tal y como se muestra en la figura 2.44. Hace falta prestar especial atención a que la entrada de la conexión USB quede como en la figura 2.45.

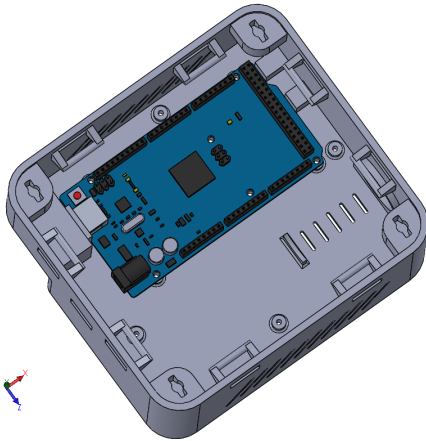


Figura 2.44: Placa Arduino en posición.

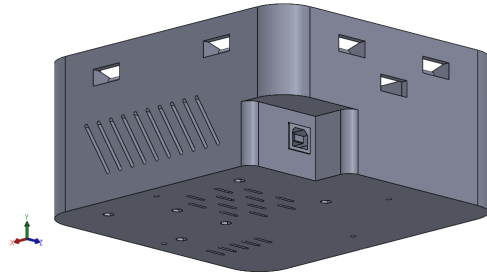


Figura 2.45: Detalle de la entrada USB.

Una vez en posición, se deben disponer los seis tornillos que fijan la posición de la placa Arduino dentro de la carcasa, junto con las seis tuercas en la cara inferior de la carcasa (ver figuras 2.46 y 2.47).

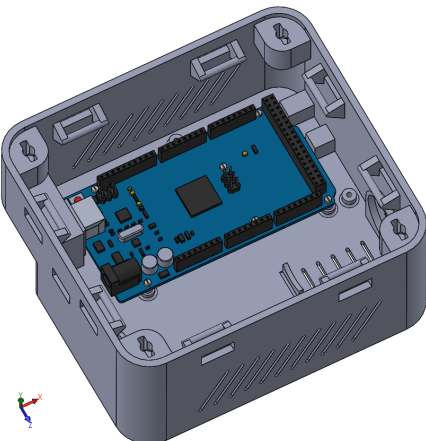


Figura 2.46: Tornillos en la placa Arduino.

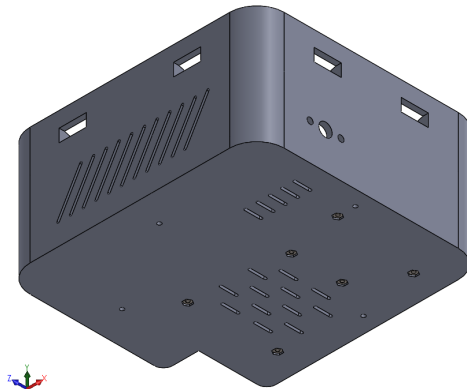


Figura 2.47: Tuercas de la placa Arduino.

Fijada en posición la placa Arduino, el siguiente paso consiste en ensamblar el Motor Shield de Arduino. Esta unión se hará sólo y exclusivamente por medio de los pines que comunican una placa con otra. Haciendo coincidir los pines homónimos, se consigue tener posicionado el Motor Shield en el ensamblaje (figura 2.48).

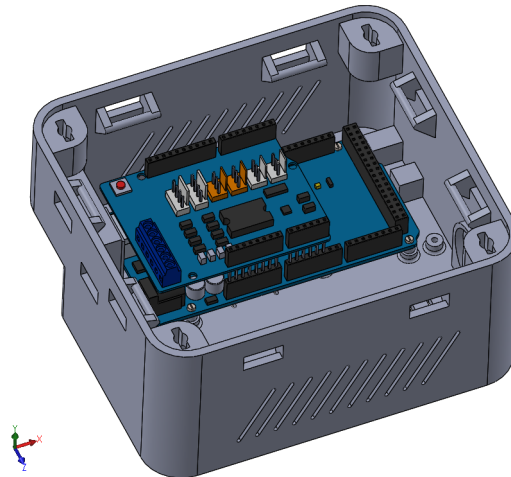


Figura 2.48: Motor Shield sobre la placa Arduino.

Las siguientes piezas en ser añadidas al ensamblaje son el acoplamiento con la base y los apoyos de silicona. Estos últimos deben ser pegados después de añadir el acoplamiento, ya que una vez fijado éste, es más fácil colocar los apoyos de silicona en la posición correcta para que no interfiera en la unión del acoplamiento con la carcasa. Por lo tanto, tras posicionar el acoplamiento y añadir los tornillos, tuercas y apoyos de silicona, el ensamblaje debe quedar como en las figuras 2.49 y 2.50.

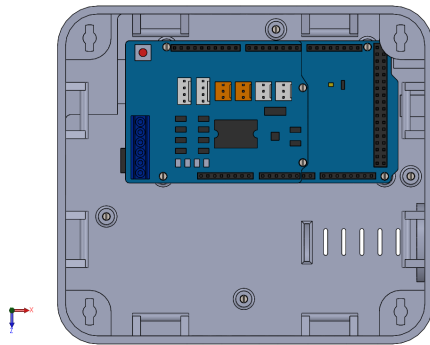


Figura 2.49: Tornillos de la unión del acoplamiento base.

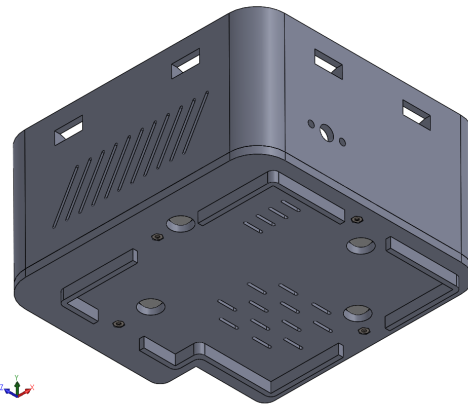


Figura 2.50: Acoplamiento base, tuercas y apoyos de silicona.

El siguiente paso consiste en posicionar el motor de corriente continua dentro de la carcasa. La unión se hará exclusivamente con dos tornillos. El resultado se puede ver en la figura 2.51.

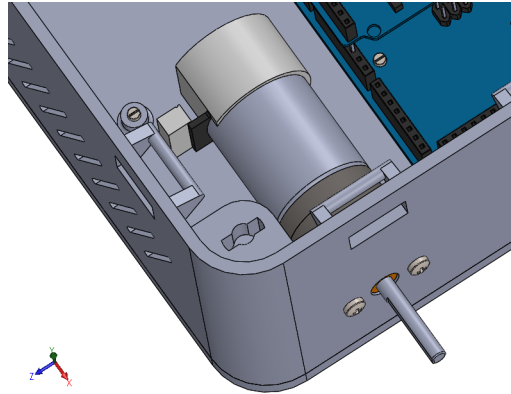


Figura 2.51: Motor de corriente continua fijado en posición.

Lo último que falta por añadir al ensamblaje es el cierre de la carcasa. Este cierre va acoplado a la carcasa a través de las uniones que se definieron en apartados anteriores. Para comenzar, se introduce una de las llaves de la forma que se puede ver en la figura 2.52. Repetir en las tres esquinas restantes (figura 2.53).

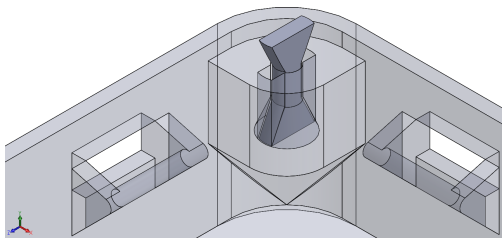


Figura 2.52: Llave posicionada y sin girar.

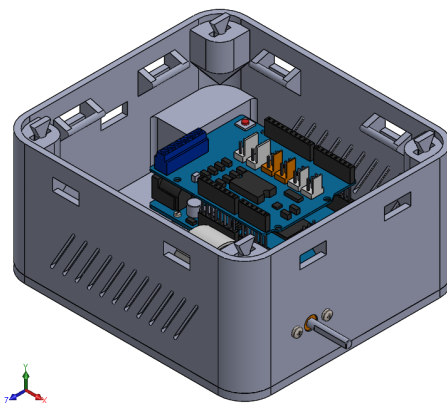


Figura 2.53: Ensamblaje sin la cubierta.

A continuación, se añade al ensamblaje la cubierta y, una vez en posición, se giran las cuatro llaves 90° (figura 2.54), quedando la cubierta bloqueada en la posición adecuada (figura 2.55).

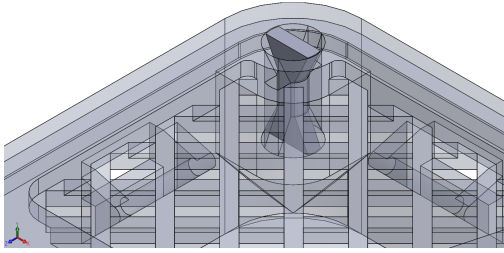


Figura 2.54: Llave posicionada girada.

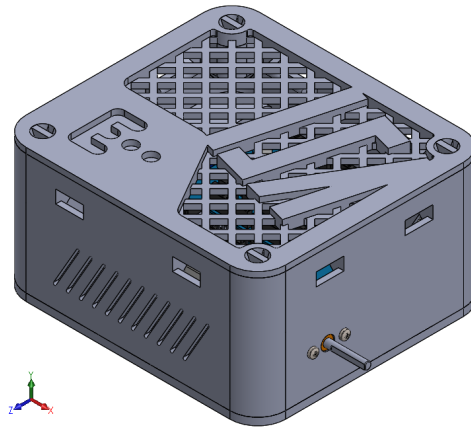


Figura 2.55: Ensamblaje completo.

Para tener una mejor visión del conjunto completo del ensamblaje, se muestra una vista explosionada en la figura 2.56.

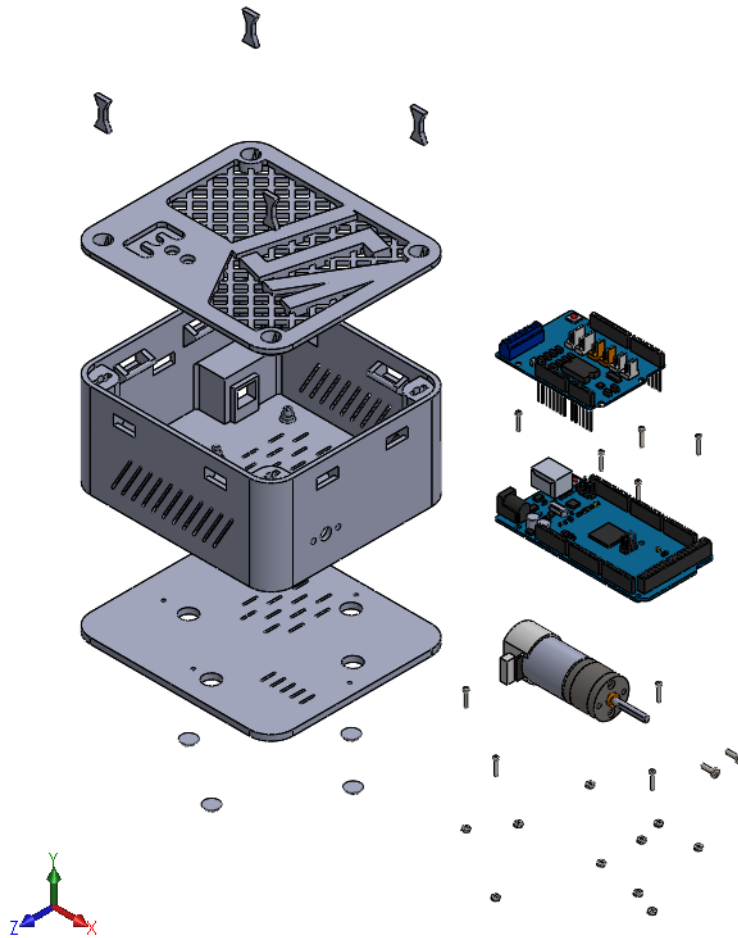


Figura 2.56: Vista explosionada del ensamblaje.

# Capítulo 3

## Impresión 3D

### 3.1. Introducción

La impresión 3D, también conocida como fabricación aditiva, consiste en el proceso de unión de materiales para fabricar piezas u objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa a capa, en oposición a métodos de fabricación mediante eliminación de material y de conformado [28].

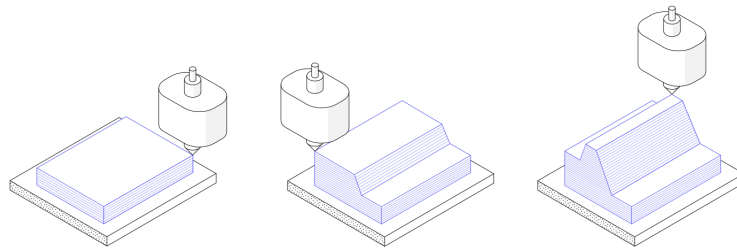


Figura 3.1: Esquema del proceso de impresión 3D [1].

Este proceso de fabricación es diferente a los métodos de fabricación substractiva<sup>1</sup> o de conformado<sup>2</sup>. Debido a esto, en la impresión 3D no se necesitan herramientas especiales, como por ejemplo herramientas de corte (CNC) o moldes (inyección), sino que la pieza se obtiene directamente en una plataforma tras imprimirla capa a capa (ver figura 3.1).

Para comenzar, se parte del modelo 3D de la pieza que se va a imprimir y, a continuación, se procesa dicho modelo en un tipo de programa llamado *slicer*. Este programa se encarga de seccionar el modelo en capas muy finas y, a continuación, generar una serie de instrucciones que la impresora 3D será capaz de interpretar.

Una vez hecho esto, el tipo de impresión estará condicionado por la tecnología que se vaya a utilizar, las propiedades físicas deseadas y el material que se decida emplear.

---

<sup>1</sup>La forma final se adquiere mediante la extracción selectiva del material: fresado, torneado, taladrado, electroerosión, etc.

<sup>2</sup>La forma deseada se adquiere mediante la aplicación de presión a un cuerpo de materia prima: forja, curvado, fundición, moldeo por inyección, etc.

## 3.2. Ventajas y limitaciones de la impresión 3D

Como cualquier otra tecnología, la impresión 3D cuenta con una serie de ventajas y limitaciones. Conociéndolas bien, se podrá tomar una decisión más acertada e informada respecto a qué tipo de proceso de fabricación será el más adecuado para el desarrollo de la carcasa del presente trabajo.

### 3.2.1. Ventajas

- **Bajo coste de prototipado con plazos de entrega muy cortos:** el proceso de prototipado de una pieza impresa en 3D suele tardar entre 2 y 5 días.
- **Coste inicial bajo:** al contrario que otro tipo de procesos de fabricación, la impresión 3D no necesita moldes ni herramientas especializadas para cada diseño que se vaya a fabricar. El coste de la fabricación depende exclusivamente del material utilizado y del tiempo que se haya tardado en imprimir la pieza.
- **Amplia gama de materiales:** a pesar de que el plástico es el material más utilizado en la impresión 3D, también se pueden utilizar otros materiales como metal y materiales compuestos. Esto permite obtener piezas con propiedades adaptadas perfectamente a su función (figura 3.2).



Figura 3.2: Muestras de materiales para impresión 3D [2].

- **Alto grado de personalización:** en los procesos de fabricación habituales es más barato producir piezas iguales, en cambio, en la impresión 3D, basta con modificar el archivo digital con el modelo 3D.
- **Las geometrías complejas no implican un mayor coste:** la propia naturaleza de la impresión 3D permite que se puedan fabricar diversas geometrías sin aumentar el coste de fabricación. De hecho, una geometría compleja puede ser hasta más económica por tener menos material que otra más simple.

### 3.2.2. Limitaciones

- **Menor resistencia y propiedades anisotrópicas:** como en la impresión 3D convencional se fabrica capa a capa, las piezas son menos resistentes en una dirección que en otra (ver figura 3.3). Es por esto que por lo general las piezas impresas en 3D no se suelen utilizar en aplicaciones críticas. Para estos casos existen otras tecnologías de impresión en 3D que producen piezas con unas propiedades mecánicas excepcionales (ver impresión DMLS/SLM en el apartado 3.3).

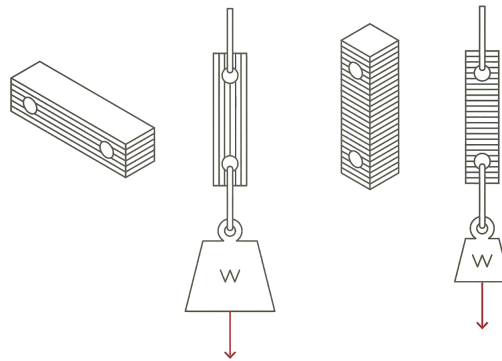


Figura 3.3: Esquema de las capas en una pieza impresa en 3D [3].

- **Precios menos competitivos a mayor escala:** cuando el número de piezas a producir es pequeño, la impresión en 3D tiene ventaja sobre el resto de tecnologías, pero cuando se empieza a producir una mayor cantidad de piezas, el mecanizado CNC o el moldeo por inyección empiezan a producir piezas con un menor coste (ver figura 3.4).

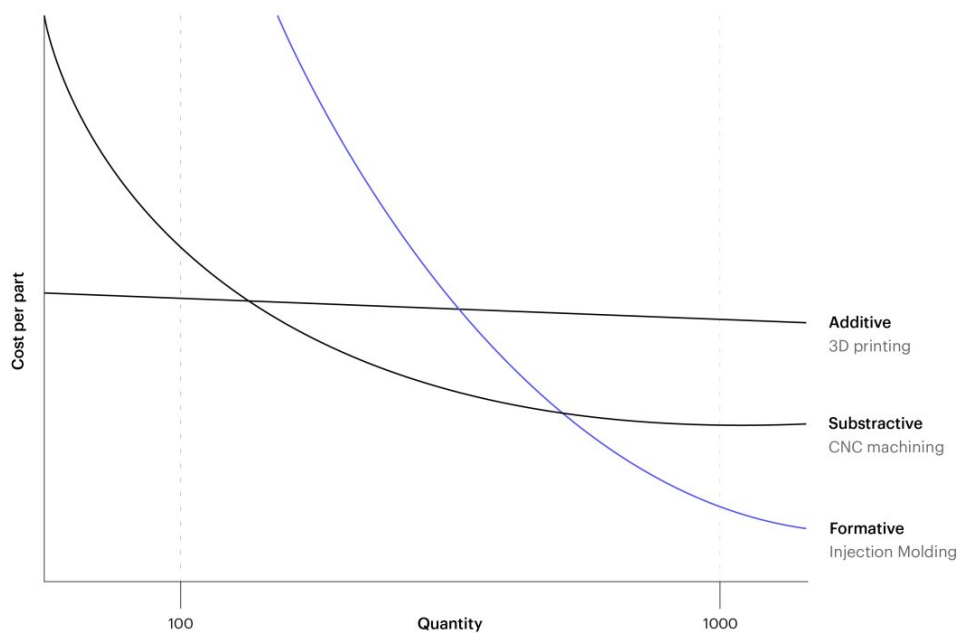


Figura 3.4: Representación cualitativa coste - piezas producidas [3].

- **Precisión y tolerancia limitada:** la precisión de las impresoras 3D depende del calibrado de la propia máquina. Normalmente, las impresoras 3D de tecnología FDM (ver apartado 3.3) imprimen con tolerancias de  $\pm 0,5$  mm. En cambio, otros tipos de impresión 3D ofrecen tolerancias de hasta  $\pm 0,01$  mm (impresión SLA, ver apartado 3.3).
- **Postprocesado y eliminación de soportes:** no es común que una pieza impresa en 3D esté lista nada más salir de la impresora. Para poder imprimir elementos en voladizo, hace falta disponer de *soportes* (figura 3.5), estructuras que se imprimen junto con la pieza debajo de partes en voladizo o para fijar la pieza a la superficie de impresión. Estos soportes deben ser eliminados una vez está terminada la pieza.

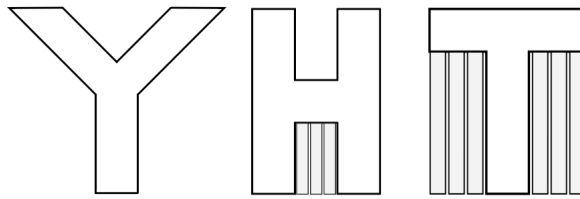


Figura 3.5: Vista esquemática del uso de los soportes [4].

### 3.3. Clasificación de las diferentes tecnologías de impresión 3D

La Norma UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017 [28], en el Anexo A, apartado A.1, hace una clasificación de los factores que afectan a las propiedades de las piezas fabricadas mediante fabricación aditiva:

- Tipo de material (polímero, metal, cerámica o compuesto).
- El principio aplicado para la fusión o adhesión (fusión, curado, sinterizado, etc.).
- La materia prima que se utiliza para la adición del material (líquido, polvo, suspensión, filamento, lámina, etc.).
- Cómo se une el material, es decir, la arquitectura de la máquina.

Del mismo modo, clasifica la propia tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D) en función de la **técnica utilizada para aportar los materiales**. Se pueden ver diferentes esquemas de esta clasificación desde la figura A.2 a la figura A.5 en la misma Norma. De forma general se pueden distinguir siete grupos:

### 3.3. CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D 27

- **Extrusión de material (FDM):** el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio (ver apartado 3.3.1).



Figura 3.6: Esquema extrusión de material [5].

- **Fotopolimerización en tanque o cuba (SLA y DLP):** el fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz (ver apartado 3.3.2).

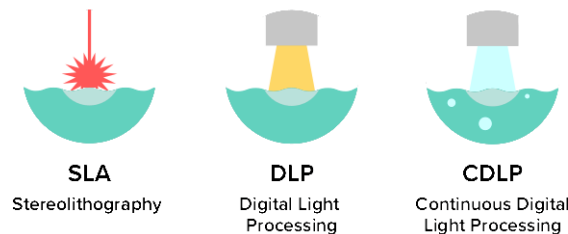


Figura 3.7: Fotopolimerización en tanque o cuba [5].

- **Fusión en lecho de polvo (SLS, DMLS y SLM):** la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo (ver apartados 3.3.3 y 3.3.4).

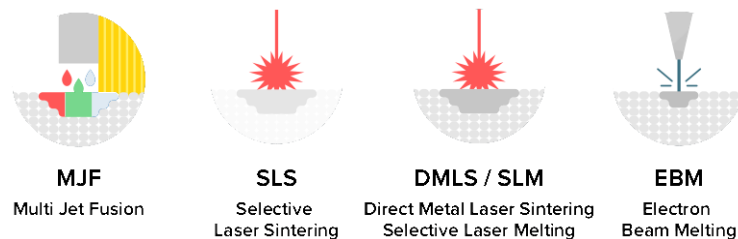


Figura 3.8: Fusión en lecho de polvo [5].

- **Proyección de material (MJ):** se depositan selectivamente gotas del material de fabricación (ver apartado 3.3.5).



Figura 3.9: Proyección de material [5].

- **Proyección de aglomerante (BJ):** un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo (ver apartado 3.3.6).



Figura 3.10: Proyección de aglomerante [5].

- **Deposición de energía focalizada (LENS, EBAM):** se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan.

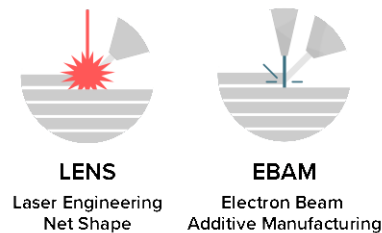


Figura 3.11: Deposición de energía focalizada [5].

- **Laminado de hojas (LOM):** el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto.



Figura 3.12: Laminado de hojas [5].

A continuación, se van a explicar de forma más detallada las técnicas más importantes de entre las descritas anteriormente.

### 3.3.1. Extrusión de material (*Fused Deposition Modelling, FDM*)

En este tipo de impresión, una bobina de filamento alimenta a la boquilla extrusora calefactable. Cuando ésta alcanza la temperatura deseada un motor hace pasar el filamento a través de ella, fundiendo así en material.

La impresora mueve la boquilla, depositando el material en los puntos necesarios, donde se enfría y solidifica. Cuando se termina una capa, la plataforma se mueve hacia abajo para repetir el proceso hasta que la pieza está acabada.

Después de la impresión, la pieza suele estar lista para utilizarla, aunque a veces requiere algún tipo de postprocesado como la eliminación de soportes o alisado de las caras.

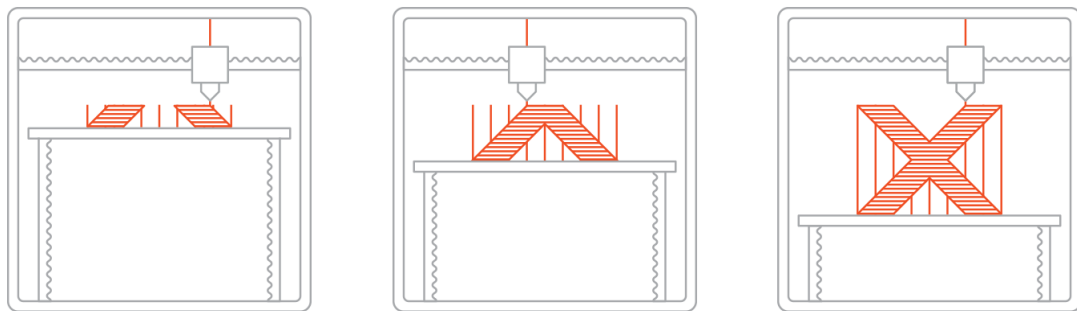


Figura 3.13: Proceso de impresión FDM [6].

La impresión FDM es la opción más rentable a la hora de producir piezas de termoplásticos y prototipos. También tiene el tiempo de elaboración más pequeño de todas las tecnologías de impresión 3D. Existen una gran cantidad de termoplásticos disponibles para la creación de piezas mediante extrusión de material.

Como limitaciones, se tiene una precisión menor comparada con otras tecnologías de impresión y las capas suelen ser visibles a simple vista. Además, el mecanismo de adhesión entre capas hace que las piezas tengan propiedades mecánicas anisotrópicas de por sí, por lo que puede que no sean aptas para las aplicaciones más exigentes.

### 3.3.2. Fotopolimerización en tanque o cuba: Estereolitografía (*Stereolithography, SLA*) y Procesamiento Digital de Luz (*Digital Light Processing, DLP*)

Ambos son procesos parecidos que utilizan luz ultravioleta para curar capa a capa una resina líquida que se encuentra dentro de un tanque o cuba. La SLA utiliza un láser simple para curar la resina, mientras que el DLP usa un proyector digital de luz para curar una misma capa a la vez proyectándola en la resina.

Después de imprimir, hace falta limpiar las piezas de la resina sobrante y exponerlas a una fuente de luz ultravioleta para incrementar su dureza. A continuación, se eliminan los

soportes y, si fuera necesario, se realizan procesos de acabado superficial.

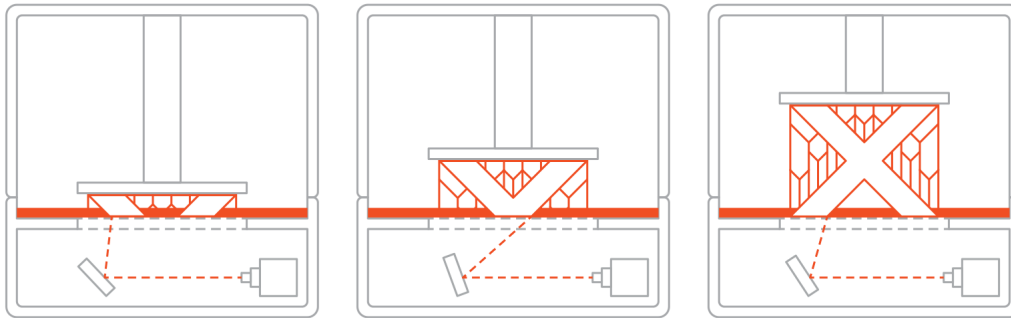


Figura 3.14: Proceso de impresión SLA [7].

Este tipo de impresión permite producir piezas con un alto grado de precisión, muchos detalles y un acabado superficial muy bueno. Existen muchos tipos de resinas especialmente diseñadas para distintas necesidades.

Por lo general, las piezas impresas por SLA/DLP son más frágiles que las impresas mediante FDM. Igualmente, estas piezas no deben ser utilizadas en el exterior debido a que sufren un deterioro tanto mecánico como estético al estar expuestas a la luz ultravioleta del sol. Además, estas piezas siempre necesitan soportes durante el proceso de impresión.

### 3.3.3. Fusión en lecho de polvo: Sinterizado Selectivo por Láser (*Selective Laser Sintering, SLS*)

La fabricación mediante SLS se comienza calentando un depósito con polímero en polvo a una temperatura ligeramente inferior a su punto de fusión. Inmediatamente después se distribuye una fina capa de polvo (de unos 0,1 mm) sobre la plataforma.

A continuación, un láser de  $CO_2$  escanea la superficie de la plataforma y sinteriza de manera selectiva las partículas de polímero en polvo, haciendo que éstas se cohesionen. Cuando toda la sección se ha escaneado, la plataforma se desplaza hacia abajo el equivalente al espesor de una capa y se repite el proceso. El resultado es un depósito con piezas, rodeadas por polvo sin sinterizar.

Después de imprimirse la pieza, el depósito se tiene que enfriar antes de extraerla. Puede hacer falta algún paso de postprocesado para mejorar la apariencia de las piezas.

Las piezas impresas así suelen tener unas propiedades mecánicas muy buenas y casi isotrópicas. Como no hacen falta soportes, los diseños con geometrías muy complejas se pueden fabricar fácilmente. También es un tipo de tecnología de impresión muy buena para lotes de hasta unas 100 piezas, ya que el depósito se puede llenar por completo y se pueden

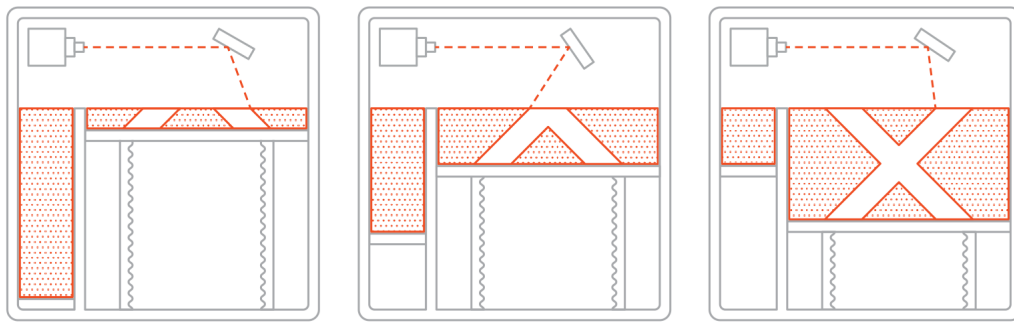


Figura 3.15: Proceso de impresión SLS [8].

imprimir varias piezas al mismo tiempo.

Este tipo de impresoras suelen ser de gama alta, por lo que los costes son mayores comparados con las impresiones con FDM o SLA. Por otro lado, las piezas impresas mediante SLS tienen una superficie granular y algo de porosidad interna.

#### 3.3.4. Fusión en lecho de polvo: Sinterizado Directo de Metal por Láser (*Direct Metal Laser Sintering*, DMLS) y Fusión Selectiva por Láser (*Selective Laser Melting*, SLM)

El DMLS y la SLM producen piezas de manera similar al SLS: un láser cohesiona de manera selectiva partículas de polvo, capa a capa. La principal diferencia estriba en que el DMLS y la SLM producen piezas de metal.

La diferencia entre el DMLS y la SLM es muy sutil: la SLM logra una fusión completa de las partículas de polvo, mientras que el DMLS calienta las partículas de metal hasta el punto de que se fusionan a nivel molecular.

Siempre hacen falta soportes para minimizar la deformación producida por las altas temperaturas empleadas. Después de la impresión, se deben eliminar los soportes bien de forma manual o mediante mecanizado CNC. Por último, las piezas son tratadas térmicamente para aliviar cualquier tipo de esfuerzos residuales.

Este tipo de impresión es ideal para fabricar piezas con geometrías complejas que no se pueden conseguir con los métodos tradicionales. Las piezas obtenidas tienen unas propiedades mecánicas excelentes, con frecuencia superiores a las del material en bruto. Además, muchas aleaciones que son difíciles de procesar utilizando otros tipos de tecnologías<sup>3</sup>, están disponibles para el DMLS/SLM.

<sup>3</sup>Como por ejemplo las superaleaciones.

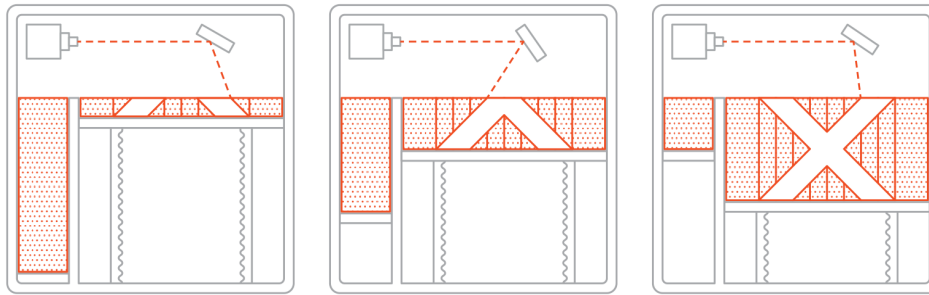


Figura 3.16: Proceso de impresión SLM/DMLS [9].

Los costes asociados con esta tecnología son altos: las piezas suelen costar entre 5.000 y 25.000 euros, además de no contar con la posibilidad de imprimir piezas excesivamente grandes. Por lo tanto, estos métodos sólo se utilizan para fabricar piezas que no se pueden obtener de otra manera.

### 3.3.5. Proyección de Material (*Material Jetting*, MJ)

La proyección de material funciona de manera parecida a las impresoras convencionales, pero en lugar de imprimir una sola capa de tinta en un papel se imprimen muchas capas de material, una sobre otra, para crear una pieza.

Varios cabezales proyectan cientos de pequeñas gotas de un fotopolímero sobre una plataforma, que después es curado por medio de una fuente de luz ultravioleta. Tras completar una capa, la plataforma se desplaza hacia abajo y el proceso se repite.

Siempre hacen falta soportes, que se imprimen junto con el resto de la pieza con un material hidrosoluble para poder retirarlo fácilmente en el postprocesado.

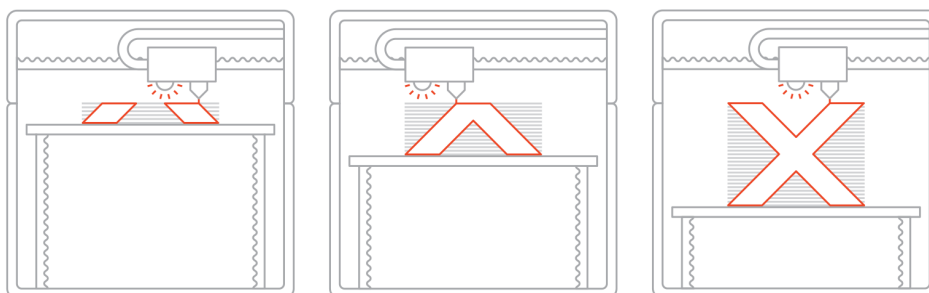


Figura 3.17: Proceso de impresión SLS [10].

Este tipo de tecnología es la más precisa de todas y es una de las pocas que permite la impresión con varios materiales diferentes al mismo tiempo. Las superficies que se consiguen también son muy lisas.

Por otro lado, la impresión mediante proyección de material es la más cara, lo que puede hacer que no sea siempre económicamente viable. Además, las piezas fabricadas por este método no son las mejores para aplicaciones funcionales<sup>4</sup>. Al igual que con la SLA y el DLP, los modelos impresos son frágiles. A esto se le añade el hecho de que también son fotosensibles y que irán perdiendo sus propiedades según pase el tiempo si están expuestos a la luz solar.

### 3.3.6. Proyección de Aglomerante (*Binder Jetting, BJ*)

La proyección de aglomerante es una tecnología con muchas aplicaciones desde las más baratas hasta impresiones a color y de moldes de arena para usar en fundición.

El proceso de impresión comienza con una fina capa de polvo (metal, resina acrílica o arenisca) depositada sobre una plataforma. A continuación se aplican pequeñas gotas de pegamento para cohesionar de manera selectiva las partículas de polvo y conformar la pieza capa a capa.

Una vez se ha terminado la impresión, se saca la pieza del polvo y se limpia. En este punto, la pieza es muy frágil, por lo que hace falta un postprocesado. A las piezas de metal se les aplica un sinterizado o infiltrado de metal con un bajo punto de fusión (por ejemplo, bronce), mientras que a las piezas de color se les infiltra un adhesivo de cianoacrilato.

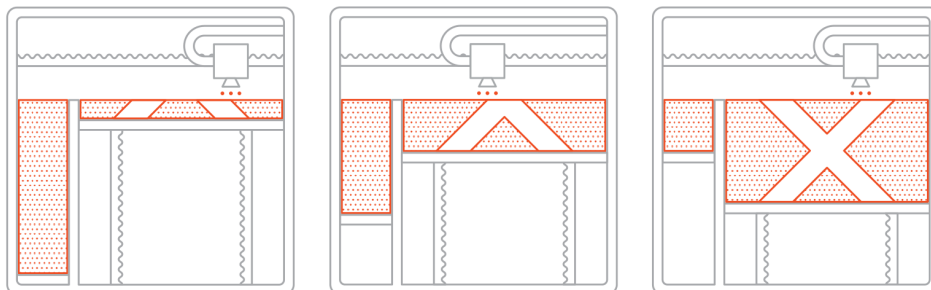


Figura 3.18: Proceso de impresión BJ [11].

Con esta tecnología se pueden imprimir piezas de metal por un coste inferior al coste del DMLS/SLM o del MJ. También se pueden imprimir piezas muy grandes de arenisca. Como no hacen falta soportes durante la impresión, las piezas de metal pueden tener geometrías muy complejas. También se pueden imprimir varias piezas a la vez, por lo que se puede aplicar esta tecnología en la fabricación por lotes.

Las piezas metálicas tienen propiedades mecánicas inferiores a las del metal en bruto debido a la porosidad interna. Además, tampoco se pueden imprimir detalles excesivamente pequeños ya que la fragilidad de las piezas hará que se rompan.

<sup>4</sup>Esto es, aplicaciones que no son meramente estéticas.

### 3.4. Criterios de selección del tipo de impresión 3D

Una vez conocidas todas las tecnologías de impresión 3D, hace falta escoger la que mejor se adapte a las necesidades del producto, en este caso, la carcasa de protección.

Se puede hacer la selección en función de estos detalles:

- El tipo de material a utilizar se conoce a priori.
- Las características de la pieza final ya están definidas.
- Limitaciones del proceso de fabricación.

#### 3.4.1. Selección en función del material

Los materiales destinados a la impresión 3D suelen venir en forma de filamento, polvo o resina. Los polímeros y los metales son los dos grupos principales en que se pueden diferenciar los materiales. Además, también se puede disponer de otro tipo de materiales, como por ejemplo materiales cerámicos o compuestos. Los polímeros, a su vez, pueden diferenciarse en termoplásticos y termoestables.

Si el material del que deben estar hechas las piezas es conocido a priori, la selección del tipo de impresión 3D es relativamente fácil. En la figura 3.19 se muestra un esquema con esta clasificación.

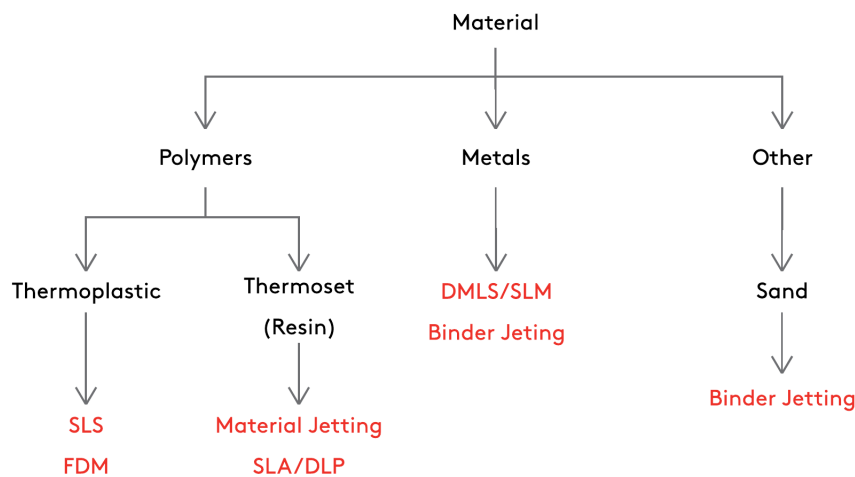


Figura 3.19: Esquema de selección en función del material [12].

##### 3.4.1.1. Termoplásticos

Son los mejores para la fabricación de piezas que sean operativas una vez impresas, tanto para prototipos como para productos finales.

Tienen unas buenas propiedades mecánicas, así como una buena resistencia a los golpes, a la abrasión y a los productos químicos. Además, se pueden mezclar con carbono, vidrio y demás aditivos para mejorar dichas propiedades.

Las piezas producidas mediante sinterizado selectivo por láser (SLS) tienen mejores propiedades y una precisión dimensional mayor, pero las piezas fabricadas mediante la extrusión de material (FDM) son más baratas y más rápidas de producir.

En la tabla 3.1 se pueden ver los termoplásticos usados en cada tipo de tecnología.

Tabla 3.1: Termoplásticos usados en la impresión 3D.

<b>SLS</b>	PA (Poliamida)
	TPU (Poliuretano termoplástico)
<b>FDM</b>	PLA (Ácido poliláctico)
	ABS (Acronitrilo butadieno estireno)
	PETG (Polietileno tereftalato glicol)
	Nylon
	PEI ULTEM (Polieterimida)
	ASA (Acronitrilo estireno acrilato)
	TPU (Poliuretano termoplástico)

En la figura 3.20 se muestra una pirámide con los termoplásticos más utilizados en la impresión 3D. Cuanto más cercano al vértice, el material tendrá unas propiedades mecánicas mejores pero será más difícil producir piezas con él, por lo que será más cara la fabricación.

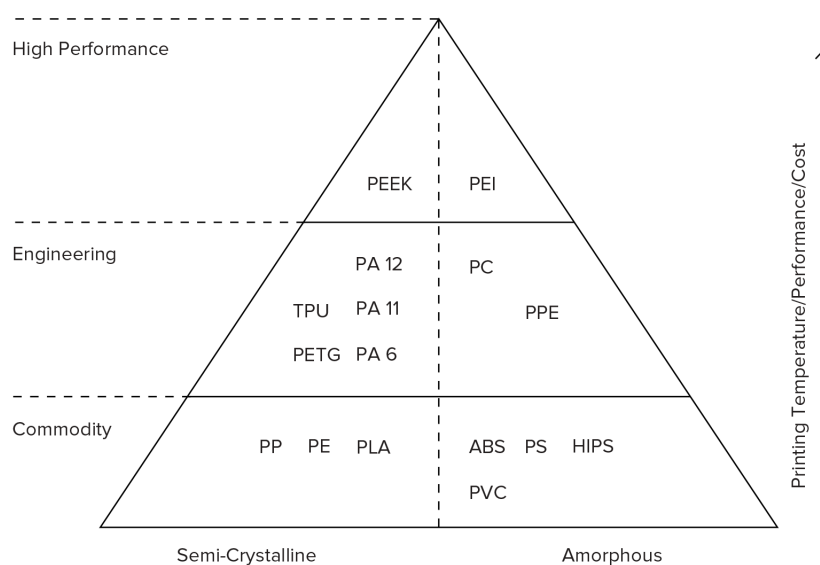


Figura 3.20: Pirámide de los termoplásticos [13].

### 3.4.1.2. Termoestables (resinas)

Este material es más adecuado en las aplicaciones en las que el aspecto de la pieza es importante, ya que permite producir piezas con caras muy lisas. Por lo general, da lugar a piezas rígidas pero más frágiles que los termoplásticos, por lo que pueden no ser adecuadas para piezas funcionales.

Se pueden conseguir piezas con una precisión superficial muy alta gracias a la proyección de material (MJ) pero con un coste ligeramente superior al SLA/DLP.

### 3.4.1.3. Metales

Las piezas metálicas impresas en 3D tienen unas propiedades mecánicas muy buenas, lo que les permite operar a temperaturas muy elevadas. La libertad que supone imprimir en 3D, hace que las piezas obtenidas por estos procedimientos sean ideales para aplicaciones donde el peso es crítico, como por ejemplo en la industria aeronáutica o el sector médico.

Las piezas impresas mediante DMLS/SLS tienen mejores tolerancias y propiedades físicas que las impresas mediante la proyección de aglomerante (BJ), pero estas últimas pueden llegar a ser hasta diez veces más baratas de producir. En la tabla 3.2 se muestran los metales más utilizados en la impresión 3D.

Tabla 3.2: Metales usados en la impresión 3D.

<b>DMLS/SLM</b>	Acero inoxidable Titanio Aluminio
<b>BJ</b>	Acero inoxidable (con bronce o sinterizado)

### 3.4.1.4. Otros materiales

Existen otros materiales que se pueden utilizar en la impresión 3D, pero no son tan comunes y sus aplicaciones están algo limitadas. Entre estos materiales se encuentran las cerámicas y la arena con la tecnología de impresión BJ.

## 3.4.2. Selección en función de las características de la pieza

Las características se pueden clasificar en dos grupos: funcionalidad y aspecto. Como norma general, los termoplásticos son mejores para piezas funcionales y los termoestables para piezas donde el aspecto estético sea más importante.

### 3.4.2.1. Funcionalidad

En la figura 3.21 se puede ver un esquema con las principales propiedades funcionales de la pieza final, así como el proceso más adecuado.

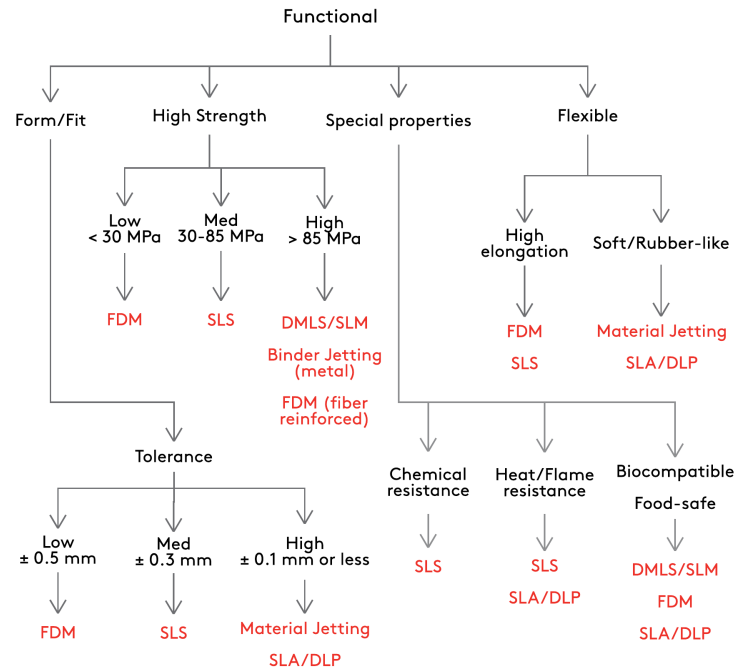


Figura 3.21: Esquema de selección en función de las propiedades de la pieza [14].

### 3.4.2.2. Apariencia

Cuando el aspecto de la pieza es lo principal, el tipo de impresión 3D a utilizar se puede ver en la figura 3.22.

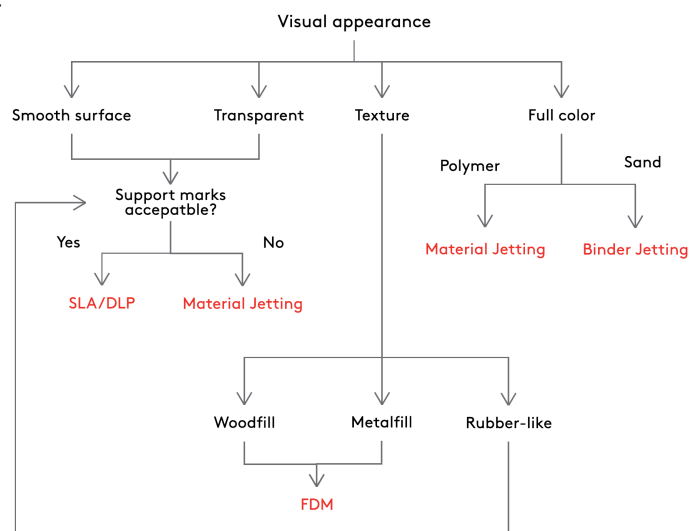


Figura 3.22: Esquema de selección en función de la apariencia de la pieza [15].

### 3.4.3. Selección en función de las limitaciones del proceso de fabricación

Una vez terminado el diseño de la pieza, las limitaciones de cada tecnología de impresión 3D pueden jugar un papel importante en el proceso de fabricación.

Se pueden distinguir varios aspectos en cada proceso de impresión:

- **Precisión dimensional:** está íntimamente relacionado con el nivel de detalle que se puede conseguir. Las máquinas de tipo industrial suelen tener una precisión mayor que las máquinas de uso doméstico.
- **Tamaño máximo que se puede imprimir:** cuando una pieza es demasiado grande hace falta cambiar de tipo de impresión 3D o separar el modelo en varias piezas.
- **Necesidad de soportes:** aspecto determinante a la hora de limitar la libertad en el diseño de la pieza. Los procesos que no necesitan soportes tienen menos limitaciones.

En la tabla 3.3 se puede ver de manera resumida estos aspectos en función de la tecnología empleada<sup>5</sup>.

Tabla 3.3: Limitaciones de la impresión 3D [24].

Tecnología	Precisión	Tamaño de impresión	Soportes
FDM	$\pm 0,5$ mm (D)	200 x 200 x 200 mm (D)	No siempre
	$\pm 0,2$ mm (I)	900 x 600 x 900 mm (I)	
SLA/DLP	$\pm 0,10$ mm (D)	145 x 145 x 175 mm (D)	Siempre
	$\pm 0,05$ mm (I)	1500 x 750 x 500 mm (I)	
SLS	$\pm 0,30$ mm	750 x 550 x 550 mm	No necesarios
MJ	$\pm 0,05$ mm	1000 x 800 x 500 mm	Siempre
BJ	$\pm 0,20$ mm	1800 x 1000 x 700 mm	No necesarios
DMLS/SLM	$\pm 0,10$ mm	500 x 280 x 360 mm	Siempre

<sup>5</sup>D - Máquina doméstica. I - Máquina industrial.

### 3.5. Tecnología de impresión elegida: FDM

El primer paso para elegir el tipo de tecnología que se va a utilizar para fabricar los elementos del presente TFG es evaluar el número de piezas que se van a producir.

Se estima que, a lo sumo, se necesitarán unas **20 piezas** para poder realizar una sesión de prácticas. Esto no se considera un alto nivel de producción. Es menor de las 100 piezas que en la figura 3.4 se establecen como punto a partir del cual otras tecnologías diferentes a la impresión 3D empiezan a ser más rentables. Por lo tanto, la tecnología escogida será la fabricación aditiva o **Impresión 3D**.

Ahora bien, en el apartado 3.3 se muestra que dentro de la impresión 3D existen muchas tecnologías diferentes (FDM, SLA, DLP, MJ, BJ, etc.). Debido a los requerimientos del conjunto que se va a producir, se decide que la tecnología de impresión 3D más adecuada es la **Extrusión de Material (FDM)**. Es una opción **económica, rápida y accesible** desde la propia Escuela [29].

Una vez elegida la tecnología de impresión, queda por elegir el material a utilizar. En la impresión FDM existen varios tipos de termoplásticos, cada uno con unas características propias y adaptadas a las necesidades finales del diseñador. En la tabla 3.1 se pueden ver listados estos materiales. De entre todos ellos, los más comunes son el PLA y el ABS.

En la figura 3.23 se puede ver de manera gráfica una comparación de las características principales de los materiales utilizados en la impresión FDM.

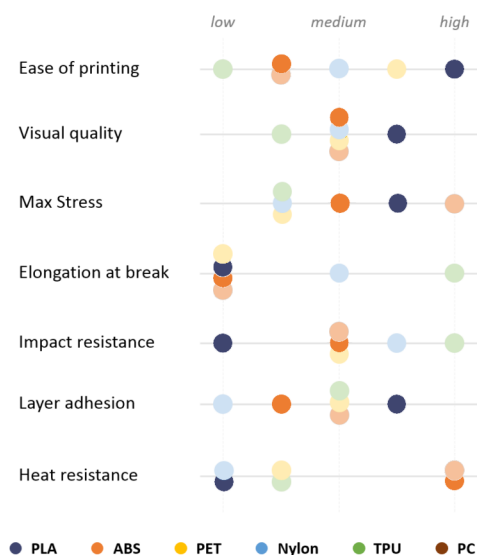


Figura 3.23: Comparación cualitativa de los materiales en impresión FDM [16].

Tras evaluar ambas opciones, el material escogido ha sido el **PLA**. Éste presenta un menor punto de fusión y no emite olores, por lo que es más fácil de imprimir y recoge mejor los detalles, además de ser biodegradable y resistir bien la radiación ultravioleta.

### 3.6. Modificaciones de las piezas

Con el objetivo de poder fabricar las piezas correctamente mediante impresión 3D es necesario realizarles una serie de modificaciones. A continuación, se muestran algunas de las mismas. En el Anexo B, se pueden ver, además, las diferentes pruebas de impresión.

- Modificación de la junta de sujeción del motor (figuras 3.24 y 3.25).

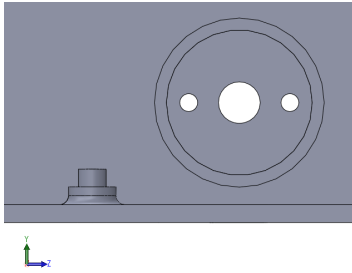


Figura 3.24: Junta de sujeción del motor sin modificar.

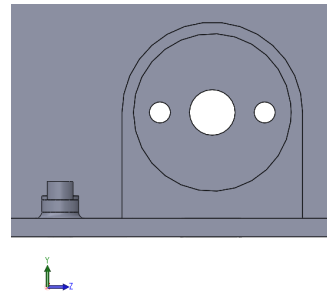


Figura 3.25: Junta de sujeción del motor modificada.

- Modificación del surco que rodea a la entrada de la conexión USB (figuras 3.26 y 3.27).

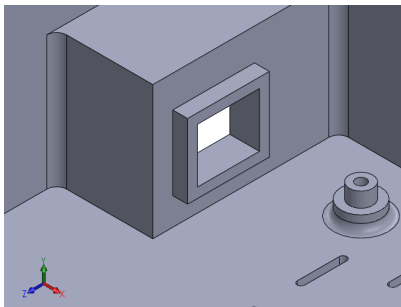


Figura 3.26: Sujeción USB sin modificar.

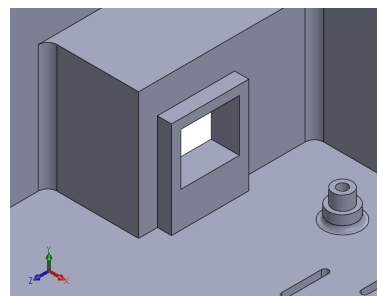


Figura 3.27: Sujeción USB modificada.

- Modificación de los soportes para la sujeción de los cables (figuras 3.28 y 3.29).

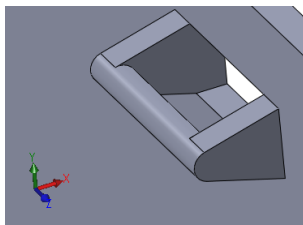


Figura 3.28: Sujeción cables sin modificar.

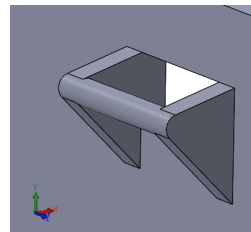


Figura 3.29: Sujeción cables modificada.

- Modificación del soporte para el cierre con la cubierta (figuras 3.30 y 3.31).

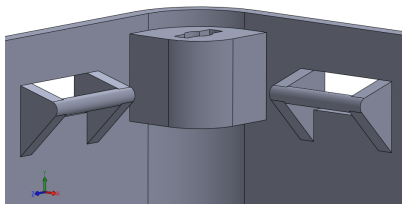


Figura 3.30: Soporte cierre sin modificar.

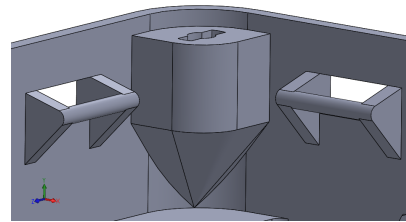


Figura 3.31: Soporte cierre modificado.

- Modificación de los surcos de la cara inferior del cuerpo principal de la carcasa y creación de una pieza nueva para realizar el acoplamiento con el soporte del laboratorio. Se pasa de imprimir la pieza en la posición de la figura 3.32 a la posición de la figura 3.33.

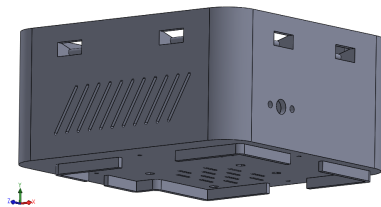


Figura 3.32: Posición inicial de impresión del cuerpo principal.

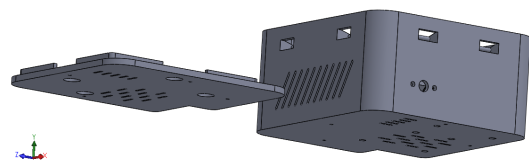


Figura 3.33: Posición final de impresión del cuerpo principal y del acoplamiento.

- Modificación del tipo de cierre entre el cuerpo principal y la cubierta, pasando a imprimirse esta última de la posición en la figura 3.34 a la posición de la figura 3.35.

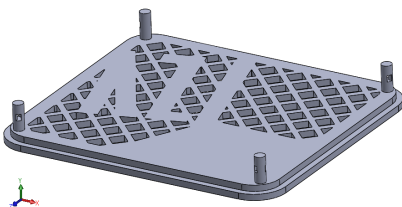


Figura 3.34: Posición inicial de impresión de la cubierta.

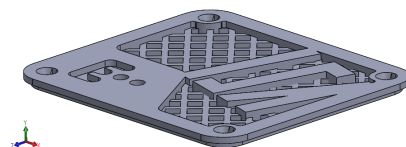


Figura 3.35: Posición final de impresión de la cubierta.

## 3.7. Archivo .STL y el *Slicer*

Al principio del apartado 3.1, se comentó que para poder imprimir una pieza en 3D hacía falta partir de un archivo con el modelo geométrico de la misma. La extensión de este archivo es **.STL** (*Standard Triangle Language*), un formato de archivo estándar utilizado en la industria para realizar trabajos de impresión en 3D. La forma en que almacena la geometría del sólido se basa en triángulos, y todos los softwares de modelado 3D permiten exportar el modelo a un archivo con esta extensión.

Una vez se tiene el archivo STL, hace falta introducirlo en un *licer*, programa que se encarga de seccionar el modelo en capas muy finas para así poder generar una serie de instrucciones en lenguaje máquina.

De este paso se suelen hacer cargo las empresas cuando se les hace el encargo de una impresión en 3D. Lo único que les hace falta es el archivo .STL. Para este trabajo se ha optado por contactar con una Asociación ubicada en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga [29]. Una vez recibidos los archivos con la información de los modelos, se encargaron de procesarlos en el *licer* y de proceder a imprimir las piezas en sus impresoras 3D.

Las imágenes de las distintas piezas procesadas en el *licer*, y en la posición en que se imprimirán, se pueden ver en las figuras 3.36 a 3.38.

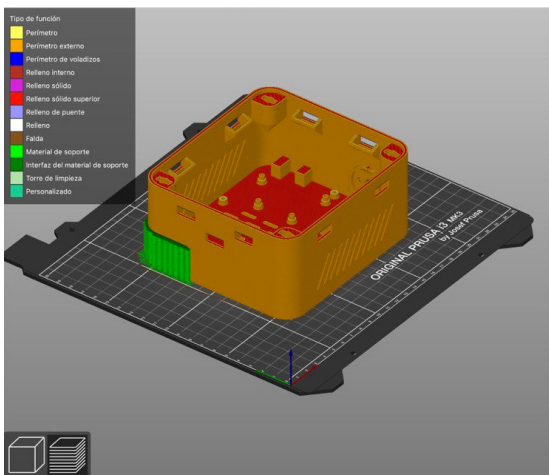


Figura 3.36: Cuerpo principal en el *licer*.

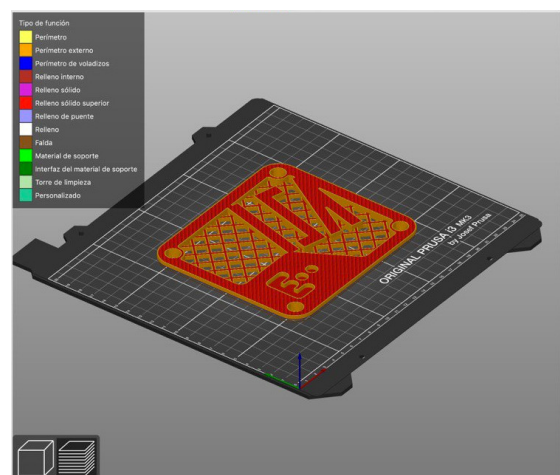


Figura 3.37: Cubierta en el *licer*.

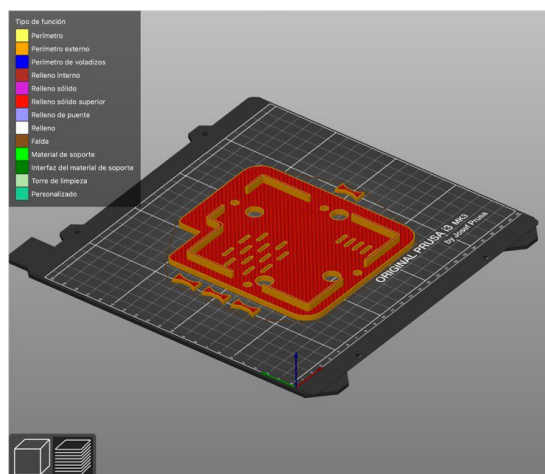


Figura 3.38: Acoplamiento y llaves en el *licer*.

### 3.8. Modelo final impreso

A continuación, se muestran una serie de imágenes del modelo terminado, junto con las piezas ensambladas:

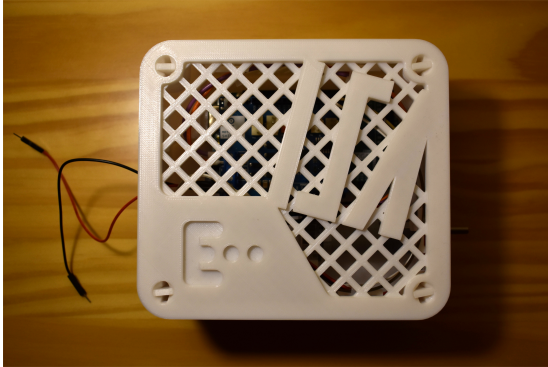


Figura 3.39: Vista superior del modelo terminado.

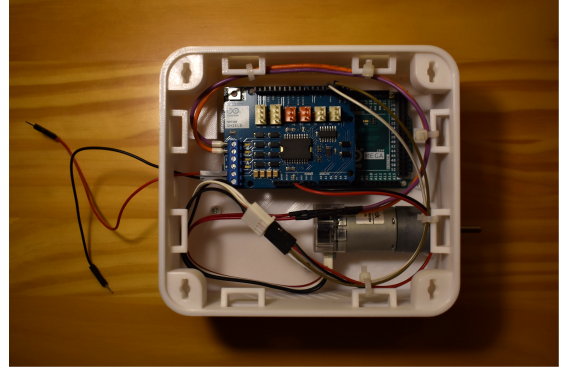


Figura 3.40: Vista superior sin cubierta.

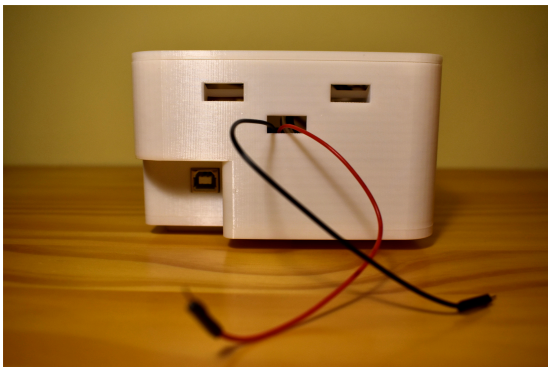


Figura 3.41: Conexiones del modelo.

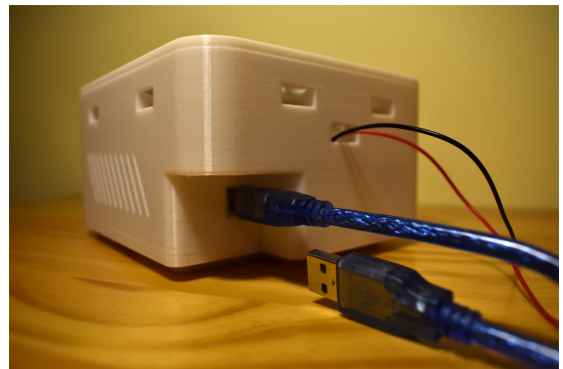


Figura 3.42: Conexión USB con conector.



Figura 3.43: Vista del motor y de la ventilación lateral.



Figura 3.44: Vista inferior.



# Capítulo 4

## Caracterización del motor de c.c. de imanes permanentes

### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se procede a realizar la caracterización del motor de corriente continua de imanes permanentes. Se usará el mismo equipo que el alumnado tendrá disponible en el transcurso de las prácticas de laboratorio:

- Motor de corriente continua, marca Makeblock.
- Placa Arduino MEGA 2560.
- Arduino Motor Shield.
- Carcasa protectora conteniendo los elementos anteriores.
- Cable de conexión USB tipo B (macho) - USB tipo A (macho).
- Ordenador con el software MATLAB instalado.

Para una mejor comprensión del proceso, se hará una introducción teórica al modelado matemático de motores de corriente continua, se explicarán las modificaciones que se le han realizado al equipo y se caracterizará el motor con el Método de Estimación de Parámetros. A continuación, se realizará una comparación del modelo obtenido con los modelos planteados en [25] y se realizarán una serie de pruebas de control de velocidad para comprobar el funcionamiento del sistema. En [25] se puede ver una introducción al Arduino MEGA 2560, al Arduino Motor Shield, al motor Makeblock y a los complementos de MATLAB utilizados.

### 4.2. Fundamentos teóricos

Lo primero que se debe definir es la nomenclatura que se va a utilizar. En el Anexo F, tabla F.1, se muestra dicha nomenclatura, así como la usada en la bibliografía consultada, de manera que sea más fácil realizar una comparación entre las mismas.

A continuación, en el apartado 4.2.1, se van a hacer unas aclaraciones con respecto a la constante de par y la constante de fuerza contraelectromotriz (usadas en el presente Trabajo y en [25]), así como respecto a la nomenclatura utilizada para designarlas. Igualmente, en el apartado 4.2.2 se va explicar el comportamiento dinámico de este tipo de motores, las constantes de tiempo que lo gobierna y las simplificaciones que se pueden realizar al respecto.

#### 4.2.1. Constante de par ( $k_i$ ) y constante de fuerza contraelectromotriz ( $k_b$ )

La fuerza contraelectromotriz en un motor de c.c. es proporcional a la velocidad de rotación del rotor ( $n$ ), al flujo magnético en el entrehierro ( $\phi$ ). Igualmente varía en función de una serie de parámetros constructivos tales como el número de conductores, el radio del rotor, la parte activa de los conductores que realmente están bajo la acción del flujo magnético, etc. Estos factores se pueden agrupar en una misma constante.

En los motores de imanes permanentes se puede considerar que el flujo magnético es constante, pudiéndose incluir éste en la misma constante que agrupa los parámetros constructivos de la máquina. A esta constante se le llama **constante de la fuerza contraelectromotriz** ( $k_b$ ). Por lo tanto, la fuerza contraelectromotriz se puede expresar como en la ecuación 4.1:

$$e_b(t) = k_b \omega_m(t) \quad (4.1)$$

Por otro lado, se supone que el par producido por el motor es proporcional a  $\phi$  y a la corriente de la armadura ( $i_a(t)$ ). La constante que recoge esto se denomina **constante de par** ( $k_i$ ). De nuevo, se considera el flujo magnético constante, por lo que el par producido por el motor se puede expresar como en la ecuación 4.2:

$$T_m(t) = k_i i_a(t) \quad (4.2)$$

Si  $k_i$  se expresa en  $[\frac{N \cdot m}{A}]$  y  $k_b$  en  $[\frac{V}{rad/s}]$  (unidades del S.I.), ambas constantes son iguales [17]<sup>1</sup>. Esto se puede ver en la expresión 4.3<sup>2</sup>:

$$\frac{[N][m]}{[A]} = \frac{[J]}{[A]} = \frac{[W][s]}{[A]} = \frac{[V][A][s]}{[A]} = [V][s] \quad (4.3)$$

Por lo tanto, se llega a la conclusión de que:

$$k_i = k_b = k \quad (4.4)$$

---

<sup>1</sup>Pág. 83.

<sup>2</sup>En la expresión final no aparecen los radianes ya que se trata de una unidad adimensional.

### 4.2.2. Comportamiento dinámico y las constantes de tiempo

Durante el funcionamiento de un motor de c.c. se puede producir un cambio brusco en dos de las magnitudes de entrada del mismo: un cambio repentino en la tensión de entrada y en el par de carga.

Estas variaciones provocarán un cambio en el régimen de funcionamiento del motor, haciendo que éste entre en una zona de comportamiento dinámico, es decir, en régimen no estable (ver figura 4.1) antes de estabilizarse de nuevo. Este comportamiento dinámico se puede definir con *dos constantes de tiempo*.

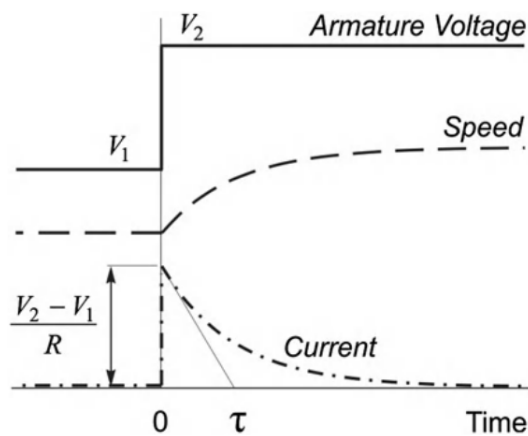


Figura 4.1: Respuesta de un motor de c.c. ante un cambio en la tensión de entrada [17].

La primera de ellas se trata de la constante de tiempo **electromecánica** ( $\tau$ ). Esta constante define cómo se va a estabilizar la velocidad ante un cambio en la tensión de entrada o del par de carga (ver ecuación 4.5).

$$\tau = \frac{R_a J_m}{k^2} \quad (4.5)$$

La segunda, es la constante de tiempo **eléctrica** ( $\tau_a$ ), que suele ser *mucho más pequeña* y define cómo cambia la intensidad en el motor ante un cambio en la tensión de entrada (ver ecuación 4.6).

$$\tau_a = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.6)$$

Esta diferencia entre la magnitud de una constante de tiempo y la otra permite que se pueda aproximar el comportamiento del motor separando el comportamiento dinámico eléctrico (muy rápido) del comportamiento mecánico (más lento en comparación), siendo este último el de mayor interés para este estudio. Además, resulta que si se *ignora* la *inductancia* del motor ( $L_a = 0 \rightarrow \tau_a = 0$ ) el comportamiento dinámico del motor se puede matematizar como un sistema de *primer orden*. Esta aproximación será válida para pequeños motores [17]<sup>3</sup>.

### 4.2.3. Modelado matemático

En la figura 4.2 se muestra el esquema del motor de c.c. que se va a utilizar.

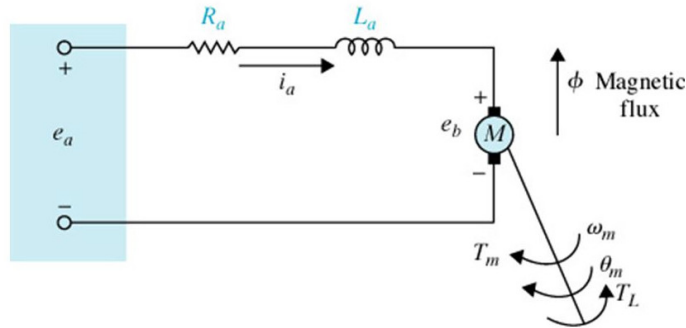


Figura 4.2: Modelo motor de c.c. [18].

Se comienza planteando la ecuación del circuito eléctrico (ecuación 4.7):

$$e_a(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_b(t) \quad (4.7)$$

a la que le sigue la ecuación de la fuerza electromotriz (ecuación 4.8):

$$e_b(t) = k_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} = k_b \omega_m(t) \quad (4.8)$$

Por último se plantea la ecuación del equilibrio de pares (ecuación 4.9):

$$J_m \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} = T_m(t) - T_L(t) \quad (4.9)$$

Sobre la ecuación 4.7 se puede comentar que el primer término de la segunda parte de la igualdad ( $L_a \frac{di_a(t)}{dt}$ ) representa la caída de tensión debida a la inductancia del motor. Esta

<sup>3</sup>Págs. 96-98.

caída de tensión es proporcional al gradiente del cambio de la corriente que circula por el motor, de manera que en estado estacionario ( $i_a(t) = cte$ ) este término se hace cero y, por lo tanto, se puede despreciar [17]<sup>4</sup>.

Aplicando la transformada de Laplace<sup>5</sup> y sustituyendo y simplificando de la ecuación 4.7 a la 4.9, junto con la ecuación 4.2, se obtiene la función de transferencia que relaciona el **desplazamiento** del motor y la tensión de entrada (ecuación 4.10). En el modelo desarrollado se supone que el rozamiento es despreciable ( $T_L(t) = 0$ ), de manera que se puede eliminar de la ecuación 4.9, quedando la ecuación 4.10:

$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_m L_a) s^2 + (k_b k_i + R_a B_m) s} \quad (4.10)$$

En la figura 4.3 se puede ver el diagrama de bloques de un motor de corriente continua, donde la salida del mismo es la posición del eje del motor.

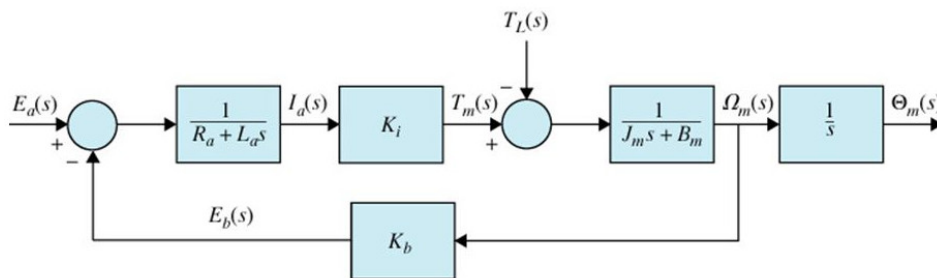


Figura 4.3: Diagrama de bloques con la posición como salida [18].

El diagrama de bloques de la figura 4.3 respresenta la función de transferencia de la ecuación 4.10, que se trata de una función de transferencia de **bucle abierto**. Esto puede sorprender ya que en el diagrama de bloques se puede ver una “realimentación”.

Esta “realimentación” es debida a la fuerza contraelectromotriz. Ésta es proporcional (en valor negativo) a la velocidad del motor, por lo tanto provoca que la propia salida del sistema (en este caso la velocidad) afecte a la entrada del mismo, haciendo que parezca que se trata de un sistema realimentado.

En la ecuación 4.10 se muestra la función de transferencia que relaciona la **posición** del motor con la tensión de entrada. Para ser coherente con [25], se trabajará con la función de transferencia entre la **velocidad** del motor y la tensión de entrada del mismo. Para ello, hace falta derivar la expresión 4.10.

<sup>4</sup>Pág. 84.

<sup>5</sup>Se escribirán en mayúsculas las variables a las que se les haya aplicado la transformada de Laplace.

En el *Dominio s*, para derivar una expresión hace falta aplicar la *Propiedad de Derivación* (ecuación 4.11)<sup>6</sup>:

$$\mathcal{L}\{f'(t)\} = s\mathcal{L}\{f(t)\} - f(0) \quad (4.11)$$

Aplicando la expresión 4.11 a la función de transferencia de la ecuación 4.10, queda la función de transferencia entre la **velocidad** del motor y la tensión de entrada (ecuación 4.12):

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{L_a J_m s^2 + (R_a J_m + B_m L_a) s + (k_b k_i + R_a B_m)} \quad (4.12)$$

Factorizando el denominador de la ecuación 4.12, se obtiene la expresión 4.13, cuyo diagrama de bloques se puede ver en la figura 4.4.

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k_i}{(R_a + L_a s)(J_m s + B_m) + k_b k_i} \quad (4.13)$$

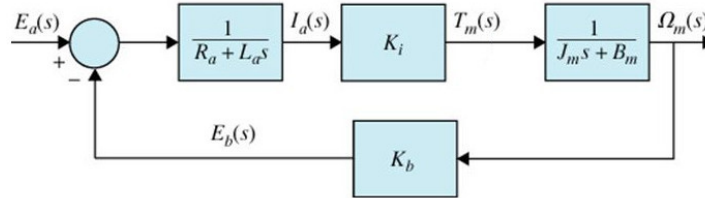


Figura 4.4: Diagrama de bloques con la velocidad como salida [18] (figura adaptada).

Aplicando la aproximación vista en el apartado 4.2.2 ( $L_a = 0$ ), la aproximación planteada en [30]<sup>7</sup> (aplicada a su vez en [25]) ( $B_m = 0$ ) y la ecuación 4.4 la función de transferencia de la ecuación 4.13 queda como en la ecuación 4.14:

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k}{R_a J_m s + k^2} \quad (4.14)$$

La ecuación 4.14, que será la que se utilizará en la caracterización del motor, se puede ver que representa a un sistema de primer orden que depende exclusivamente de la constante de par (o de fuerza c.e.m en el S.I.)  $\mathbf{k}$ , la resistencia de la armadura  $\mathbf{R}_a$  y la inercia del motor  $\mathbf{J}_m$ .

<sup>6</sup>En este caso se considerará como posición inicial el origen del sistema de coordenadas:  $f(0) = 0$ .

<sup>7</sup>Pág. 20.

Estos tres son los parámetros que permiten obtener un modelo matemático que describa el comportamiento del motor (sustituyendo dichos valores en la ecuación 4.14).

### 4.3. Elección del tiempo de muestreo

La elección de un tiempo de muestreo correcto es importante para poder recoger correctamente la información del sistema. Este parámetro se puede modificar desde la pestaña **Initialization**, en las propiedades del bloque **S-Function** (bloque del *encoder*, ver figura 4.5).

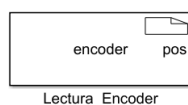


Figura 4.5: Bloque *S-Function*.

En un primer momento cabría pensar que cuanto más pequeño sea el valor del tiempo de muestreo mejor. Esto tiene el inconveniente de que se introduce *ruido a frecuencias altas* en las mediciones.

Sabiendo esto, se han realizado una serie de ensayos, con una tensión de entrada constante de valor **7,63 V**. El procedimiento seguido para recopilar los datos de los ensayos consiste en, una vez creado el diagrama en SIMULINK (figura 4.6), y seguidas las pautas establecidas en los apartados C.1 y C.3 del Anexo C, registrar los datos de velocidad de salida del motor para diferentes tiempos de discretización.

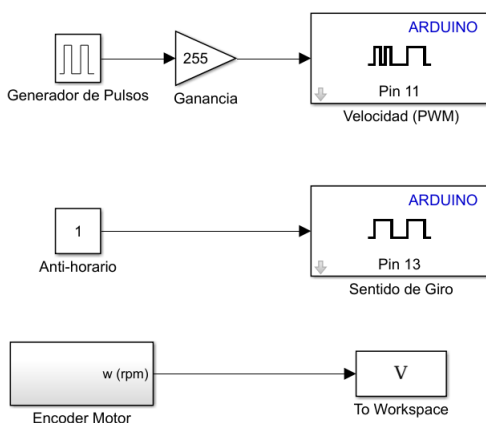


Figura 4.6: Diagrama en SIMULINK.

A continuación, se calcula la FFT de las señales de salida, pudiéndose ver así las frecuencias presentes en éstas. En la tabla 4.1 se muestra un resumen de los datos registrados para los ensayos en que se midieron las velocidades durante dos segundos (tiempo en que se mantenía la señal de entrada de tipo escalón en su valor máximo antes de bajar):

Tabla 4.1: Datos recogidos en los ensayos experimentales de un pulso.

<i>LECTURAS DE DATOS</i>			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>Tiempo de muestreo [s]</i>			
0,5	84,60	44,42	0,40
0,1	99,16	14,48	0,48
0,05	102,52	10,20	0,49
0,01	104,44	5,86	0,50
0,005	107,67	7,79	79,80
0,001	90,25	23,45	500

A: Valor medio [rpm] (0 Hz)

B: Valor máximo [rpm]

C: Frecuencia del valor máximo [Hz]

Analizando las figuras que se facilitan en el apartado C.4 del Anexo C se puede ver cómo los valores de las frecuencias más bajas (y también las propias frecuencias) se mantienen prácticamente constantes independientemente del tiempo de muestreo. En las figuras 4.7 y 4.8 se muestran los resultados con un tiempo de muestreo de 0,05 segundos.

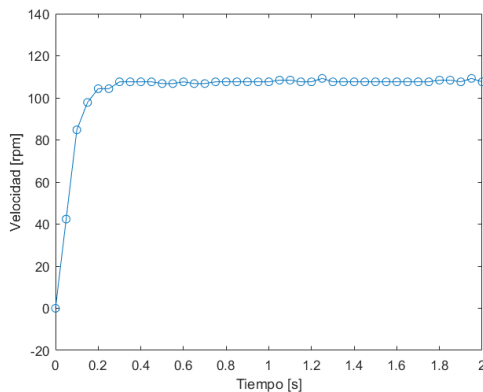


Figura 4.7: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,05s$ .

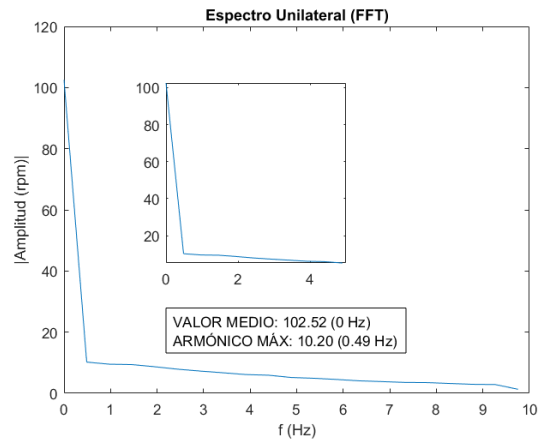


Figura 4.8: FFT.  $T_{muestreo} = 0,05s$ .

El primero de los valores de la gráfica de la FFT, con una frecuencia de 0 Hz, se corresponde con el **Valor medio** de la señal de salida. Se puede ver cómo este valor es de **102 rpm**, aproximadamente la misma velocidad en que se estabiliza la señal de la figura 4.7.

Si se consulta la tabla 4.1 se puede ver cómo para tiempos de muestreo menores, hasta 0,005 segundos, el valor medio se aproxima cada vez más al valor que alcanza el motor en el

ensayo.

El **ruido** a altas frecuencias que se comentó anteriormente se puede ver en las figuras C.17, C.19 y C.21 del Anexo C. Las frecuencias en las que se aprecia el ruido son cada vez más altas según se va disminuyendo el tiempo de muestreo (ver figura 4.10), lo que demuestra que no siempre un tiempo de muestreo pequeño es lo mejor. En la figura 4.9 se puede ver en el dominio del tiempo la respuesta medida del motor con un tiempo de muestreo de 0,001 segundos.

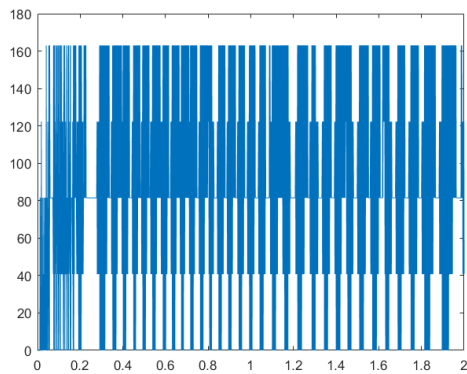


Figura 4.9: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,001s$ .

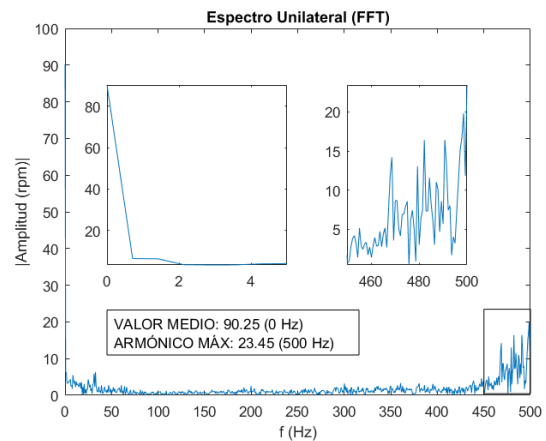


Figura 4.10: FFT.  $T_{muestreo} = 0,001s$ .

Observando los datos tomados y considerando el valor medio de la señal y el nivel de ruido introducido en las lecturas, se decide adoptar un tiempo de muestreo de **0,05 segundos** (figuras 4.7 y 4.8). Se puede ver en la figura C.16, que se corresponde con el siguiente tiempo de muestreo ensayado, que el valor medio de la señal no cambia significativamente (menos de un 2%) pero que se empieza a introducir ruido en las lecturas. Este ruido se puede empezar a ver a la izquierda de la figura C.17.

En el apartado C.4.2 del Anexo C se facilitan también los resultados de los ensayos realizados con varios pulsos.

## 4.4. Caracterización mediante el Método de Estimación de Parámetros

El objetivo del método de estimación de parámetros es encontrar los valores de una serie de parámetros, previamente definidos, de manera que la respuesta de un sistema modelado con dichos parámetros se aproxime lo mejor posible a los datos experimentales obtenidos para ese mismo sistema. Este método plantea la estimación de los parámetros como un problema de optimización donde las soluciones son la estimación de los propios parámetros.

Para poder aplicar el método hace falta disponer de los resultados obtenidos en una serie de ensayos experimentales. En el presente trabajo, para llevar a cabo la caracterización del motor, se realizaron cuatro ensayos en los que se registró la velocidad de rotación del motor ante una tensión de entrada con diferentes valores. Los voltajes utilizados fueron **5,36 V**, **6,30 V**, **7,64 V** y **9,28 V** con un tiempo de muestreo de **0,05 segundos**. Las lecturas de los ensayos se pueden ver graficadas en la figura 4.11.

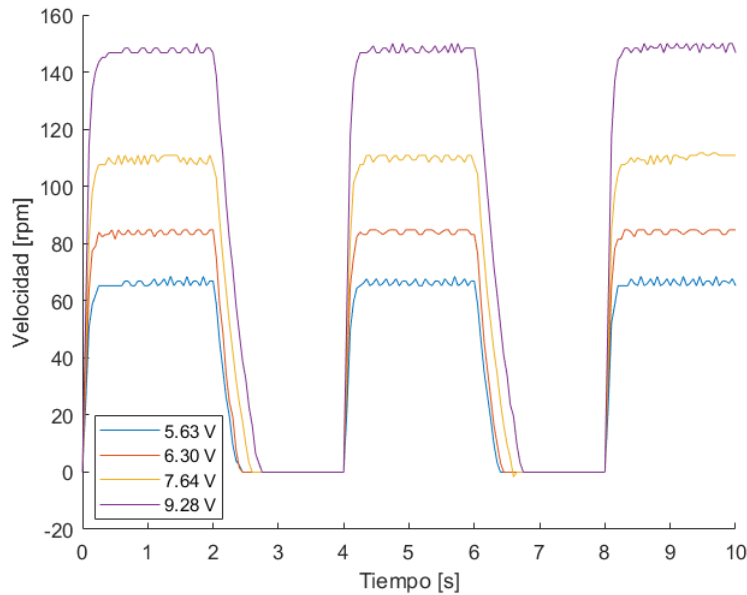


Figura 4.11: Lecturas de los ensayos experimentales.

Obtenidos los resultados de los ensayos experimentales se procede a definir en SIMULINK el diagrama de bloques del sistema (figura 4.12).

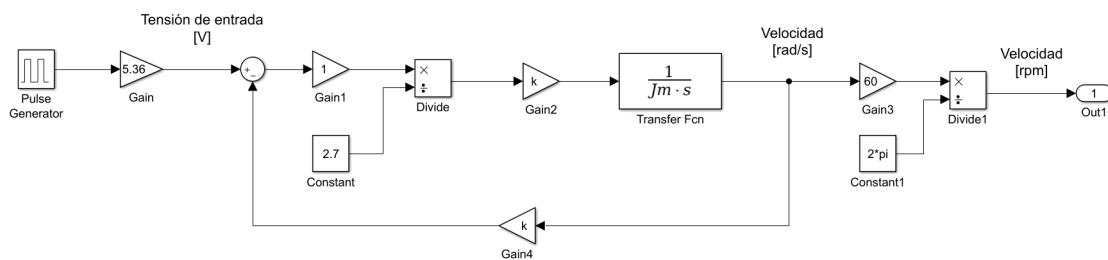


Figura 4.12: Diagrama de bloques del sistema.

Se puede apreciar cómo se ha adaptado el diagrama de bloques deducido teóricamente (ver figura 4.4) para que se incluyan las simplificaciones de  $L_a = 0$ ,  $B_m = 0$  y  $k_i = k_b = k$ . Del mismo modo, se ha tenido la precaución de añadir en la salida del diagrama unos bloques que realizan la **conversión** de  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$  a **rpm** ya que la estimación de los parámetros se realiza utilizando los datos medidos en los ensayos experimentales y éstos están en rpm.

A continuación, se realiza la estimación de los parámetros con la herramienta *Parameter Estimation* de SIMULINK (figura 4.13).

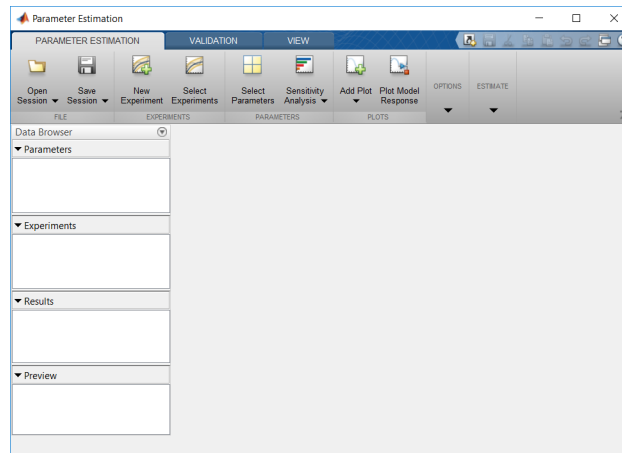


Figura 4.13: Herramienta para la estimación de parámetros.

El procedimiento seguido tanto para definir el diagrama de bloques como para realizar la estimación de los parámetros se puede ver en el apartado C.5 del Anexo C. En las figuras 4.14 y 4.15 se muestra el proceso de cálculo, ya convergido, y los resultados de la estimación para el ensayo con una tensión de entrada de 5,36 V.

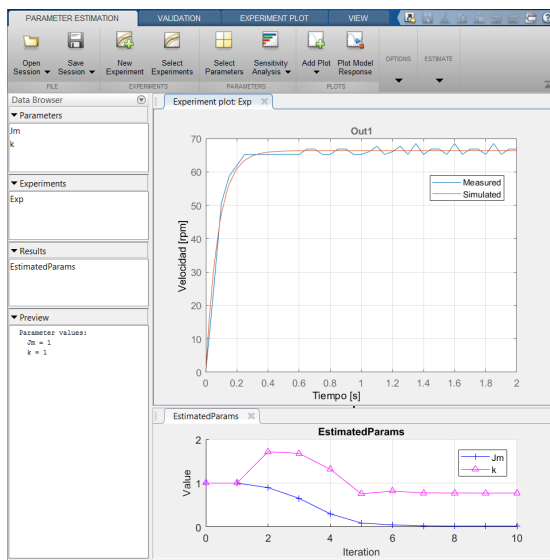


Figura 4.14: Estimación convergida.

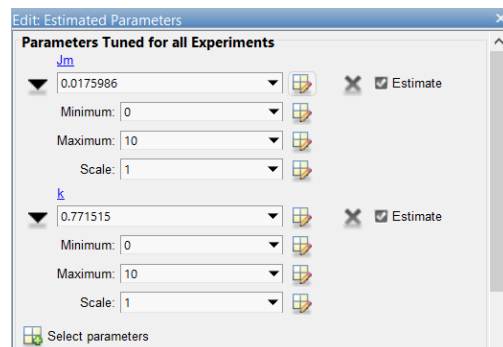


Figura 4.15: Parámetros estimados.

Los resultados de la estimación de los parámetros para los cuatro ensayos experimentales se pueden ver de manera resumida en la tabla 4.2:

Tabla 4.2: Valores de las variables estimadas.

Ensayo	$J_m$ [ $kg \cdot m^2$ ]	$k$ [ $\frac{V}{rad/s}$ ]
5,36 V	0,0175986	0,771515
6,30 V	0,0147357	0,715695
7,64 V	0,0132701	0,665354
9,28 V	0,0104070	0,599977
<b>Media (<math>\mu</math>)</b>	<b>0,0140029 <math>kg \cdot m^2</math></b>	<b>0,688135 <math>\frac{V}{rad/s}</math></b>
<b>Desviación típica (<math>\sigma</math>)</b>	<b>0,0029963 <math>kg \cdot m^2</math></b>	<b>0,073036 <math>\frac{V}{rad/s}</math></b>

$R_a = 2,7 \Omega$

De entre las variables estimadas cabe destacar el valor de la **inercia del motor** ( $J_m$ ). Según la ecuación 4.15, que expresa el valor del momento de inercia de un *cilindro sólido* con radio  $r$  y masa  $m$  respecto a su eje axial (figura 4.16), la masa que debería tener el rotor del motor para tener la inercia calculada, con un radio de aproximadamente 1,2 cm, debería ser de:

$$I_z = \frac{1}{2} \cdot mr^2 \implies m = 2 \cdot \frac{I_z}{r^2} = 2 \cdot \frac{0,0140029 [kg \cdot m^2]}{\left(\frac{1,2}{100} [m]\right)^2} \approx \mathbf{194,48 [kg]} \quad (4.15)$$

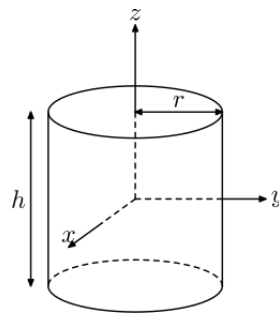


Figura 4.16: Cilindro macizo [19].

Esta masa es casi 2.000 veces superior a la masa real del rotor. La masa del motor completo es de, aproximadamente, 0.1 kg. En esta masa se incluye el motor, el sensor y el **tren de engranajes**, que es el que realmente provoca que la inercia del conjunto sea aparentemente tan elevada.

En la figura 4.17 se puede ver el tren de engranajes del motor que, tal y como se especifica en las características del mismo, tiene una relación de transmisión de **1/46**, comportándose por lo tanto como una **reductora**.

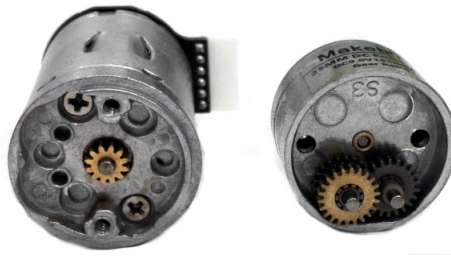


Figura 4.17: Caja reductora del motor [20].

En [23] se hace distinción entre el **eje del motor** (antes del tren de engranajes) y el **eje de salida** (después del tren de engranajes). Del mismo modo se define la variable  $\mathbf{n}$  como el número de veces que gira el eje de salida en cada revolución del eje del motor. La relación de transmisión anteriormente presentada se define como la relación entre la velocidad de salida y la velocidad de entrada al tren de engranajes. Por lo tanto, la variable  $n$  tendrá un valor de  $\mathbf{n} = \frac{1}{46}$ .

Al estar acoplado el tren de engranajes directamente al motor, la inercia que se está estimando es la del conjunto motor-tren de engranajes, es decir, la inercia referida al *eje de salida*.

Para referir la inercia al *eje del motor* (antes del tren de engranajes) se aplica la ecuación 4.16 [23]<sup>8</sup>:

$$J_{eje\ salida} = \frac{J_{eje\ motor}}{n^2} \implies J_{eje\ motor} = n^2 \cdot J_{eje\ salida} = \left(\frac{1}{46}\right)^2 \cdot 0,0140029 [kg \cdot m^2] \quad (4.16)$$

Si al resultado obtenido en la ecuación 4.16 se le aplica la ecuación 4.15 para calcular la masa teórica que debería tener el rotor, se obtiene:

$$m = 2 \cdot \frac{I_z}{r^2} = 2 \cdot \frac{\left(\frac{0,0140029}{46^2}\right) [kg \cdot m^2]}{\left(\frac{1,2}{100} [m]\right)^2} \approx 0,0919 [kg] \approx \mathbf{92 [g]} \quad (4.17)$$

La masa calculada en la ecuación 4.17 es la que debería tener el rotor si tuviera forma de *cilindro macizo*. Una mejor aproximación sería considerar el rotor del motor como un *cilindro hueco* con la masa distribuida entre un radio interior  $r_1$  y un radio exterior  $r_2$  (figura 4.18). La expresión de la inercia para este caso se puede ver en la ecuación 4.18:

$$I_z = \frac{1}{2} \cdot m(r_2^2 + r_1^2) \implies m = 2 \cdot \frac{I_z}{(r_2^2 + r_1^2)} \quad (4.18)$$

---

<sup>8</sup>Pág. 97.

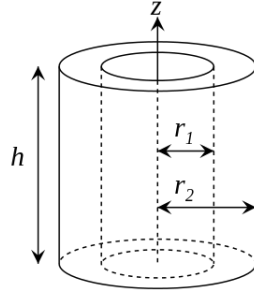


Figura 4.18: Cilindro hueco [21].

En la expresión 4.18 se puede apreciar que la masa resultante sería algo menor que la calculada en el caso de un cilindro macizo, siendo más realista el resultado ya que no toda la masa del motor (aproximadamente 100 gramos) pertenece al rotor, aunque sí gran parte.

Una vez aceptado el valor estimado de la inercia del motor ( $J_m$ ), se procede a sustituir los valores medios estimados (tabla 4.2) en la expresión 4.14 para obtener la función de transferencia del sistema:

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{k}{R_a J_m s + k^2} = \frac{0,688135 \left[\frac{V}{rad/s}\right]}{2,7 [\Omega] \cdot 0,0140029 [kg \cdot m^2] \cdot s + \left(0,688135 \left[\frac{V}{rad/s}\right]\right)^2} \quad (4.19)$$

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{0,688135}{0,0378078 \cdot s + 0,4735297} = \frac{18,2009}{s + 12,5246} \left[\frac{rad/s}{V}\right] \quad (4.20)$$

Las expresiones de la ecuación 4.20 también se pueden expresar en  $\frac{rpm}{V}$  multiplicándolas por  $\frac{60}{2\pi}$ :

$$\frac{\Omega_m^{rpm}(s)}{E_a(s)} = \frac{6,571205}{0,0378078 \cdot s + 0,4735297} = \frac{173,8054}{s + 12,5246} \left[\frac{rpm}{V}\right] \quad (4.21)$$

## 4.5. Comparación entre diferentes modelos y los datos experimentales

En los siguientes apartados se realiza una comparación entre el modelo estimado en el presente trabajo, dos modelos calculados en [25] y los datos experimentales medidos en los ensayos.

### 4.5.1. Comparación modelo estimado - datos experimentales

De la figura 4.19 a la figura 4.22 se muestran de manera conjunta sobre los mismos ejes la respuesta del modelo determinado en el presente trabajo y los datos experimentales recogidos en los ensayos. El modelo determinado mediante el método de estimación de parámetros usando la herramienta *Parameter Estimation* de MATLAB se puede ver en la expresión 4.22:

$$\frac{\Omega_m^{\text{rpm}}(s)}{E_a(s)} = \frac{173,8054}{s + 12,5246} \left[ \frac{\text{rpm}}{\text{V}} \right] \quad (4.22)$$

Se puede ver cómo para tres de los cuatro ensayos realizados el modelo representa fielmente el comportamiento del motor. En cambio, en el ensayo realizado con una tensión de entrada de 9,28 V el modelo no representa con tanta precisión el comportamiento del motor.

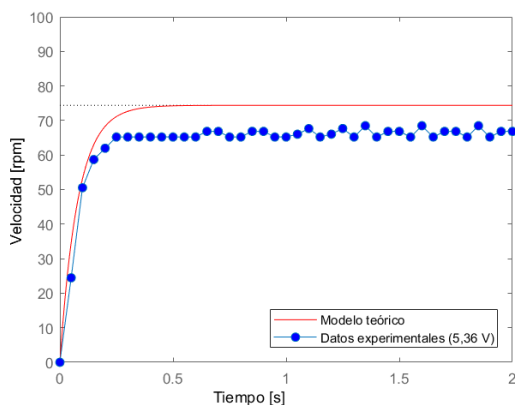


Figura 4.19: Modelo teórico - ensayo 5,36 V.

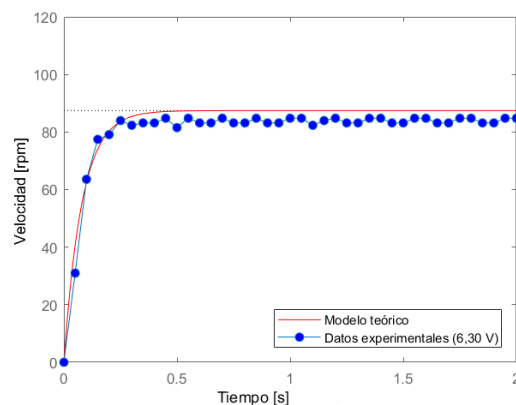


Figura 4.20: Modelo teórico - ensayo 6,30 V.

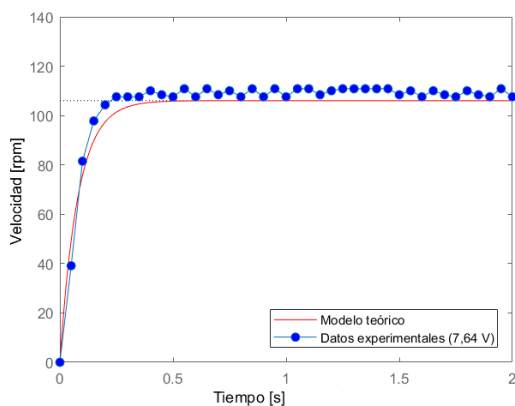


Figura 4.21: Modelo teórico - ensayo 7,64 V.

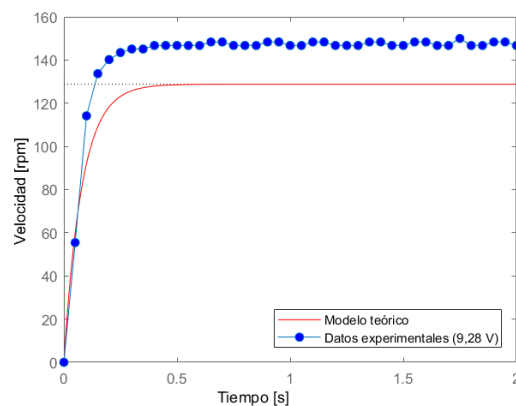


Figura 4.22: Modelo teórico - ensayo 9,28 V.

Para valorar numéricamente el grado de similitud entre el modelo y los ensayos, se calcula el **error medio** y el **error porcentual** entre el modelo y los datos experimentales.

El **error medio** se calcula para el intervalo entre 0 y 2 segundos restando el valor del modelo teórico y el valor de la medida del ensayo experimental<sup>9</sup>. Esto se hace para cada punto del que se tiene un dato experimental. A continuación se suman todas las diferencias y se divide entre el número de mediciones en ese intervalo.

Por otro lado, el **error porcentual** se calcula dividiendo el error medio entre el valor medio de las medidas entre 0,5 segundos y 2 segundos y multiplicando el resultado por 100 para expresarlo en forma de porcentaje<sup>10</sup>.

En la tabla 4.3 se muestran estos errores:

Tabla 4.3: Errores modelo estimado - datos experimentales.

Ensayo	Error medio  [rpm]	Error porcentual  [%]
5,36 V	7,65	11,55
6,30 V	3,14	3,76
7,64 V	3,33	3,04
9,28 V	18,03	12,22
	<b>Media</b>	<b>7,64</b>

#### 4.5.2. Comparación modelos previos [25] - datos experimentales

A continuación se hará una comparación entre los modelos determinados en [25] y los datos experimentales.

El primer modelo, que fue calculado utilizando el *System Identification Toolbox* de MATLAB, se puede ver en la expresión 4.23 [25]<sup>11</sup>:

$$\frac{\Omega_m^{\text{rpm}}(s)}{E_a(s)} = \frac{423}{s + 25,54} \left[ \frac{\text{rpm}}{\text{V}} \right] \quad (4.23)$$

El segundo modelo se determinó a partir de la constante de tiempo del sistema. Se puede

<sup>9</sup>Por lo tanto sólo se consideran los puntos del modelo que coinciden en el tiempo con las medidas experimentales.

<sup>10</sup>Se elije este intervalo porque se considera que es cuando está la señal ya estabilizada.

<sup>11</sup>Pág. 91.

ver en la expresión 4.24 [25]<sup>12</sup>:

$$\frac{\Omega_m^{\text{rpm}}(s)}{E_a(s)} = \frac{16,5}{0,068 \cdot s + 1} \left[ \frac{\text{rpm}}{\text{V}} \right] \quad (4.24)$$

De la figura 4.23 a la figura 4.26 se muestran en los mismos ejes las respuestas de ambos sistemas y los datos experimentales.

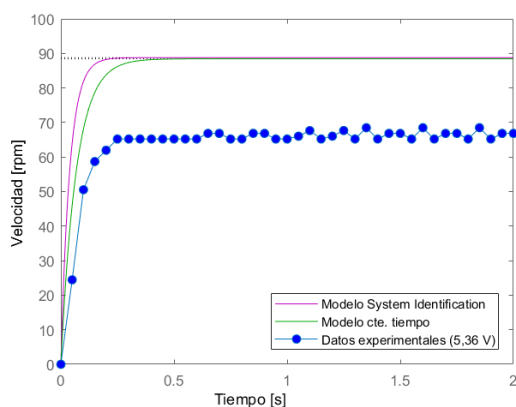


Figura 4.23: Modelo previo 1 - ensayo 5,36 V.

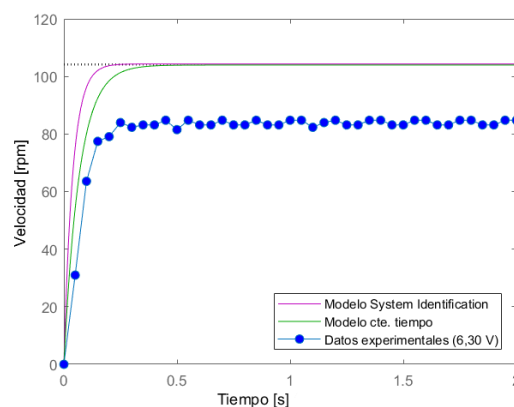


Figura 4.24: Modelo previo 1 - ensayo 6,30 V.

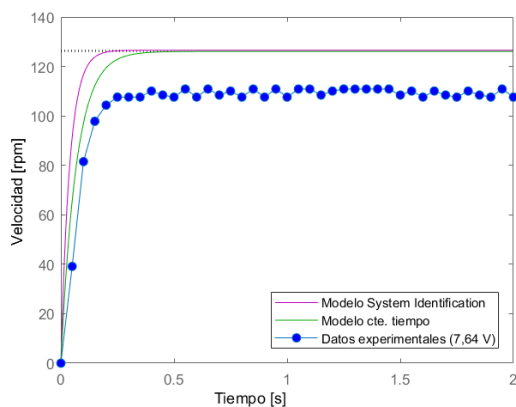


Figura 4.25: Modelo previo 1 - ensayo 7,64 V.

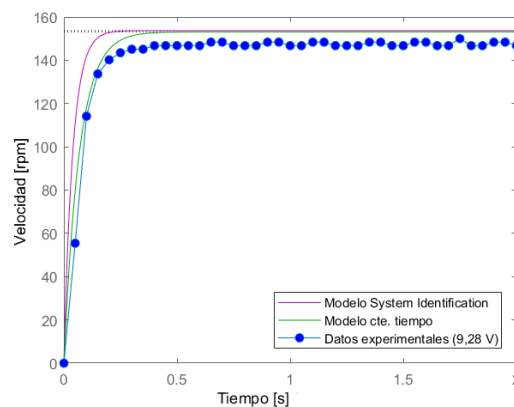


Figura 4.26: Modelo previo 1 - ensayo 9,28 V.

Al igual que en el apartado 4.5.1, se muestran dos tablas con los errores medios y porcentuales de ambos modelos (ver tablas 4.4 y 4.5):

<sup>12</sup>Pág. 106.

Tabla 4.4: Errores modelo *System Identification Toolbox* - datos experimentales.

Ensayo	Error medio  [rpm]	Error porcentual  [%]
5,36 V	22,94	34,62
6,30 V	21,12	25,19
7,64 V	18,46	16,88
9,28 V	8,44	5,72
<b>Media</b>		<b>20,60</b>

Tabla 4.5: Errores modelo constante de tiempo - datos experimentales.

Ensayo	Error medio  [rpm]	Error porcentual  [%]
5,36 V	21,47	32,39
6,30 V	19,39	23,13
7,64 V	16,36	14,96
9,28 V	5,89	3,99
<b>Media</b>		<b>18,62</b>

### 4.5.3. Resumen comparación entre modelos

A modo de resumen, y para poder establecer una comparación entre los tres modelos<sup>13</sup> de manera más cómoda, se muestran en las figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 las respuestas de los tres modelos junto con los datos experimentales. Del mismo modo, en la tabla 4.6 se muestran de manera conjunta los resultados de las tablas 4.4 y 4.5.

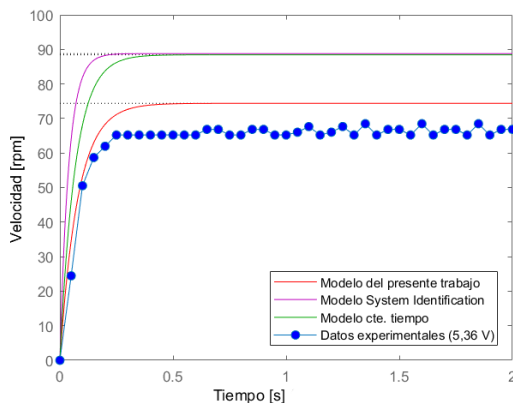


Figura 4.27: Modelos - ensayo 5,36 V.

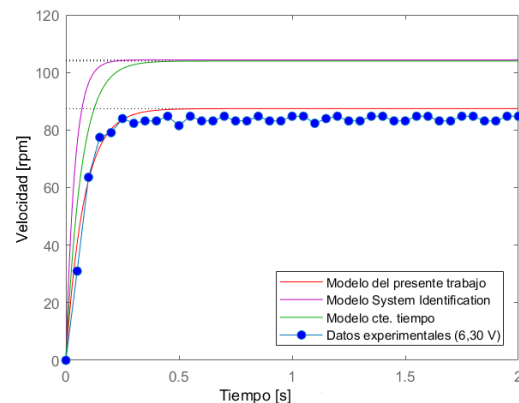


Figura 4.28: Modelos - ensayo 6,30 V.

<sup>13</sup>El determinado en el presente trabajo y los dos calculados en [25].

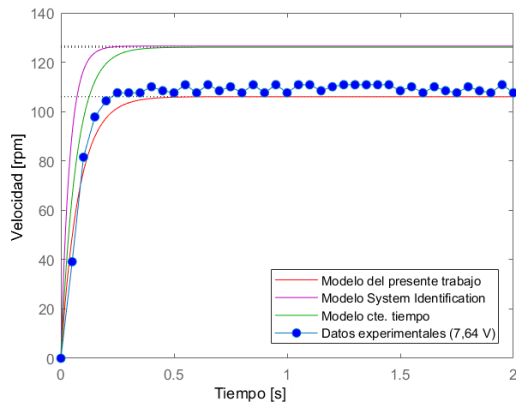


Figura 4.29: Modelos - ensayo 7,64 V.

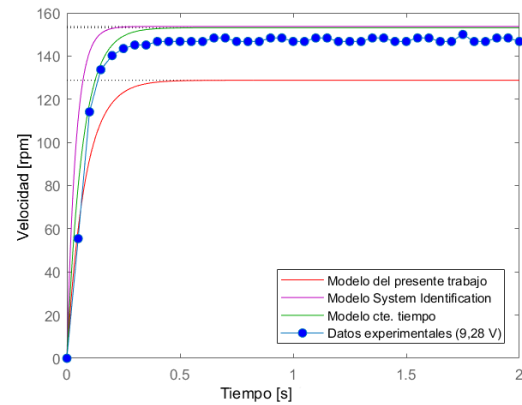


Figura 4.30: Modelos - ensayo 9,28 V.

Tabla 4.6: Tabla resumen de la comparación de los métodos.

<b>ENSAYOS</b>	<i>Modelo 1</i>	<i>Modelo 2</i>	<i>Modelo 3</i>
<b>5,36 V</b>			
Error medio   [rpm]	7,65	22,94	21,47
Error porcentual   [%]	11,55	34,62	32,39
<b>6,30 V</b>			
Error medio   [rpm]	3,14	21,12	19,39
Error porcentual   [%]	3,76	25,19	23,13
<b>7,64 V</b>			
Error medio   [rpm]	3,33	18,46	16,36
Error porcentual   [%]	3,04	16,88	14,96
<b>9,28 V</b>			
Error medio   [rpm]	18,03	8,44	5,89
Error porcentual   [%]	12,22	5,72	3,99

Modelo 1: Modelo estimado en el presente trabajo

Modelo 2: Modelo *System Identification Toolbox* [25]

Modelo 3: Modelo con la constante de tiempo [25]



# Capítulo 5

## Demostración del funcionamiento del equipo: control de velocidad

Una vez caracterizado el motor y comparados los diferentes modelos entre sí, se procede a poner a prueba, en un control de velocidad, la función de transferencia estimada en el apartado 4.4 del Capítulo 4.

### 5.1. Modificaciones del diagrama de bloques y ajuste del controlador PID

Para realizar el control de velocidad, se define un diagrama de bloques como el de la figura 5.1, basado en el diagrama de bloques propuesto en [25], al que se le han realizado una serie de **modificaciones**.

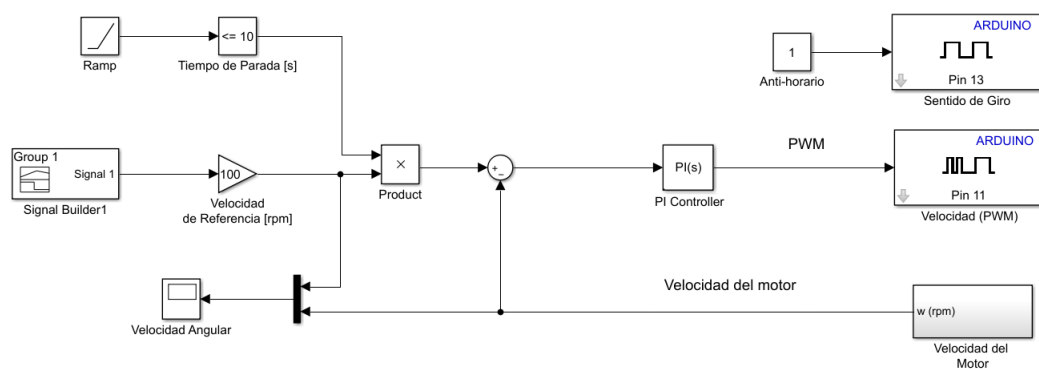


Figura 5.1: Diagrama de bloques para el control de velocidad.

El diagrama de bloques originalmente planteado para llevar a cabo el control de velocidad del motor se puede consultar en [25]<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Pág. 98.

Dicho diagrama se diseñó con el objetivo de poder realizar un control durante un periodo indefinido de tiempo, además de ir modificando la velocidad de referencia según se ejecutaba el programa. Por otro lado, la parada del motor se debía realizar mediante el accionamiento directo de un bloque de control insertado con tal fin (*Manual Switch*).

Para poder realizar comparaciones reales entre diferentes configuraciones del sistema de control, en el presente trabajo se ha optado por enfocar el diagrama de control de velocidad de manera diferente. En lugar de realizarse un control durante un periodo indefinido con una entrada variable en tiempo real por el alumno, se decide implementar una señal de entrada variable pero idéntica en todos los ensayos. Además, se establece a priori la duración del ensayo.

De esta manera, se podrán modificar los parámetros del elemento de control, un **controlador PID**, y se podrá realizar una comparación entre distintos ensayos de los efectos que producen dichas modificaciones.

A modo de resumen se listan las modificaciones (ver Anexo D, apartado D.1 para más detalles):

- Se sustituye la parada manual por una **parada temporizada** disponiendo los bloques de la manera en que se muestra en la figura 5.2).

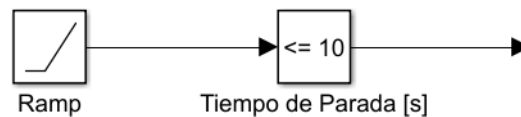


Figura 5.2: Señal rampa comparada.

El primer bloque (**Ramp**) genera una señal tipo rampa con una pendiente determinada. El segundo bloque (**Compare To Constant**) compara el valor de una señal de entrada con una constante, devolviendo 1 ó 0 en función del tipo de comparación que se haya definido en sus parámetros.

Es en este segundo bloque donde se introduce el valor del momento en que se quiere parar el ensayo de control de velocidad. Hay que tener la precaución de distinguir el valor que se introducirá en el bloque con el valor del *Stop time* de la simulación. El primero, indica el momento en el que se dejará de ejercer control sobre el motor, estableciendo una velocidad de referencia de 0 rpm, mientras que el segundo se corresponde con el tiempo que durará la simulación.

A modo de ejemplo, estableciendo un *Stop time* de 20 segundos e introduciendo en el bloque de *Compare To Constant* un valor de 10, el motor estará funcionando y siendo controlado hasta los 10 segundos de iniciarse el ensayo. En ese punto se comandará una señal de referencia de 0 rpm, por lo que se parará el motor (figura 5.3). El ensayo

seguirá ejecutándose hasta que se llegue a los 20 segundos establecidos en el *Stop time*.

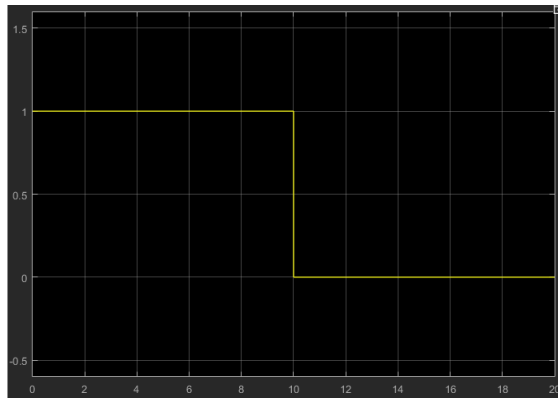


Figura 5.3: Resultado de la comparación de la señal tipo rampa con una constante.

- Se sustituye el *Slider* para establecer el valor de la velocidad de referencia por un bloque de **Definición de señales** (figura 5.4).

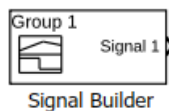


Figura 5.4: Bloque constructor de señales.

Tal y como se comenta en [25] (Pág. 95.), se recomienda trabajar con el motor en la zona comprendida entre **80 rpm** y **120 rpm**. Por lo tanto, en este bloque se define una señal que parta de 120 rpm, para a continuación disminuir hasta 80 rpm y, finalmente, llegar a 100 rpm.

Para que la visualización de la velocidad de referencia sea más cómoda en el diagrama de bloques, se decide definir la señales del presente bloque en **tanto por uno**. Esta señal se multiplicará después por 100 para pasarla a valores reales. Dicho esto, la señal definida por el bloque debería quedar como en la figura 5.5.

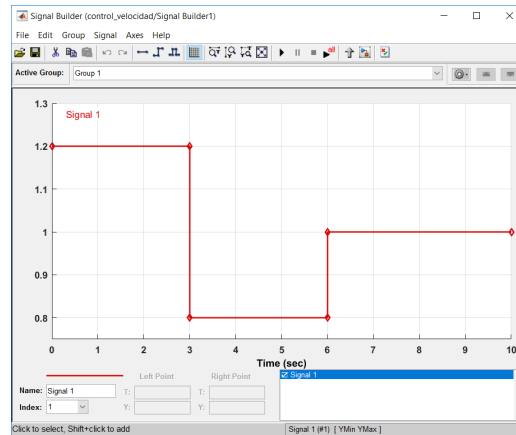


Figura 5.5: Definición de la señal de referencia variable.

En la figura 5.6 se muestra la salida del bloque de definición de señales, seguido de una ganancia de valor 100, durante un tiempo de simulación de 20 segundos.

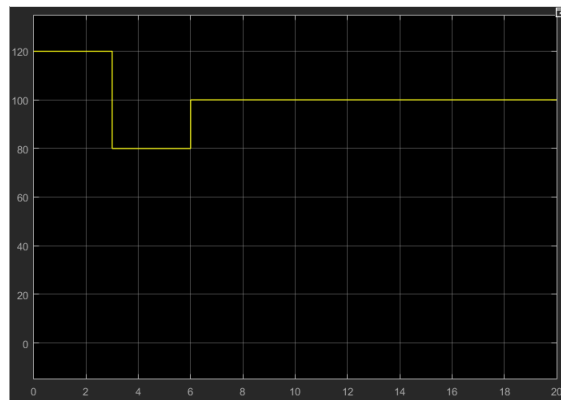


Figura 5.6: Salida escalada del bloque de definición de señales.

- Por último, los dos bloques anteriores se unen mediante un bloque de tipo **Product** (figura 5.7), que se encarga de multiplicar las dos entradas entre sí.

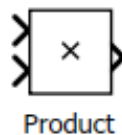


Figura 5.7: Bloque producto.

El conjunto del diagrama que une los bloques anteriores se puede ver en la figura 5.8.

Al relacionar los bloques de la manera que se muestra en la figura 5.8, se consigue una salida en la que, mientras el momento en el que se encuentre el ensayo sea menor

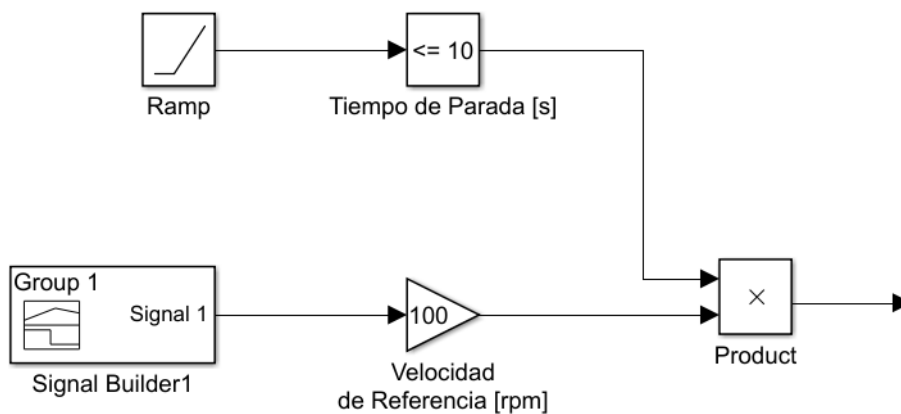


Figura 5.8: Bloques comentados anteriores unidos entre sí.

al tiempo de parada establecido en el bloque de *Compare To Constant*, la señal que le llega al controlador PID será la generada por el bloque *Signal Builder*. Una vez el ensayo llega al tiempo de parada definido, en este caso 10 segundos, al controlador PID le llegará una velocidad de referencia nula (gracias a multiplicar la señal por cero), por lo que el motor se parará (ver figura 5.9).

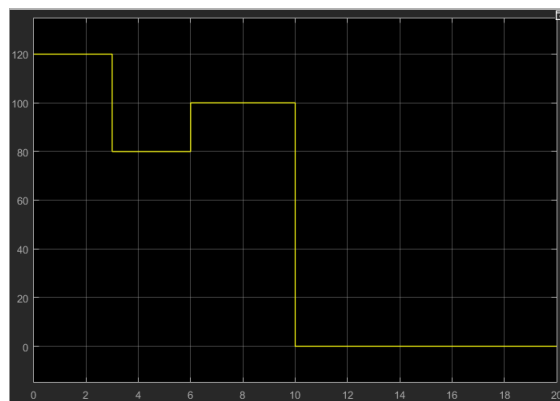


Figura 5.9: Señal de velocidad de referencia.

El **controlador PI** que aparece en el diagrama se ha estimado por **tanteo** siguiendo el procedimiento comentado en el apartado D.2 del Anexo D. La expresión de dicho controlador se puede ver la ecuación 5.1, donde **2,25** se corresponde con la **Ganancia Proporcional** y **12** con la **Ganancia Integral**:

$$PI(s) = 2,25 + 12 \cdot \frac{1}{s} \quad (5.1)$$

## 5.2. Respuesta del sistema al control de velocidad

En la figura 5.11 se puede ver la **respuesta teórica** del sistema de control de velocidad con el controlador de la ecuación 5.1 y el modelo del motor estimado en el presente trabajo<sup>2</sup>. El diagrama de bloques utilizado para representar el comportamiento teórico del sistema se muestra en la figura 5.10.

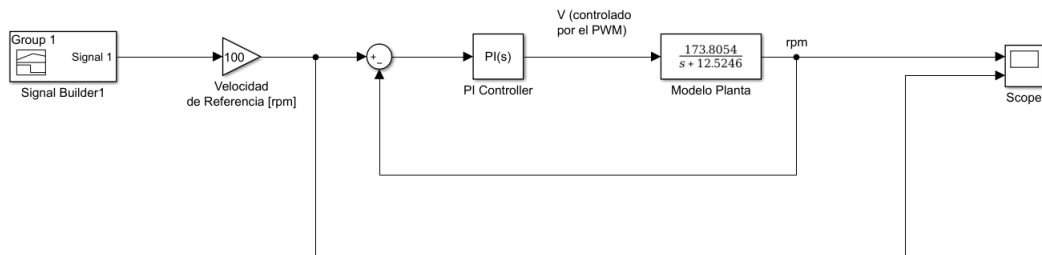


Figura 5.10: Diagrama de bloques con PID para respuesta teórica.

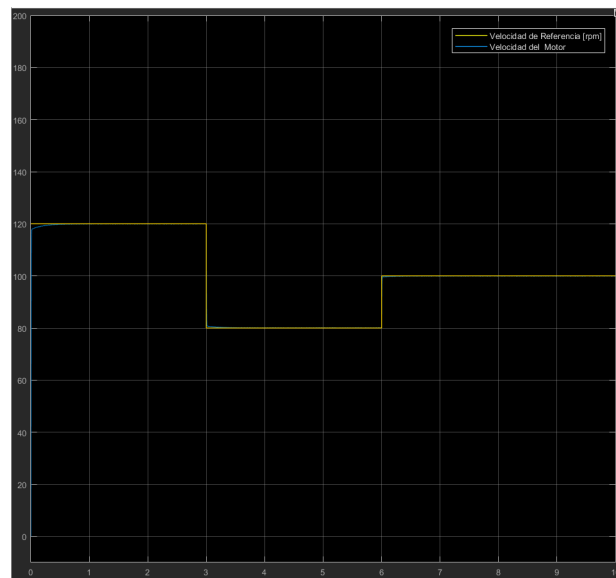


Figura 5.11: Respuesta simulada del sistema en el control de velocidad.

En la figura 5.12 se muestra la **respuesta real**, obtenida en un ensayo experimental, del comportamiento del sistema de control de velocidad con el controlador estimado anteriormente<sup>3</sup>.

<sup>2</sup>En la gráfica aparecen dos curvas, una azul y otra amarilla. El grado de coincidencia es tal que aparentan ser la misma.

<sup>3</sup>Motor alimentado a su tensión nominal (9 V).

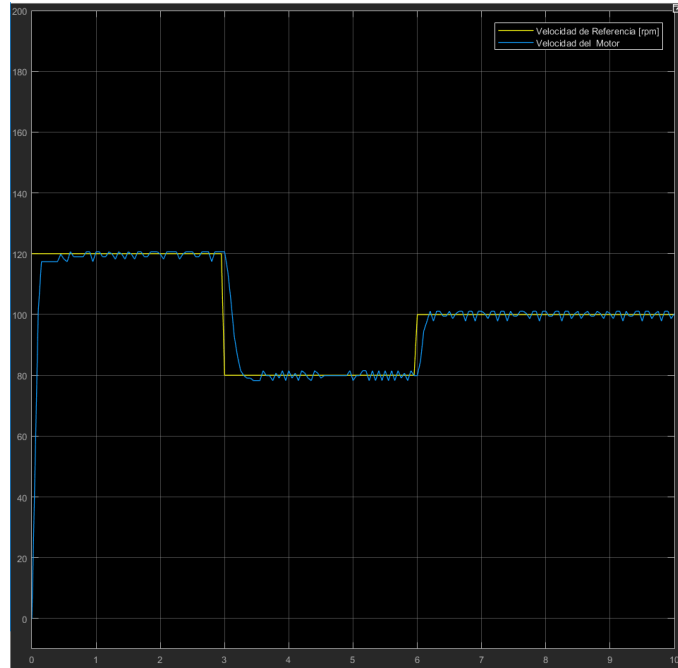


Figura 5.12: Respuesta experimental del sistema en el control de velocidad.

En el Anexo D, apartado D.2, se muestra la respuesta del sistema con varias versiones diferentes del controlador, obtenidas durante el proceso del ajuste por tanteo.



# Capítulo 6

## Conclusiones y líneas futuras de trabajo

### 6.1. Conclusiones

Una vez realizado el presente trabajo se llega a las siguientes conclusiones generales y específicas:

#### 6.1.1. Conclusiones generales

- 1) Gracias a la utilización de elementos como Arduino se ha conseguido reducir el coste del equipo de prácticas.
- 2) La caracterización del motor puede variar significativamente dependiendo de los ensayos experimentales realizados, así como del método utilizado para el cálculo de los parámetros.
- 3) El uso de la FFT ha resultado de gran utilidad a la hora de determinar el tiempo de muestreo.
- 4) Se considera que Solidworks ha resultado ser una herramienta acorde a las necesidades de diseño geométrico de la carcasa y que MATLAB permite una forma de comunicación relativamente sencilla con Arduino.

#### 6.1.2. Conclusiones específicas

- 1) En versiones de MATLAB anteriores a la 2016 se pueden producir errores al establecer la comunicación entre MATLAB y la placa Arduino. La descripción de los errores que muestra MATLAB con respecto a su funcionamiento con Arduino, en algunos casos no es demasiado descriptiva. Los errores pueden deberse incluso a parámetros externos al propio MATLAB (SDK de Windows, puerto COM al que se conecte la placa, etc.). Estos errores no se han dado al utilizar la versión de MATLAB 2017a y posteriores.
- 2) Para evitar el desperdicio tanto de material como de tiempo y energía, es necesario prestar atención a las tolerancias. A priori puede resultar complejo determinar dichas

tolerancias, por lo que se recomienda realizar la impresión de pruebas parciales del modelo.

- 3) Es necesario estudiar con detenimiento qué cara del modelo se apoyará en la placa soporte de la impresora para obtener un acabado superficial aceptable tras el proceso de impresión 3D. En dicho proceso se debe evitar la realización de puentes en la medida de lo posible.
- 4) Utilizando el equipo mostrado durante el presente trabajo se ha logrado obtener un equipo de prácticas funcional y fácil de personalizar y modificar por menos de 100 €.
- 5) En tres de los cuatro ensayos experimentales realizados se obtuvieron velocidades más cercanas entre sí que con respecto al cuarto ensayo. Por lo tanto, estas tres medidas tendrán más peso a la hora de evaluar una función que represente a los cuatro ensayos de manera conjunta, lo que se traduce en que el modelo obtenido será mejor en el rango de las velocidades cercanas entre sí.

A pesar de esto, como el control se realiza en un rango de velocidades que el modelo representa de manera aceptable, el hecho de que las medidas más cercanas entre sí fueron obtenidas en ese rango, se traduce en un mejor control en la velocidad del sistema.

- 6) Si se conociera a priori un rango aún más acotado de las velocidades en las que se desea realizar el control, se podría mejorar el modelo realizando más ensayos, a intervalos menores de tensión, en dicho rango.
- 7) Con el modelo estimado del motor y el controlador PID ajustado se ha conseguido un control de velocidad preciso para el rango de velocidades recomendadas del motor.
- 8) El procedimiento comentado en los Capítulos 4 y 5, así como los resultados pueden dar pie a ser seguidos para elaborar una práctica de laboratorio sobre modelado y control de posición de motores de c.c. en las distintas asignaturas que imparte el Departamento.

## 6.2. Líneas futuras de trabajo

- En vez de hacer la aproximación del sistema a un modelo de primer orden, trabajar con un modelo de segundo orden y comparar los resultados obtenidos.
- Tratar de determinar la inductancia del motor ( $L_a$ ) y el coeficiente de fricción viscosa ( $B_m$ ).
- Como alternativa a MATLAB y a SIMULINK, probar opciones de código abierto y gratuitas, tales como Scilab, Xcos y Python.
- Ajuste del controlador PID utilizando diferentes métodos y comparación entre los resultados obtenidos.
- Control de velocidad y posición bajo estados de carga, que se podrían simular también con elementos controlados, como por ejemplo un freno electromecánico.

# Anexo A

## Modelado geométrico

En este documento se detalla el procedimiento para obtener la geometría de la carcasa y de las piezas que la conforman. Se ha utilizado para ello la versión 2016 de SolidWorks.

Antes de comenzar con el modelado de cada una de las partes que componen la carcasa para, posteriormente, ensamblar todas las piezas en un mismo conjunto, se recomienda leer el apartado A.1. de *Conceptos previos* que se puede encontrar en [31].

### A.1. 00 Cuerpo principal.SLDPRT Modelado del cuerpo principal

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Sobre el plano de **Planta** crear un **Croquis**. Este croquis definirá las dimensiones generales del cuerpo de la carcasa.

Dibujar un **Rectángulo** de **140 x 126 mm** y **Extruir 65 mm** tal y como se ve en la figura A.1.

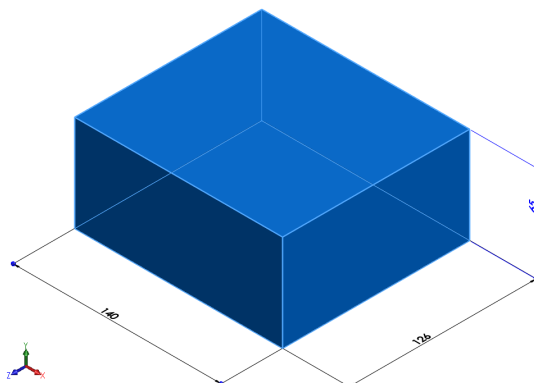


Figura A.1: Extrusión del cuerpo principal.

A continuación, se recortará una de las esquinas del cuerpo principal. Este espacio servirá para facilitar la conexión y desconexión del cable USB que permite conectar la placa Arduino

al ordenador.

El cuerpo que se acaba de extruir tiene cuatro caras laterales, dos de ellas de menor tamaño. Seleccionar de entre las caras pequeñas la del lateral izquierdo y dibujar el **Croquis** de un **Rectángulo** de **37,50 x 27 mm**. Aplicar a este croquis la operación de **Extruir corte** hasta una profundidad especificada de **19,40 mm** (figura A.2).

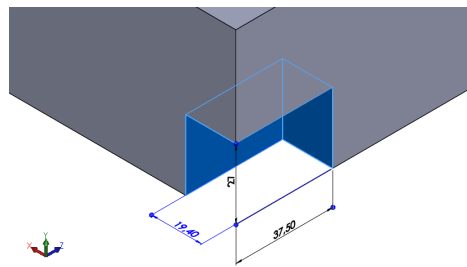


Figura A.2: Corte espacio conexión USB.

Una vez definidas las dimensiones generales de la carcasa, se procede a redondear algunas de las aristas. Hacer clic sobre la operación de **Redondeo**, seleccionar las aristas que se van a redondear y en el recuadro de **Radio** introducir el valor de **15 mm** (figura A.3). De igual modo, redondear las aristas del espacio cortado anteriormente para la entrada del cable USB, pero esta vez con un **Radio** de **5 mm** (figura A.4).

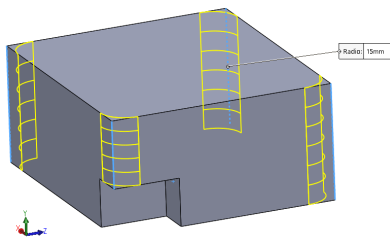


Figura A.3: Redondeo aristas exteriores.

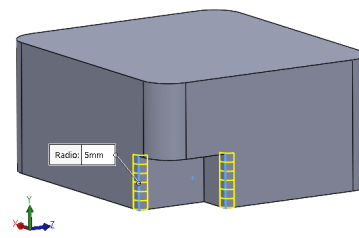


Figura A.4: Redondeo aristas espacio USB.

El siguiente paso en el modelado consiste en vaciar el cuerpo de la carcasa ya que en este punto éste es un cuerpo macizo. Seleccionar la operación de **Vaciado**. En el recuadro de **Espesor** introducir **3 mm** y tras hacer clic en el recuadro de **Caras a eliminar**, seleccionar la cara superior del modelo tal y como se ve en la figura A.5. El modelo debe quedar igual que el de la figura A.6.

Para que el conector del cable USB pueda acceder físicamente al conector USB de la placa Arduino hace falta realizar un corte en una de las caras de la carcasa. Para ello, seleccionar la cara que se muestra en la figura A.7 y dibujar el **Croquis** de un **Rectángulo** de **12,50 x 11,04 mm** con el centro del mismo a **28,24 mm** de la pared izquierda y a **16,05 mm** de la base. Una vez terminado el croquis, seleccionar la operación de **Extruir corte** y en el recuadro de **Condición final** seleccionar la opción de **Hasta profundidad especificada**.

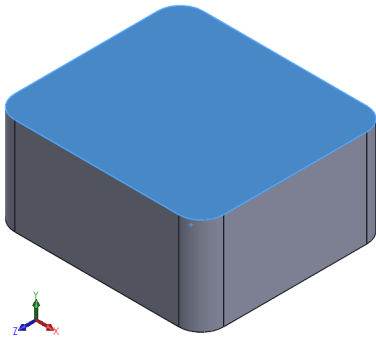


Figura A.5: Cara seleccionada para operación de vaciado.

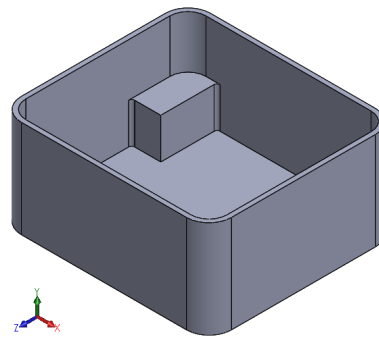


Figura A.6: Vaciado cuerpo principal.

El corte se realizará a lo largo de una profundidad de **3 mm**. El resultado de la operación, así como las dimensiones de los elementos que intervienen en la misma, se puede ver en la figura A.8.

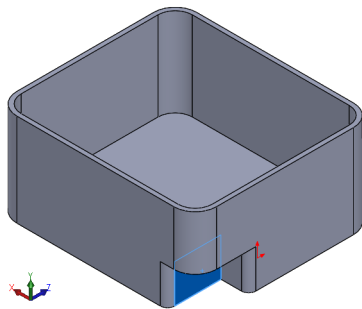


Figura A.7: Cara seleccionada para corte.

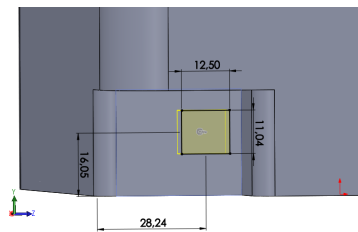


Figura A.8: Corte espacio conector USB.

Con el fin de que la pared de la carcasa no sufra excesivamente debido a los esfuerzos que puede ocasionar el conector USB de la placa Arduino cuando ésta se acople o desacople de la carcasa, se va a modelar un pequeño refuerzo alrededor de la entrada del conector USB. Este refuerzo será un rectángulo con las mismas dimensiones del rectángulo que se dibujó en el paso anterior (figura A.8) ampliadas en 2 mm por cada lado a excepción del lado inferior, que llegará hasta la base de la carcasa<sup>1</sup>. El espesor del refuerzo será de 3 mm.

Dibujar un **Rectángulo** en un **Croquis** definido en la cara interior del espacio de entrada del USB y acotarlo tal y como se ve en la figura A.9<sup>2</sup>. Para sólo tener que acotar dos lados y no todos, hacer que los puntos medios de los lados horizontales del croquis sean **Verticales** respecto a los puntos medios de los lados que tienen enfrentados en el croquis del hueco del conector USB. Estas **Relaciones** se pueden definir haciendo clic en el punto medio de una de las rectas y, pulsando la tecla *SHIFT*, hacer clic en el otro punto medio.

<sup>1</sup>Esto permitirá cumplir con las restricciones tecnológicas que supone la impresión en 3D.

<sup>2</sup>Al acotar de esta manera nos aseguramos de que el refuerzo siempre sea 2 mm mayor que el hueco del USB.

A continuación, en el panel de la izquierda se abrirá un menú en el que se podrán definir las relaciones (ver figura A.10).

Para los dos pares de rectas horizontales, seleccionar la relación **Vertical**.

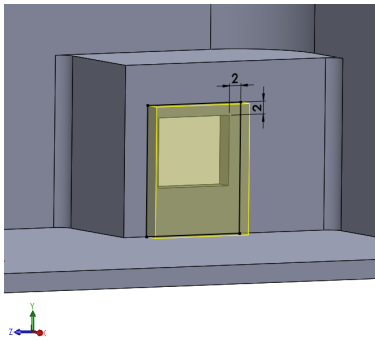


Figura A.9: Croquis refuerzo espacio conector USB.

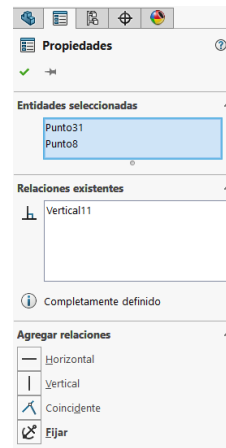


Figura A.10: Relaciones.

**Extruir 3 mm** el croquis, quedando la pieza como se muestra en la figura A.11.

Por último, falta terminar de hacer el hueco para que pueda pasar el conector USB por la abertura. Como se ha creado una extrusión sobre el hueco ya existente, éste se ha tapado. Con una operación de tipo **Extruir corte** y con un croquis exactamente igual que el de la figura A.8 se termina de hacer el hueco, quedando como en la figura A.12.

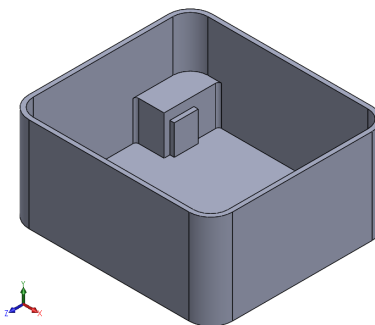


Figura A.11: Extruir refuerzo espacio conector USB.

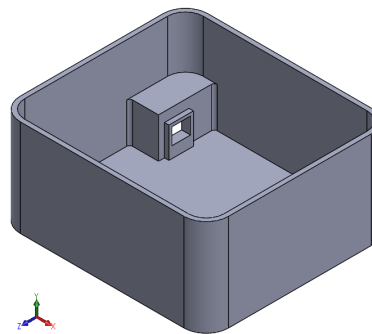


Figura A.12: Cortar ampliación espacio conector USB.

Dentro de la carcasa van a ir acoplados una serie de elementos: dos placas y un motor. Para que estos queden fijados a la carcasa se van a modelar una serie de apoyos. Se va a comenzar con el modelado de los apoyos de las placas y se continuará con el modelado de los apoyos para el motor.

Crear un **Croquis** en la cara interior de la base de la carcasa. En este croquis se van a dibujar seis **Círculos** de **6 mm** de diámetro. Para no tener que introducir la cota de 6 mm en todos los círculos, se puede introducir sólo en uno de ellos, a continuación se seleccionan todos a la vez haciendo uso de la tecla *SHIFT* del teclado y por último se selecciona la relación **Igual** (figura A.13).

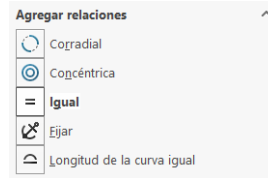


Figura A.13: Relación *Igual*.

Las posiciones de los círculos [32]<sup>3</sup> se pueden ver acotadas en la figura A.14.

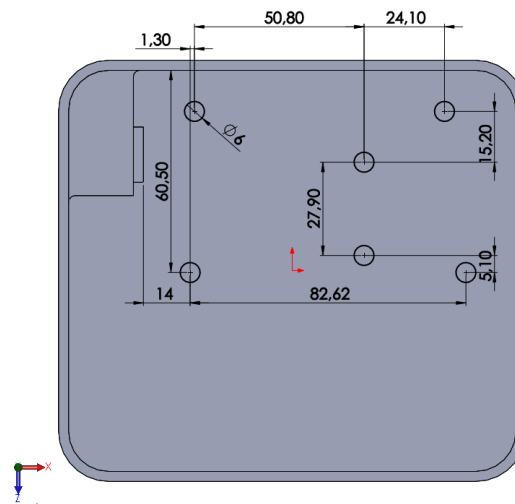


Figura A.14: Cotas posición apoyos.

**Extruir 3 mm** el croquis de los apoyos, quedando el modelo como en la figura A.15.

El siguiente paso consiste en modelar unos apoyos algo más pequeños encima de los apoyos modelados en el paso anterior. Para que los nuevos apoyos se coloquen sobre los anteriores, seleccionar como plano de **Croquis** el definido por la cara superior de éstos últimos. Éstos nuevos apoyos tendrán un diámetro de **4,20 mm**, estando colocados en las mismas posiciones que las mostradas anteriormente en la figura A.14. La distancia de **Extrusión** será también de **3 mm**. El resultado se puede ver en la figura A.16.

<sup>3</sup>En el plano no viene recogida la cota horizontal entre los dos orificios inferiores. Se ha considerado una cota de 82.62 mm.

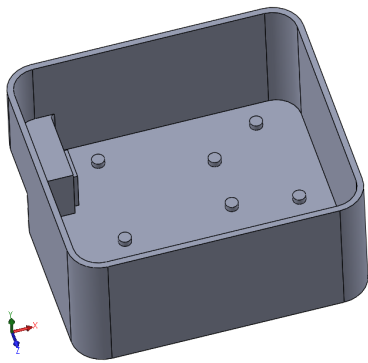


Figura A.15: Extruir apoyos gruesos.

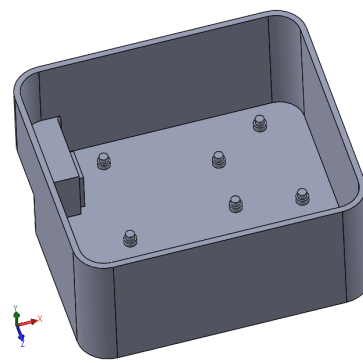


Figura A.16: Extruir apoyos finos.

Una vez modelados los apoyos, hace falta realizar los taladros que permitirán pasar tornillos por los mismos. Estos tornillos irán fijados con una tuerca en su extremo, por lo que para evitar que ésta gire al apretar el tornillo también se modelará un hueco con la forma de ésta.

Los taladros serán **Círculos** de **2,20 mm** de diámetro. Como irán justo sobre los apoyos, se pueden usar los croquis anteriores para fijar la posición de los mismos. El plano del **Croquis** debe ser el que define la cara superior de los últimos apoyos modelados. Una vez dibujados los círculos que conformarán los taladros, seleccionar la operación de **Extruir corte**. Como **Condición final** se establecerá **Hasta el siguiente**.

Los taladros deben quedar como en la figura A.17.

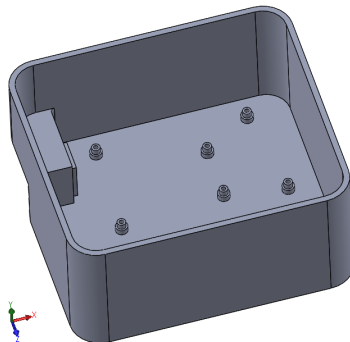


Figura A.17: Taladros apoyos placa Arduino.

Para modelar los huecos de fijación de las tuercas que se ha comentado anteriormente, se debe comenzar con un **Croquis** en la cara inferior de la base de la carcasa. Este croquis tendrá la forma de un hexágono. Basta con definir las dimensiones de uno de los hexágonos, ya que el resto serán copias de este primero.

Dibujar un hexágono utilizando la herramienta **Polígono** (figura A.18). Esta herramienta tiene una serie de campos que permitirán definir el polígono que se quiere dibujar. En este caso, en el recuadro **Número de lados** se debe escribir **6**, marcar la casilla de **Círculo**

**inscrito.** Los recuadros de las coordenadas de la posición del centro no son relevantes en este caso, ya que se definirán posteriormente. Por último, introducir en el recuadro de **Diámetro de círculo 4,20 mm** y en el de **Ángulo, 0,00°**. Los parámetros ya introducidos se pueden ver en la figura A.19.

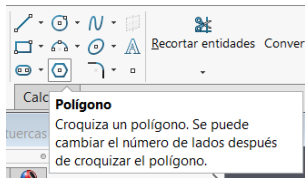


Figura A.18: Herramienta *Polígono*.

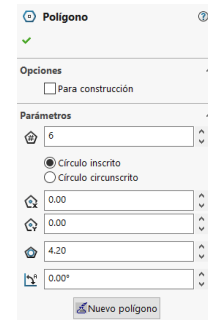


Figura A.19: Parámetros de la herramienta *Polígono*.

El color de las líneas del croquis que se ha creado es azul. Esto indica que las dimensiones del mismo no están completamente definidas. Para que esté completamente definido basta con acotar el diámetro de la circunferencia inscrita y definir una **Relación de Horizontal** para la recta inferior. Una vez definidas estas relaciones, el croquis seguirá estando en azul. Esto es debido a que falta por definir la posición en la que se dispondrá el mismo. Para ello establecer una **Relación de Concéntrica** entre la circunferencia inscrita y una de las circunferencias producidas al realizar los taladros del paso anterior.

Repetir el proceso anterior hasta tener un total de 6 hexágonos<sup>4</sup>. Cada uno de ellos será concéntrico a cada uno de los agujeros de los taladros. El croquis terminado se puede ver en la figura A.20.

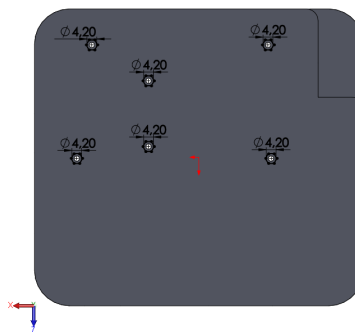


Figura A.20: Croquis fijaciones tuercas.

A continuación, seleccionar el croquis anterior y aplicarle una operación de **Extruir corte**. La profundidad del corte será de **3 mm** y en el sentido del interior de la carcasa (ver

<sup>4</sup>En lugar de repetir el proceso se podría copiar el hexágono ya dibujado, pero se tendrían que definir manualmente todas las relaciones de los elementos que lo conforman.

figuras A.21 y A.22).

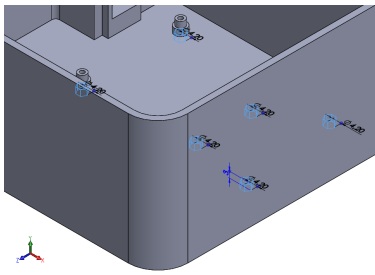


Figura A.21: Corte fijaciones tuercas (1).

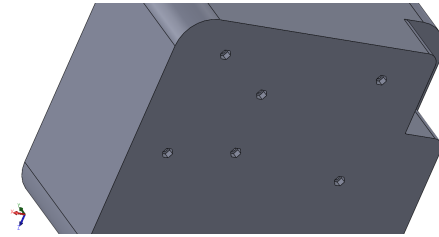


Figura A.22: Corte fijaciones tuercas (2).

Los siguientes elementos que se van a modelar consisten en cuatro apoyos que servirán para acoplar una base al cuerpo principal de la carcasa. El modelado de dicha base está recogido en el apartado A.3 de este mismo Anexo.

Crear un **Croquis** en la cara interior de la base de la carcasa y dibujar cuatro **Círculos** de **6 mm** de diámetro. Las cotas de las posiciones de dichos círculos se pueden ver en la figura A.23.

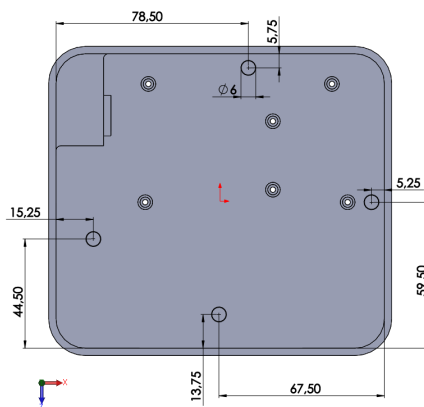


Figura A.23: Croquis de los apoyos del acoplamiento base.

**Extruir** este croquis **3,65 mm** de manera que el modelo quede como en la figura A.24.

Una vez extruidos los apoyos, realizar unos taladros de **2,20 mm** de diámetro utilizando la operación **Extruir corte**. En el campo de **Condición final** marcar la opción de **Hasta la superficie** y seleccionar la cara inferior del exterior de la carcasa de manera que el taladro sea pasante. El modelo debe quedar como en la figura A.25.

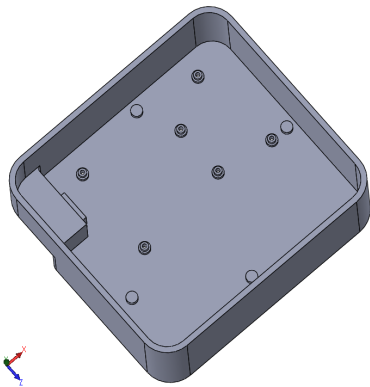


Figura A.24: Extruir apoyos del acoplamiento base.

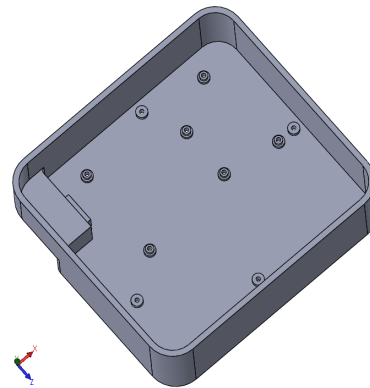


Figura A.25: Cortar taladros de los apoyos del acoplamiento base.

El siguiente elemento del modelado de los apoyos para las placas consiste en unos topes pegados a una de las paredes. El fin de estos refuerzos es evitar que los apoyos de la placa sufran excesivamente a la hora de conectar y desconectar el cable USB que conecta la placa con el ordenador. Se colocarán en la pared opuesta a donde se encuentra la entrada de la conexión USB.

Crear un **Croquis** en la cara interior de la base de la carcasa y dibujar el croquis que se muestra en la figura A.26. **Extruir** el croquis **10 mm** en el sentido adecuado de manera que el modelo quede como en la figura A.27.

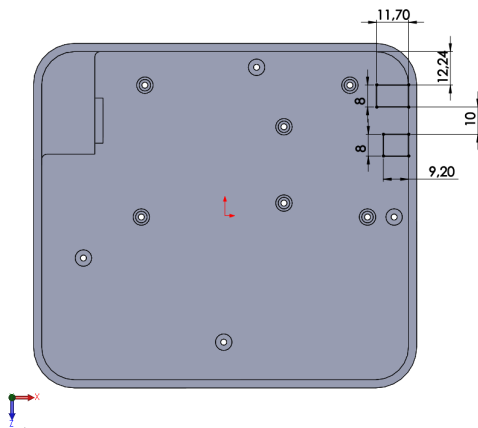


Figura A.26: Croquis topes traseros de la placa Arduino.

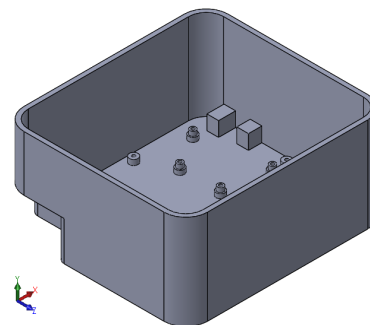


Figura A.27: Extruir topes traseros de la placa Arduino.

Para terminar con el modelado de los elementos de apoyo de las placas se va a proceder a realizar dos operaciones de **Redondeo**. En la primera, seleccionar las aristas que se muestran en la figura A.28 e introducir un valor de **Radio** de redondeo de **1 mm**. En la segunda, seleccionar las aristas<sup>5</sup> que se muestran en la figura A.29 e introducir un valor de **Radio** de

<sup>5</sup>Se deben seleccionar 36 aristas.

redondeo de **0,70 mm**.

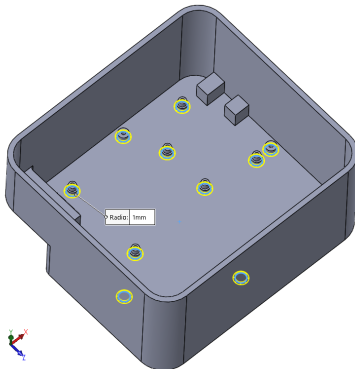


Figura A.28: Redondeo de los apoyos y elementos auxiliares.

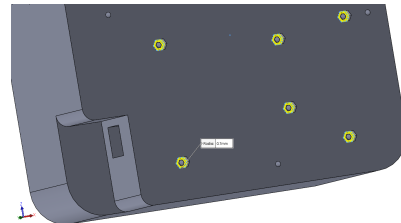


Figura A.29: Aristas de las fijaciones de las tuercas.

En la figura A.30 se puede ver un detalle de seis de las aristas seleccionadas en el paso anterior.

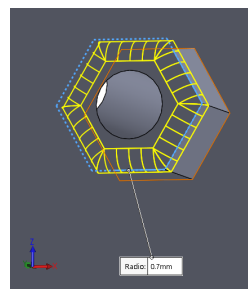


Figura A.30: Detalle aristas de las fijaciones de las tuercas.

A continuación, se van a modelar los elementos que servirán para poder acoplar el motor en el interior de la carcasa. En primer lugar se van a realizar los taladros para poder sacar el eje del motor hacia fuera de la carcasa y poder fijar mediante tornillos el motor a una de las paredes de la misma. Para ello, crear un **Croquis** en la pared exterior derecha de la carcasa y dibujar tres **Círculos**, el central de **7,40 mm** de diámetro y los otros dos de **3,40 mm**. La posición de los mismos se puede ver en la figura A.31.

Realizar una operación de **Extruir corte** usando como base el croquis dibujado en el paso anterior. En el recuadro de **Condición final**, seleccionar **Hasta el siguiente**. El resultado de la operación se puede ver en la figura A.32.

También se va a modelar un refuerzo para la pared en la que irá acoplado el motor. Este refuerzo servirá, además, para ayudar a colocar el motor en posición dentro de la carcasa. Junto con este refuerzo, se va a modelar también un pequeño soporte para que parte del peso del motor descansa sobre él y así alivie algo de esfuerzo de la pared.

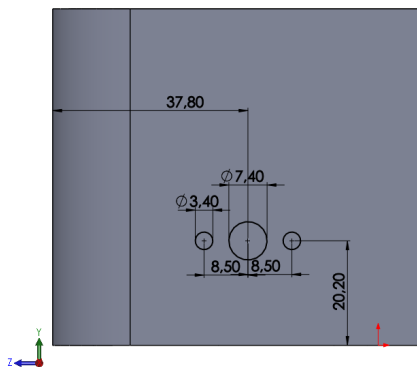


Figura A.31: Posición de los taladros de fijación del motor.

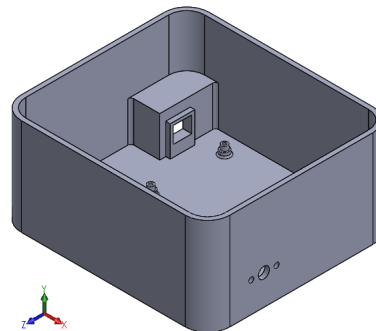


Figura A.32: Resultado operación corte taladros fijación motor.

Para modelar el refuerzo de la pared, se va a crear un **Croquis** en la cara interior de la pared derecha. Las dimensiones del croquis se pueden ver en la figura A.33. **Extruir** este croquis **3 mm** hacia el interior de la carcasa (ver figura A.34).

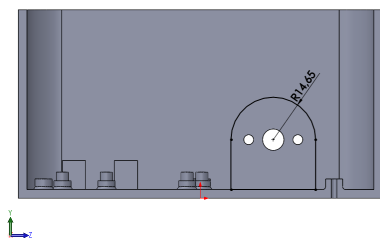


Figura A.33: Croquis refuerzo fijación motor.

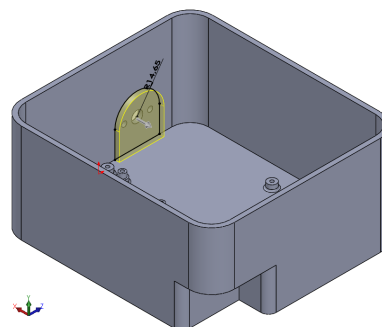


Figura A.34: Extruir refuerzo fijación motor.

Sobre la nueva cara que se ha creado al extruir el croquis anterior, crear un nuevo **Croquis**. Este croquis estará formado por un **Círculo** de **25,60 mm** de diámetro. Aplicar la operación **Extruir corte** a este croquis seleccionando como **Condición final** una **Profundidad especificada** de **3 mm**, de manera que quede un hueco en el refuerzo que permita introducir parte del motor a través del soporte y que se pueda acceder a los taladros para fijar el motor (ver figura A.35).

Para la creación del soporte que servirá de apoyo para el motor hace falta crear un plano. Dicho plano se crea con la herramienta **Geometría de referencia**, seleccionando en el desplegable la opción **Plano**. Para la definición de dicho plano seleccionar la cara interior de la pared derecha de la carcasa y en el recuadro de **Equidistancia**, introducir el valor de **44 mm**. La definición del plano se puede ver en la figura A.36.

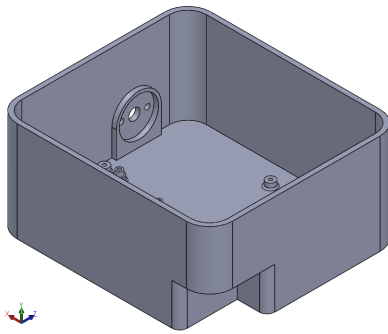


Figura A.35: Cortar hueco refuerzo fijación motor.

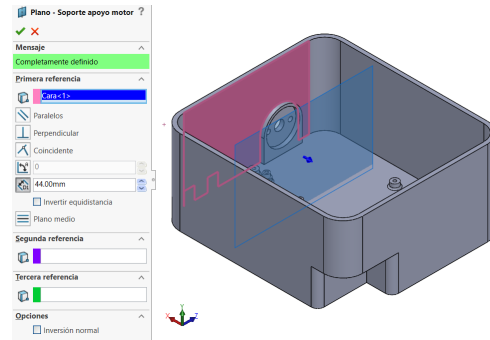


Figura A.36: Definición del plano soporte del apoyo motor.

Sobre este último plano, crear un **Croquis** como el que se puede ver en la figura A.37. **Extruir** dicho croquis **2 mm** seleccionando en el recuadro de **Condición final** la opción de **Plano medio**. El resultado final de la operación se puede ver en la figura A.38.

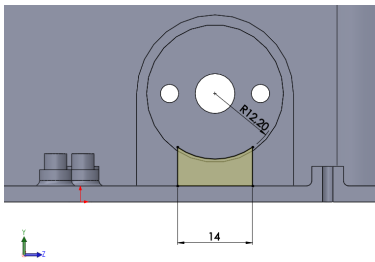


Figura A.37: Croquis soporte apoyo motor.

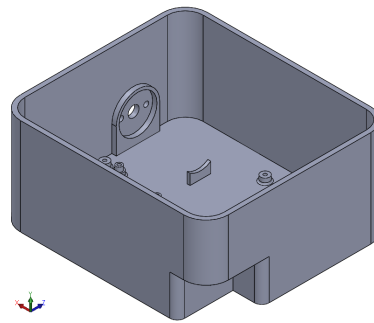


Figura A.38: Extruir soporte apoyo motor.

Para finalizar el modelado del soporte para el apoyo del motor basta con aplicar una operación de **Redondeo** en las cuatro aristas comunes entre la base de la carcasa y el soporte para el apoyo del motor. El **Radio** del redondeo será de **1 mm** (ver figura A.39).

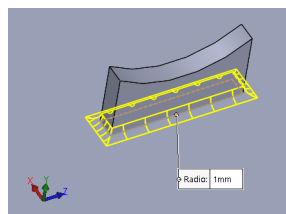


Figura A.39: Redondeo arista soporte motor.

Una vez modelados los soportes, el siguiente paso consiste en modelar los orificios de ventilación de la carcasa. Éstos se pueden dividir en cinco zonas:

- Ventilación de las placas en la cara inferior de la carcasa.
- Ventilación del motor, también en la cara inferior de la carcasa.
- Ventilaciones laterales en dos paredes laterales enfrentadas de la carcasa.
- Orificios de ventilación rectangulares en la parte superior de las paredes<sup>6</sup>.

Se va a comenzar con el modelado de la ventilación de las placas y con la ventilación del motor.

Crear un **Croquis** en la cara inferior de la base de la carcasa. Se comienza dibujando un croquis como el que se muestra en la figura A.40. Como esta ventilación presenta varias simetrías, se hará uso de la herramienta **Simetría de entidades** (figura A.41) para terminar de realizar el croquis (ver figuras A.42 y A.43).

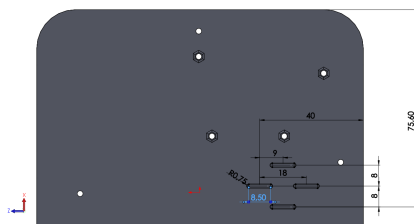


Figura A.40: Croquis de la ventilación inferior de las placas.

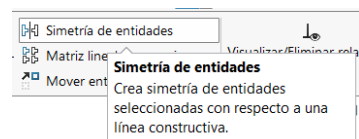


Figura A.41: Herramienta *Simetría de entidades*.

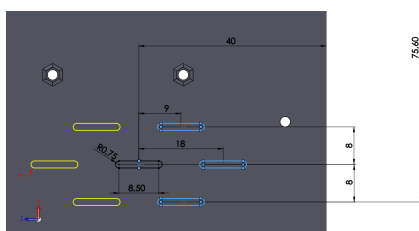


Figura A.42: Primera simetría de la ventilación.

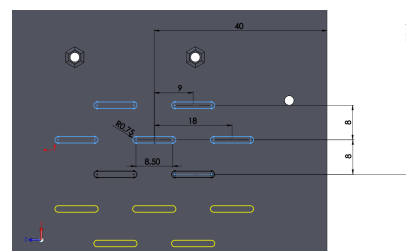


Figura A.43: Segunda simetría de la ventilación.

El croquis terminado y acotado debe quedar como el que se muestra en la figura A.44.

Aplicarle a este croquis una operación de **Extruir corte**, seleccionando en el desplegable de **Condición final** la opción de **Hasta el siguiente**. El resultado de la operación se puede ver en la figura A.45.

<sup>6</sup>Estos orificios de ventilación se van a modelar más adelante.

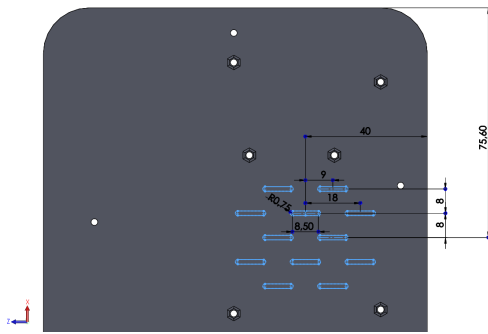


Figura A.44: Croquis de la ventilación terminado.

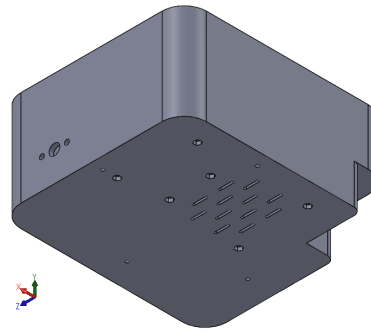


Figura A.45: Cortar ventilación inferior de las placas.

La siguiente ventilación que se va a modelar se encuentra justo debajo de donde irá fijado el motor. Crear un **Croquis** en la misma cara que en el caso anterior. En este croquis se va a hacer uso de una herramienta diferente, que será **Matriz lineal de croquis** (figura A.46). Para poder utilizar esta herramienta hace falta partir de un croquis. Dibujar una ranura con las mismas dimensiones que en el caso anterior y hacer clic sobre la operación de **Matriz lineal de croquis**.

Seleccionar el croquis dibujado anteriormente y dentro de la pestaña de **Dirección 1**, en el recuadro de **Separación** introducir el valor de **6,75 mm**. En el recuadro de **Número de instancias** introducir **5**. Dejar el resto de parámetros con sus valores por defecto. Los datos introducidos y el resultado de aplicar esta herramienta se puede ver en la figura A.47.

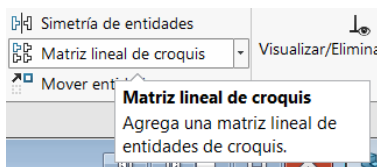


Figura A.46: Herramienta *Matriz lineal de croquis*.

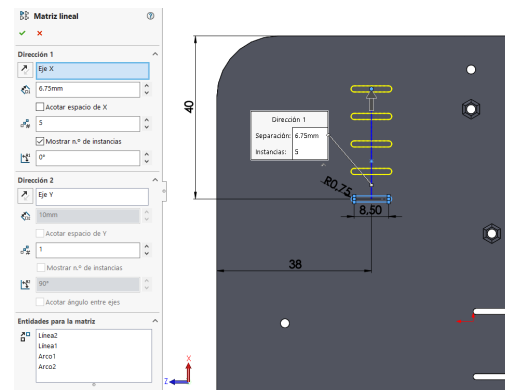


Figura A.47: Aplicación de la matriz lineal.

Aplicarle a este croquis una operación de **Extruir corte** con los mismos parámetros que en el caso de la ventilación modelada anteriormente. El resultado se puede ver en la figura A.48.

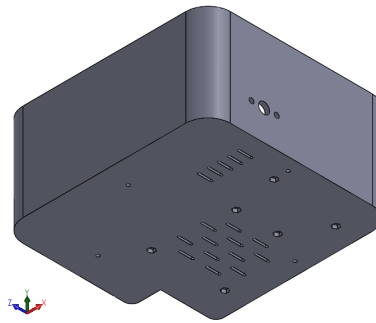


Figura A.48: Cortar la ventilación inferior del motor.

Quedan por modelar las ventilaciones de los dos laterales, cada una con 10 y 11 ranuras respectivamente. Se va a comenzar modelando la ventilación del lateral frontal. Crear un **Croquis** en la cara exterior del lateral frontal y realizar un dibujo como el que se muestra en la figura A.49.

Una vez realizado el dibujo, se seleccionan sus líneas y se hace clic en la operación de **Matriz lineal de croquis**. En el caso de que el sentido en el que se propague la matriz sea el contrario al buscado, pulsar sobre el botón de **Invertir dirección**. En el recuadro de **Separación** introducir el valor de **7 mm** y en el de **Número de instancias**, **11** (ver figura A.50).

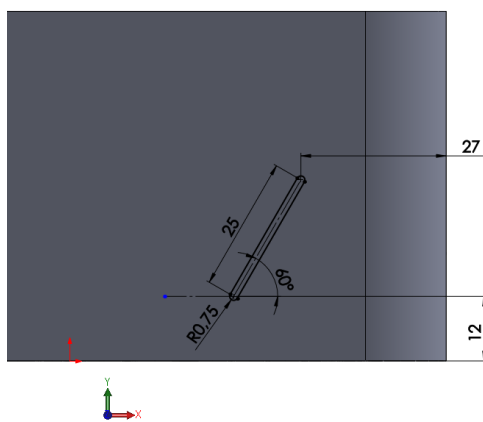


Figura A.49: Croquis inicial de la ventilación del lateral frontal.

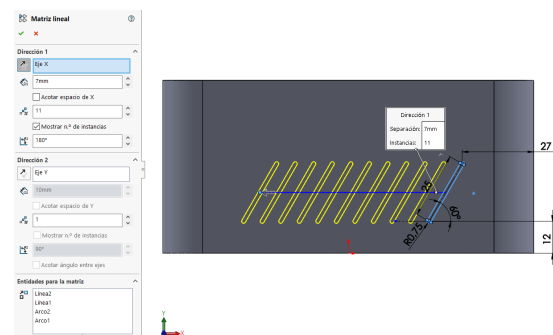


Figura A.50: Parámetros de la matriz lineal.

A continuación aplicarle al croquis una operación de **Extruir corte** con la opción de **Hasta el siguiente** en el recuadro de **Condición final**. El resultado se puede ver en la figura A.51.

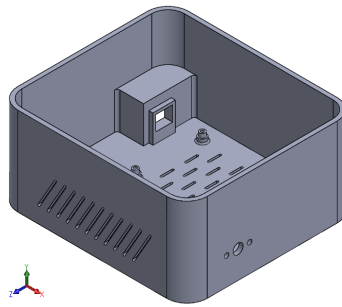


Figura A.51: Cortar la ventilación del lateral frontal.

Repetir el mismo proceso en el lateral opuesto pero esta vez con 10 ranuras en lugar de 11. El **Croquis** completo se puede ver en la figura A.52 y el resultado de la operación de **Extruir corte** en la figura A.53.

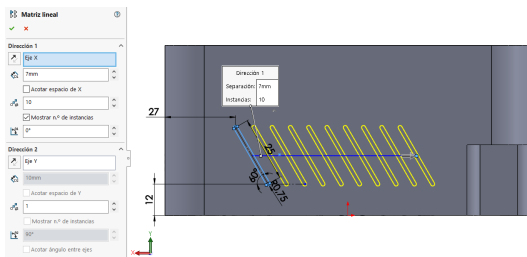


Figura A.52: Croquis de la ventilación del lateral trasero.

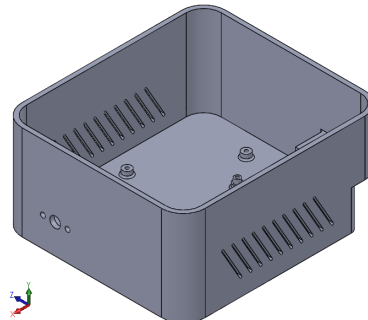


Figura A.53: Cortar ventilación del lateral trasero.

Terminada la ventilación, se procede a modelar los soportes que permitirán que se pueda acoplar el cierre de la carcasa con el cuerpo principal de la misma. Habrá un soporte en cada esquina. Como el plano en el que se van a dibujar los croquis no existe aún, habrá que definirlo con la herramienta de **Geometría de referencia**. Seleccionar la opción de **Plano**. En el recuadro de **Primera referencia** seleccionar la cara inferior exterior de la carcasa y en **Equidistancia** introducir **49,50 mm**. Si es necesario, marcar la casilla de **Invertir equidistancia**. La definición del plano se puede ver en la figura A.54.

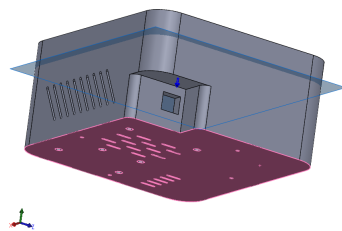


Figura A.54: Definición del plano de los soportes.

Sobre este plano crear un **Croquis** como el que se muestra en la figura A.55 y **Extruirlo 12,50 mm** en el sentido positivo del eje y, y **3 mm** en el sentido negativo, quedando el modelo como en la figura A.56.

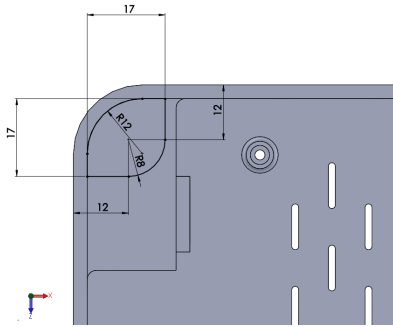


Figura A.55: Croquis de los soportes.

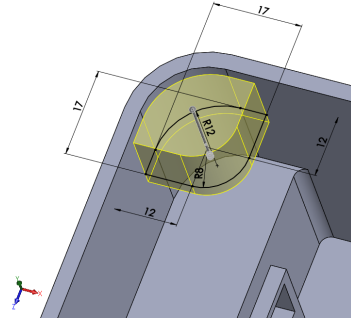


Figura A.56: Extruir los soportes del acoplamiento de cierre.

Una vez modelado el soporte de una de las esquinas, utilizar la herramienta de **Simetría** para definir un soporte en cada una de las esquinas (ver figura A.57).

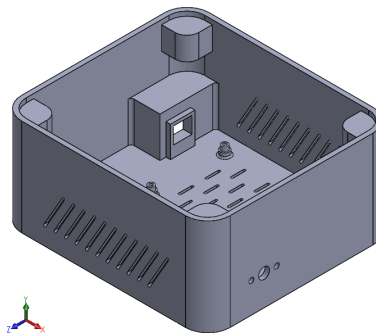


Figura A.57: Simetrías de los soportes del acoplamiento de cierre.

El siguiente paso consiste en modelar el espacio en el que se alojará la pieza que hará de unión entre el cuerpo principal y el cierre de la carcasa. Este espacio consta de un taladro y de una ranura practicados en los soportes modelados anteriormente. A continuación se describe el procedimiento para modelar este alojamiento.

En primer lugar, en la pestaña de **Tipo**, seleccionar la operación de **Asistente para taladro**. Seleccionar como **Tipo de taladro** la opción de **Avellanado**. Activar el **Ajuste de tamaño personalizado** e introducir en los tres recuadros que describen las dimensiones del taladro, **5 mm**, **10 mm** y **45°** respectivamente. En el desplegable de **Condición final** seleccionar la opción **Hasta el siguiente**. Puede que haga falta pulsar sobre el icono de **Invertir dirección** (ver figura A.58).

En la pestaña de **Posiciones** se van a definir mediante puntos las posiciones donde van a ir los taladros. Para ello, seleccionar como plano de croquis el plano que se creó anteriormente para modelar los soportes del acoplamiento del cierre y disponer cuatro **Puntos** en

las posiciones que se muestran en la figura A.59.

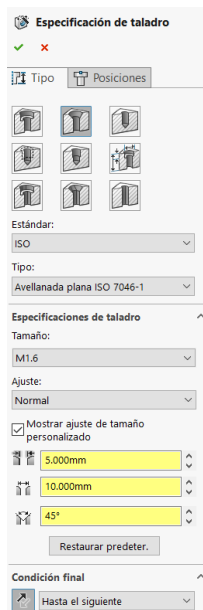


Figura A.58: Parámetros del taladro.

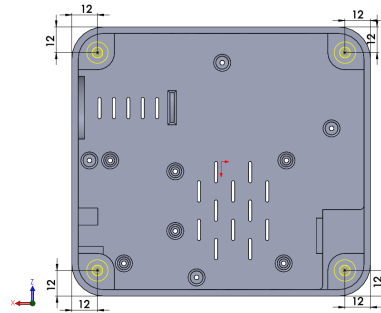


Figura A.59: Posiciones de los taladros.

Antes de validar la operación, el modelo debería quedar como se muestra en la figura A.60.

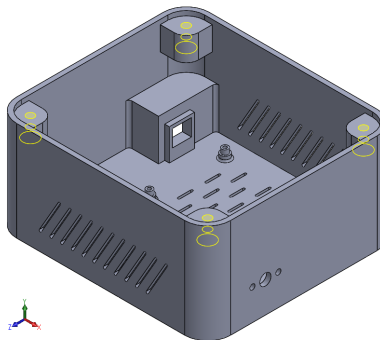


Figura A.60: Modelo antes de validar los taladros.

Para modelar la ranura, crear un **Croquis** en la cara con mayor coordenada y de uno de los soportes creados antes. El croquis a dibujar se muestra en la figura A.61.

Aplicarle a este croquis una operación de **Extruir corte**. En el recuadro de **Condición final** marcar la opción **Hasta la superficie** y seleccionar la superficie que se puede apreciar en la figura A.62.

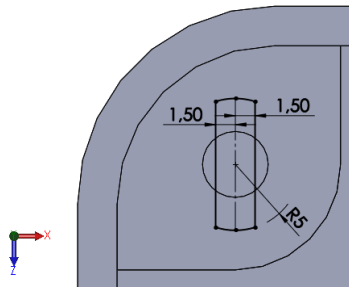


Figura A.61: Croquis de la ranura.

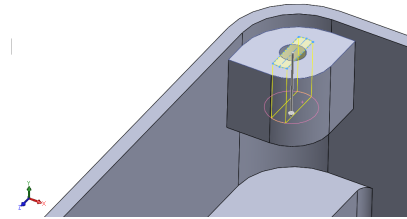


Figura A.62: Cortar ranura.

Utilizar la herramienta de **Simetría** para copiar la ranura en los cuatro soportes. El resultado se puede ver en la figura A.63.

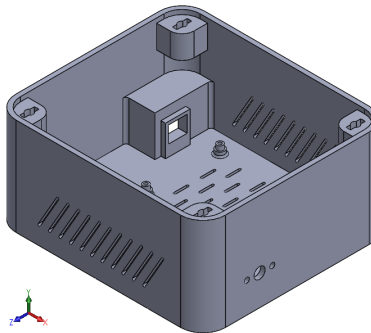
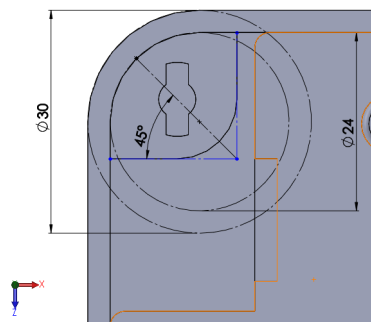


Figura A.63: Resultado de la simetría.

Para terminar con el modelado de los soportes hace falta adaptarlos para que puedan ser impresos en 3D cumpliendo las restricciones técnicas. En primer lugar se crea un **Croquis** nuevo en el plano y con las dimensiones que se muestran en la figura A.64. En este croquis se puede ver que todos los elementos son auxiliares<sup>7</sup> a excepción de un **Punto** que se ha añadido en la intersección de una de las circunferencias y la recta oblicua.

Figura A.64: Perímetro inferior de la operación *Recubrir*.

<sup>7</sup>Para definir una línea como línea auxiliar se debe activar la casilla de **Para construcción** al realizar el trazado de la misma.

Se debe crear un segundo croquis con la forma del perímetro del soporte (ver figura A.65).

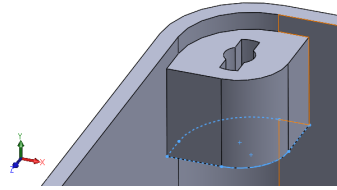


Figura A.65: Perímetro superior de la operación *Recubrir*.

A continuación, se aplica una operación de **Recubrir**. Hacer clic en la operación y en el recuadro de **Perfiles** seleccionar los dos croquis creados antes (ver figura A.66). Haciendo uso de la herramienta de **Simetría**, copiar la última operación en cada una de las esquinas.

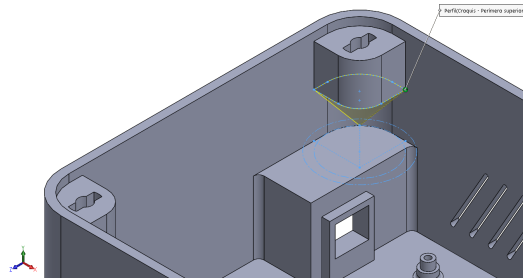


Figura A.66: Resultado de la operación *Recubrir*.

Se creará un cuerpo debajo del soporte, pero si nos fijamos bien se puede apreciar que este cuerpo no está completamente adherido a la pared (ver corte en la figura A.67). Para solucionarlo se hará uso de la operación **Convertir entidades** (figura A.68).

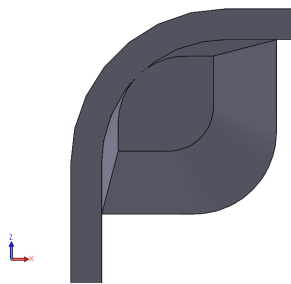


Figura A.67: Corte en la pieza.

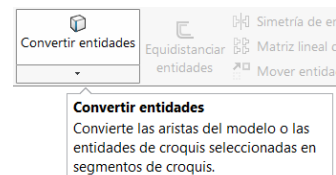


Figura A.68: Operación *Convertir entidades*.

Esta operación proyecta las aristas de una cara en un croquis, que es justo lo que buscamos para después poder extruir el croquis hacia la superficie del soporte y así rellenar la separación que queda entre ésta y la pared. Crear un **Croquis** y seleccionar la cara que se muestra en la figura A.69. Después de realizar la selección, pulsar en **Convertir entidades**. Tras esto se proyectará la superficie en el croquis, consiguiendo el dibujo que se puede ver

en la figura A.70.

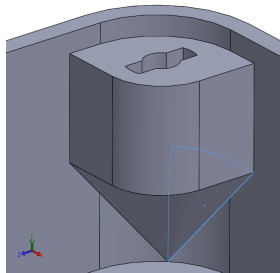


Figura A.69: Cara seleccionada.

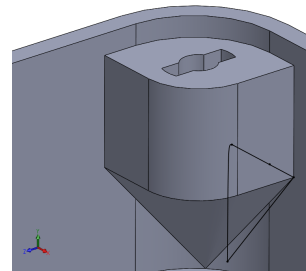


Figura A.70: Resultado de convertir entidades.

Con este croquis, crear una operación de **Extruir** seleccionando en el recuadro de **Condición final** la opción de **Hasta la superficie**. Seleccionar como superficie final la misma que proyectó en el croquis anterior. Tras validar la operación, el modelo debe quedar como en la figura A.71.

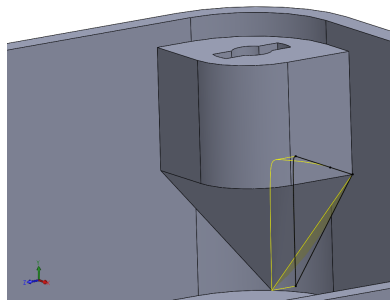


Figura A.71: Extruir relleno.

Repetir esta operación en las esquinas restantes. Como cada esquina tiene dos huecos que rellenar, se deberá repetir la operación 7 veces más<sup>8</sup>. La comparación de un corte del modelo antes y después de realizar estas operaciones de relleno se puede ver en las figuras A.72a y A.72b.

Llegados a este punto sólo quedan por modelar dos grupos de elementos más. El primero de ellos consiste en una serie de sujeciones que tienen el objetivo de proporcionar un punto de anclaje para poder organizar los conductores dentro de la carcasa. Éstos podrán ir sujetos a estos elementos por medio de, por ejemplo, bridas de plástico. El segundo, serán las ventilaciones que nos dejamos sin hacer tal y como se comentó en la parte del modelado de las ventilaciones de la carcasa.

<sup>8</sup>La razón por la que se repite manualmente esta operación es porque la naturaleza de la misma impide que se pueda aplicar la operación de simetría.

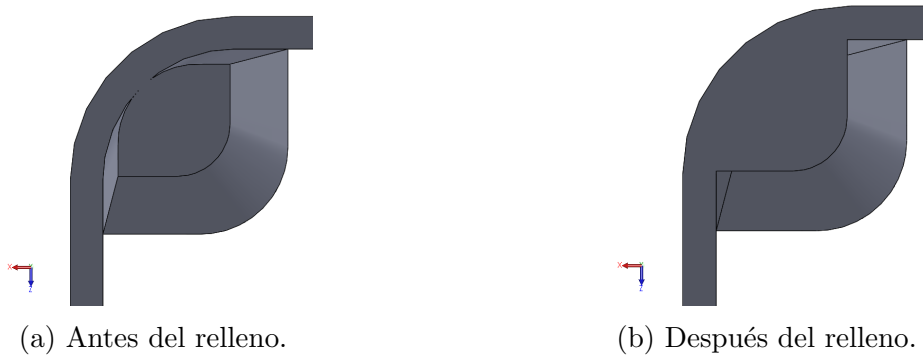


Figura A.72: Comparación del corte de la figura A.67 antes y después del relleno.

Se empieza definiendo dos **Planos**. El primero, a **31,50 mm** del plano de **Vista lateral** y el segundo a **10,50 mm** del primero (ver figura A.73).

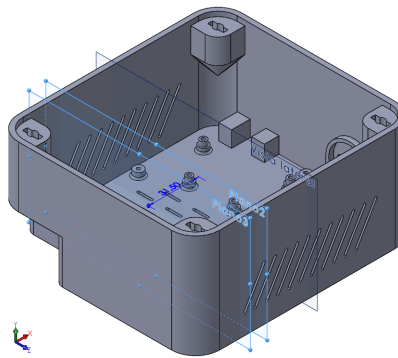


Figura A.73: Definición de los planos.

En el segundo plano definido, crear un **Croquis** como el que se muestra en la figura A.74). **Extruir** este croquis **3 mm** en la dirección positiva del eje x tal y como se puede ver en la figura A.75.

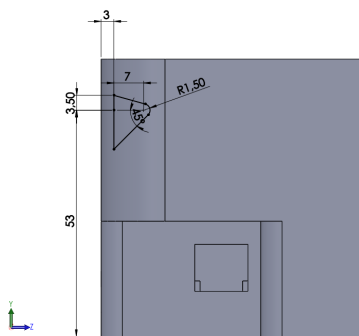


Figura A.74: Croquis de la sujeción pequeña.

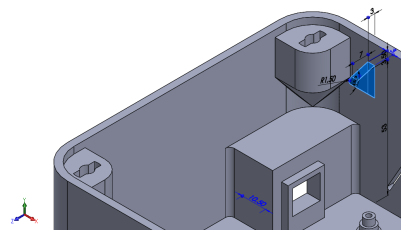


Figura A.75: Extruir sujeción pequeña.

En la nueva superficie que se ha creado tras realizar la extrusión, crear el **Croquis** de un **Círculo** de **3 mm** de diámetro. A continuación, **Extruir** el croquis **7,50 mm**. El resultado se puede ver en la figura A.76. Una vez extruido el cilindro anterior, crear un **Croquis** sobre la cara exterior del lateral de la carcasa. Este croquis constará de un **Rectángulo** de **7,50 x 7 mm**. Seguidamente, se le aplicará una operación de **Extruir corte** al croquis, quedando éste como en la figura A.77.

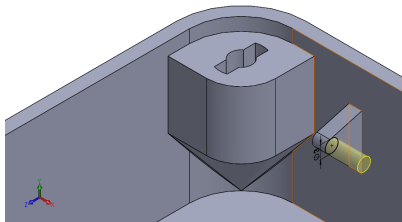


Figura A.76: Extruir cilindro de la sujeción pequeña.

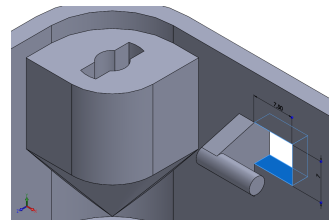


Figura A.77: Cortar ventilación de la sujeción pequeña.

Terminada esta operación, aplicar una **Simetría** para obtener el modelo que se puede ver en la figura A.78.

Definir dos otros dos **Planos**. El primero a **24 mm** del plano de **Alzado** y el segundo a **10,50 mm** del primero (ver figura A.79).

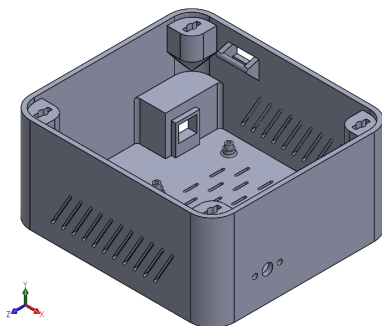


Figura A.78: Simetría de la sujeción pequeña.

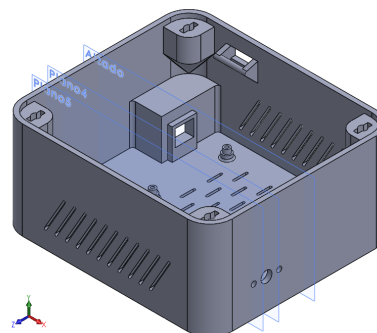


Figura A.79: Nueva definición de planos.

Sobre estos planos repetir las mismas operaciones que para la sujeción anterior<sup>9</sup> hasta que el modelo quede como el de la figura A.80).

Una vez llegados a este punto, aplicar dos veces la operación de **Simetría** para obtener un modelo como el de la figura A.81).

<sup>9</sup>También con las mismas medidas.

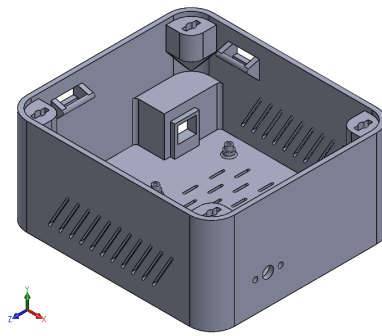


Figura A.80: Modelo con la sujeción grande.

Terminado el modelado de las sujeciones y de las ventilaciones de las mismas, sólo falta el modelado de un orificio para contemplar la posibilidad de futuras salidas de conexiones de la carcasa. Definir sobre el lateral exterior izquierdo un **Croquis** como el de la figura A.82). Aplicarle una operación de **Extruir corte** para que perfore toda la pared de la carcasa.

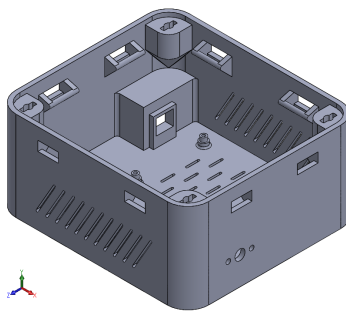


Figura A.81: Modelo con todas las sujeciones.

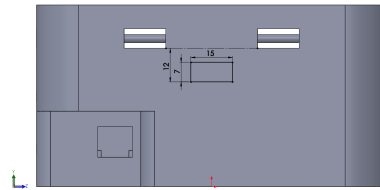


Figura A.82: Croquis para la salida de conexiones futuras.

El modelo terminado del cuerpo principal de la carcasa se puede ver en la figura A.83.

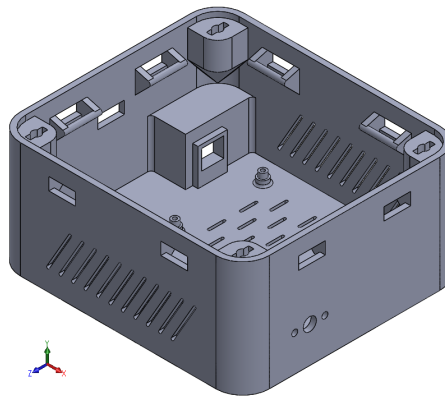


Figura A.83: Modelo terminado del cuerpo principal de la carcasa.

## A.2. 01 Cubierta.SLDPRT

### Modelado de la cubierta

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Planta** un **Croquis**. Este croquis describirá las dimensiones generales de la cubierta de la carcasa. Dibujar un **Rectángulo** de **140 x 126 mm** y, a continuación, aplicarle una operación de **Extruir** con una **Profundidad** especificada de **3 mm** (figura A.84).

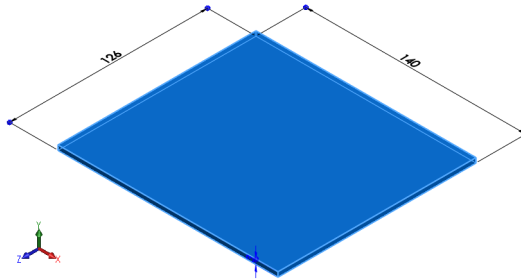


Figura A.84: Croquis con las dimensiones de la cubierta.

El siguiente paso consiste en modelar un pequeño escalón que servirá para acoplar correctamente la cubierta con el cuerpo principal de la carcasa. Para ello, definir un **Croquis** en la cara inferior del rectángulo extruido anteriormente. Este croquis consistirá en un **Rectángulo**, con el centro en el mismo punto que el rectángulo anterior, con unas dimensiones de **134 x 120 mm**<sup>10</sup>. **Extruir** el croquis **3 mm** en el sentido negativo del eje y (ver figura A.85).

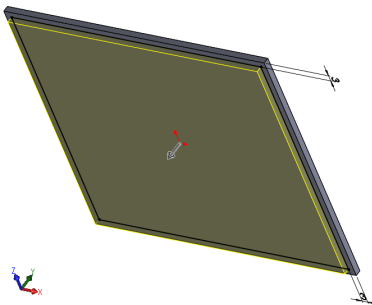


Figura A.85: Escalón de la cubierta.

A continuación, se procede a redondear las aristas verticales de la cubierta. Hay un total de 8 aristas que se van a redondear en este paso. Como el radio de redondeo es distinto según la parte de la pieza en que se encuentren éstas, habrá que realizar dos operaciones diferentes de redondeo. Para la primera operación, hacer clic sobre **Redondeo** y seleccionar las aristas inferiores, esto es, las que pertenecen al escalón modelado en el paso anterior. El **Radio** de redondeo será de **12 mm** (figura A.86). A las otras cuatro aristas, aplicarles un **Redondeo** con un **Radio** de **15 mm** (ver figura A.87).

<sup>10</sup>O lo que es lo mismo, con 3 mm menos por cada lado respecto al rectángulo anterior.

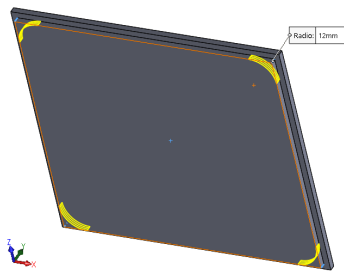


Figura A.86: Redondeo de las aristas del escalón.

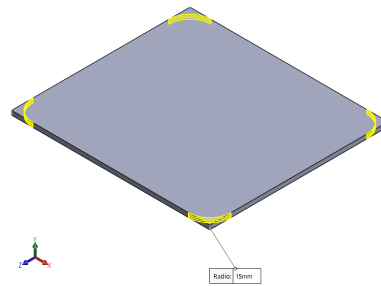


Figura A.87: Redondeo de las aristas de la parte superior.

Una vez terminadas las operaciones de redondeo, se va a realizar una operación de corte. Sobre la cara superior de la carcasa, dibujar un **Croquis** como el que se muestra en la figura A.88.

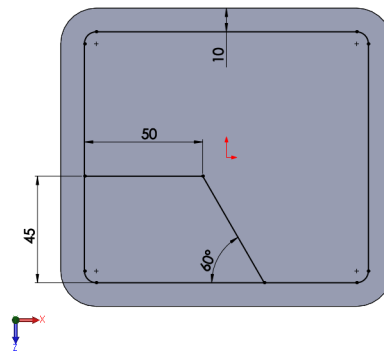


Figura A.88: Croquis del corte de la cubierta.

Para mayor facilidad y rapidez a la hora de hacer este croquis, se recomienda hacer uso de la herramienta **Equidistar entidades**. Haciendo clic sobre esta herramienta e introduciendo el valor de la distancia a la que equidistar, en este caso **10 mm**, se crea un perfil igual que el exterior, pero a la distancia introducida. Si la equidistancia se hiciera en la dirección contraria a la deseada (figura A.89), pulsar sobre la casilla de **Invertir dirección** (figura A.90).

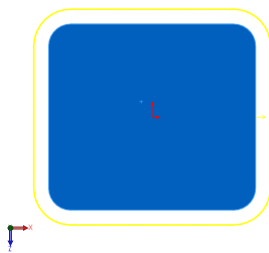


Figura A.89: Equidistancia en dirección contraria.

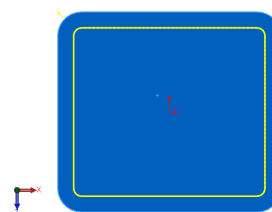


Figura A.90: Equidistancia en la dirección correcta.

Aplicar una operación de **Extruir corte** con este croquis. En el recuadro de **Condición final** seleccionar la opción **Hasta la profundidad especificada** y, a continuación, introducir un valor de **3 mm**. A diferencia del resto de operaciones de extruir corte, en este caso se tienen varias posibles zonas que cortar. Hará falta seleccionar expresamente la zona a cortar, que será la interior según se puede ver en la figura A.91. La pieza debe quedar en este punto como en la figura A.92.

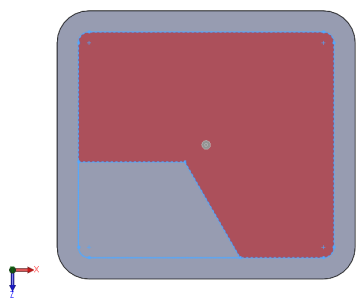


Figura A.91: Selección de la cara a cortar.

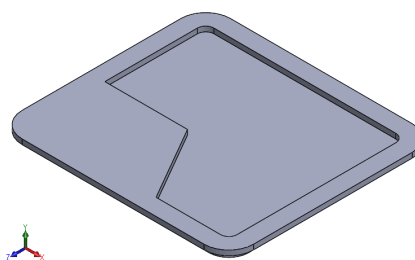


Figura A.92: Corte de la cubierta.

El modelo, llegados a este punto, tiene tres aristas sin redondear. De nuevo, se realizarán dos operaciones de redondeo diferentes debido a los distintos radios de redondeo. La primera, redondea las dos aristas que se muestran en la figura A.93 con un **Radio** de redondeo de **5 mm**. La segunda (figura A.94) tendrá un radio de redondeo de **10 mm** para la arista restante.

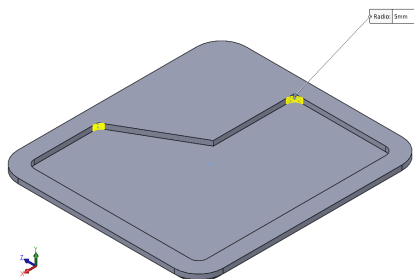


Figura A.93: Redondeo de las aristas laterales.

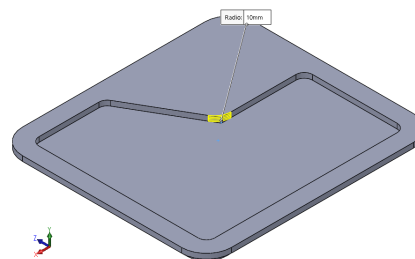


Figura A.94: Redondeo de la arista central.

El siguiente paso consiste en el modelado de la malla de protección de la carcasa. La malla está formada por cuadrados de **7 mm** de lado con una separación de **3 mm**. Crear un **Croquis** en el plano intermedio de la cubierta. Aprovechando la simetría que ofrece la malla que se va a modelar, se van a dibujar sólo dos elementos cuadrados. La disposición de los mismos se puede ver en la figura A.95. Aplicar a este croquis una operación de **Extruir corte** con la **Condición final** establecida en **Hasta el siguiente**. El sentido del corte será hacia el sentido negativo del eje y. (ver figura A.96).

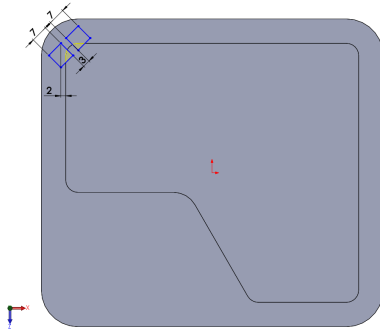


Figura A.95: Disposición del croquis.

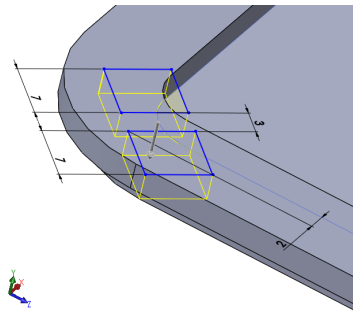


Figura A.96: Sentido de corte.

A continuación, seleccionar la herramienta **Matriz lineal**. En esta herramienta se deben introducir varios parámetros describiendo cómo se repetirá la operación que se ha realizado en el último paso. En primer lugar, en el desplegable **Dirección 1**, seleccionar como **Dirección de matriz** alguna arista del modelo paralela al eje x. Hacer lo mismo en la pestaña **Dirección 2**, pero con una arista paralela al eje y. De esta manera se definen las direcciones en las que se copiará la operación de corte realizada previamente.

De nuevo en la pestaña **Dirección 1**, en el recuadro de **Separación** introducir **14,14 mm** y en el **Número de instancias**, **9** (figura A.97). Repetir lo mismo en la pestaña **Dirección 2**, introduciendo **14,14 mm** y **8** instancias (ver figura A.98).



Figura A.97: Pestaña de dirección (1).

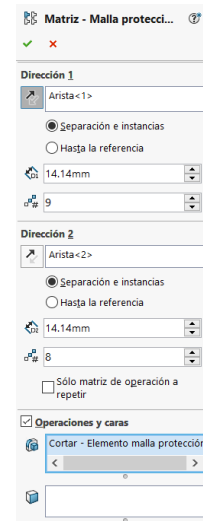


Figura A.98: Pestaña de dirección (2).

Por último, activar la pestaña **Operaciones y caras** y en el recuadro **Operaciones para la matriz** seleccionar la operación de corte que se llevó a cabo anteriormente. De esta manera se creará una matriz sobre el modelo en la que se repetirá la operación de corte a lo largo de las dos direcciones establecidas, repitiendo la operación tantas veces como se haya indicado. El resultado de aplicar la matriz se puede ver en la figura A.99.

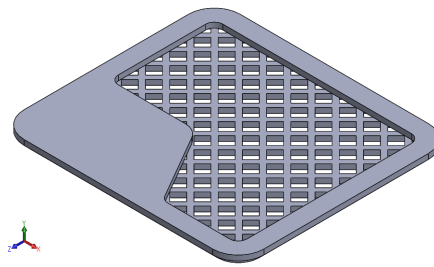


Figura A.99: Malla de protección.

En la figura A.99 se puede apreciar cómo se ha creado la malla en el modelo, pero ésta no ha respetado partes que antes eran macizas y se quiere que sigan siendo macizas, como por ejemplo el volumen que queda debajo del logo de la Escuela de Ingenierías Industriales. En la figura A.100 se muestra una vista de la cara trasera del modelo, donde se puede ver claramente que la malla se extiende más allá de los límites deseados.

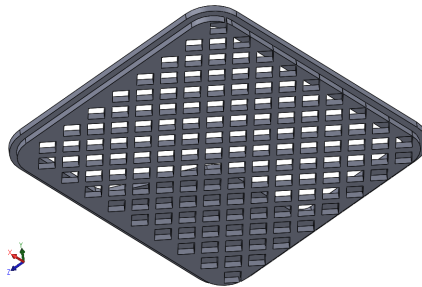


Figura A.100: Vista inferior de la malla.

Para solucionar esto, hace falta crear un nuevo croquis en el plano inferior de la cubierta y extruirlo en la dirección de la malla, de manera que se recomponga el volumen eliminado anteriormente. El **Croquis** correspondiente se puede ver en la figura A.101. Una vez creado el croquis, realizar una operación de **Extruir** a lo largo de una longitud de **3 mm** y en el sentido positivo del eje y. El resultado se muestra en la figura A.102.

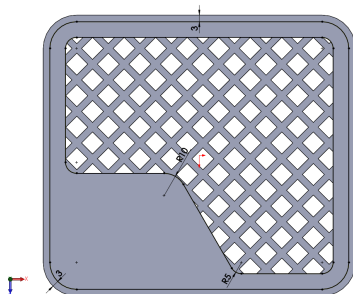


Figura A.101: Croquis borde parte trasera.

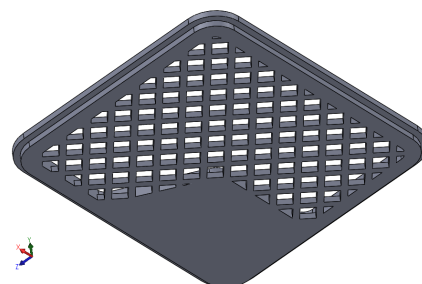


Figura A.102: Resultado de la reconstrucción de la parte trasera.

A continuación se van a modelar los logos, tanto del Departamento de Ingeniería de Siste-

mas y Automática como de la Escuela de Ingenierías Industriales<sup>11</sup>. Se comienza modelando el logo del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Crear un **Croquis** en el plano superior del modelo. El croquis que se va a dibujar se muestra en la figura A.103. Establecer las relaciones de colinealidad y de igualdad necesarias para definir completamente el dibujo.

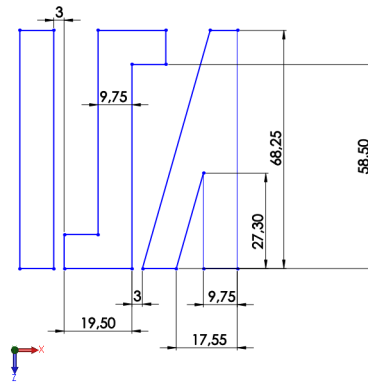


Figura A.103: Croquis ISA.

Este croquis está alineado con los ejes del modelo, pero se busca que esté algo girado. Para ello seleccionar, desde dentro del croquis, la herramienta **Girar entidades** (figura A.104). En el recuadro de **Entidades a girar**, seleccionar todas las líneas que conforman el croquis. Activar la casilla de **Conservar relaciones**<sup>12</sup>. Como **Centro de rotación** seleccionar el punto inferior izquierdo del croquis y en el recuadro de **Ángulo**, introducir el valor de  $-15^\circ$ . Con todo esto, el croquis debería quedar como el de la figura A.105.

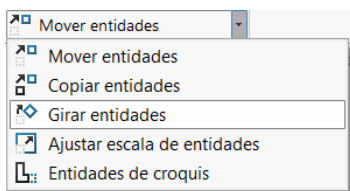


Figura A.104: Herramienta *Girar entidades*.

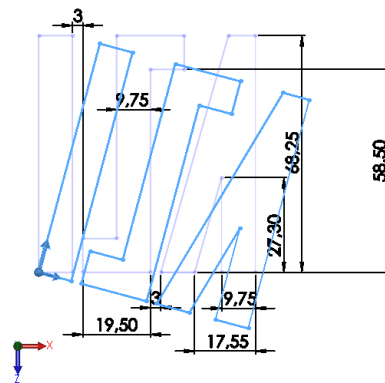


Figura A.105: Croquis tras el giro.

Una vez hecho el croquis, falta posicionarlo sobre el modelo. Como las relaciones mantienen el croquis unido, basta con acotar la posición de un punto cualquiera del mismo, por

<sup>11</sup>Las medidas han sido estimadas en base a diversas imágenes disponibles en Internet.

<sup>12</sup>Nótese que se eliminarán automáticamente las relaciones que causen contradicciones en el modelo, por ejemplo, la relación de *Horizontal* en una línea que quedará oblicua tras el giro.



Aplicar la operación de **Extruir corte** al croquis anterior con una **Profundidad especificada** de **3 mm**. El resultado de la operación se puede ver en la figura A.109.

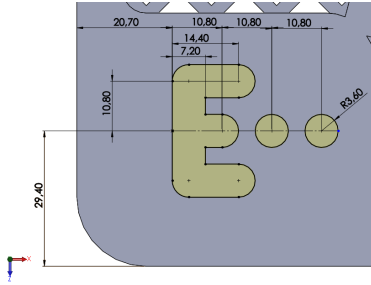


Figura A.108: Croquis EII.

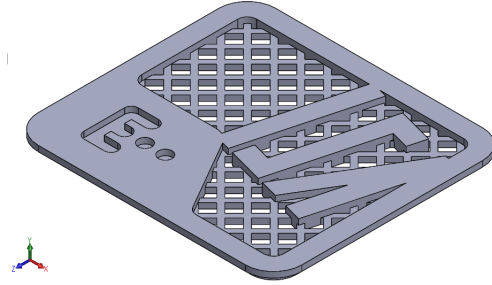


Figura A.109: Corte croquis EII.

Los siguientes elementos que se van a modelar de la cubierta van a ser los acoplamientos. Comenzar haciendo un **Croquis** en el plano inferior de la cubierta. El croquis se va a realizar en la esquina superior izquierda con la disposición y dimensiones que se pueden ver en la figura A.110. **Extruir** el soporte **6 mm** en el sentido positivo del eje y. La operación debe quedar como en la figura A.111.

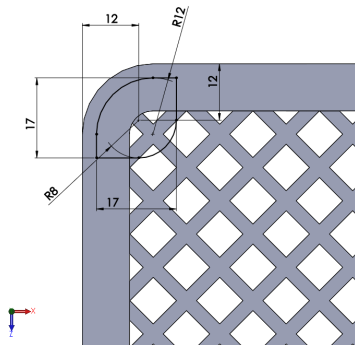


Figura A.110: Croquis del soporte.

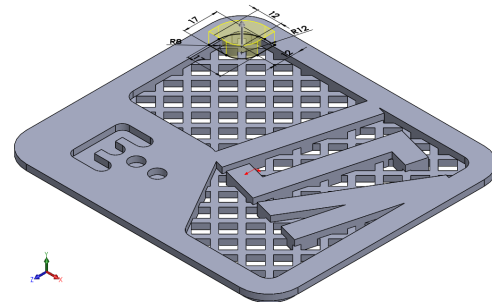


Figura A.111: Extruir soporte.

Como en el modelo hay otras dos esquinas<sup>14</sup> que necesitan tener modelado un soporte y como también presenta una cierta simetría, se hará uso de esta herramienta<sup>15</sup>. Una vez aplicadas las operaciones de **Simetría**, la cubierta debe quedar como en la figura A.112.

A continuación, se aplica una operación de **Redondeo** con un **Radio** de redondeo de **1,50 mm** para suavizar las aristas de los soportes (ver figura A.113).

Para poder acoplar el cierre a la carcasa, además de los soportes hacen falta una serie de ranuras y orificios. Para modelarlos, seleccionar la herramienta **Asistente para taladro**. En la pestaña de **Tipo**, hacer clic sobre el tipo **Avellanado**. Lo siguiente que hay que modificar en esta herramienta se encuentra en el desplegable de **Especificaciones de taladro**.

<sup>14</sup>La esquina inferior izquierda no va a necesitar el modelado de este elemento.

<sup>15</sup>Aplicar la herramienta dos veces consecutivas para tener las tres esquinas modeladas.

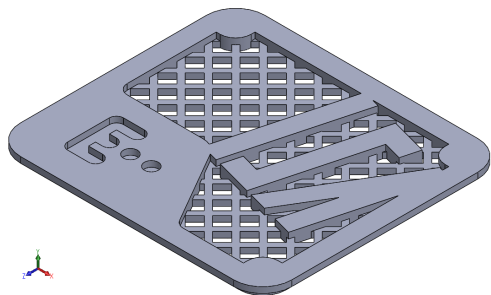


Figura A.112: Soportes tras la simetría.

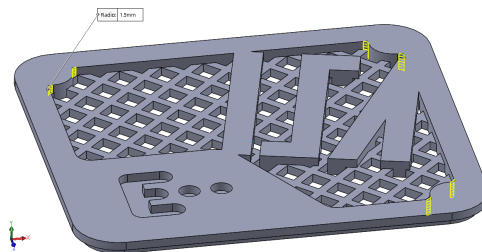


Figura A.113: Redondeo del radio de los soportes.

Activar la casilla de **Mostrar ajuste de tamaño personalizado**. En **Diámetro de taladro pasante** introducir **5 mm**. En **Diámetro de avellanado**, **10 mm** y en **Ángulo de avellanado**, **45°**. Por último en esta pestaña, dentro del desplegable de **Condición final**, seleccionar **Hasta el siguiente**.

Lo siguiente que hace falta definir son las posiciones en las que irán los taladros. Esto se define desde la pestaña de **Posiciones**. Una vez ahí, seleccionar como plano de croquis la cara superior del modelo. Situar entidades de tipo **Punto** en las posiciones que se indican en la figura A.114. En esta figura también se pueden ver los parámetros ya introducidos de la pestaña anterior.

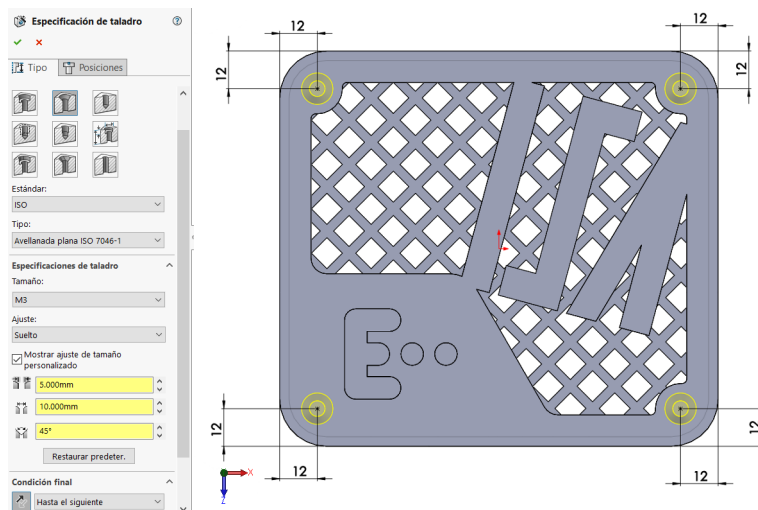


Figura A.114: Parámetros de los taladros.

El modelado sigue con el corte de las ranuras necesarias para el ensamblaje de las distintas piezas. Crear un **Croquis** como el que se muestra en la figura A.115 sobre la cara superior de la cubierta. Aplicar una operación de **Extruir corte** hasta la superficie inferior. El resultado de la operación se puede ver en la figura A.116.

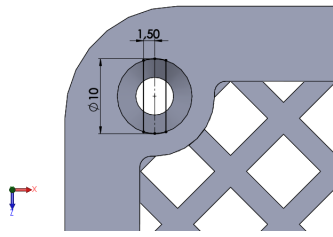


Figura A.115: Croquis de la ranura.

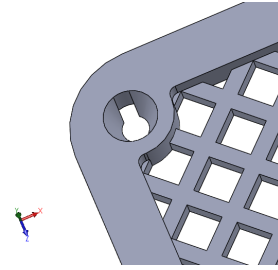


Figura A.116: Ranura del cierre del soporte.

Al igual que antes, utilizando la herramienta de **Simetría**, se copia la operación a cada una de las cuatro esquinas, quedando el modelo como en la figura A.117.

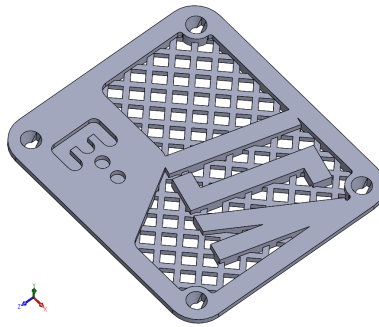


Figura A.117: Ranuras en todas las esquinas.

Para terminar con el modelado de la cubierta, basta con hacer una pequeña modificación al escalón que se modeló al principio del apartado. El motivo por el que se reajustan las medidas del mismo es para tener en cuenta las tolerancias de la impresión 3D. La modificación consiste en añadir una operación de **Extruir corte** en la base inferior de la cubierta. El **Croquis** consta de un dibujo del perfil del escalón, pero desfasado **0,40 mm** hacia el interior (figura A.118). A la hora de aplicar la operación de **Extruir corte**, a lo largo de una profundidad de **3 mm**, seleccionar como zona a cortar la que se extiende hacia el exterior del croquis activando la opción de **Invertir lado a cortar** (figura A.119).

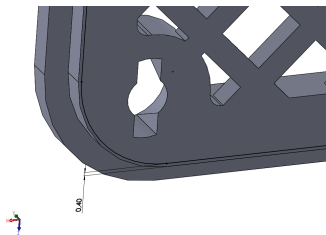


Figura A.118: Desfase del croquis.

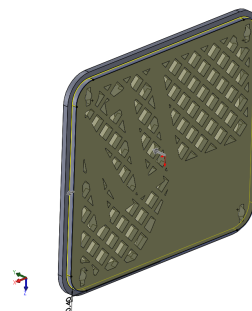


Figura A.119: Corte hacia el exterior.

El modelo terminado de la cubierta se puede ver en la figura A.120.

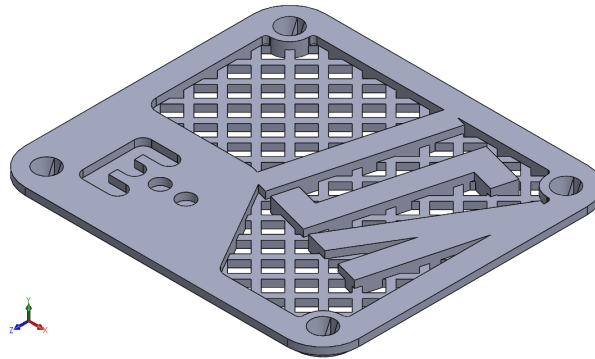


Figura A.120: Modelo terminado de la cubierta.

### A.3. 02 Acoplamiento base.SLDPRT

#### Modelado del acoplamiento con la base

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Sobre el plano de **Planta** crear un **Croquis**. El croquis constará de un **Rectángulo** de **140 x 126 mm** (figura A.121). **Extruir** dicho croquis **4 mm** en la dirección positiva del eje y (figura A.122).

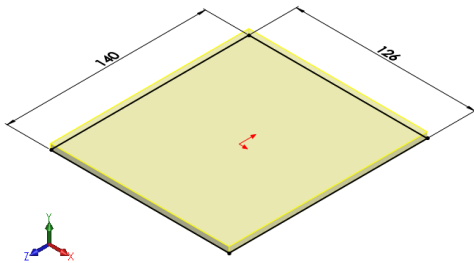


Figura A.121: Croquis del rectángulo.

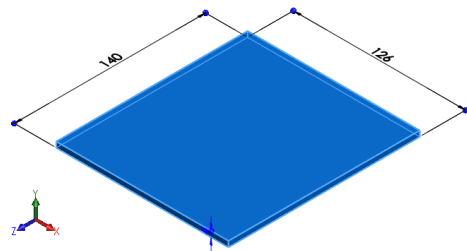


Figura A.122: Extrusión del croquis.

A continuación, se recorta con la operación **Extruir corte** en la esquina superior derecha el **Croquis** de un **Rectángulo** de **37,50 x 19,40 mm**. El resultado de la operación se puede ver en la figura A.123.

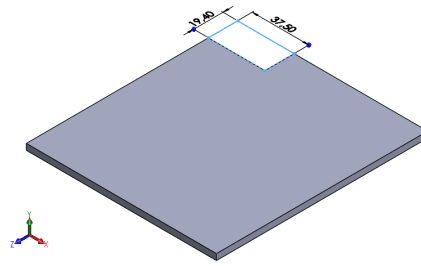


Figura A.123: Recortar esquina.

La siguiente operación que se debe llevar a cabo consiste en un **Redondeo** con un **Radio** de **15 mm** de las aristas que se muestran en la figura A.124. Del mismo modo, redondear las esquinas del rectángulo que se recortó anteriormente, con un **Radio** de **5 mm**, según se muestra en la figura A.125.

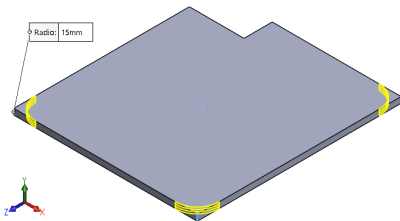


Figura A.124: Redondeo esquinas grandes.

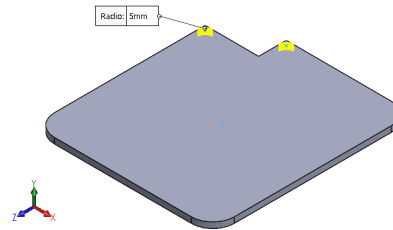


Figura A.125: Redondeo aristas del corte.

Crear un **Croquis** en la cara superior del modelo. Aquí se dibujarán los surcos que van a permitir el acoplamiento entre la carcasa y una base. El croquis acotado se puede ver en la figura A.126.

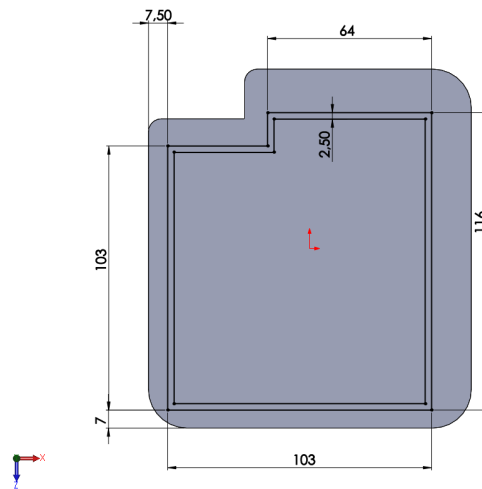


Figura A.126: Croquis de los surcos.



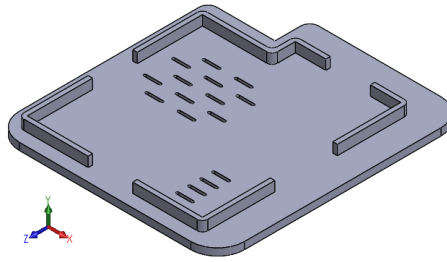


Figura A.131: Modelo con ventilación.

A continuación, crear un **Croquis** en la cara inferior del modelo y con las cotas de la figura A.132 crear cuatro agujeros con un diámetro de **2,20 mm**. Aplicar la operación de **Extruir corte** al croquis, quedando el modelo como en la figura A.133.

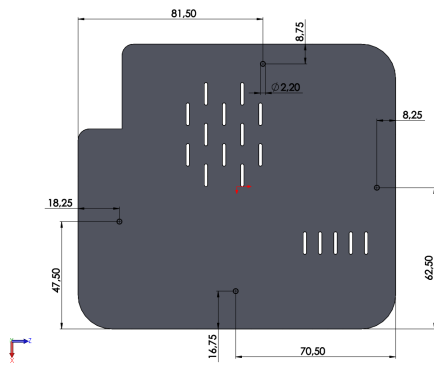


Figura A.132: Taladros de la sujeción.

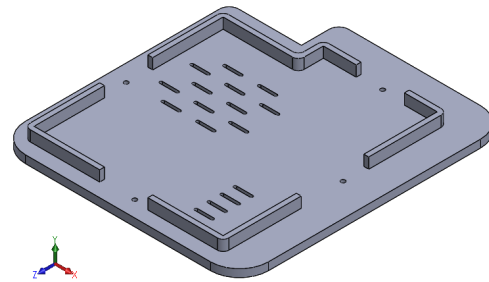


Figura A.133: Taladros efectuados.

El siguiente paso consiste en el modelado de unos huecos para fijar una serie de tuercas, al igual que en el apartado A.1. Los parámetros para el modelado de estos huecos se pueden ver en la figura A.19. Irán situados bajo cada uno de los taladros antes realizados. El resultado tras aplicar una operación de **Extruir corte** a lo largo de una profundidad de **2,50 mm** y tras aplicar a las aristas de los huecos anteriores un **Redondeo** de **0,7 mm** como en la figura A.30 se puede ver en la figura A.134.

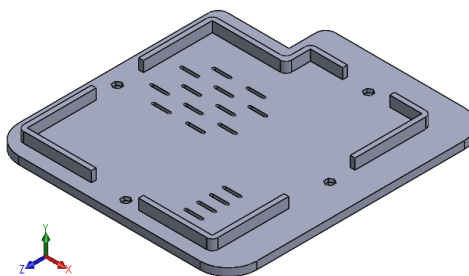


Figura A.134: Resultado tras efectuar el corte para las tuercas.

Por último, faltan por hacer cuatro orificios en el modelo. Crear un **Croquis** en la cara superior del modelo y dibujar cuatro **Círculos** con un diámetro de **11 mm** en las posiciones que vienen acotadas en la figura A.135. Tras esto, realizar un **Corte** con el croquis anterior a lo largo de toda la superficie. El aspecto del modelo final se puede ver en la figura A.136.

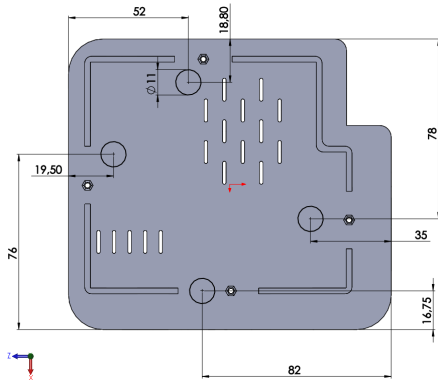


Figura A.135: Croquis huecos apoyos silicona.

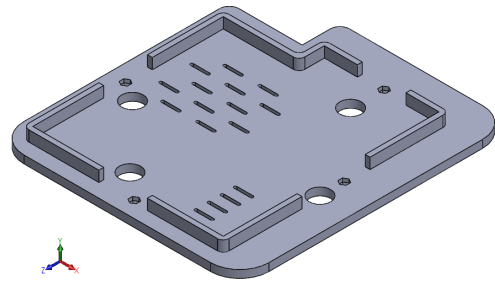


Figura A.136: Modelo terminado del acoplamiento con la base.

## A.4. 03 Llave.SLDPRT Modelado de la llave de cierre

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Sobre el plano de **Planta** crear un **Croquis** como el que se muestra en la figura A.137. A continuación, realizar una operación de **Extruir**. En **Condición final** introducir **Plano medio** y en **Profundidad**, **2,80 mm** (figura A.138).

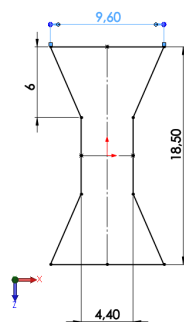


Figura A.137: Croquis principal de la llave.

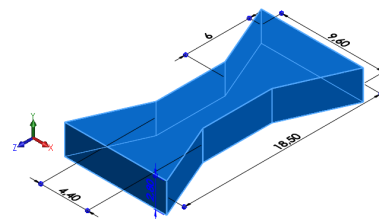


Figura A.138: Extrusión del croquis de la llave.

Sobre el plano de **Planta**, crear un **Croquis** como el que se muestra en la figura A.139<sup>17</sup>. Este croquis sirve como base para realizar una operación de **Corte de revolución** (figura A.140).

<sup>17</sup>Nótese que la recta vertical es auxiliar, esto es, de tipo *Para construcción*.

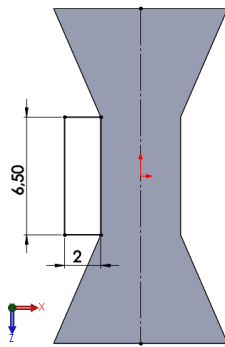


Figura A.139: Vista del croquis.

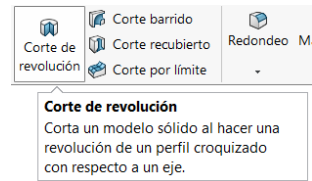


Figura A.140: Operación de *Corte de revolución*.

En esta operación, introducir en el recuadro de **Ángulo** el valor de **360°**. La operación se verá como en la figura A.141 y el resultado será el que se muestra en la figura A.142.

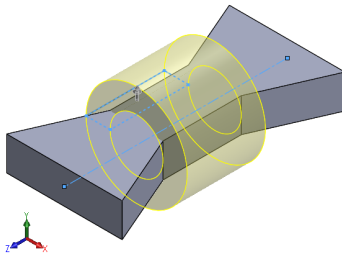


Figura A.141: Proceso de aplicación de la operación de corte de revolución.

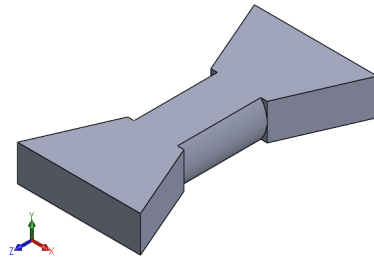


Figura A.142: Resultado de la operación.

El siguiente paso consiste en suavizar las aristas de la parte cónica de la pieza. Para ello crear un **Croquis** en el plano de **Planta**. Las dimensiones del croquis se muestran en la figura A.143. Aplicar de nuevo la operación de **Corte de revolución**, obteniéndose el resultado de la figura A.144.

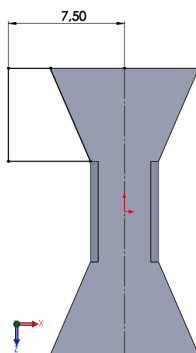


Figura A.143: Croquis para el suavizado de las aristas.

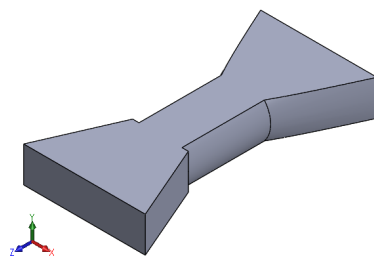


Figura A.144: Corte de revolución superior.

Finalmente, tras utilizar la herramienta de **Simetría** para copiar la última operación que se ha llevado a cabo, el modelo quedará terminado como se muestra en la figura A.145.

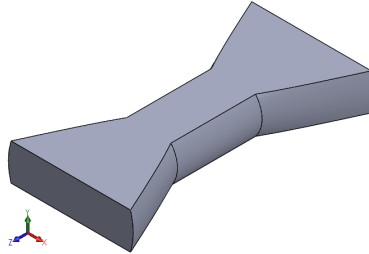


Figura A.145: Modelo terminado de la llave.

## A.5. 04 Apoyo silicona.SLDPRT Modelado de los apoyos adhesivos de silicona

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Sobre el plano de **Vista lateral** crear un **Croquis** igual al que se facilita en la figura A.146. Seleccionar el croquis y aplicar una operación de **Revolución** seleccionando como **Eje de revolución** la recta vertical (figura A.147).

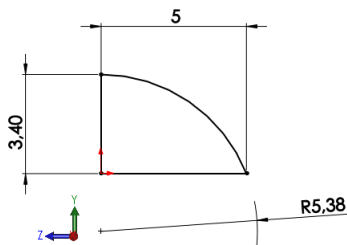


Figura A.146: Croquis del apoyo de silicona.

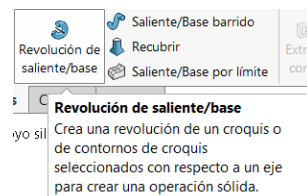


Figura A.147: Operación *Revolución*.

El resultado final del modelado se muestra en la figura A.148.

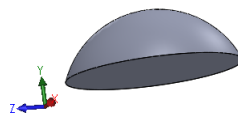


Figura A.148: Modelo terminado del apoyo adhesivo de silicona.

## A.6. Modelado de los elementos de fijación y ensamble

Al comienzo del apartado A.10. de [31] se explica detenidamente cómo acceder a los elementos de fijación y ensamble que proporciona SolidWorks. A continuación, se mostrarán los tres componentes elegidos para el correcto ensamblaje de los elementos del modelo.

### A.6.1. 05 Tornillo placa.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Pernos y tornillos > Tornillos con cabeza ranurada > Cabeza chata ranurada ISO 1207

- **Tamaño:** M1.6
- **Longitud:** 10
- **Longitud de rosca:** 10

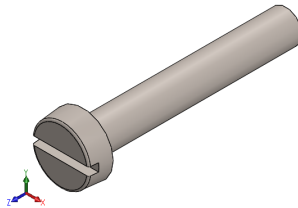


Figura A.149: Tornillo placa.

### A.6.2. 06 Tuerca placa.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Tuercas > Tuercas hexagonales > Tuerca hexagonal tipo 1 ISO – 4032

- **Tamaño:** M2
- **Finalizar:** Chaflán doble

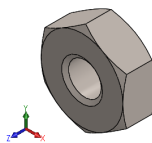


Figura A.150: Tuerca placa.

### A.6.3. 07 Tornillo motor.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Pernos y tornillos > Tornillos con hendidura en cruz > Ranura en cruz con cabeza cilíndrica ISO 7045

- **Tamaño:** M2.5
- **Longitud:** 8
- **Longitud de rosca:** 8

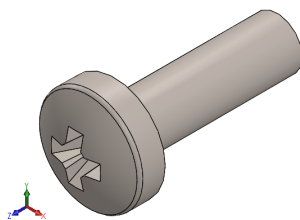


Figura A.151: Tornillo motor.

## A.7. Modelado y modificación de elementos adicionales

Los tres elementos adicionales que son necesarios para una visualización más clara del modelo son el motor, la placa Arduino y el Arduino Motor Shield.

Gracias a estos elementos, a la hora de realizar en ensamblaje se tendrá una mejor percepción de las proporciones de la carcasa, además de facilitar el diseño de la misma al poder modificar fácilmente la disposición de los elementos dentro de ella.

Todo el proceso de modelado del motor se ha realizado tomando las medidas directamente del mismo. En cambio, los modelos tanto de la placa Arduino como del Motor Shield se han obtenido de Internet. A pesar de esto, los modelos descargados no se corresponden de manera completa con las placas reales que se han usado en este TFG. Esto puede deberse a que los modelos de Internet están basados en versiones anteriores o no modificadas de las placas. Por lo tanto, ha hecho falta un proceso de **modificación** y **adaptación** de los **modelos** descargados de Internet para que describan de manera acertada los elementos reales utilizados.

Dado que los siguientes elementos no son estrictamente necesarios para el modelado de la carcasa, se comentarán brevemente tanto el modelado como la modificación de los mismos sin entrar tanto en detalle como en las piezas de los apartados anteriores.

### A.7.1. 08 Motor makeblock.SLDPRT Modelado del motor Makeblock

Las dimensiones más características del modelo son:

- **Diámetro tramo inicial reductora:** 24,40 mm (figura A.152)
- **Diámetro unión reductora-eje:** 7 mm (figura A.153)
- **Diámetro protector sensor:** 27 mm (figura A.154)
- **Longitud motor:** 63,70 mm (figura A.155)

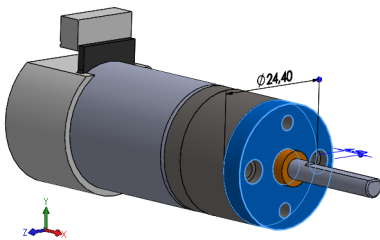


Figura A.152: Reductora del motor.

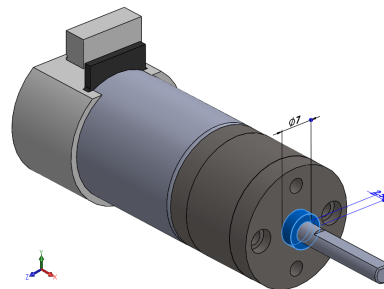


Figura A.153: Unión del eje.

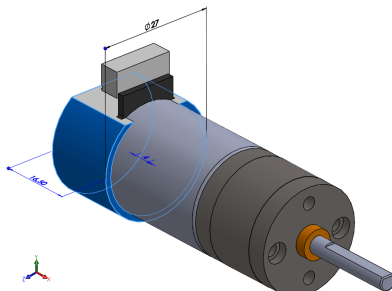


Figura A.154: Protector del sensor.

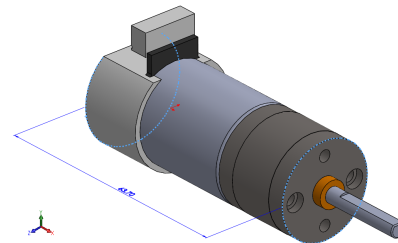


Figura A.155: Longitud del motor.

### A.7.2. 09 Arduino mega 2560.SLDPRT Modificaciones de la placa Arduino Mega 2560

Para poder utilizar el modelo en el trabajo, es necesario realizar una serie de modificaciones al modelo original<sup>18</sup>.

En primer lugar se realiza una modificación estética. Se decide ocultar la imagen de la placa Arduino que el modelo muestra superpuesta con la propia pieza. Esto se puede modificar desde **Pestaña DisplayManager > Ver calcomanías**.

A continuación, se procede a realizar las modificaciones de la geometría del modelo:

<sup>18</sup>Ver [26] - Arduino MEGA 2560.

- Se traslada el botón de reinicio de la placa desde el centro de la placa hasta la esquina superior izquierda (figura A.156)<sup>19</sup>.

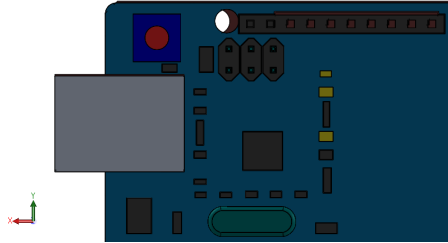


Figura A.156: Modificación del botón de reinicio.

- En la hilera superior para la conexión de pines, se añaden en el primer tramo de la izquierda dos pines más, teniendo así un total de 10 pines en el primer tramo (figura A.157). En el tramo inferior izquierdo se añaden dos pines más, pasando de 6 pines a 8 (figura A.158).

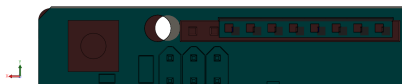


Figura A.157: Modificación de los pines superiores.



Figura A.158: Modificación de los pines inferiores.

- Se modifica la disposición de los taladros de la placa destinados a la fijación en la carcasa. Las medidas que se han utilizado se pueden ver en [32]<sup>20</sup> (figura A.159).

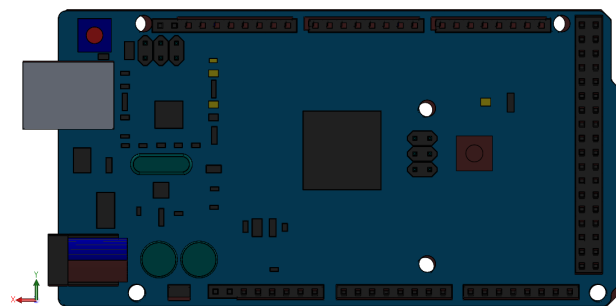


Figura A.159: Modificación de los taladros.

<sup>19</sup>Las figuras de este apartado muestran una superposición del modelo sin modificar y del modelo modificado, permitiéndose así una mejor visualización de las modificaciones.

<sup>20</sup>En el plano no viene recogida la cota horizontal entre los dos orificios inferiores. Se ha considerado una cota de 82.62 mm.

### A.7.3. 10 Arduino motor shield.SLDPRT

#### Modificaciones del Motor Shield de Arduino

A continuación, se describen las modificaciones que se han realizado al modelo original<sup>21</sup>:

- Se reduce el diámetro del botón de reinicio (figura A.160).

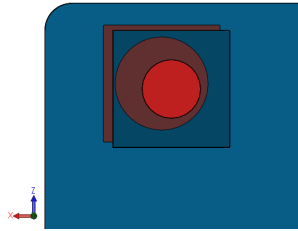


Figura A.160: Modificación del botón de reinicio del Motor Shield.

- Modificación de los pines, pasando a ser rectangulares en lugar de circulares (figura A.161).

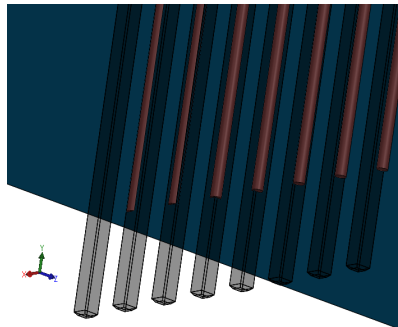


Figura A.161: Modificación de los pines de conexión.

- Se crea un chaflán en los orificios de entrada para la conexión de los pines con la placa (figura A.162).

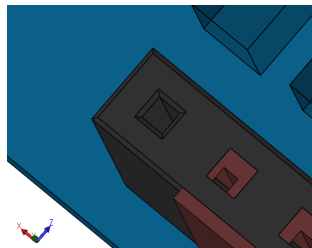


Figura A.162: Modificación chaflán.

---

<sup>21</sup>Ver [27] - Arduino Motor Shield.

- Se modifica la posición y la geometría de los agujeros de conexión de los pines, y también la de los propios pines, de manera que se puedan acoplar sin problemas y de manera correcta la placa de Arduino y el Motor Shield (figuras A.163 y A.164).



Figura A.163: Modificación de los pines superiores del Motor Shield.

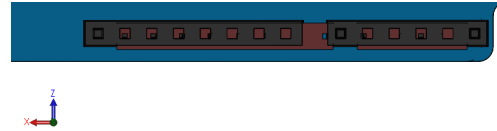


Figura A.164: Modificación de los pines inferiores del Motor Shield.

- La posición de los taladros se cambia para que sea coherente con la posición de los taladros en la placa de Arduino (figura A.165).

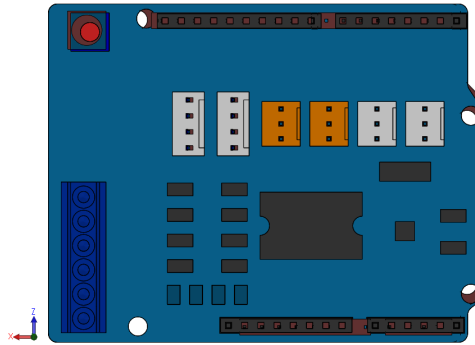


Figura A.165: Modificación de los taladros del Motor Shield.

## A.8. Ensamblaje del modelo

Una vez terminadas todas las piezas que conforman el modelo, hace falta definir cómo se posicionan unas respecto a otras en el modelo real. De esto se encarga la sección de **Ensamblaje** de SolidWorks. Los primeros pasos necesarios para crear un ensamblaje, para posicionar la primera pieza del mismo y para introducir el resto de piezas se muestran con mayor detenimiento en la primera parte del apartado A.11. de [31].

Tras crear un **Nuevo** archivo de **Ensamblaje** (figura A.166), SolidWorks pedirá que se inserte la primera pieza del mismo. Esta pieza suele ser una pieza *importante* dentro del modelo y sobre la cual se irán ensamblando el resto de piezas. En este ensamblaje se ha considerado que la pieza idónea para introducir en primer lugar es el archivo que se ha guardado con el nombre de **00 Cuerpo principal.SLDPRT**, que se corresponde con el modelo del cuerpo principal de la carcasa. Para incluir la pieza dentro del archivo, hacer clic en cualquier parte del espacio de trabajo. Esto hará que se pueda empezar a añadir piezas al modelo.

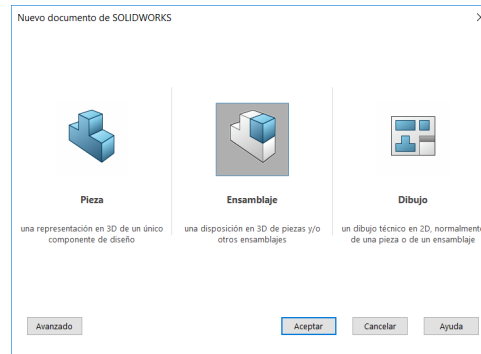


Figura A.166: Ventana de nuevo ensamblaje.

La forma de ensamblar piezas en SolidWorks consiste en ir añadiendo elementos al ensamblaje y definir las **Relaciones de posición** (figura A.167) que mantienen las piezas entre sí. Hasta que éstas no sean definidas, las piezas se pueden mover por el espacio de trabajo ya que no se habrán fijado sus diferentes grados de libertad. La única pieza que desde el principio está fija en el espacio de trabajo es la primera pieza que se ha añadido al ensamblaje, en este caso el cuerpo principal de la carcasa. Se puede ver que una pieza está fija si junto a su nombre aparece una **(f)**. En caso contrario, aparecerá un **(-)**.

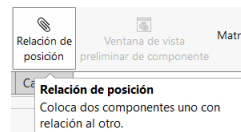


Figura A.167: Herramienta de *Relación de posición*.

Como el cuerpo principal de la carcasa ha sido la primera pieza en ser añadida, estará fija. La cuestión es que no se sabe exactamente dónde se ha fijado ya que éste punto se ha establecido al hacer clic en el espacio de trabajo. Para mantener el ensamblaje ordenado se va a establecer dicho punto en el origen del ensamblaje. Es necesario por tanto hacer que la carcasa principal deje de ser fija. Esto se consigue haciendo clic derecho sobre el modelo y seleccionando la opción **Flotar** (figura A.168).

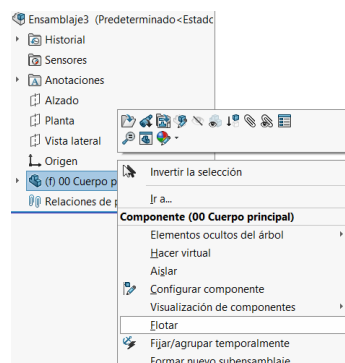


Figura A.168: Flotar.

La pieza dejará de estar fija. Esto se puede apreciar ya que delante del nombre ya no tendrá (f) sino (-). Para fijar el origen de la pieza en el del ensamblaje, hacer clic sobre el desplegable con el nombre de la pieza en el **Gestor de diseño**. Dentro del mismo se podrá ver un elemento con el nombre de **Origen**, se trata del origen de la pieza. Una vez hecho esto, seleccionar el origen del ensamblaje<sup>22</sup> y pulsando la tecla *CTRL* seleccionar el origen de la pieza. Aparecerá justo debajo del puntero una ventana emergente con las **Relaciones de posición** que se pueden definir según los elementos seleccionados. En este caso la relación de posición que se busca es la de **Coincidente** (figura A.169). Seleccionarla y ambos orígenes se superpondrán.

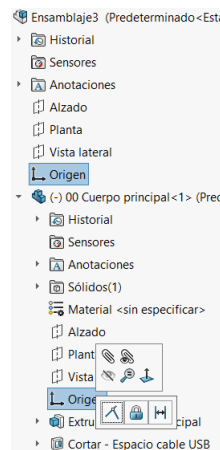


Figura A.169: Coincidir orígenes.

Falta volver a fijar la pieza. Para ello hacer clic con el botón derecho del ratón sobre la misma y seleccionar **Fijar** (figura A.170). De esta manera la pieza volverá a ser fija (ver figura A.171).

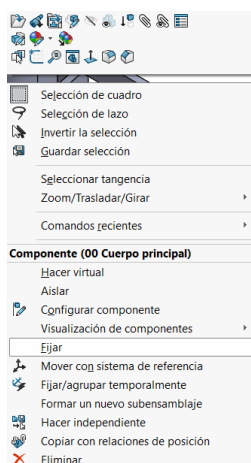


Figura A.170: Fijar.

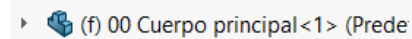


Figura A.171: Pieza fijada.

A continuación, se va a **Insertar** en el ensamblaje la placa de Arduino. En la pestaña de

<sup>22</sup>Se encuentra justo encima del desplegable con el nombre de la pieza.

**Ensamblaje** hacer clic sobre **Insertar componentes** (figura A.172) y sobre **Examinar...** Para insertar la placa seleccionar el archivo guardado con el nombre **09 Arduino mega 2560.SLDPRT**.

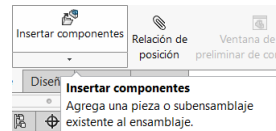


Figura A.172: Insertar componentes.

Como se puede ver en la figura A.173, la orientación de la placa no es la correcta. Para modificarla hay varias opciones, pero la más rápida consiste en hacer uso de las herramientas de giro que proporciona SolidWorks cada vez que se introduce una pieza nueva en el ensamblaje. Estas herramientas aparecen automáticamente en la esquina inferior izquierda del espacio de trabajo al insertar una nueva pieza y *antes* de hacer clic en algún lugar del mismo para insertarla definitivamente (ver figura A.173). Esta herramienta permite el giro en cada uno de los tres ejes globales y, por defecto, el ángulo de giro es de  $90^\circ$ , aunque éste se puede modificar. En el caso de este ensamblaje, rotar el modelo **una vez** respecto al **eje x** y **dos veces** respecto al **eje y**. El modelo de la placa debe quedar como se muestra en la figura A.174.

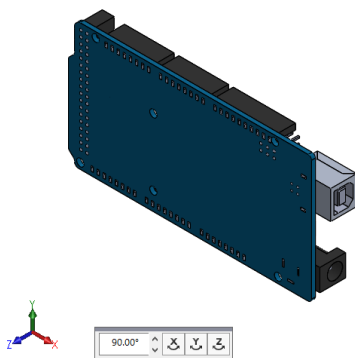


Figura A.173: Orientación original de la placa Arduino.

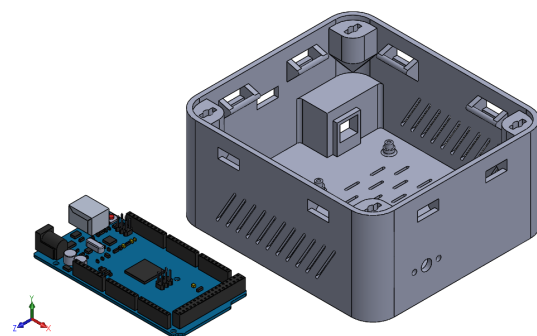


Figura A.174: Orientación deseada de la placa Arduino.

Para fijar en posición la placa dentro de la carcasa hace falta definir tres relaciones de posición. En primer lugar, seleccionar la cara interior de uno de los taladros de la placa y, pulsando la tecla *SHIFT*, seleccionar la cara interior del taladro homólogo en la carcasa (figuras A.175 y A.176). A continuación, definir una relación de **Concéntrica**. Repetir el mismo proceso para cualquiera de los otros taladros de la placa Arduino<sup>23</sup>.

<sup>23</sup>En este ensamblaje se ha seleccionado el taladro derecho inferior de la placa.

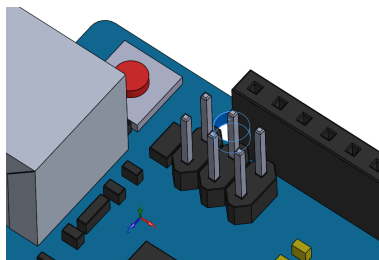


Figura A.175: Cara interior del taladro de la placa.

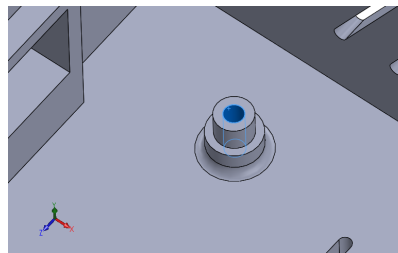


Figura A.176: Cara interior del taladro de la carcasa.

Definidas estas relaciones, seleccionar la cara inferior de la placa Arduino y la cara superior de uno de los apoyos del fondo de la carcasa destinados a soportar la placa (figura A.177). Definir una relación de **Coincidente**, quedando el modelo como en la figura A.178.

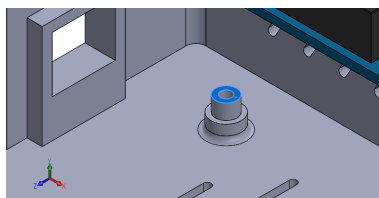


Figura A.177: Cara superior del soporte.

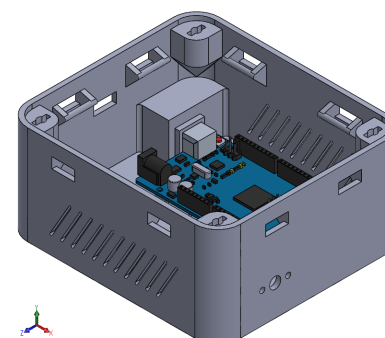


Figura A.178: Placa Arduino en posición.

Se puede ver como llegado a este punto el modelo estará de nuevo **completamente definido**. Esto se puede apreciar tanto en el gestor de diseño como en el espacio de trabajo. En el **Gestor de diseño** habrán desaparecido de delante del nombre de las piezas el signo que indica que una pieza no está completamente definida en el espacio. Del mismo modo, en la esquina inferior derecha del **Espacio de trabajo** se podrá ver el mensaje **Completamente definida**.

Como la placa de Arduino ya está en posición, el siguiente paso consiste en definir las relaciones entre los elementos de sujeción de la placa y la carcasa. Insertar en el ensamblaje la pieza con el nombre de **05 Tornillo placa.SLDPRT**. De nuevo, estará orientada de manera incorrecta. Rotar hasta que esté orientada verticalmente.

La posición de esta pieza se puede definir con dos relaciones de posición. Seleccionar la cara cilíndrica mayor que conforma el cuerpo del tornillo y la cara interior cilíndrica de uno de los agujeros de la carcasa. Establecer la relación de **Concéntrica**. Además, se deberá activar una casilla con la opción de **Bloquear rotación**. Esto impedirá que, aunque el tornillo sea concéntrico al taladro, pueda girar (ver figura A.179).

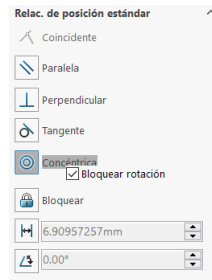


Figura A.179: Bloquear rotación.

Para terminar de definir la posición del tornillo, seleccionar la cara inferior de la cabeza del mismo y la cara superior de la placa Arduino. Establecer una relación de **Coincidente** entre ambas caras, quedando el modelo como en la figura A.180.

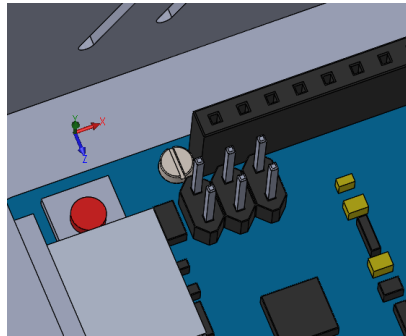


Figura A.180: Tornillo en posición.

Insertar en el ensamblaje la pieza con el nombre **06 Tuerca placa.SLDPRT** con el eje del agujero central paralelo al eje y. Seleccionar la cara interior del agujero de la tuerca y la cara cilíndrica del tornillo anterior y establecer la relación de **Concéntrica**. Del mismo modo, seleccionar una de las caras laterales de la tuerca y una de las caras laterales planas de los orificios hechos para las tuercas en la parte inferior de la carcasa. Definir una relación de **Paralela**. El modelo, que aún no está completamente definido, se puede ver en la figura A.181.

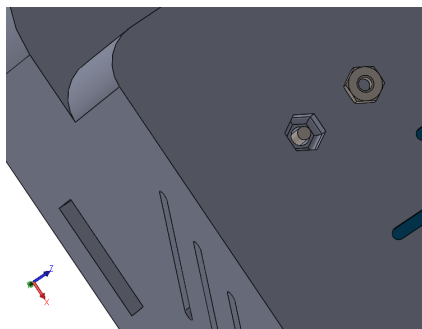


Figura A.181: Posición intermedia de la tuerca.

Seleccionar la cara plana de la tuerca más cercana a la cara inferior de la carcasa y la

arista del orificio de la carcasa según se muestra en la figura A.182. Establecer una relación de **Coincidente** entre ambos elementos, quedado así la tuerca en posición.

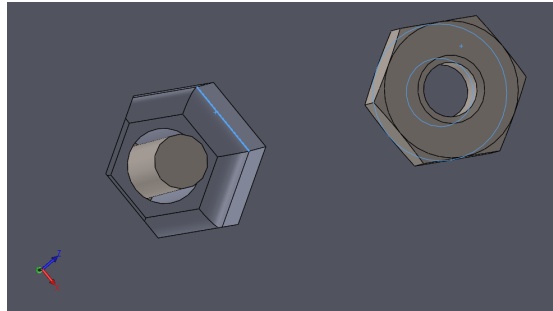


Figura A.182: Selección de la arista.

Repetir este proceso para los 5 orificios restantes de la placa Arduino. Para ello se pueden volver a insertar los elementos o, para copiar un elemento ya insertado en el ensamblaje, pulsar la tecla *CTRL*, pulsar dentro del espacio de trabajo sobre la pieza que se quiera copiar y manteniendo tanto la tecla *CTRL* como el clic del ratón, arrastrar. De esta manera se duplica una pieza. Haciendo esto y definiendo el resto de relaciones, el modelo debe quedar como en la figura A.183<sup>24</sup>.

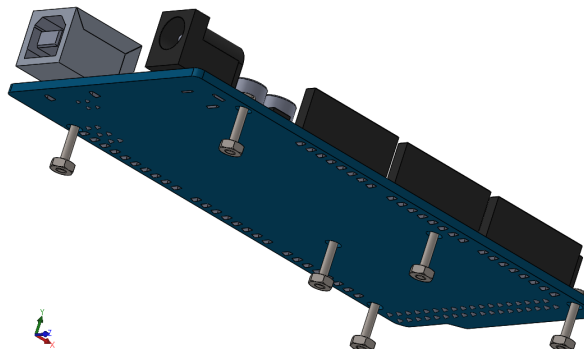


Figura A.183: Tornillos y tuercas en posición.

La siguiente pieza que se va a insertar en el ensamblaje será **10 Arduino motor shield.SLDPRT**. De nuevo, será necesario rotarla hasta que esté en posición dentro del ensamblaje. Como las patillas de la pieza son rectangulares, basta con definir las relaciones de posición de tres de las caras para que la posición de la pieza esté completamente definida. Seleccionar una de las caras laterales de una de las patillas del Motor Shield y la cara interior homóloga del orificio correspondiente de la placa de Arduino, estableciendo la relación de **Coincidente** (figura A.184).

<sup>24</sup>Se ha ocultado la carcasa para poder ver las seis uniones con mayor facilidad.

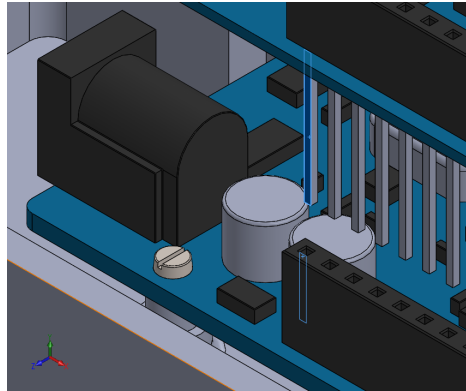


Figura A.184: Caras laterales de los pines.

Hacer lo mismo con la cara contigua del mismo pin. Finalmente, seleccionar la cara inferior del pin y la cara inferior del interior del orificio para el pin, estableciendo de nuevo una relación de **Coincidente** (figura A.185).

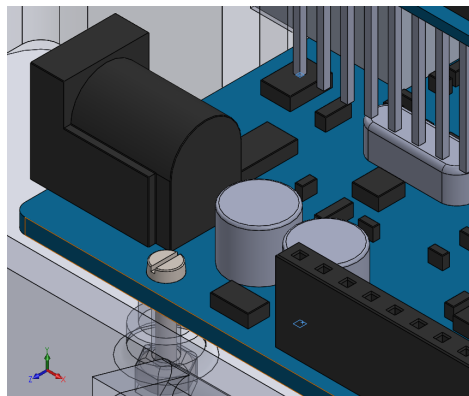


Figura A.185: Cara del extremo del pin.

El modelo debe quedar como se muestra en la figura A.186.

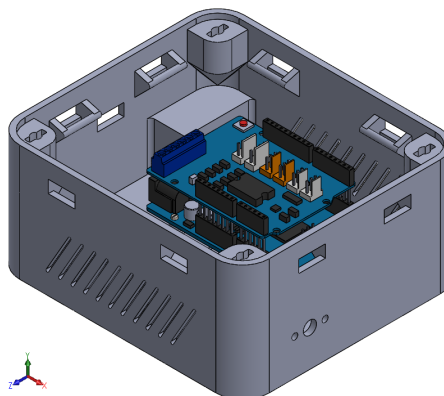


Figura A.186: Modelo con Motor Shield.

Insertar en el modelo la pieza **08 Motor makeblock.SLDPRT** en posición. Seleccionar la cara cilíndrica interior de uno de los taladros con menor diámetro y la cara homóloga en la carcasa (figura A.187) y definir una relación de **Concéntrica**. Hacer lo mismo con el otro taladro. Por último, seleccionar la cara frontal del motor y la cara interior de lateral derecho de la carcasa. Establecer una relación de **Coincidente**, quedando el modelo como en la figura A.188.



Figura A.187: Caras interiores de los taladros del motor.

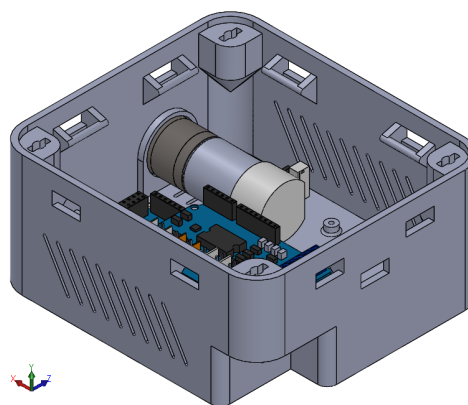


Figura A.188: Modelo con el motor.

Seguidamente, insertar la pieza **07 Tornillo motor.SLDPRT** y disponerlo en posición. Se puede fijar su posición con una relación de **Concéntrica** con **Bloquear rotación** y con otra relación de **Coincidente** entre las caras planas de la cabeza del tornillo y la cara exterior de la carcasa. El resultado final, tras duplicar la pieza y definir de nuevo las relaciones de posición, se puede ver en la figura A.189.

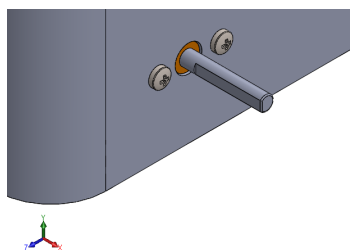


Figura A.189: Modelo con los tornillos de sujeción del motor.

La siguiente pieza que se va a insertar en el ensamblaje es **02 Acoplamiento base.SLDPRT**. La orientación de la pieza debe ser la correcta para poder establecer con facilidad las relaciones de posición. Para definir la posición de la pieza en el modelo, hacer **Concéntricos** dos taladros del acoplamiento con los dos taladros correspondientes de la carcasa. Bastará, entonces, definir una relación de **Coincidente** entre la cara superior del acoplamiento y la inferior de la carcasa, quedando el modelo como el mostrado en la figura A.190.

Al igual que la placa Arduino, el acoplamiento de la base va ensamblado con el resto de la carcasa mediante una unión de tornillo y tuerca. Repetir el mismo proceso que se mostró

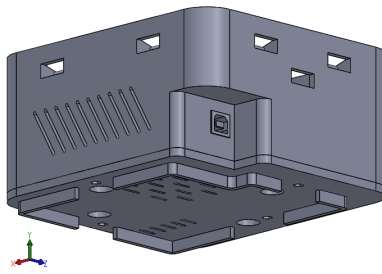


Figura A.190: Modelo con el acoplamiento base.

anteriormente para fijar la posición de los cuatro tornillos y tuercas que se encargan de sujetar el acoplamiento de la base con la carcasa. El resultado se puede ver en la figura A.191<sup>25</sup>.

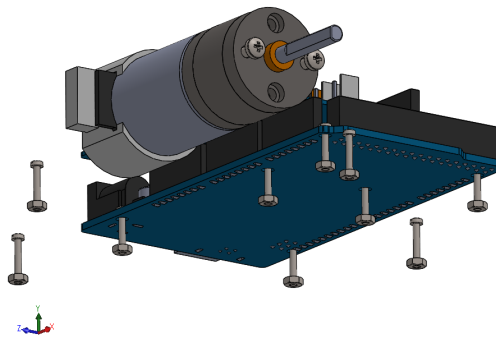


Figura A.191: Modelo con todos los tornillos.

Una vez insertado el acoplamiento con la base, se va a insertar la pieza **04 Apoyo silicona.SLDPRT**. Seleccionar la arista circular del apoyo y la cara cilíndrica interior de los taladros más grandes del acoplamiento con la base (figura A.192). Establecer una relación de **Concéntrica**, además de activar la casilla de **Bloquear rotación**. A continuación, seleccionar la cara plana del apoyo de silicona y la cara inferior de la carcasa (figura A.193), estableciendo una relación de **Coincidente** entre ambas.

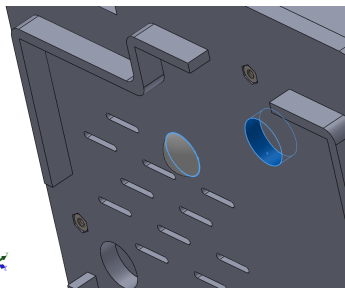


Figura A.192: Selección de elementos.

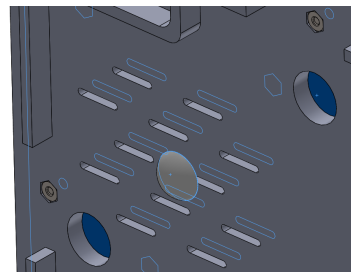


Figura A.193: Selección de las caras planas.

<sup>25</sup>Se han ocultado piezas para facilitar la visualización de las uniones atornilladas.

Tras todo esto, el modelo debe quedar como se muestra en la figura A.194.

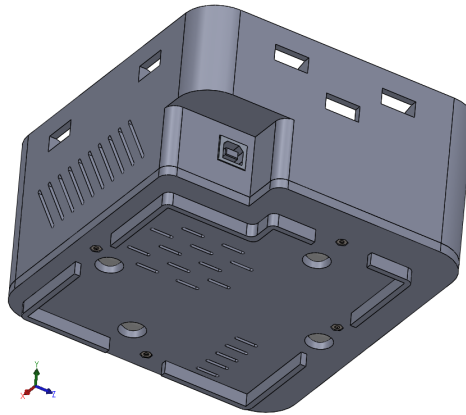


Figura A.194: Modelo con los apoyos de silicona.

Llegados a este punto, sólo falta por insertar la cubierta de la carcasa y las uniones que la mantendrán en posición. Por tanto, insertar la pieza **01 Cubierta.SLDPRT**. Seleccionar la cara lateral superior derecha de la cubierta y, del mismo modo, la cara lateral exterior derecha de la carcasa (figura A.195). Establecer una relación de **Coincidente** entre ambas caras. Hacer lo mismo con las caras del lateral frontal (figura A.196).

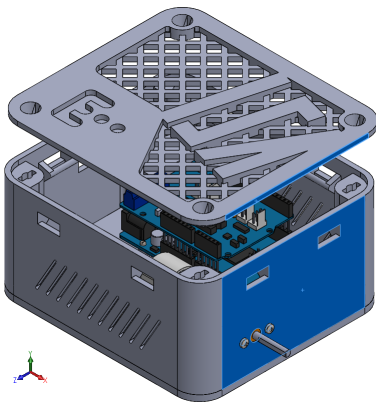


Figura A.195: Selección de las caras laterales.

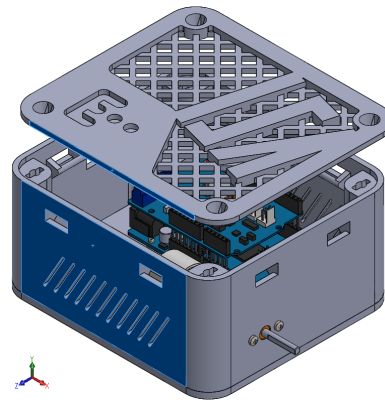


Figura A.196: Selección de las caras frontales.

Para terminar de definir la posición de la cubierta, seleccionar la cara inferior de la cubierta que se muestra en la figura y la cara del reborde de la carcasa (también mostrada en la figura A.197). Establecer entre ambas caras una relación de **Coincidente**. El modelo, ensamblado hasta este punto, se puede ver en la figura A.198.

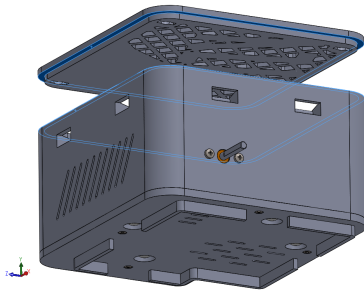


Figura A.197: Selección de caras de la carcasa y el cierre.

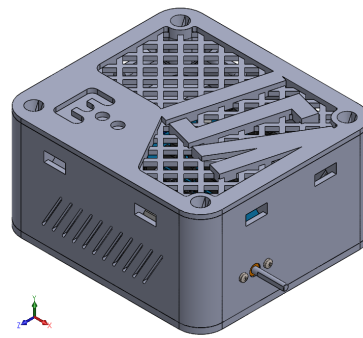


Figura A.198: Modelo con la cubierta.

A continuación, insertar la pieza **03 Llave.SLDPRT** con la orientación apropiada. Seleccionar las dos caras curvas que se muestran en la figura A.199 y establecer entre ellas una relación de **Concéntrica** activando también la casilla de **Bloquear rotación**. Seguidamente, seleccionar la cara superior de la llave y la cara superior de la cubierta (figura A.200) y establecer una relación de **Coincidente** entre ellas.

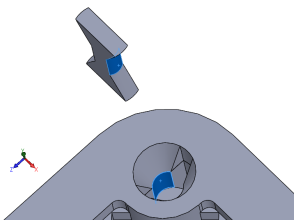


Figura A.199: Selección caras curvas.

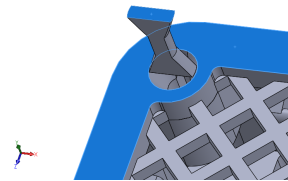


Figura A.200: Selección de otras dos caras.

Repetir este proceso para los otros tres orificios. Una vez terminado este último paso, el modelo ensamblado y completo debe quedar igual que el modelo que se muestra en las figuras A.201 y A.202.

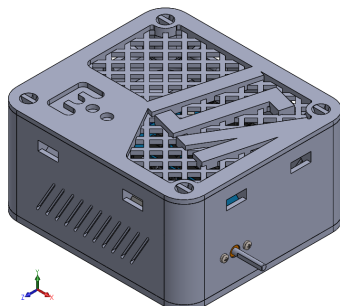


Figura A.201: Ensamblaje completo terminado.

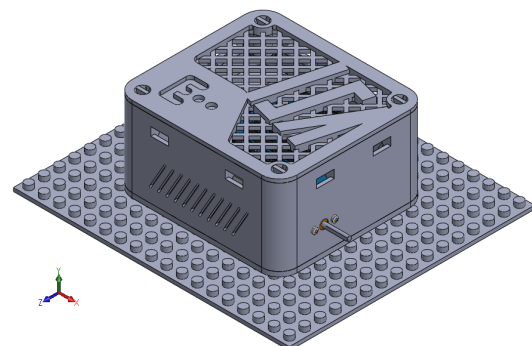


Figura A.202: Ensamblaje con la superficie del laboratorio.

# Anexo B

## Modificaciones y pruebas de impresión 3D

### B.1. Introducción

Este Anexo complementa con imágenes y fotografías las modificaciones comentadas en el apartado 3.6 del Capítulo 3 y, además, añade imágenes y fotografías de las pruebas de impresión realizadas antes de obtener el modelo final impreso en 3D.

Antes de mostrar las imágenes y poder comentarlas, es necesario introducir dos conceptos:

- **Soportes:** en la impresión 3D FDM, cada capa se forma al adherirse material fundido a las capas ya existentes y las que le rodean. Cada capa puede tener un cierto desfase respecto de la anterior, lo que permite que se puedan imprimir modelos con planos de hasta  $45^\circ$ .

Cuando algún elemento de una pieza se tiene que imprimir con una inclinación de más de  $45^\circ$ , ésta puede combarse y romperse, por lo que hace falta que algún material de soporte aguante la pieza (ver figura B.1).

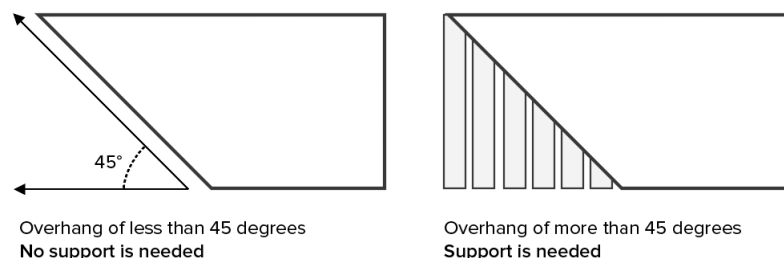


Figura B.1: Soportes en ángulos mayores de  $45^\circ$  [22].

- **Puentes:** a pesar de lo comentado en el punto de los soportes, cuando dos puntos están muy próximos, se puede aplicar material fundido y unirlos sin ningún soporte. Esto es conocido como *realizar puentes*. Como norma general, si se desea un acabado

suficientemente aceptable, no se deben realizar puentes para huecos mayores de 5 mm.

## **B.2. Modificaciones del modelo para la impresión en 3D**

La razón principal por la que se realizaron las modificaciones de la figura 3.24 a la 3.31 del capítulo 3 es la de evitar tener que añadir soportes. Haciendo estas modificaciones se consigue imitar el efecto de los mismos, pero sin ser una solución temporal y sin tener que realizar un postprocesado, obteniendo un mejor resultado final.

Por otro lado, en la figura 3.33 de ese mismo capítulo, se puede ver cómo se le ha dado solución al problema de tener que aplicar soportes en toda la cara inferior del modelo, o tener que realizar muchos puentes, con el peor acabado superficial que eso supone. En la figura B.13 se puede ver cómo es el acabado cuando una superficie está formada en su totalidad por puentes.

Por último, la solución dada en la figura 3.35 trata de evitar que en la cara vista de la cubierta se tengan que disponer soportes, como se debería hacer en la figura 3.34. Al hacer esto se consigue que la cara vista de la cubierta esté completamente lisa y no necesite de ningún postprocesado.

## **B.3. Pruebas de impresión**

Las pruebas de impresión se realizaron para ir comprobando el diseño de las piezas y para evaluar la tolerancia de la propia impresora. Con los resultados de cada una de las pruebas, se iba modificando el diseño de las piezas hasta lograr el resultado deseado. Se realizaron un total de tres pruebas de impresión, en las que se trataba de minimizar tanto el gasto de material como el tiempo de impresión.

### **B.3.1. Primera prueba de impresión**

En esta primera prueba se trató de obtener en una pieza lo más reducida posible todas las peculiaridades del diseño: soporte para los cables, ventilación, llave, logo, cubierta, surcos en la parte inferior, taladro y tuerca. Se pueden ver en las figuras B.2 y B.3 las piezas que se imprimieron en esta primera prueba de impresión.

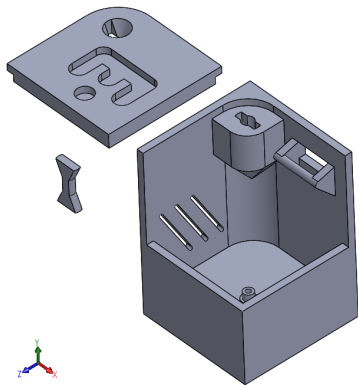


Figura B.2: Vista superior de la primera prueba.

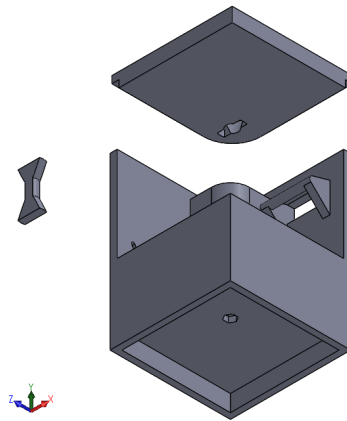


Figura B.3: Vista inferior de la primera prueba.

En la figura B.4 se facilita una vista general de la pieza principal impresa.

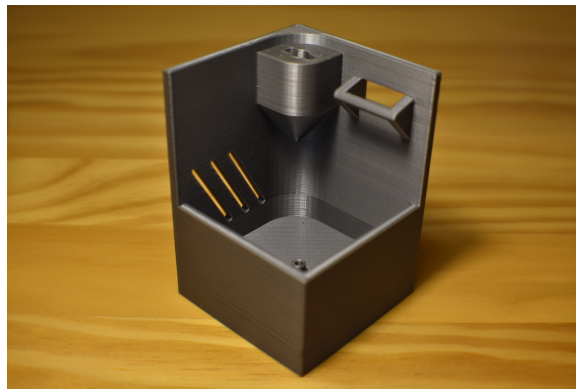


Figura B.4: Vista general modelo impreso.

En las figuras B.5 y B.6 se muestran las dos caras de la cubierta y la llave.

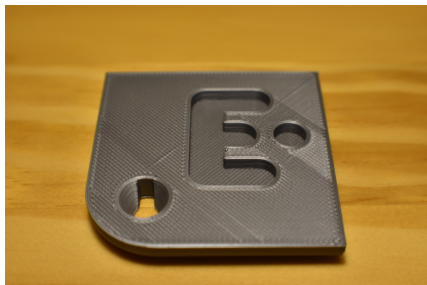


Figura B.5: Vista superior de la cubierta.

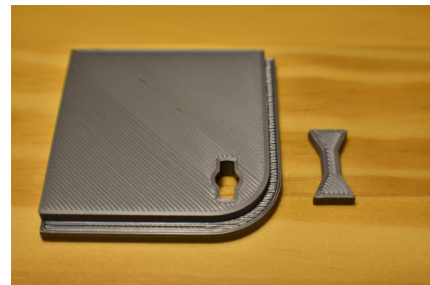


Figura B.6: Vista inferior de la cubierta y llave.

En la figura B.7 se puede ver como en el diseño inicial de la llave no se tuvo en cuenta la tolerancia necesaria para que dos piezas puedan acoplarse entre sí con cierta holgura. Esto

se solucionó, en primer lugar, reduciendo el ancho de la misma en 0,4 mm.

Por otro lado, en la figura B.8 se pueden ver los puentes que se han hecho en la cara inferior, haciendo que el acabado superficial no sea suficientemente aceptable. Esto se solucionará más adelante.

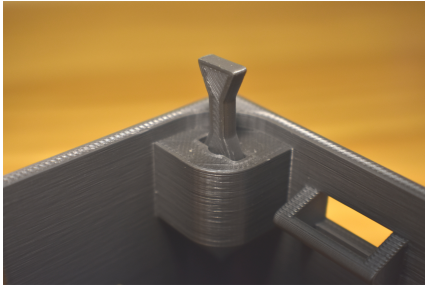


Figura B.7: Llave sin tolerancia tenida en cuenta.

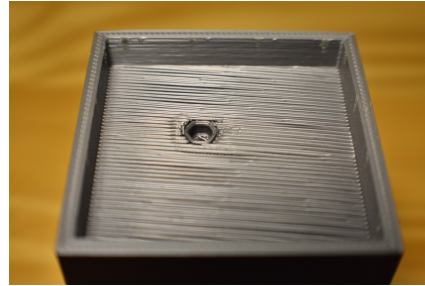


Figura B.8: Puentes en la cara inferior.

### B.3.2. Segunda prueba de impresión

En la segunda prueba se buscaba comprobar qué tal se imprimían otros elementos que no se incluyeron en la primera prueba. Se volvió a imprimir la llave para ver si los cambios habían sido acertados. Los elementos que se incluyeron fueron: hueco para la conexión USB, taladros para fijar la placa Arduino, topes laterales de la placa, soporte y fijación para el motor, ventilación inferior y los surcos de toda la base para comprobar la fijación con la superficie soporte del laboratorio. En las figuras B.9 y B.10 se pueden ver todos estos elementos.

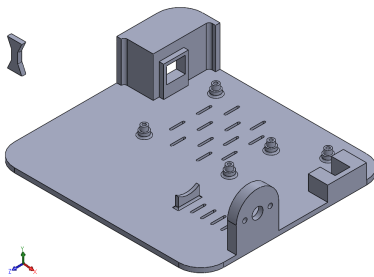


Figura B.9: Vista superior de la segunda prueba.

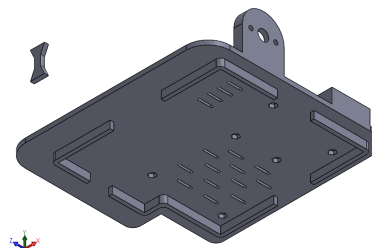


Figura B.10: Vista inferior de la segunda prueba.

En las figuras B.11 y B.12 se pueden ver dos vistas generales de la pieza ya impresa.

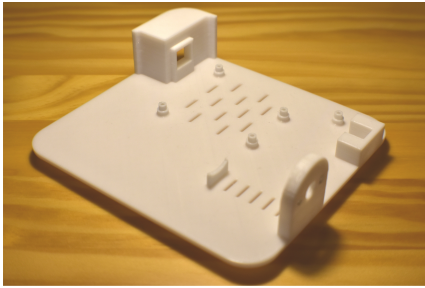


Figura B.11: Vista general del modelo impreso (1).

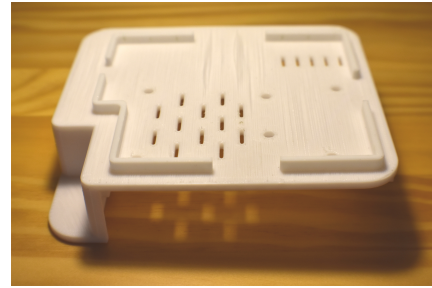


Figura B.12: Vista general del modelo impreso (2).

Se puede apreciar en la figura B.12, y con mayor detalle en las figuras B.13 y B.14, que los puentes en la parte inferior hacen que el acabado de la pieza no sea excesivamente bueno, a pesar de que la pieza es completamente funcional. Es por esto por lo que se deciden separar del cuerpo principal los surcos de acoplamiento con la base, quedando así definido el diseño de una nueva pieza (ver apartado 2.3.3 del Capítulo 2).

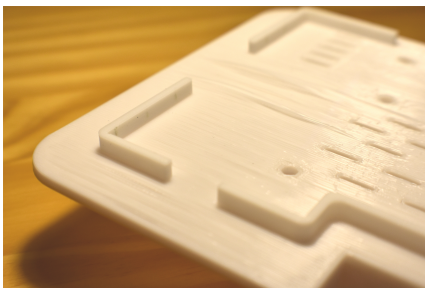


Figura B.13: Vista de los puentes de la cara inferior (1).

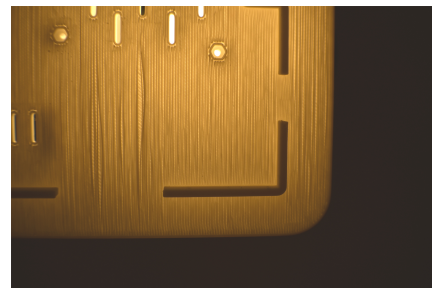


Figura B.14: Vista de los puentes de la cara inferior (2).

Por otro lado, el soporte para fijar en posición el motor era demasiado estrecho, además de que los taladros (ver figura B.15) y los orificios para fijar la placa Arduino estaban ligeramente desfasados de su posición real.



Figura B.15: Fractura del taladro para la sujeción del motor.

Los cambios realizados al modelo se listan a continuación:

- Se vuelven a modificar las dimensiones de la llave.
- Los soportes de la derecha de la placa Arduino se acortan 0,8 mm.
- Se amplía el diámetro de los taladros para los tornillos de sujeción del motor, pasando de 3 mm a 3,4 mm de diámetro.
- Se amplía en 0,8 mm el diámetro interior del soporte del motor.
- Se amplía en 0,4 mm la altura de la entrada de la conexión USB.
- Se modifica la posición de 4 de los 6 taladros para acoplar la placa a la carcasa.
- Se eliminan los surcos del cuerpo principal y se crea la nueva pieza.

Con estos cambios, se procede a realizar la tercera y última prueba de impresión.

### B.3.3. Tercera prueba de impresión

Se trata de la última de todas las pruebas de impresión. Con las piezas impresas se busca comprobar si los cambios implementados son correctos. En las figuras B.16 y B.17 se pueden ver los modelos de las piezas a imprimir.

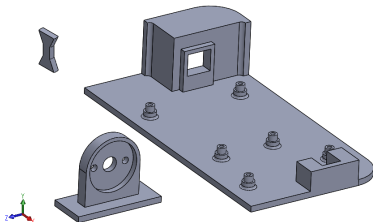


Figura B.16: Vista superior de la tercera prueba.

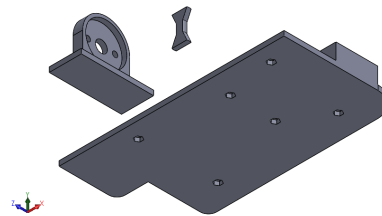


Figura B.17: Vista inferior de la tercera prueba.

En las figuras B.18 y B.19 se pueden ver las piezas impresas en la tercera prueba.

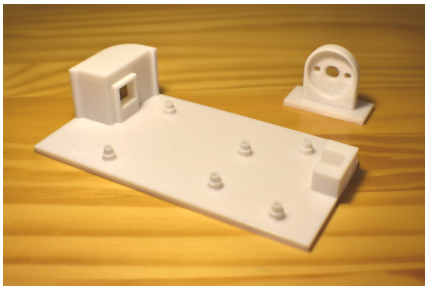


Figura B.18: Vista general del modelo impreso (1).

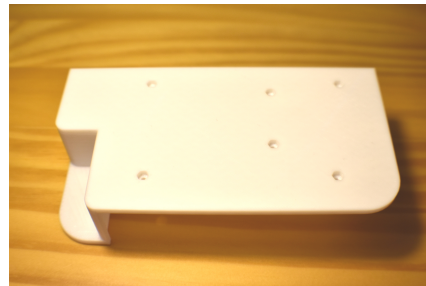


Figura B.19: Vista general del modelo impreso (2).

Se comprueba que son correctas las medidas de la tercera prueba, y por lo tanto son las que se le aplican al modelo final.

Por otro lado, se puede comentar que las paredes de las piezas realmente no son macizas. Esto se hace así para ahorrar tanto tiempo como material. Para obtener la fotografía de la figura B.20 se colocó la pieza impresa en la tercera prueba a contraluz, pudiéndose ver así el entramado de la estructura interna. En la esquina superior derecha de la pieza también se pueden apreciar ligeramente los puentes realizados para poder imprimir la zona de la conexión USB.

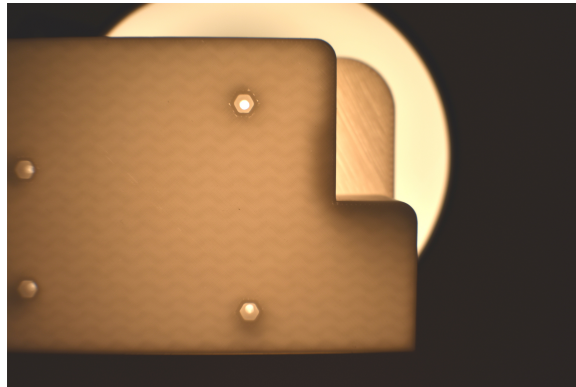


Figura B.20: Entramado de la estructura interna y puentes.



# Anexo C

## Caracterización del motor

Para llevar a cabo la caracterización del motor, es necesario realizar unos pasos previos. Estos pasos permitirán que se pueda establecer una comunicación entre la placa Arduino, el Motor Shield, el motor de c.c. y el ordenador.

El programa con el que se realiza la caracterización es MATLAB. En este trabajo se ha utilizado la versión 2017a.

### C.1. Preparación del equipo y conexiones

El proceso de conexionado interno entre las placas y el motor se puede ver desarrollado en [25]<sup>1</sup>.

Partiendo de que ya están realizadas las conexiones internas<sup>2</sup>, se resume en los siguientes puntos el proceso de conexión entre el equipo y el ordenador que se utilizará en las prácticas. Igualmente, se supone que se ha instalado correctamente el *Arduino Toolbox* dentro de MATLAB [25]<sup>3</sup>, así como los *drivers* necesarios que pudieran hacer falta en el ordenador.

- Con las conexiones internas realizadas correctamente, se recomienda, en primer lugar, abrir MATLAB.
- Desde MATLAB, cambiar el directorio en que se trabaja. Esto es debido a que a la hora de compilar los archivos, MATLAB debe tener permisos de escritura en la carpeta en la que esté trabajando. Por defecto, en la carpeta en que MATLAB trabaja, no se tienen permisos de escritura. Esto generará un error a la hora de compilar el programa. Además, se recomienda que se cree una carpeta exclusivamente para guardar los archivos de compilación, ya que son bastantes y esto puede dificultar el trabajo dentro de una carpeta.

---

<sup>1</sup>Capítulo 5, apartado 5.1.

<sup>2</sup>En las prácticas esta será la situación desde la que partirán los alumnos, a quienes se les facilitará el equipo ya dispuesto correctamente dentro de la carcasa, pero sin conectar con el ordenador.

<sup>3</sup>Anexo I.

- A continuación, introducir en el puerto USB del ordenador el cable que lo conectará con la placa Arduino. Si la conexión se ha realizado estando MATLAB abierto, debe aparecer en la *Ventana de comandos* un mensaje como el que se muestra en la figura C.1. Esto nos muestra que el ordenador y MATLAB han reconocido la placa Arduino correctamente.

```

Arduino Mega 2560 detected.
This device is ready for use with Simulink Support Package for Arduino Hardware. Get started with examples
To use this device with MATLAB, install MATLAB Support Package for Arduino Hardware.

fx >> |

```

Figura C.1: Mensaje de detección del Aruino en MATLAB.

- Si se ha instalado correctamente el *Arduino Toolbox*, pero al conectar la placa con el ordenador no aparece ningún mensaje en MATLAB, puede ser que haga falta cambiar el *Puerto COM*. Para esto, buscar el **Administrador de dispositivos** en el menú de Windows. Una vez abierto, expandir el desplegable **Puertos (COM y LPT)**. Junto al nombre de **Dispositivo serie USB** debe aparecer la palabra **COM** seguida de un número (ver figura C.2). Anotar este número para completar el siguiente paso.

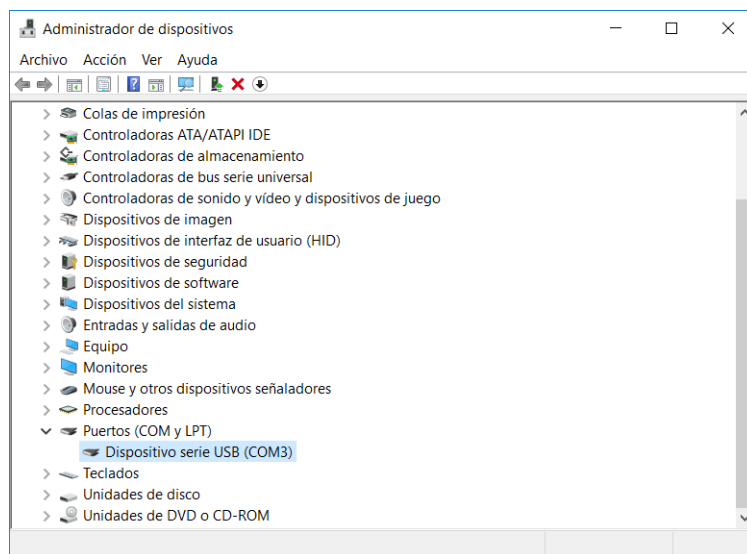


Figura C.2: Dispositivo serie USB.

Anotado el número, abrir **Simulink** desde MATLAB, y hacer clic en **Configuración Parameters** (un icono con forma de engranaje). A continuación, dentro de la ventana que debe haber aparecido, seleccionar **Hardware Implementation** y pulsar sobre el desplegable de **Device details**. Navegar entre las opciones que se mostrarán junto a una barra deslizante hasta llegar a **Host-board connection**. Establecer el desplegable **Set host COM port** en **Manually** y escribir en el recuadro **COM port number** el número de puerto que se anotó previamente.

Pulsar sobre **OK** y se guardará la configuración (ver figura C.3).

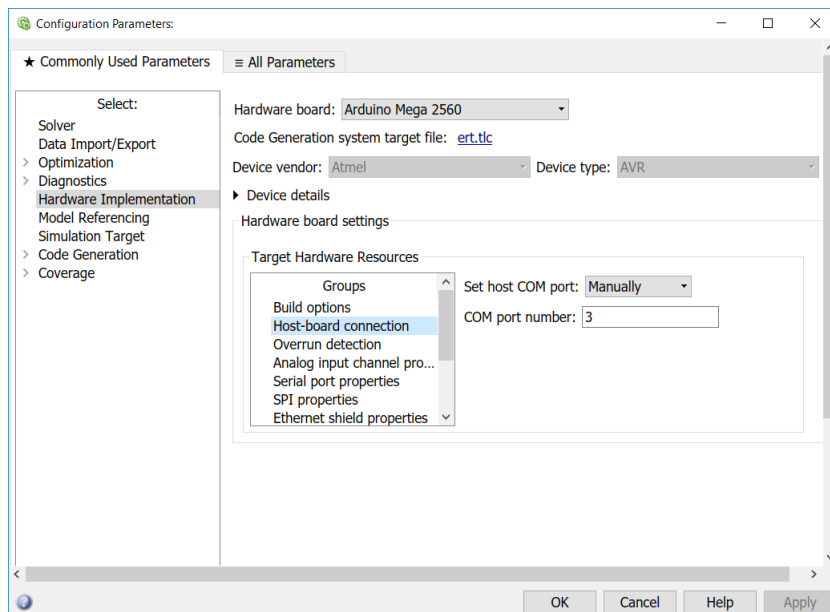


Figura C.3: Modificar puerto COM.

Si ha hecho falta realizar este proceso, se recomienda que siempre que se conecte la placa Arduino al ordenador sea utilizando el mismo puerto USB para evitar que reaparezca este problema.

- Una vez conectada la placa Arduino, se debe programar el *encoder* que hará posible la comunicación entre el ordenador y la placa Arduino MEGA. El *encoder* utilizado en [25], y en el presente trabajo, se obtuvo de [33] y se adaptó al equipo de prácticas. El proceso de instalación del mismo se puede ver en el Anexo II de [25].
- Cuando se quiera desconectar la placa Arduino del ordenador, se recomienda cerrar MATLAB y, a continuación, desconectar la alimentación y desenchufar la conexión USB.

## C.2. Comentario sobre el pin $V_{in}$ Connect del Arduino Motor Shield

El pin  $V_{in}$  Connect conecta la placa del Arduino MEGA 2560 con el Motor Shield.

En la página oficial de Arduino [34] se recomienda que en el caso de que se vaya a alimentar un motor con el Motor Shield a una tensión por encima de 9V se separen las líneas de alimentación de la placa y del motor.

Para realizar esta separación de líneas se debe cortar la conexión entre dos piezas llamadas *solder pads* que se encuentran en la cara inferior del Motor Shield. En la figura C.4 se muestra esta pieza en el diagrama del Motor Shield [35] y en la figura C.5 una imagen

tomada desde la cara inferior del mismo.

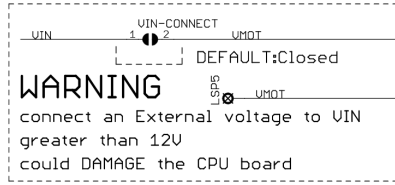


Figura C.4: Solder pads en el diagrama.

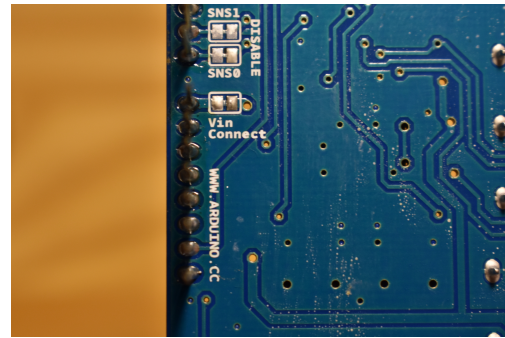


Figura C.5: Solder pads en la placa.

La separación se puede realizar con una herramienta de corte y rompiendo físicamente la conexión entre las *solder pads*. En caso de que se quiera conectar de nuevo la alimentación de la placa y del motor, basta con añadir un poco de estaño fundido entre las dos *solder pads* [36].

En este trabajo se decide no separar las alimentaciones por dos razones. La primera, porque se va a trabajar con tensiones inferiores<sup>4</sup> a 9 V y la segunda, porque para poder hacer comparaciones con el TFM se quiere mantener el equipo sin modificarlo para que estas comparaciones sean lo más ajustadas a la realidad.

### C.3. Aclaraciones sobre el diagrama en Simulink y la representación de los datos

#### C.3.1. Aclaraciones del diagrama en Simulink

A continuación se detallan dos cambios que se han realizado al diagrama de SIMULINK utilizado para realizar la caracterización del motor (figuras C.6 y C.7).

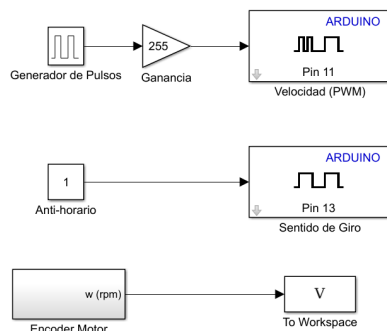


Figura C.6: Esquema completo SIMULINK.

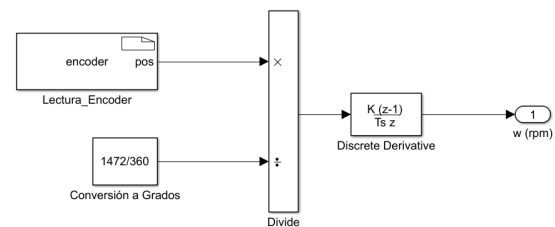


Figura C.7: Esquema del *encoder*.

<sup>4</sup>La tensión nominal del motor es 9 V.

- Por mayor comodidad y facilidad a la hora de entender el funcionamiento del diagrama, se ha decidido establecer el valor del bloque **Generador de pulsos** (ver figura C.8) en 1, de manera que se trate de un impulso unitario. Como el bloque al que va conectado es el que se encarga de configurar el **PWM**, y éste trabaja con valores de 0 a 255, se insertará antes del bloque una **Ganancia** con un valor de 255 (ver figura C.9).

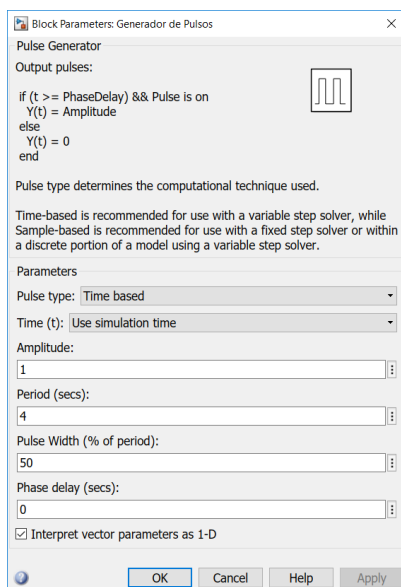


Figura C.8: Generador de pulsos.



Figura C.9: Ganancia.

- En la memoria de [25]<sup>5</sup> se comenta que el impulso tendrá periodo de 4 segundos, y que éste varía entre su valor máximo y 0. Para implementar esto en SIMULINK se debe acceder a las propiedades del bloque correspondiente (haciendo doble clic) y modificando los parámetros (ver figura C.8). En el recuadro **Amplitude** introducir **1**, en el **Period**, **4** y en el **Pulse Width**, **50**. Con esto la señal de excitación se deberá comportar como se ha indicado anteriormente.

### C.3.2. Representación de los datos

Las variables de salida que SIMULINK exporta al *Espacio de Trabajo* de MATLAB no son variables simples ni vectores, sino **Estructuras**. Para acceder a los datos de las mismas hace falta saber cómo están conformadas.

Los datos que son necesarios para poder representar las salidas en MATLAB son la **Velocidad** medida y el **Tiempo**. Estos datos se pueden encontrar en los campos **signals.values** y **time**, respectivamente.

Suponiendo que, tras realizar una lectura de la velocidad del motor después de aplicarle una entrada de tipo escalón con una amplitud determinada, se obtiene en el *Espacio de*

<sup>5</sup>Pág. 86.

*Trabajo* una variable con el nombre `lectura_salida`, el vector con los datos medidos de la velocidad se encuentra en `lectura_salida.signals.values` y el tiempo en `lectura_salida.time`. Conociendo esto, se podrá representar una gráfica de la velocidad y el tiempo escribiendo el comando `plot(lectura_salida.time, lectura_salida.signals.values)`.

## C.4. Ensayos experimentales para la selección del tiempo de muestreo

En este apartado se facilitan los resultados de los diferentes ensayos realizados para determinar el tiempo de muestreo a utilizar en la caracterización del motor. La tensión de entrada se ha mantenido constante a lo largo de todos los ensayos con un valor de **7,63 V**. El procedimiento seguido para la realización de los ensayos se explica en el apartado 4.3 del Capítulo 4.

En algunas de las figuras en las que se muestra la FFT, se han ampliado dos zonas. La primera, cerca de las frecuencias más bajas y la segunda, en los picos en las frecuencias más altas.

### C.4.1. Ensayos experimentales con un único pulso

De la figura C.10 a la C.21 se muestran los resultados de los ensayos en los que se recogieron datos durante 2 segundos, es decir, el tiempo en el que se mantenía el valor máximo de la señal de entrada de tipo escalón.

En las figuras C.10, C.12, C.14 y C.16 se muestran, además de la gráfica de velocidad, los puntos en los que realmente se han tomado medidas. A partir de la figura C.18 en adelante no se han mostrado los puntos de toma de datos por mayor facilidad a la hora de ver la gráfica.

Igualmente, en la tabla C.1 se pueden ver los datos de los ensayos con un único pulso de manera resumida.

Tabla C.1: Datos recogidos en los ensayos experimentales de un pulso.

	<i>LECTURAS DE DATOS</i>		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>Tiempo de muestreo</i> [s]			
0,5	84,60	44,42	0,40
0,1	99,16	14,48	0,48
0,05	102,52	10,20	0,49
0,01	104,44	5,86	0,50
0,005	107,67	7,79	79,80
0,001	90,25	23,45	500

A: Valor medio [rpm] (0 Hz)

B: Valor máximo [rpm]

C: Frecuencia del valor máximo [Hz]

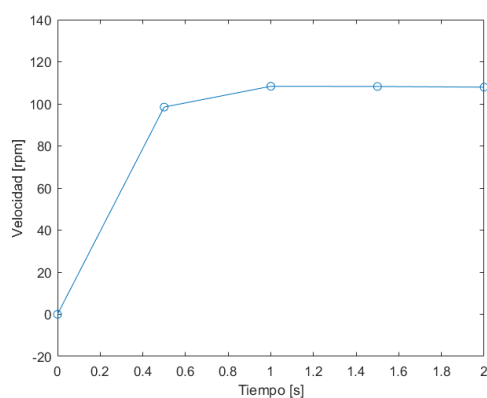


Figura C.10: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,5s$ .

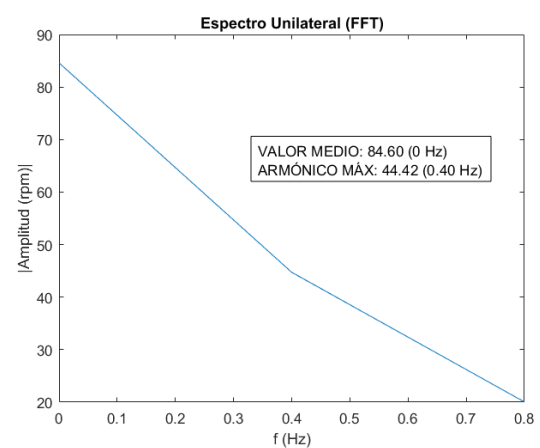


Figura C.11: FFT.  $T_{muestreo} = 0,5s$ .

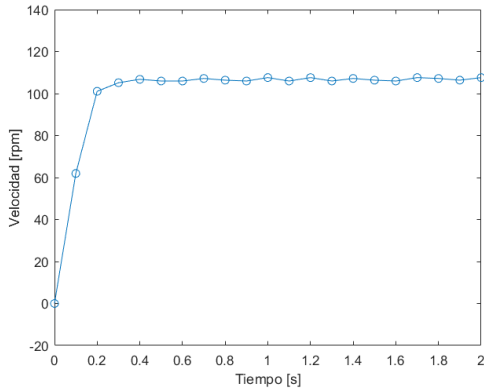


Figura C.12: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,1s$ .

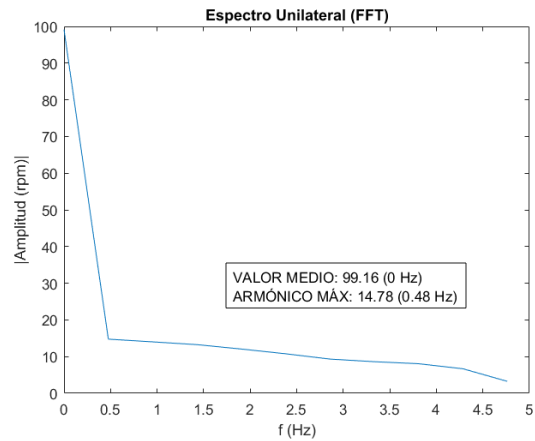


Figura C.13: FFT.  $T_{muestreo} = 0,1s$ .

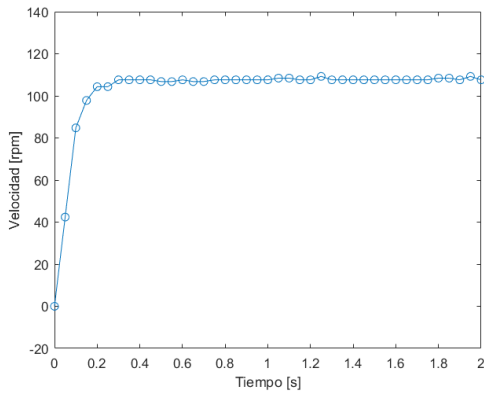


Figura C.14: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,05s$ .

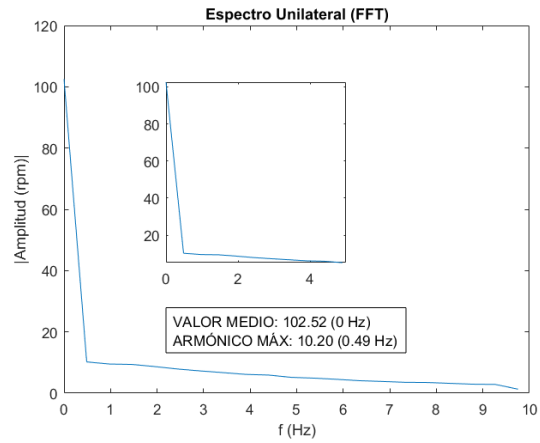


Figura C.15: FFT.  $T_{muestreo} = 0,05s$ .

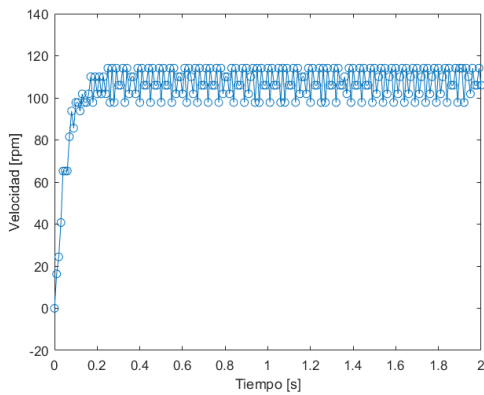


Figura C.16: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,01s$ .

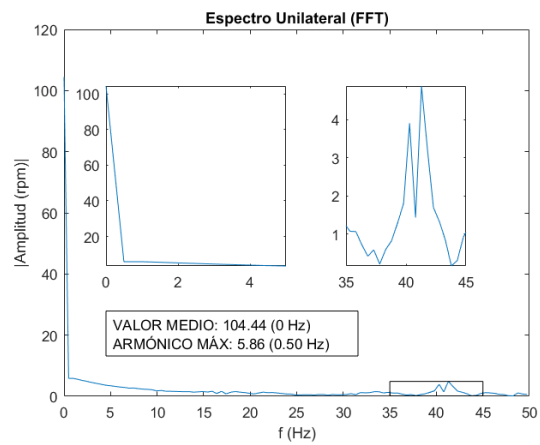


Figura C.17: FFT.  $T_{muestreo} = 0,01s$ .

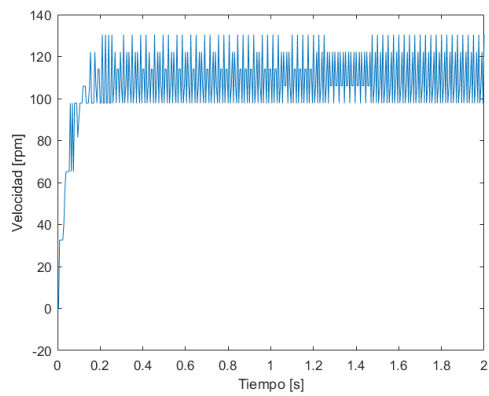


Figura C.18: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,005s$ .

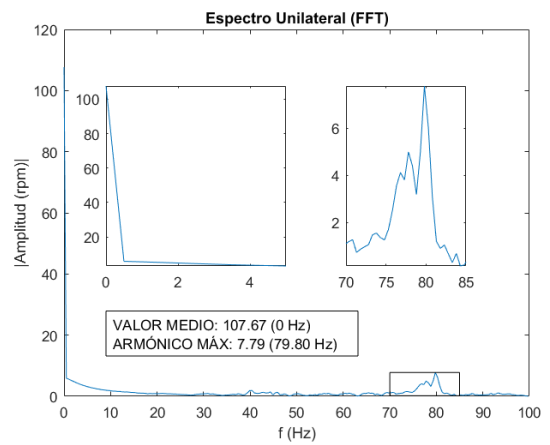


Figura C.19: FFT.  $T_{muestreo} = 0,005s$ .

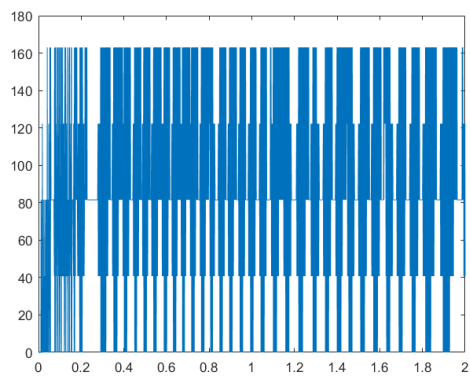


Figura C.20: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,001s$ .

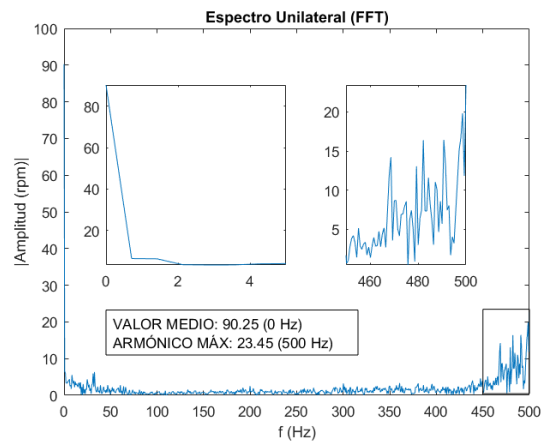


Figura C.21: FFT.  $T_{muestreo} = 0,001s$ .

### C.4.2. Ensayos experimentales con varios pulsos

A continuación, de la figura C.22 a la C.33 se muestran las gráficas de velocidad respecto al tiempo junto con el resultado de aplicar la FFT en los ensayos en los que se recogieron datos durante 10 segundos.

Del mismo modo, en la tabla C.2 se pueden ver los datos de los ensayos con múltiples pulsos de manera resumida.

Tabla C.2: Datos recogidos en los ensayos experimentales de varios pulsos.

<i>LECTURAS DE DATOS</i>			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<b><i>Tiempo de muestreo [s]</i></b>			
0,5	66,75	50,49	0,29
0,1	66,23	46,26	0,20
0,05	67,08	47,92	0,20
0,01	68,92	50,13	0,20
0,005	70,06	49,72	0,20
0,001	45,56	45,43	0,248

A: Valor medio [rpm] (0 Hz)

B: Valor máximo [rpm]

C: Frecuencia del valor máximo [Hz]

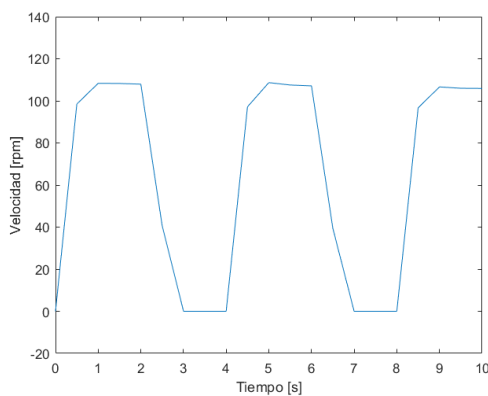


Figura C.22: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,5s$ .

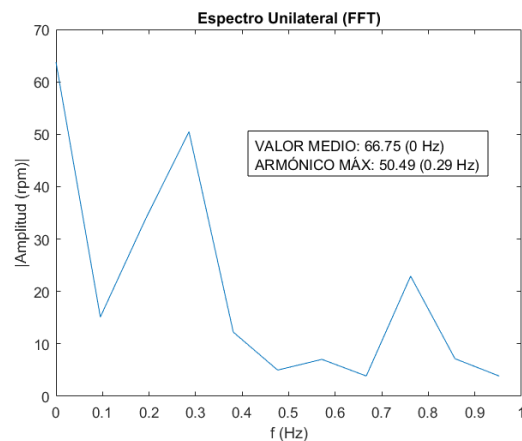


Figura C.23: FFT.  $T_{muestreo} = 0,5s$ .

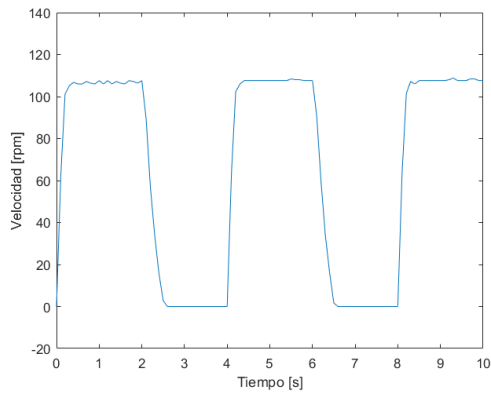


Figura C.24: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,1s$ .

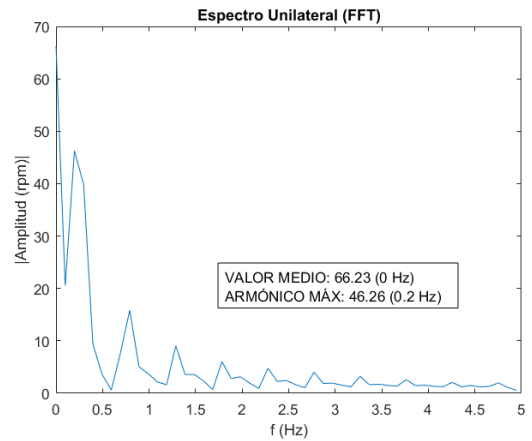


Figura C.25: FFT.  $T_{muestreo} = 0,1s$ .

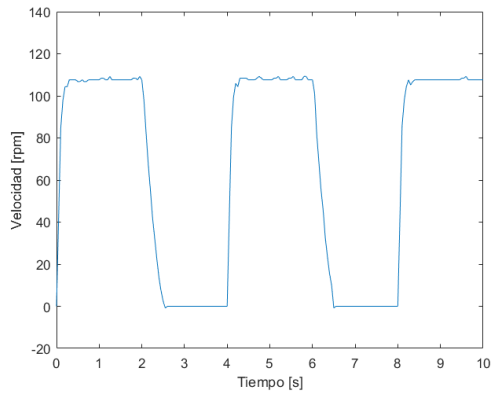


Figura C.26: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,05s$ .

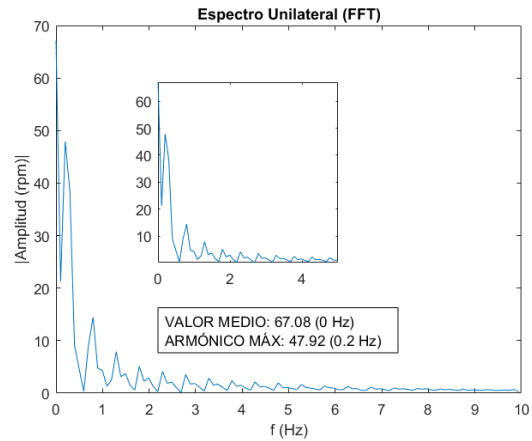


Figura C.27: FFT.  $T_{muestreo} = 0,05s$ .

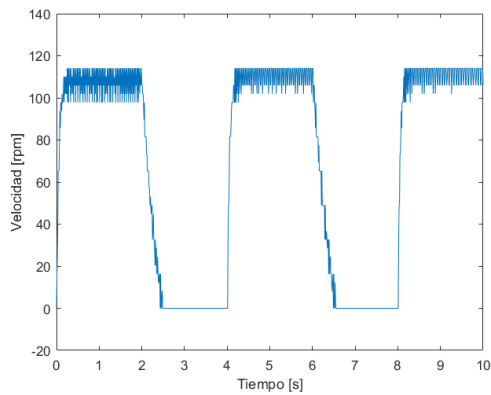


Figura C.28: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,01s$ .

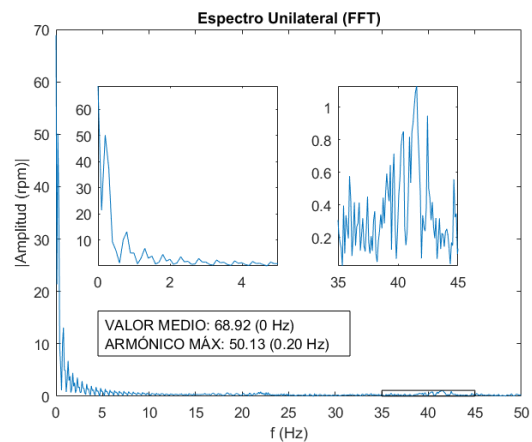


Figura C.29: FFT.  $T_{muestreo} = 0,01s$ .

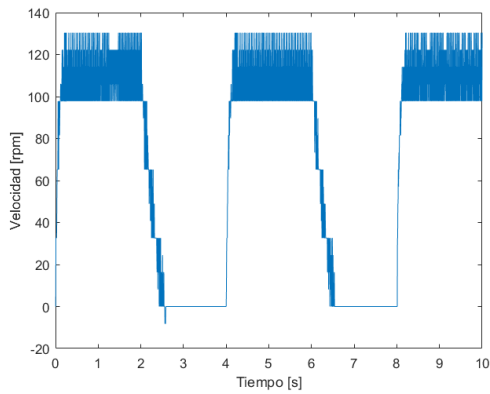


Figura C.30: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,005s$ .

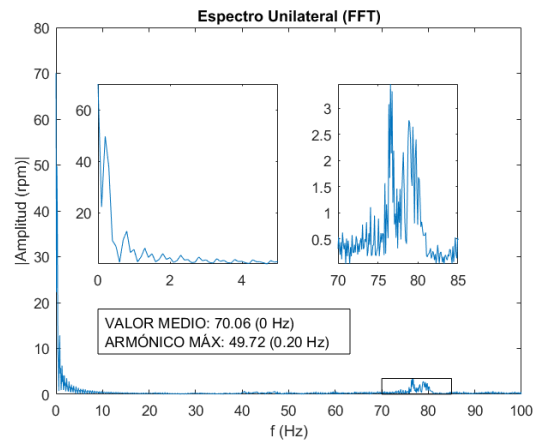


Figura C.31: FFT.  $T_{muestreo} = 0,005s$ .

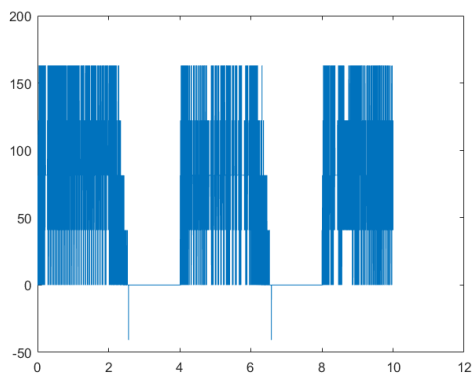


Figura C.32: Velocidad.  $T_{muestreo} = 0,001s$ .

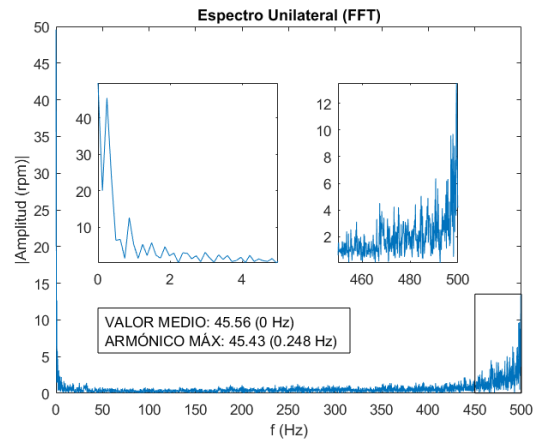


Figura C.33: FFT.  $T_{muestreo} = 0,001s$ .

## C.5. Estimación de los parámetros del motor

### C.5.1. Definición de parámetros

Abrir SIMULINK desde MATLAB pulsando sobre el icono que se muestra en la figura C.34. Aparecerá una ventana con un nuevo proyecto en blanco (figura C.35).



Figura C.34: Icono de SIMULINK.

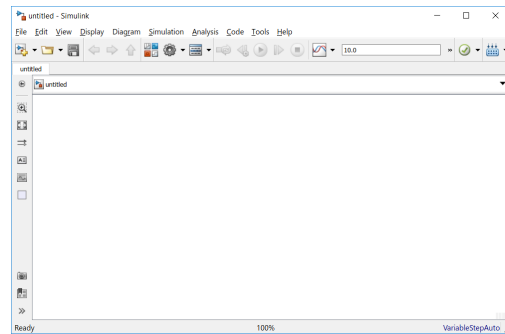


Figura C.35: Nuevo proyecto de SIMULINK.

En esta ventana se va a diseñar un diagrama de bloques similar al que se mostró en el apartado 4.2.3 del Capítulo 4 (ver figura 4.4), pero realizando algunas modificaciones.

La primera modificación consiste en eliminar del diagrama los términos  $L_a$  y  $B_m$  ya que se hará la simplificación de suponer ambos parámetros despreciables (suposición explicada igualmente en el apartado 4.2.3 del Capítulo 4).

Para realizar la segunda modificación hace falta ver las unidades en que se está trabajando. La función de transferencia deducida teóricamente (ver ecuación 4.14) relaciona la velocidad de salida en  $\frac{rad}{s}$  con la tensión de entrada en voltios. Por otro lado, en los datos recogidos de los ensayos la velocidad está expresada en **rpm**.

Se puede ver, por tanto, que hace falta aplicar un factor de conversión de unidades a los resultados experimentales (para pasarlos a  $\frac{rad}{s}$ ) o a la función de transferencia (para expresar los resultados en rpm). Se decide aplicar el cambio de unidades a la función de transferencia multiplicando la salida por el factor de conversión adecuado, en este caso multiplicando por una ganancia de valor  $\frac{60}{2\pi}$  (ecuación C.1).

$$\frac{\Omega_m^{rpm}(s)}{E_a(s)} = \frac{k}{R_a J_m s + k^2} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (C.1)$$

De este modo ya se tienen las mismas unidades tanto en los datos de los ensayos experimentales como en la función de transferencia, estando la tensión en voltios y la velocidad en **rpm**. Las unidades del resto de variables se puede ver en la tabla F.1 del Anexo F.

A continuación, se van a definir los **parámetros** que deben ser calculados, en este caso la inercia del motor ( $J_m$ ) y la constante de par (o constante de fuerza c.e.m.) ( $k$ ). Se puede ver en la ecuación C.1 que la resistencia del motor ( $R_a$ ) es otro parámetro del motor que hace falta calcular pero si nos fijamos en la misma ecuación se puede ver que la resistencia del motor está *multiplicando* a la inercia del motor. Debido a la *propiedad conmutativa* de la multiplicación, esto implica que hay infinitas soluciones para estos valores<sup>6</sup>.

Para solucionar esta cuestión se plantean dos posibles alternativas. La primera consiste en establecer unos límites bien definidos a los valores que pueden tomar cada una de estas variables. La segunda alternativa, se basa en conocer a priori el valor de uno de los parámetros. Como la resistencia del motor se puede medir fácilmente con un polímetro digital entre los terminales del mismo, se decide optar por esta segunda alternativa. El valor adoptado para la resistencia del motor es el mismo que se midió en [25], por lo tanto:

$$R_a = 2,7 \Omega \quad (\text{C.2})$$

Fijado este parámetro, faltan por definir la inercia del motor ( $J_m$ ) y la constante de par ( $k$ ). Para ello, hacer clic sobre el icono del **Model Explorer** (figura C.36). Aparecerá una ventana como la de la figura C.37.

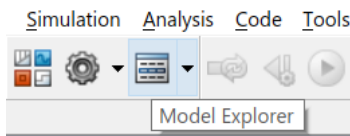


Figura C.36: Icono del *Model Explorer*.

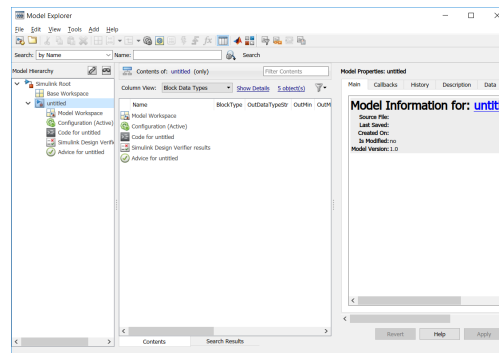


Figura C.37: Ventana del *Model Explorer*.

A continuación, en el lateral derecho, en **Model Hierarchy**, seleccionar el desplegable con el nombre del modelo y seleccionar el apartado de **Model Workspace** (figura C.38). Hecho esto, se activará el icono de **Add MATLAB Variable** (ver figura C.39).

<sup>6</sup>Por ejemplo si el producto tuviera que ser 6, no es posible, a priori, deducir el valor de cada una de las variables por separado.

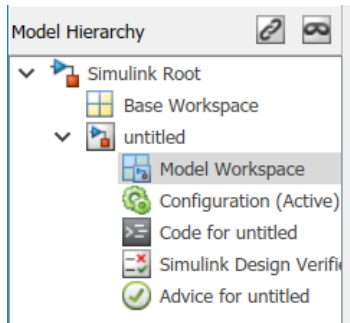
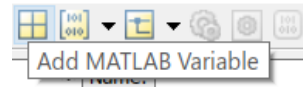
Figura C.38: *Model Workspace*.

Figura C.39: Añadir variable.

Hacer clic sobre ese icono y se creará una nueva variable con el nombre de **Var** y asignarle un valor cualquiera distinto de cero<sup>7</sup>, por ejemplo **1**. Hacer clic sobre el nombre para modificarlo y darle el nombre de **Jm**. Repetir el proceso una vez más para crear una nueva variable con el nombre **k** (ver figura C.40) y cerrar la ventana.



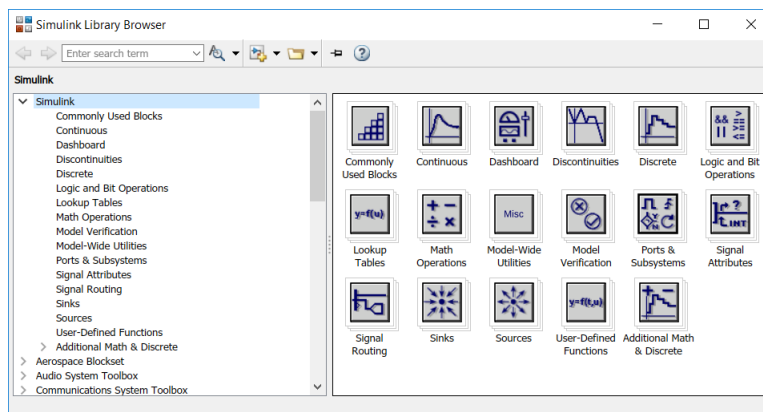
	Name	Value	DataType	Dimensions
	Jm	1	double (auto)	
	k	1	double (auto)	

Figura C.40: Nombres de las variables.

## C.5.2. Creación del diagrama de bloques

El siguiente paso consiste en crear el diagrama de bloques de sistema. Para poder ver la librería con los bloques disponibles en SIMULINK (figura C.41), hacer clic sobre **View > Library Browser**.

Figura C.41: *Library Browser*.

<sup>7</sup>Lo importante es que el valor sea distinto de 0 para poder asignárselo al denominador de la función de transferencia sin obtener ningún error de MATLAB.

A continuación se muestran los bloques que se van a utilizar y la ruta en la que se encuentran:

- **Transfer Fcn:** bloque para introducir una función de transferencia (figura C.42). Se encuentra en **Simulink > Continuous > Transfer Fcn.**

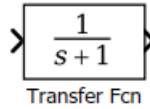


Figura C.42: Bloque función de transferencia.

Una vez introducido en el diagrama de SIMULINK (arrastrándolo desde *Simulink Library Browser*), hacer doble clic sobre el bloque para modificar sus parámetros. En el recuadro de **Numerator coefficients** debe aparecer [1]. Dejar ese valor. Por otro lado, en el recuadro de **Denominator coefficients** se debe introducir [Jm 0] (ver figura C.43).

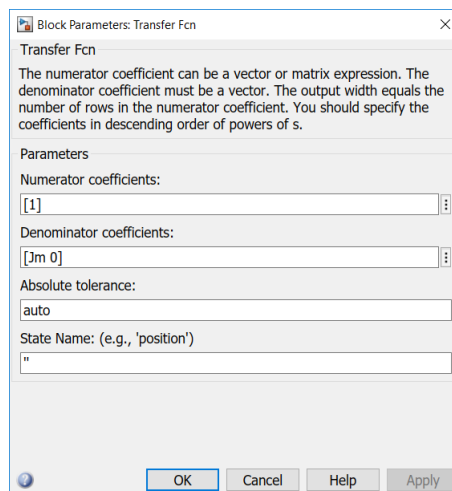


Figura C.43: Parámetros función de transferencia.

- **Gain:** bloque de ganancia (figura C.44). Se encuentra en **Simulink > Math Operations > Gain.**

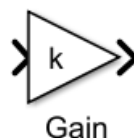


Figura C.44: Bloque ganancia.

Haciendo doble clic se accede a las propiedades del bloque. Se deben crear cinco bloques de ganancias con las ganancias 1, 60, k, k y otro bloque más (el que irá junto con

el generador de pulsos), con el valor de la tensión con que se alimentó al motor en cada uno de los experimentos. En este caso, como se está modelando el ensayo que se hizo con una tensión de entrada de 5,36 V, se introduce **5.36**.

Para girar un bloque (como el de la ganancia del “lazo”) hacer clic con el botón derecho sobre el bloque y seleccionar **Rotate & Flip > Flip Block**.

- **Constant:** bloque para introducir una constante (figura C.45). Se encuentra en **Simulink > Sources > Constant**.

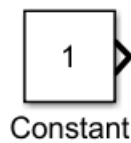


Figura C.45: Bloque constante.

Introducir dos bloques de este tipo, con los valores **2.7** (valor de  $R_a$ ) y de **2\*pi** ( $2\pi$ ).

- **Divide:** bloque que permite realizar la división entre dos bloques (figura C.46). Se encuentra en **Simulink > Math Operations > Divide**. Introducir dos de estos bloques.

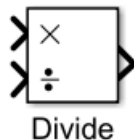


Figura C.46: Bloque división.

- **Sum:** realiza la suma de dos bloques (figura C.47). Se encuentra en **Simulink > Math Operations > Sum**.



Figura C.47: Bloque suma.

Una vez incluido en el diagrama, hacer doble clic sobre el bloque. Como lo que se busca con este bloque es realizar una resta en lugar de una suma, hace falta sustituir el último símbolo dentro del recuadro de **List of signs** por un signo menos (ver figura C.48).

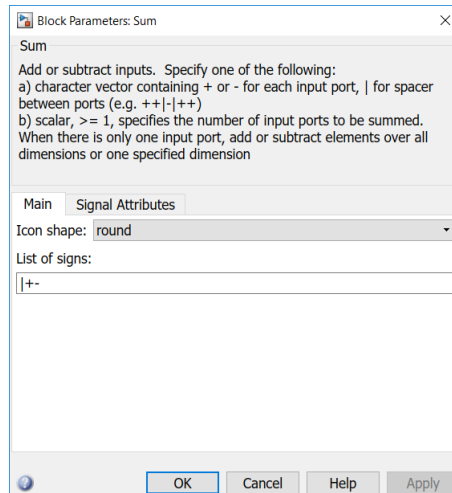


Figura C.48: Parámetros bloque suma.

- **Pulse Generator:** será el bloque que introduzca la señal de excitación al sistema (figura C.49). Se encuentra en **Simulink > Sources > Pulse Generator**.

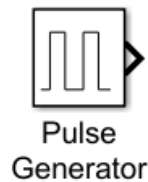


Figura C.49: Bloque generador de pulsos.

Hacer doble clic sobre el bloque. En el recuadro de **Period (seconds)** introducir **4** y en el de **Pulse Width**, **50** (ver figura C.50).

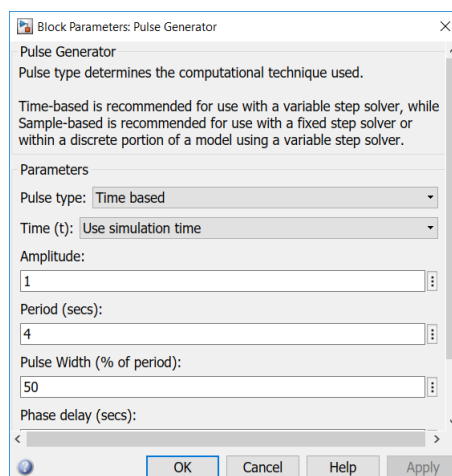


Figura C.50: Parámetros generador de pulsos.

- **Out1**: bloque que recoge los datos de salida del sistema y permite su tratamiento. (figura C.51). Se encuentra en **Simulink > Sinks > Out1**.

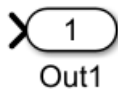


Figura C.51: Bloque salida.

Introducidos todos los bloques, realizar las conexiones entre los mismos de manera que el diagrama quede como el de la figura C.52.

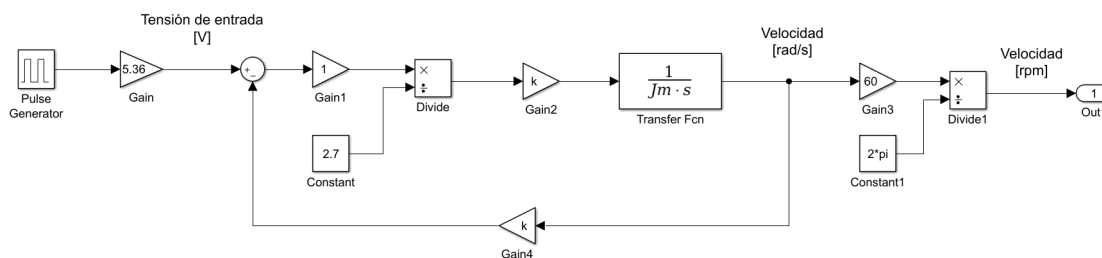


Figura C.52: Diagrama de bloques.

### C.5.3. Método de Estimación de Parámetros

En el apartado C.3.2 de este mismo Anexo se comenta la estructura en que se guardan los datos de los ensayos experimentales. Para la aplicación de este método únicamente son necesarios los valores del tiempo y de la velocidad de cada ensayo. Llegados a este punto existe la posibilidad de realizar la estimación con los datos del experimento completo o sólo con los valores de uno de los pulsos. Se decide optar por la segunda opción, de manera que hará falta extraer de los datos de los ensayos sólo los puntos que se correspondan al primer pulso. En este caso no se toman todos los puntos del primer pulso, sino los puntos hasta que se estabiliza el valor de la señal de salida. En primer lugar se realiza la estimación de parámetros en el ensayo con una tensión de entrada de **5,36 V**.

Suponiendo que las lecturas se encuentran guardadas en una variable llamada **ensayo\_velocidad\_5\_36\_v**, definir en la **Ventana de comandos** dos variables. La primera se llamará **tiempo\_5\_36\_v** y se le asignarán los valores **ensayo\_velocidad\_5\_36\_v.time(1:41)**. El nombre de la segunda variable será **velocidad\_5\_36\_v** con los valores **ensayo\_velocidad\_5\_36\_v.signals.values(1:41)**. De esta manera quedarán almacenados en las variables los puntos de interés del ensayo. Se almacena hasta el punto 41 ya que en los 10 segundos de cada ensayo se almacenaron 200 mediciones (el tiempo de muestreo elegido es de 0,05 segundos tal y como se explica en el apartado 4.3 del Capítulo 4). Como se estableció en los ensayos una duración de 4 segundos por pulso, se tienen un total de 50 mediciones por pulso. Eliminando los puntos correspondientes al flanco de bajada de la respuesta, resultan

los 41 puntos de interés.

Una vez almacenados los datos del ensayo, hacer clic en la pestaña de **Analysis** y seleccionar **Parameter Estimation** en el desplegable (figura C.53). Aparecerá una ventana como la que se muestra en la figura C.54.

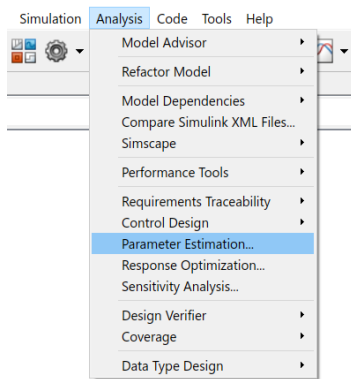


Figura C.53: Desplegable *Analysis*.

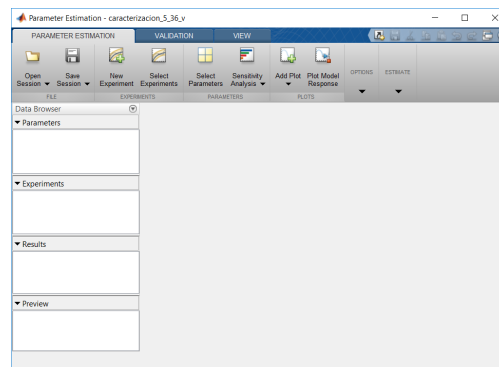


Figura C.54: Ventana *Parameter Estimation*.

En la sección de **Experiments**, seleccionar el icono **New Experiment**. Aparecerá una nueva ventana. Es en esta ventana donde se introducen los datos de las lecturas obtenidas en los ensayos experimentales. En el recuadro dentro de la sección de **Outputs** introducir las variables que se almacenaron antes, [**tiempo\_5\_36\_v**, **velocidad\_5\_36\_v**] (figura C.55). Pulsar sobre **OK** para que se guarden los datos.

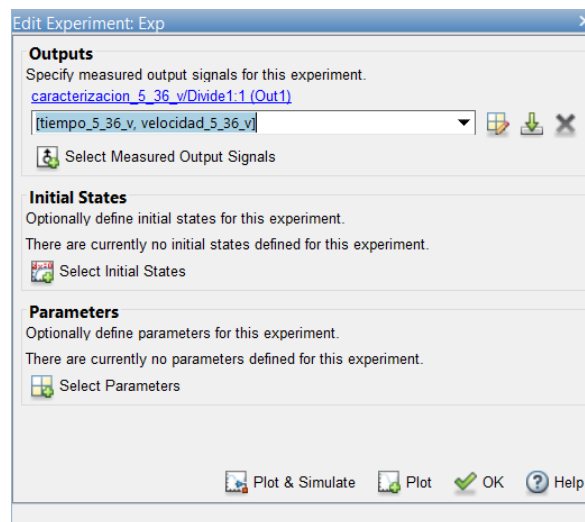


Figura C.55: Introducir lecturas de los ensayos.

A continuación, hacer clic con el botón derecho en el recuadro de **Parameters** situado en el lateral izquierdo de la ventana y seleccionar la opción de **Edit** (figura C.56).

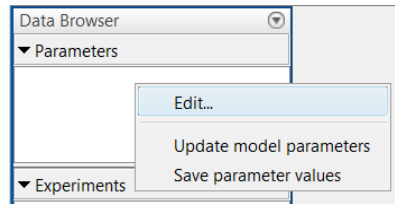


Figura C.56: Introducir lecturas de los ensayos.

En la nueva ventana que aparecerá, hacer clic sobre **Select parameters** (figura C.57). Aparecerá una nueva ventana, donde estarán listadas las dos variables que se definieron al principio del apartado (**Jm** y **k**). Activar la casilla que hay junto a cada una de las variables y hacer clic en **OK** (figura C.58).

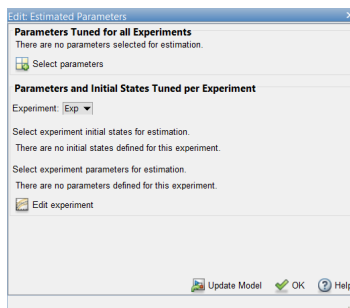


Figura C.57: Seleccionar parámetros.

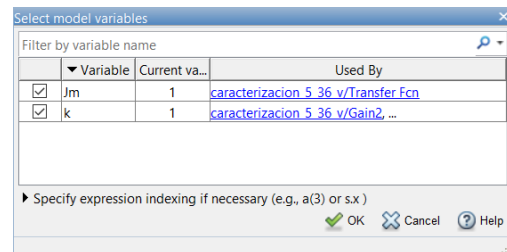


Figura C.58: Parámetros seleccionados.

Al hacer esto, aparecerán en la ventana anterior las dos variables con una flecha negra junto a cada una de ellas. Pulsar sobre ellas para visualizar más opciones. Estas opciones permiten acotar los valores máximo y mínimo de las variables y sus valores iniciales. En este trabajo se han **inicializado** ambas variables en **1**, con un valor **mínimo** de **0** y un valor **máximo** de **10** (ver figura C.59). Para cerrar la ventana pulsar en **OK**.

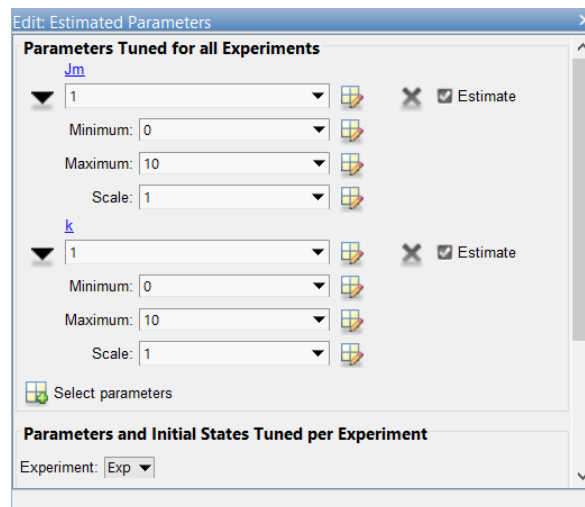


Figura C.59: Valores iniciales y cotas.

A continuación, se recomienda añadir dos gráficas para poder ver la evolución del método. Pulsar sobre **Add Plot** y añadir una gráfica de tipo **Exp** (donde se verán superpuestas las gráficas del ensayo y la gráfica de la estimación) . También puede resultar útil observar la evolución de los parámetros según van avanzando las iteraciones, representada en la gráfica de **Parameter Trajectory** (ver figura C.60).

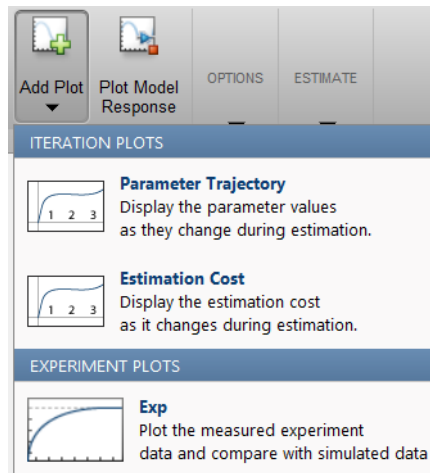


Figura C.60: Añadir gráficas.

Una vez introducidas las gráficas, sólo queda iniciar el proceso de estimación de parámetros. Pulsar sobre el botón de **Estimate** (figura C.61).

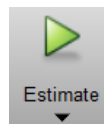


Figura C.61: Inicial estimación.

Cuando termine el proceso, aparecerá en la ventana de **Estimation Progress Report** (habrá aparecido al pulsar el botón de *Estimate*) un mensaje indicando que se ha llegado a la convergencia. El proceso finalizado se muestra en la figura C.62, donde se puede apreciar cómo la trayectoria de la función con los parámetros estimados coincide con la de las lecturas de los ensayos.

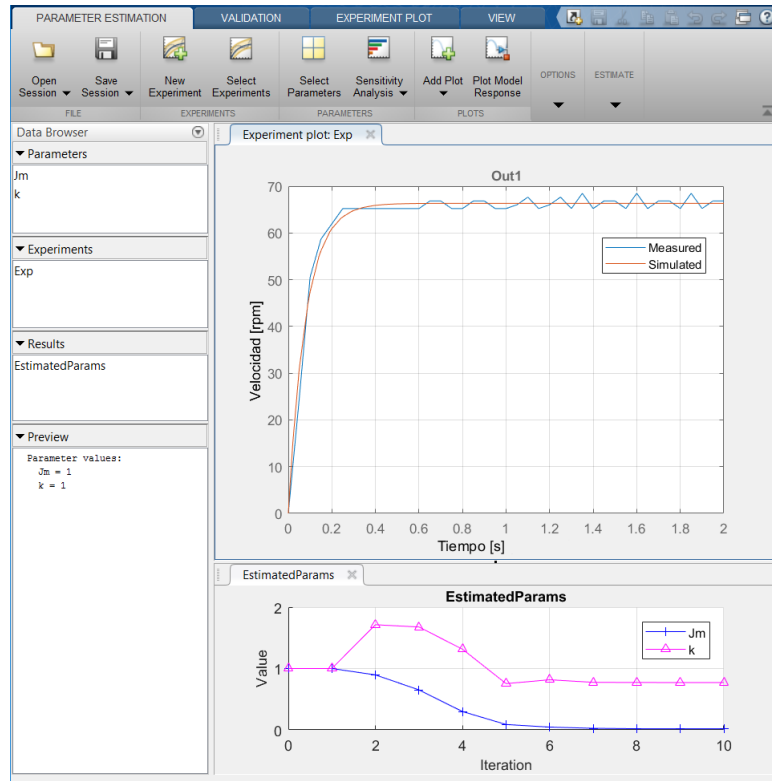


Figura C.62: Proceso convergido.

Para ver los valores de las variables estimadas, hacer doble clic sobre cualquiera de ellas en el recuadro de **Parameters**. En la misma ventana en la que se introdujeron los valores iniciales de las variables, aparecerán actualizados los valores estimados tal y como se puede ver en la figura C.63.

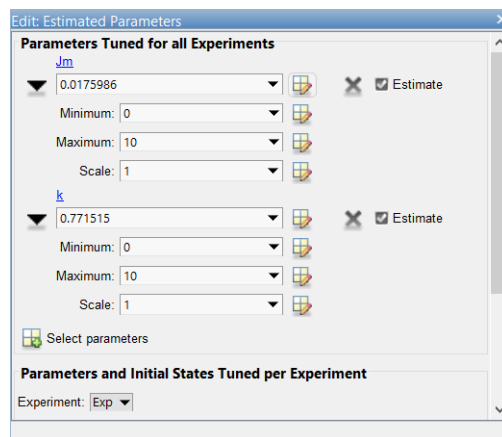


Figura C.63: Valores estimados.

Este proceso se repite para los otros tres ensayos, modificando convenientemente los valores de entrada de los ensayos que se introducen en la estimación de parámetros y estableciendo el valor de la ganancia inicial del diagrama de bloques en el valor de tensión de

entrada del ensayo que se esté analizando.

En el apartado C.5.4 se muestran los resultados obtenidos con MATLAB al realizar la estimación de parámetros en los cuatro ensayos.

#### C.5.4. Estimación de parámetros todos los ensayos

De la figura C.64 a la C.71 se muestran los resultados de la estimación de parámetros para los ensayos experimentales realizados a 5,36 V, 6,30 V, 7,64 V y 9,28 V.

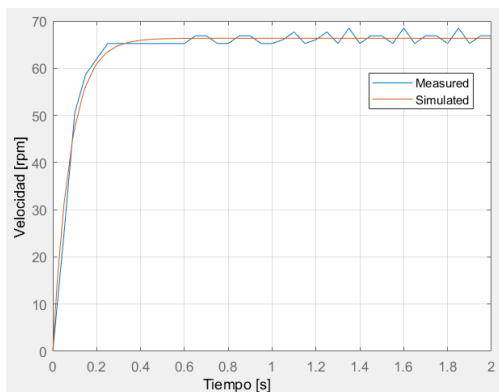


Figura C.64: Proceso convergido (5,36 V).

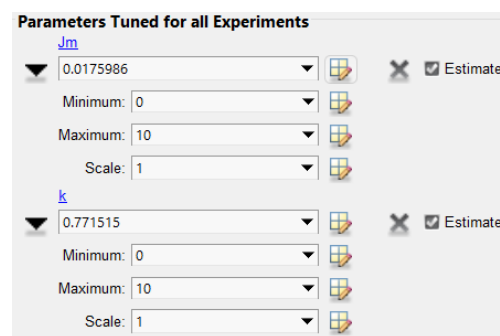


Figura C.65: Valores estimados (5,36 V).

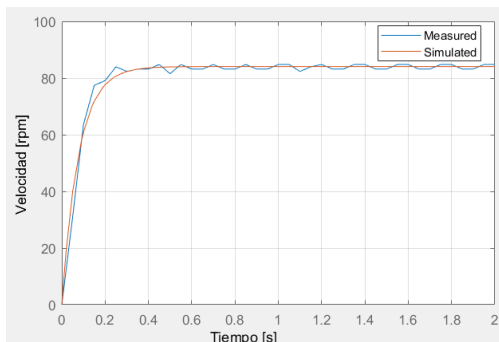


Figura C.66: Proceso convergido (6,30 V).

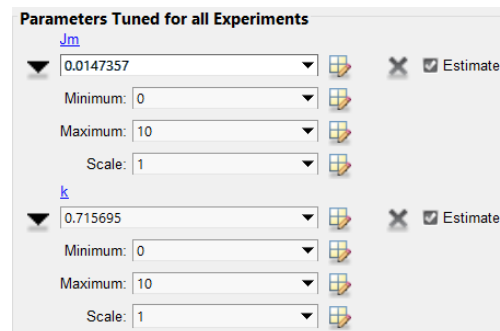


Figura C.67: Valores estimados (6,30 V).

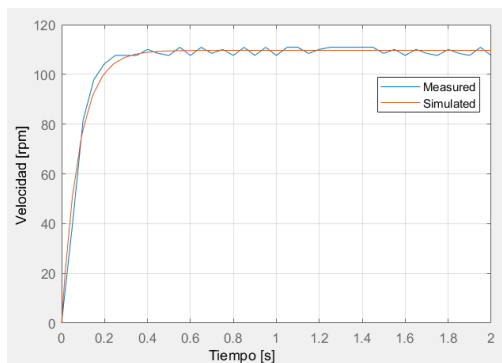


Figura C.68: Proceso convergido (7,64 V).

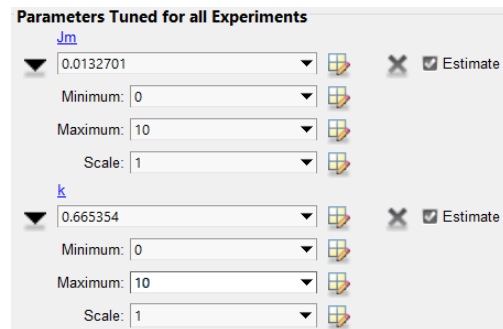


Figura C.69: Valores estimados (7,64 V).

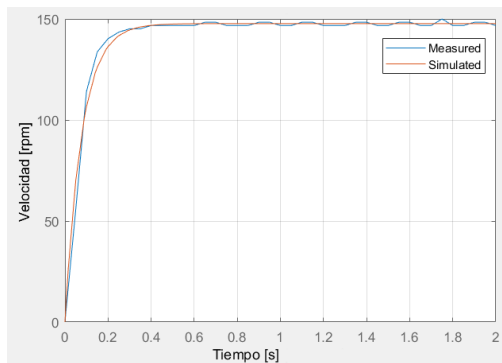


Figura C.70: Proceso convergido (9,28 V).

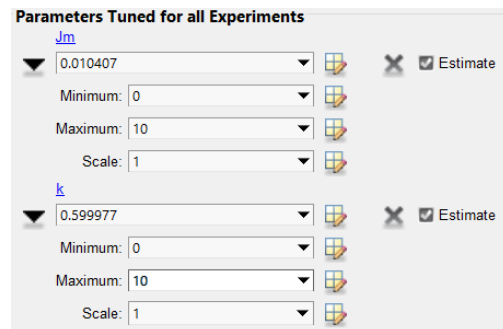


Figura C.71: Valores estimados (9,28 V).



# Anexo D

## Control de velocidad

El control de velocidad se realiza partiendo del procedimiento y de los diagramas de bloques expuestos en [25] a los que se les realiza una serie de **modificaciones**.

### D.1. Modificaciones del diagrama de bloques

Los cambios con respecto al diagrama de bloques ya existente son los siguientes:

- Se sustituye la parada manual por una **parada temporizada**. Para ello se han dispuesto de manera conjunta un bloque tipo **Ramp** unido a otro bloque tipo **Compare To Constant** (ver figura D.1).

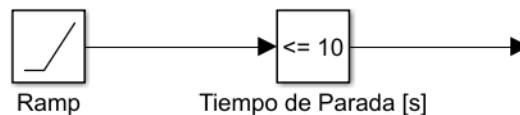


Figura D.1: Señal rampa comparada.

El bloque **Ramp** se puede encontrar en **Simulink > Sources > Ramp** (figura D.2).



Figura D.2: Bloque rampa.

Dicho bloque genera una señal tipo rampa con una pendiente determinada. Para configurar el bloque, hacer doble clic sobre él. Modificar el campo **Slope** e introducir un valor de **1** (ver figura D.3).

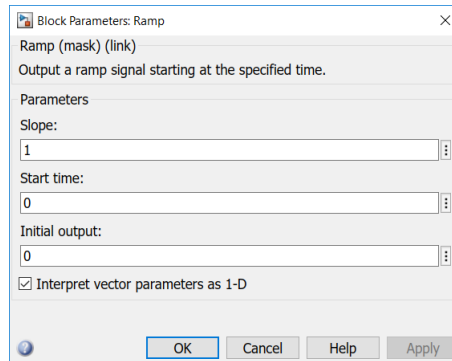


Figura D.3: Parámetros bloque rampa.

El bloque **Compare To Constant** se puede encontrar en **Simulink > Logic and Bit Operations > Compare To Constant** (figura D.4).

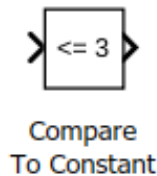


Figura D.4: Bloque comparación con una constante.

Dicho bloque compara el valor de una señal de entrada con una constante, devolviendo 1 ó 0 en función del tipo de comparación que se haya definido en sus parámetros. Para configurar el bloque, hacer doble clic sobre él. En primer lugar, en el desplegable de **Operator**, seleccionar la opción  $\leq$ . En segundo lugar, modificar el campo **Constant value** e introducir en segundos el valor del momento en el que se quiere detener el ensayo de control. Para detenerlo a los diez segundos, introducir **10** (ver figura D.5).

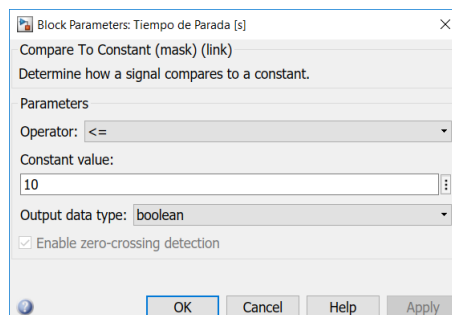


Figura D.5: Parámetros bloque de comparación.

- Se sustituye el *Slider* para establecer el valor de la velocidad de referencia por un bloque de **Definición de señales**. Se utiliza el bloque **Signal Builder**, que se encuentra en **Simulink > Sources > Signal Builder** (figura D.6).

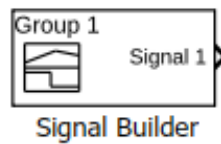


Figura D.6: Bloque constructor de señales.

Haciendo doble clic sobre el bloque se pueden definir señales variables que se ejecutarán según avance el control (ver figura D.7).

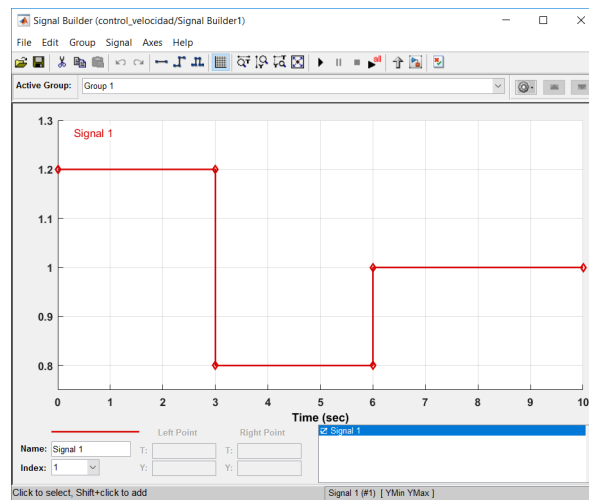


Figura D.7: Definición de la señal de referencia variable.

- Por último, los dos bloques anteriores se unen mediante un bloque de tipo **Product**, que se puede encontrar en **Simulink > Math Operations > Product** (figura D.8). Dicho bloque se encarga de multiplicar las dos entradas entre sí.

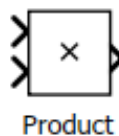


Figura D.8: Bloque producto.

El conjunto del diagrama que une los bloques anteriores se puede ver en la figura D.9.

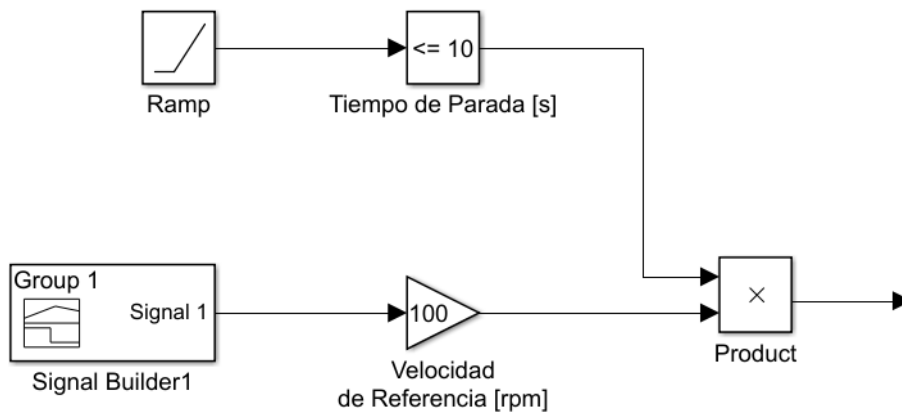


Figura D.9: Bloques comentados unidos entre sí.

## D.2. Ajuste del controlador PID

Para ajustar el controlador PID y ver la respuesta teórica, se crea un diagrama de bloques como el de la figura D.10.

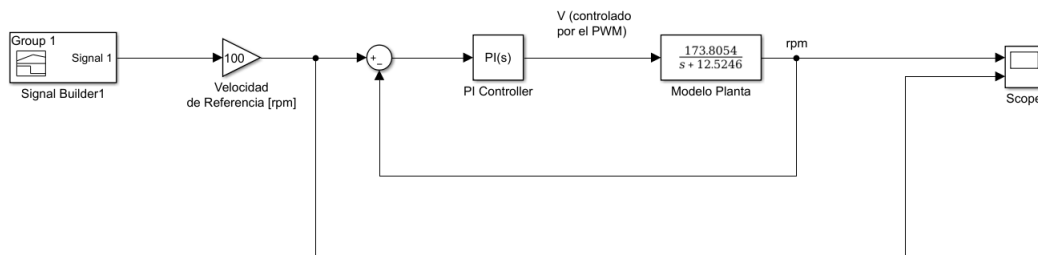


Figura D.10: Diagrama de bloques con PID para respuesta teórica.

El bloque **PID Controller** se puede encontrar en **Simulink > Continuous > PID Controller** (figura D.11).

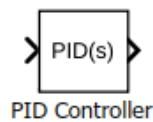


Figura D.11: Bloque controlador PID.

La función de transferencia del motor que se puede ver en el diagrama es la misma que se estimó en el Capítulo 4.

Tras realizar el ajuste del controlador PID por medio de **tanteo**, se determina que los parámetros de dicho controlador son los que se muestran en la figura D.12.

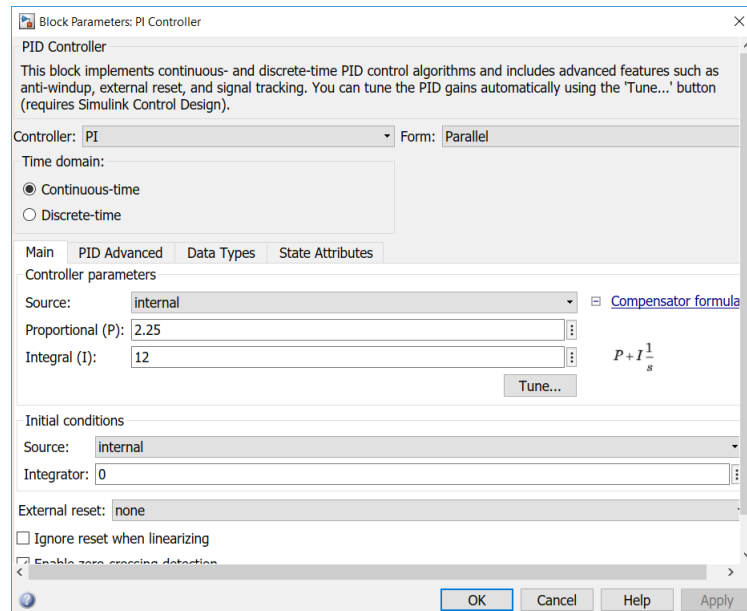


Figura D.12: Parámetros bloque controlador.

El procedimiento a seguir para el ajuste por tanteo consiste en, recursivamente, modificar ligeramente algún parámetro del controlador, realizar un ensayo experimental con dicho controlador y ver cómo afecta el cambio a la respuesta del sistema. De la figura D.13 a la D.18 se pueden ver algunos de los controladores obtenidos durante el proceso de *tanteo*.

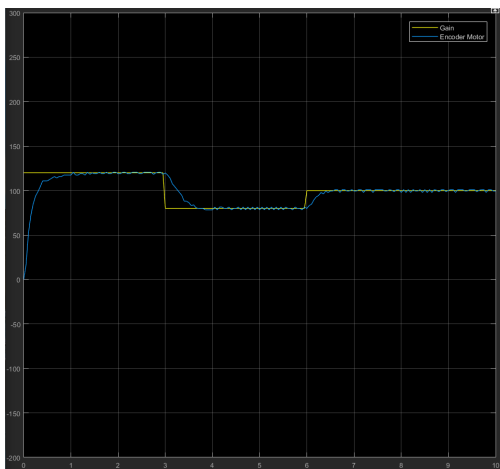


Figura D.13:  $P = 0,9; I = 5; D = 0; N = 10$ .

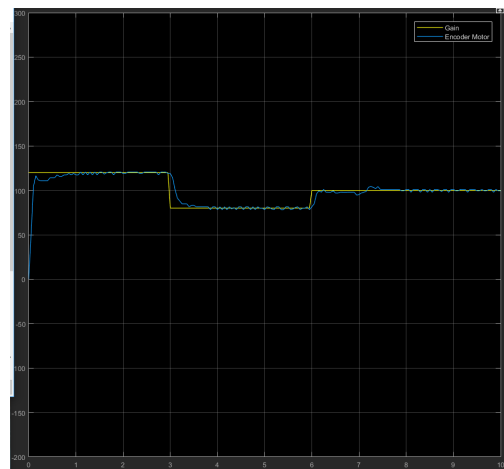


Figura D.14:  $P = 2,5; I = 10; D = 0; N = 10$ .

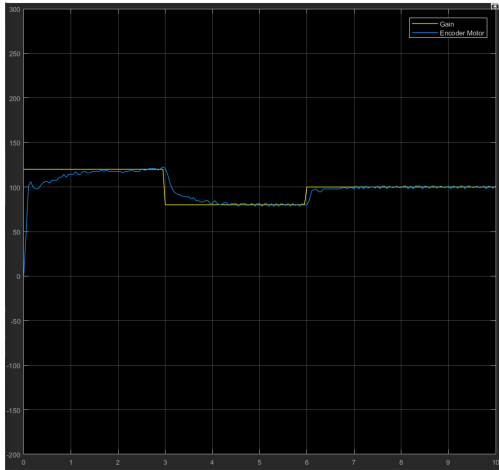


Figura D.15:  $P = 2; I = 5; D = 0,05; N = 10$ .

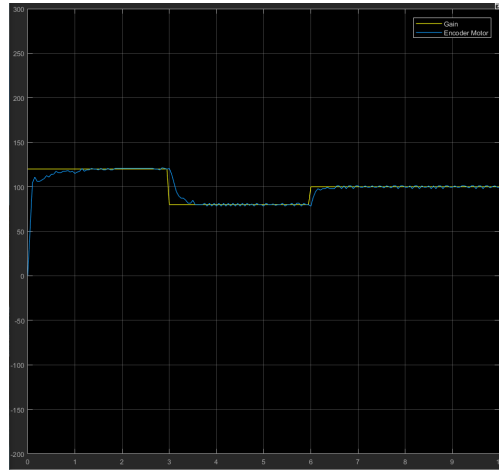


Figura D.16:  $P = 2; I = 8; D = 0,05; N = 10$ .

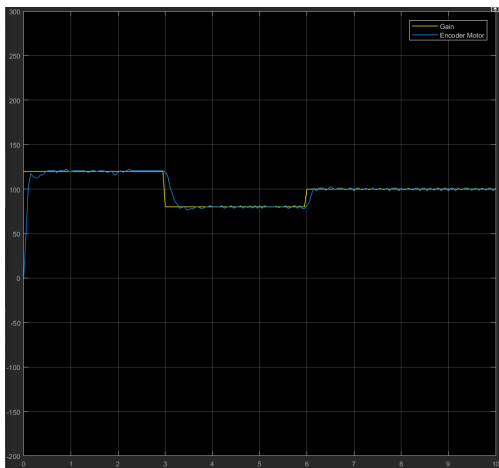


Figura D.17:  $P = 2; I = 12; D = 0,05; N = 10$ .

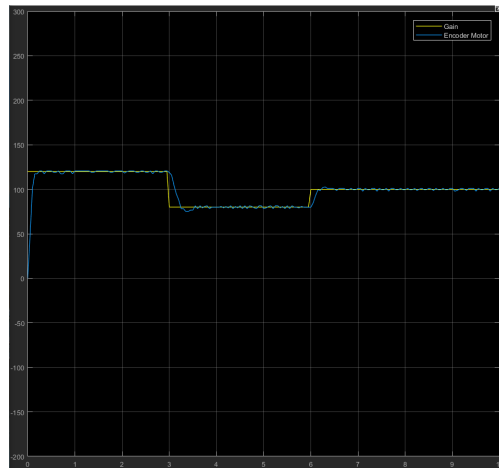


Figura D.18:  $P = 2; I = 12; D = 0; N = 10$ .

Finalmente, se determina que un controlador de tipo **PI** realiza el control de forma adecuada. Para ello se modifica el tipo de controlador, en el desplegable **Controller** a tipo **PI** (ver figura D.12). La **Ganancia Proporcional** se ha establecido en **2,25** y la **Ganancia Integral** en **12**. La **respuesta simulada** (teórica) del sistema ante el control de velocidad diseñado se puede ver en la figura D.19.

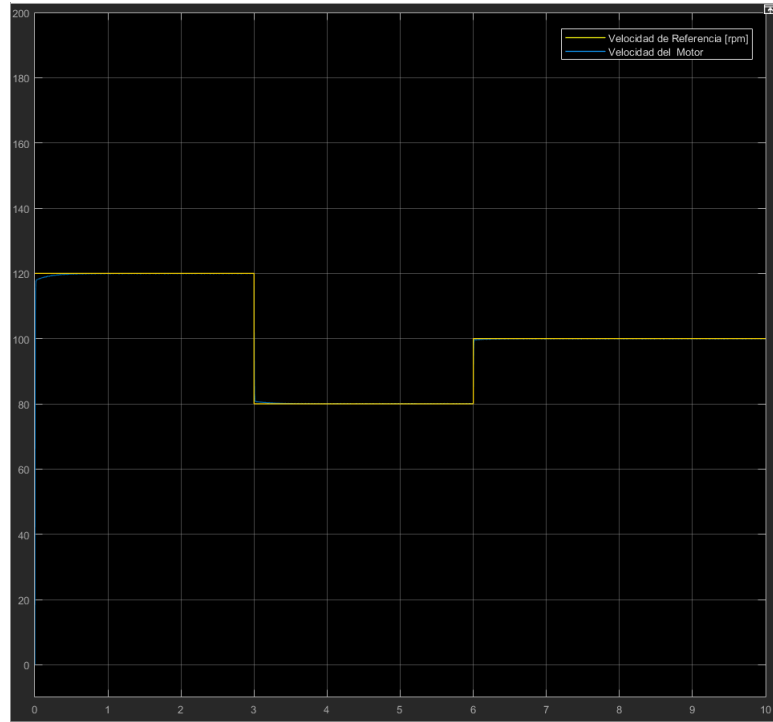


Figura D.19: Respuesta simulada del sistema en el control de velocidad.

### D.3. Diagrama de bloques del control de velocidad

Calculado el controlador PID de manera teórica, se crea el diagrama de bloques que servirá para controlar el motor. Dicho diagrama se puede ver en la figura D.20.

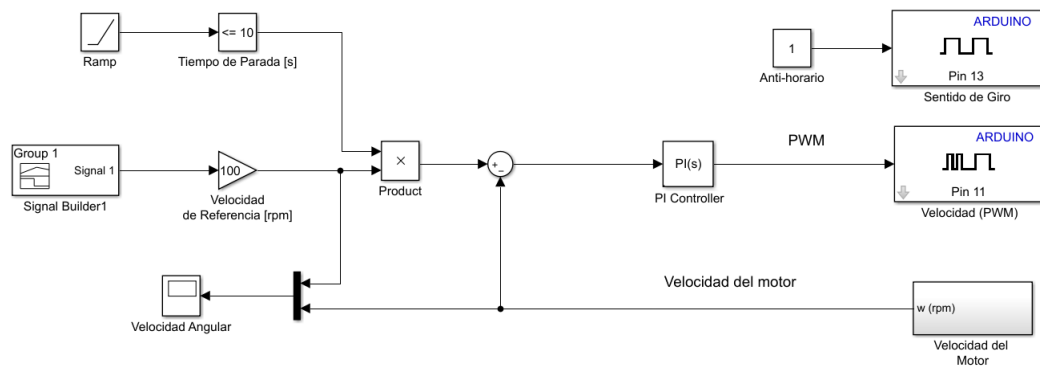


Figura D.20: Diagrama de bloques para el control de velocidad.

En este diagrama se puede ver incluido el diagrama de bloques diseñado en el apartado D.1 y el controlador PID (PI) con las ganancias proporcional e integral determinadas en el apartado D.2.

La **respuesta experimental** del sistema durante el ensayo experimental del control de velocidad se puede ver en la figura D.21<sup>1</sup>.

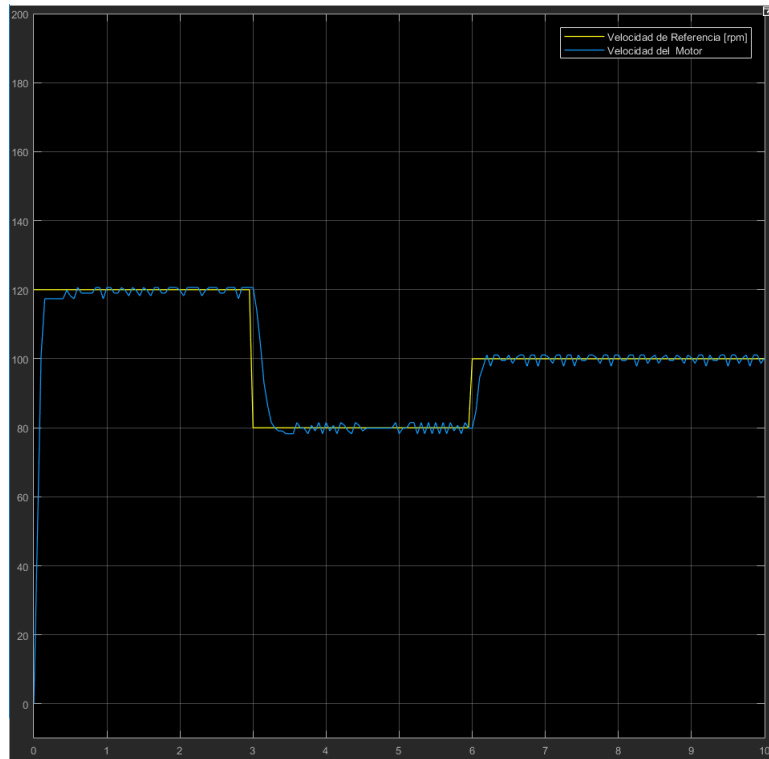


Figura D.21: Respuesta experimental del sistema en el control de velocidad.

---

<sup>1</sup>Motor alimentado a su tensión nominal (9 V).

# Anexo E

## Presupuesto

Tabla E.1: Presupuesto del material utilizado.

Descripción	Ud.	Precio ud.	Coste (- IVA)	Coste (+ IVA)
Arduino MEGA 2560	1	28,93 €	28,93 €	35 €
Arduino Motor Shield	1	16,53 €	16,53 €	20 €
DC Motor-25 9V/185RPM	1	9,90 €	9,90 €	11,98 €
Cables jumper macho-macho	6	0,15 €	0,90 €	1,09 €
Cable cocodrilo (para fuente alimentación)	1	3,03 €	3,03 €	3,67 €
Cable USB tipo A - tipo B	1	2,49 €	2,49 €	3,02 €
Pruebas de impresión 3D	1	6,79 €	6,79 €	8,22 €
Impresión 3D del modelo	1	10,95 €	10,95 €	13,25 €
Apoyos silicona	4	0,03 €	0,12 €	0,15 €
Tornillería	1	0,65 €	0,65 €	0,79 €
			<b>TOTAL</b>	<b>97,17 €</b>

No se ha incluido el precio de las licencias del software utilizado debido a que se utilizarán las licencias proporcionadas por la Universidad de Málaga ni tampoco el coste de los recursos humanos debido a que al tratarse de un trabajo académico el número de horas empleadas no representa un reflejo del coste real del trabajo.



# Anexo F

## Nomenclatura motor de c.c.

En la tabla F.1 se muestra la nomenclatura utilizada para nombrar las variables y parámetros del motor. Para facilitar las comparaciones entre los distintos trabajos consultados, se han dispuesto en columnas las nomenclaturas utilizadas en cada uno de los citados estudios. En [25] se tomó una nomenclatura sacada de [30], mientras que en el presente trabajo se ha optado por tomar una nomenclatura similar a la que se puede encontrar en [18].

Hace falta remarcar que en [23] se calculan las variables en el eje de salida del motor (antes del tren de engranajes) y después se trasladan las magnitudes al extremo de salida del tren (figura F.1). En el resto de la bibliografía y en este trabajo se considera que el eje de salida del motor es directamente el mismo que el del tren de engranajes (figura F.2) pues se consideran las propiedades mecánicas, tales como la inercia y la viscosidad, del conjunto motor-engranajes, en lugar de únicamente del motor.

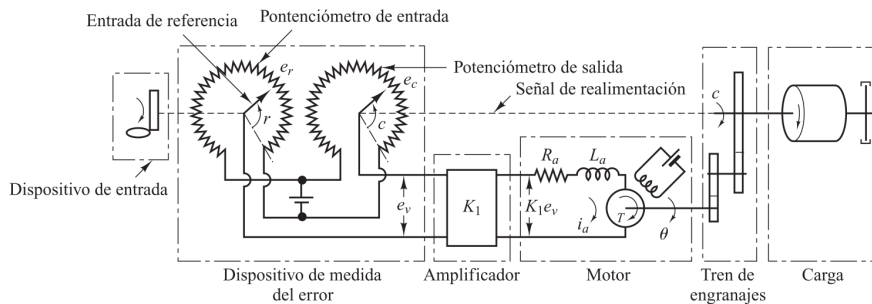


Figura F.1: Modelo motor c.c. [23].

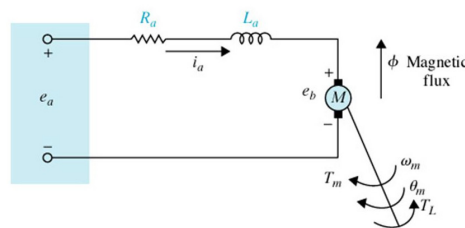


Figura F.2: Modelo motor c.c. [18].

Tabla F.1: Nomenclatura utilizada para las variables y parámetros del motor.

VARIABLE	KUO [18]	OGATA [23]	TFM [25]	TFG
Constante de proporcionalidad	—	$k_0$	—	—
Ganancia de un amplificador	—	$k_1$	—	—
Constante de par [ $\frac{N \cdot m}{A}$ ]	$k_i$	$k_2$	$k_m$	$k_i$
Constante de la fuerza contraelectromotriz [ $\frac{V}{rad/s}$ ]	$k_b$	$k_3$	$k_{emf}$	$k_b$
Constantes de par y de fuerza c.e.m. en el S.I.	—	—	$k_m$	$k$
Razón de engranaje del tren de engranajes	—	$n$	—	—
Desplazamiento del motor [ $rad$ ]	$\theta_m(t)$	$\theta$	—	$\theta_m(t)$
Velocidad angular [ $\frac{rad}{s}$ ]	$\omega_m(t)$	$\frac{d\theta}{dt}$	$\omega_m$	$\omega_m(t)$
Velocidad angular en el dominio s y en rpm [ $rpm$ ]	—	—	—	$\Omega_m^{rpm}(s)$
Tensión de medida del error [V]	—	$e_v$	—	—
Tensión aplicada a los bornes del motor [V]	$e_a(t)$	$e_a (= k_1 e_v)$	$V_m$	$e_a(t)$
Fuerza contraelectromotriz [V]	$e_b(t)$	$e_b$	—	$e_b(t)$
Par del motor [ $N \cdot m$ ]	$T_m(t)$	$T$	—	$T_m(t)$
Par de carga [ $N \cdot m$ ]	—	—	$T_d$	—
Par de carga debido a la fricción [ $N \cdot m$ ]	$T_L(t)$	—	—	$T_L(t)$
Corriente de la armadura [A]	$i_a(t)$	$i_a$	$I_m$	$i_a(t)$
Resistencia de la armadura (motor) [ $\Omega$ ]	$R_a$	$R_a$	$R_{sm}$	$R_a$
Inductancia de la armadura (motor) [H]	$L_a$	$L_a$	$L_m$	$L_a$
Inercia del motor [ $kg \cdot m^2$ ]	$J_m$	$J_0$	$J_{eq}$	$J_m$
Coefficiente de fricción viscosa [ $N \cdot m \cdot s$ ]	$B_m$	$b_0$	—	$B_m$

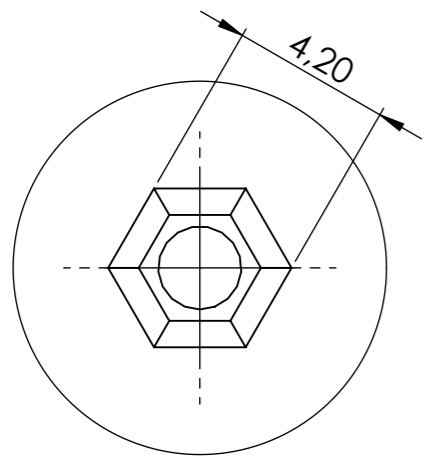
# Anexo G

## Planos

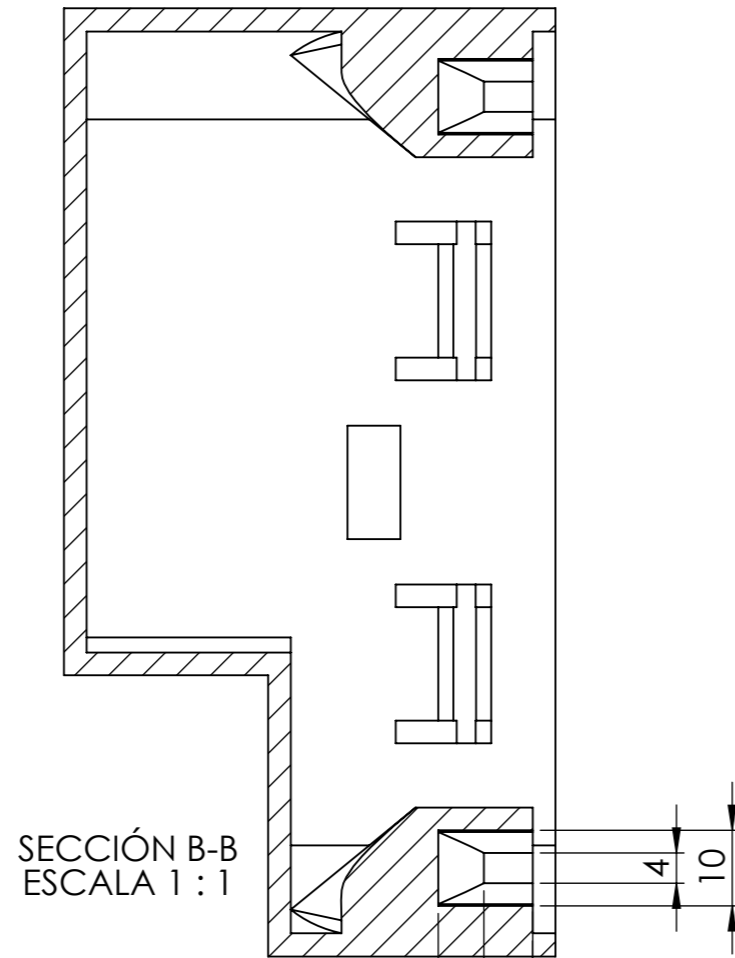
En este Anexo se muestran los distintos planos de los elementos diseñados. Se listan a continuación:

- Plano 1: Cuerpo principal (1)
- Plano 2: Cuerpo principal (2)
- Plano 3: Cubierta
- Plano 4: Acoplamiento base
- Plano 5: Apoyo silicona y llave
- Plano 6: Logo EII y logo ISA
- Plano 7: Ensamblaje

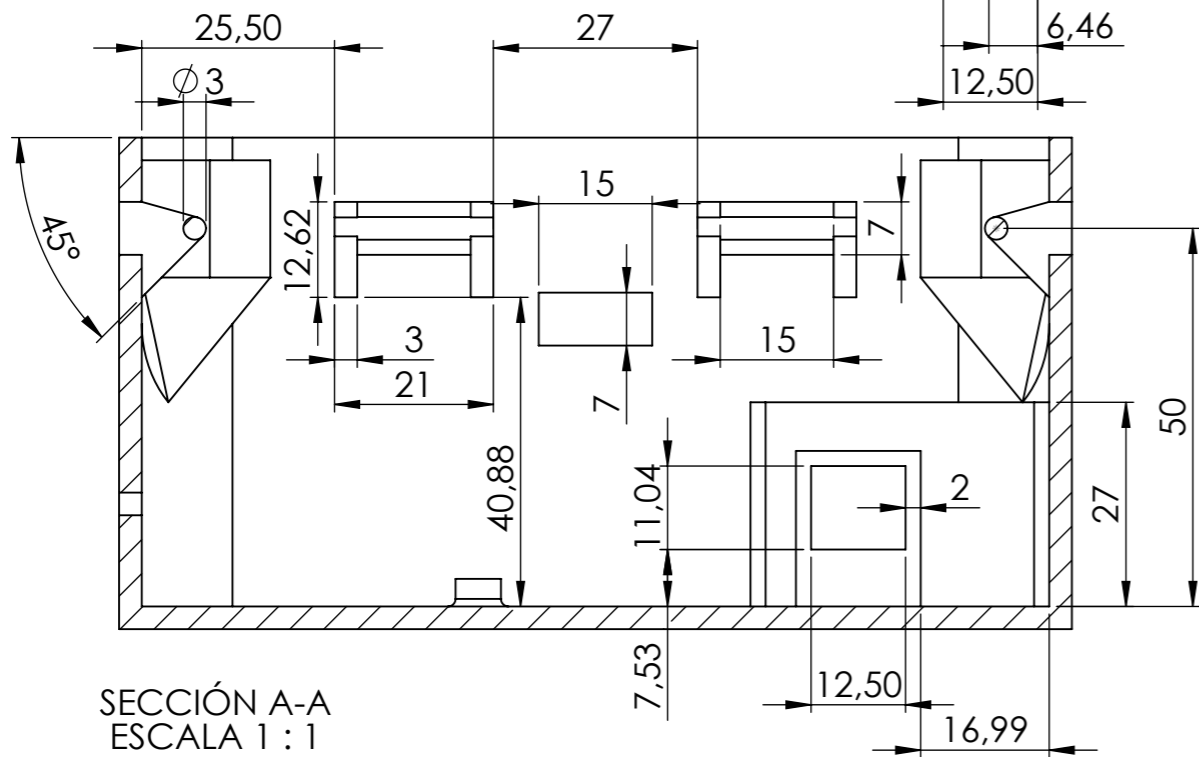




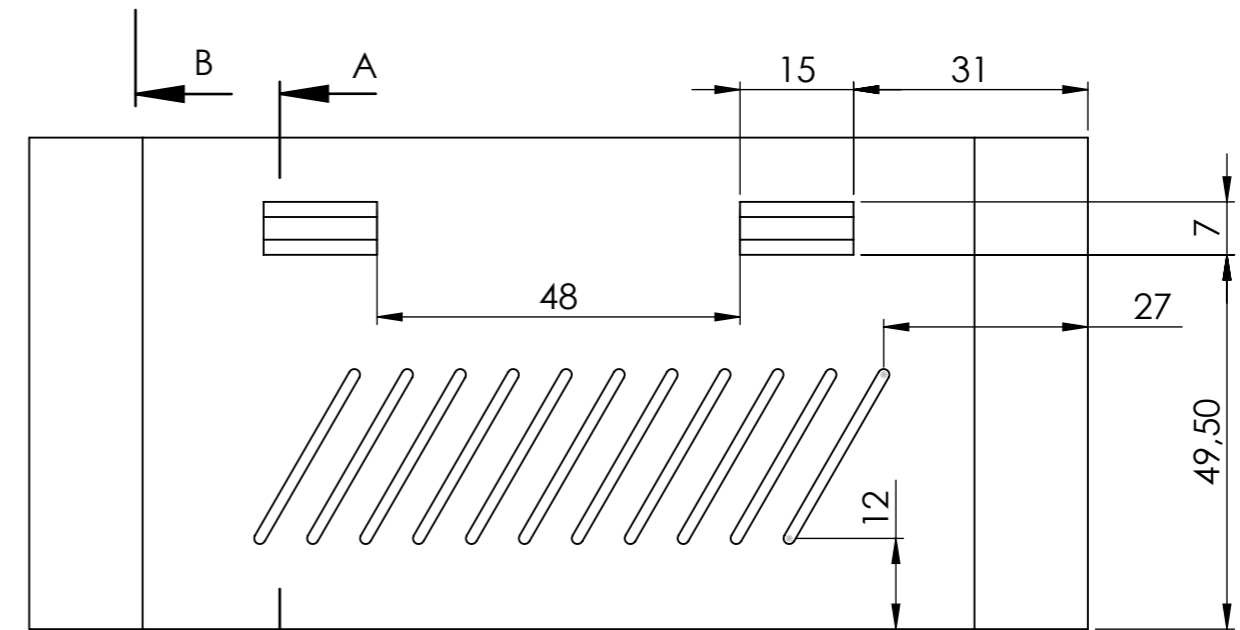
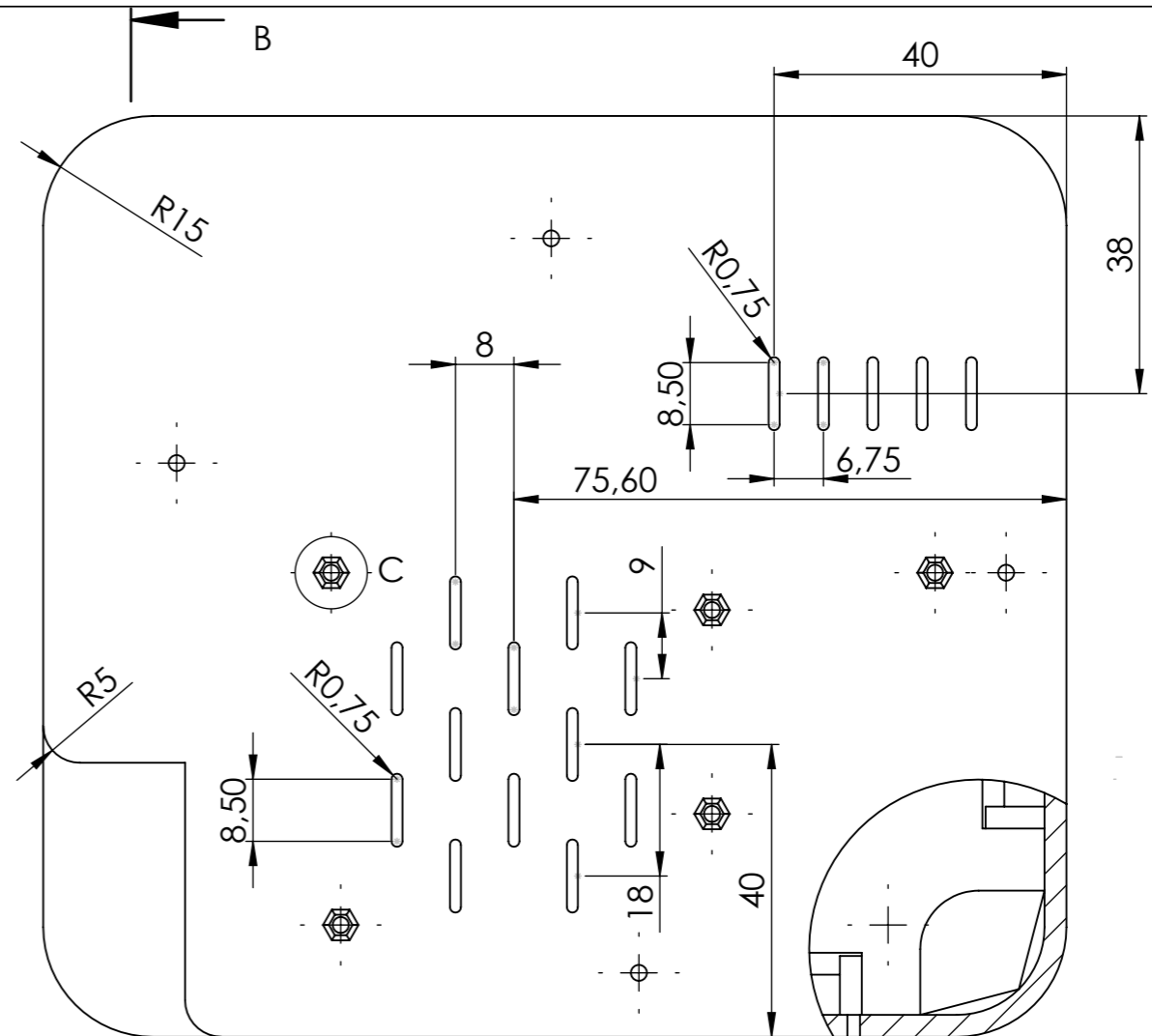
DETALLE C  
ESCALA 5 : 1



SECCIÓN B-B  
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

AUTOR: GUILLERMO FERRER LÓPEZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

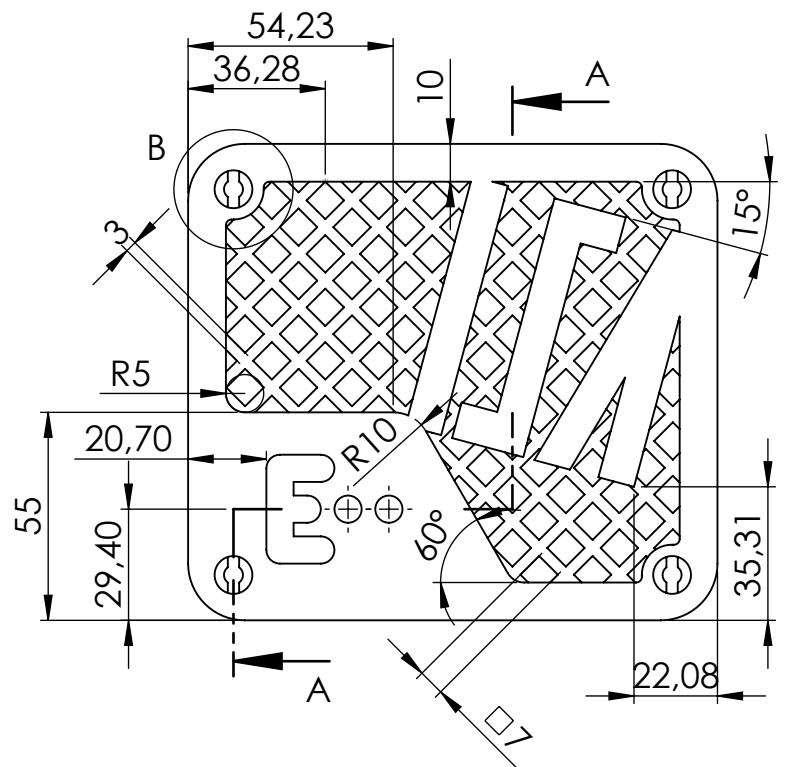
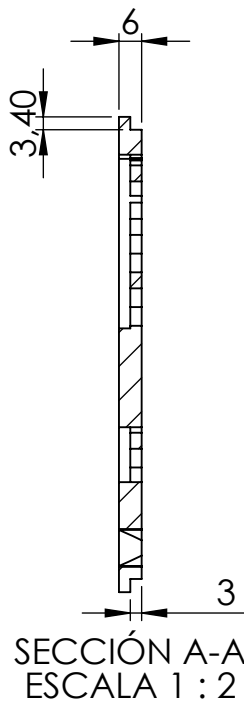
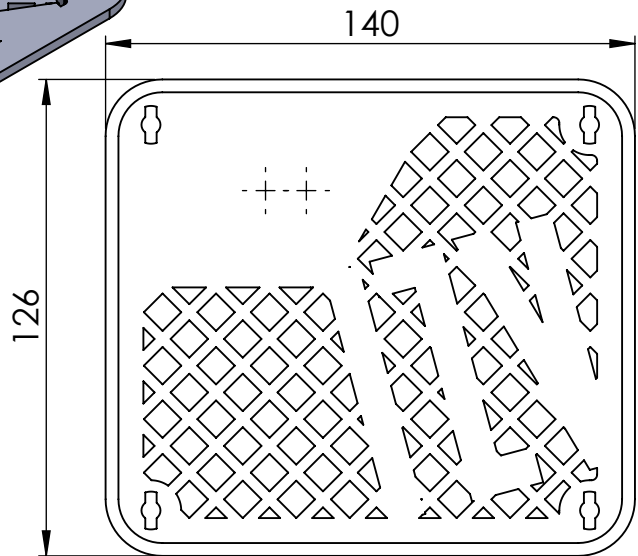
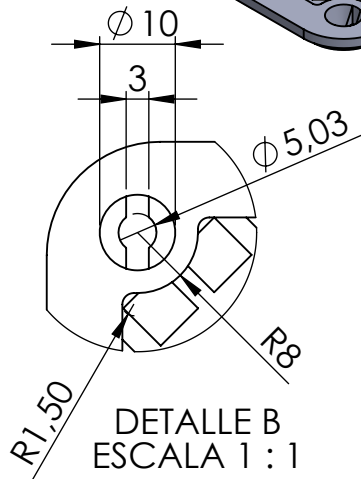
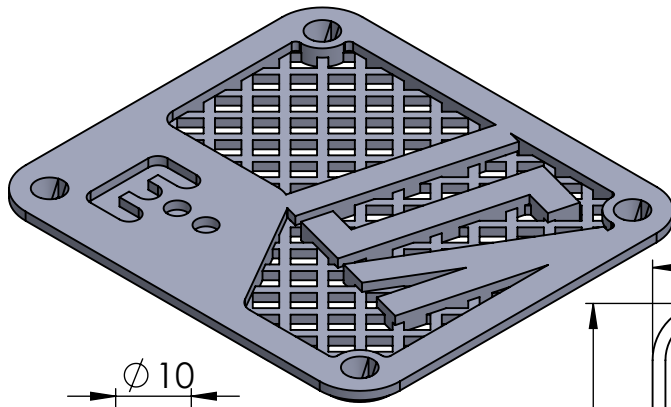
FIRMA:

CUERPO PRINCIPAL (2)

PLANO Nº:  
2

ESCALA:  
1:1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO,  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

AUTOR: GUILLERMO FERRER LÓPEZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

FIRMA:

CUBIERTA

PLANO Nº:

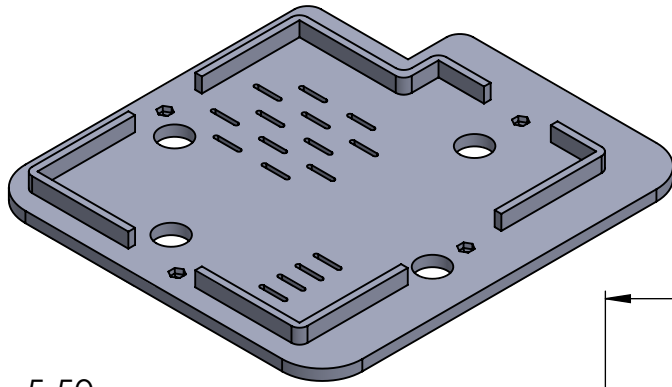
3

ESCALA:

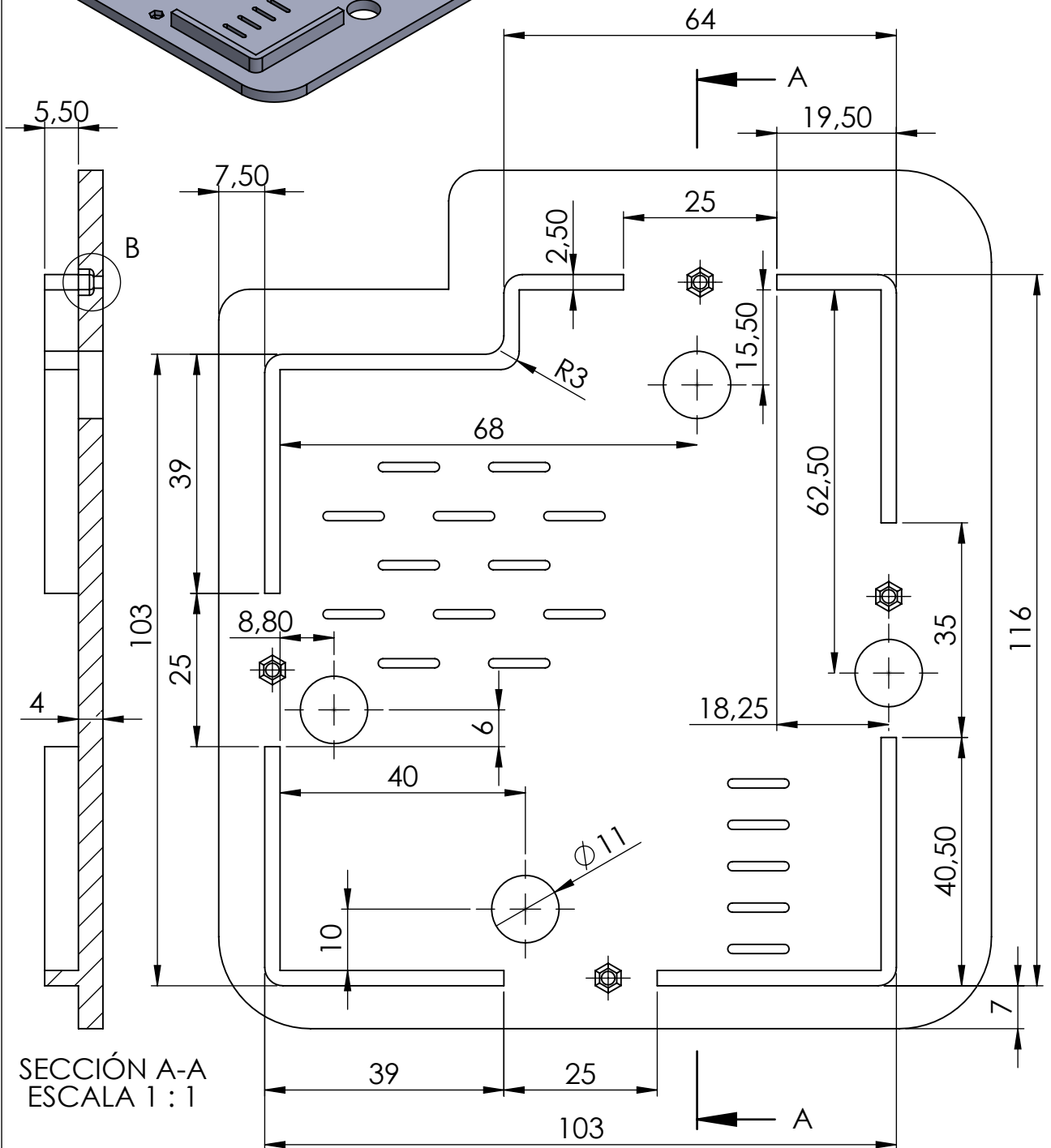
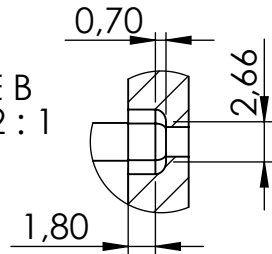
1:2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO,  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.

LAS COTAS DE LOS  
LOGOS SE PUEDEN  
VER EN EL PLANO Nº 6



DETALLE B  
ESCALA 2 : 1



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

AUTOR: GUILLERMO FERRER LÓPEZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

FIRMA:

ACOPLAMIENTO BASE

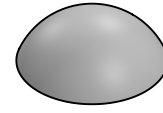
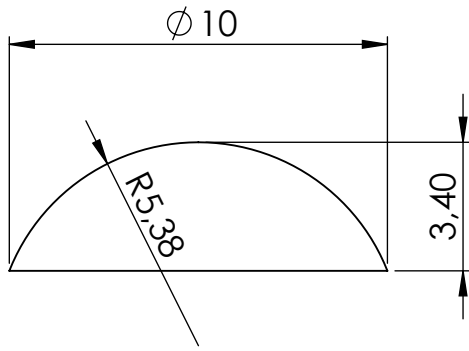
PLANO N°:

4

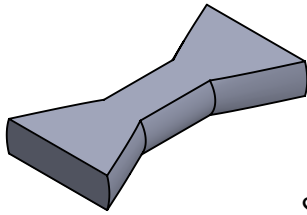
ESCALA:

1:1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO,  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.

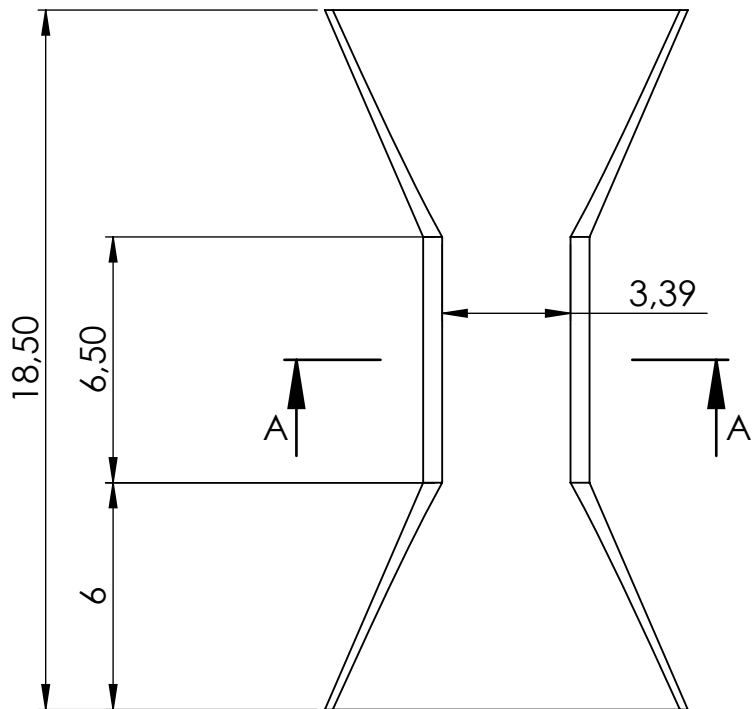
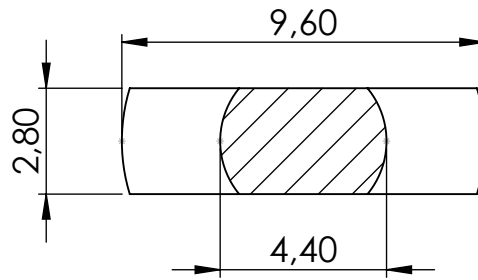


APOYO SILICONA



LLAVE

SECCIÓN A-A  
ESCALA 5 : 1



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

AUTOR: GUILLERMO FERRER LÓPEZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

FIRMA:

APOYO SILICONA Y LLAVE

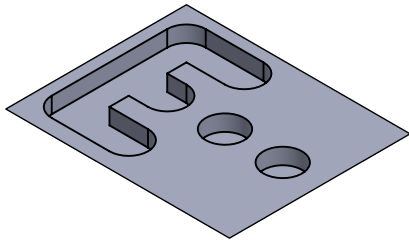
PLANO Nº:

5

ESCALA:

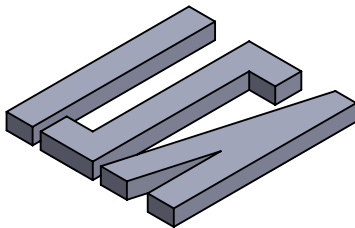
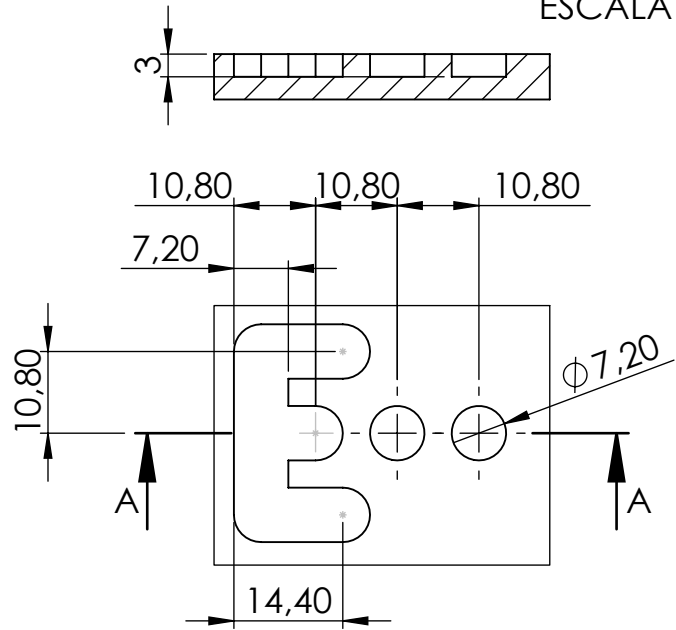
5:1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO,  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.

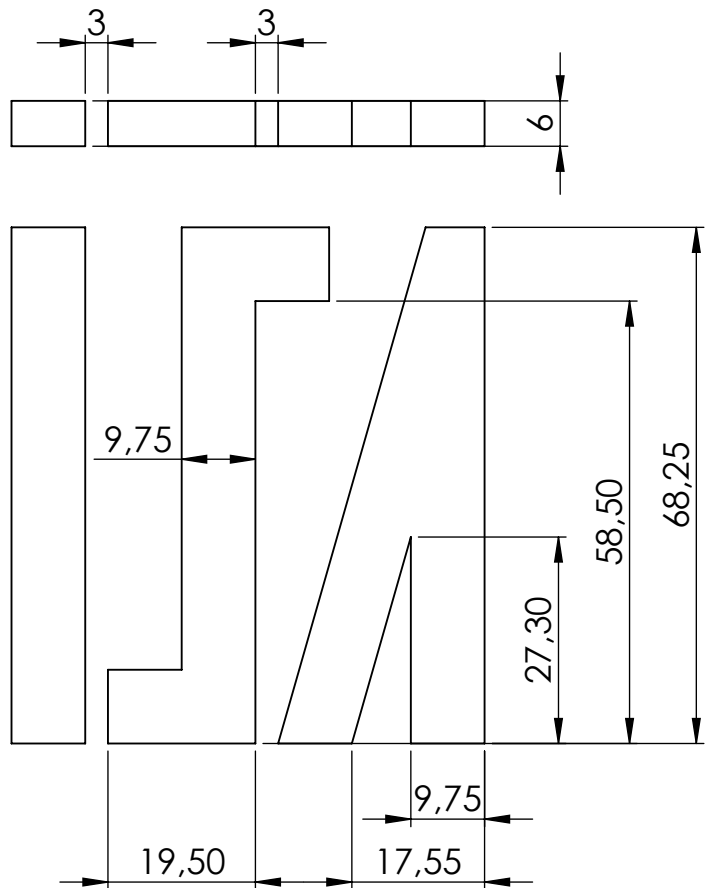


LOGO EII

SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 1



LOGO ISA



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

AUTOR: GUILLERMO FERRER LÓPEZ

FECHA: SEPTIEMBRE 2019

FIRMA:

LOGO EII Y LOGO ISA

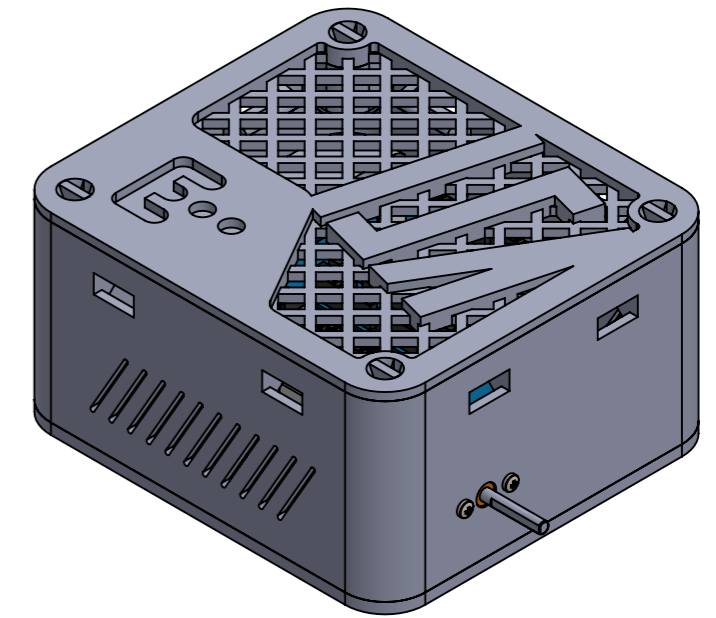
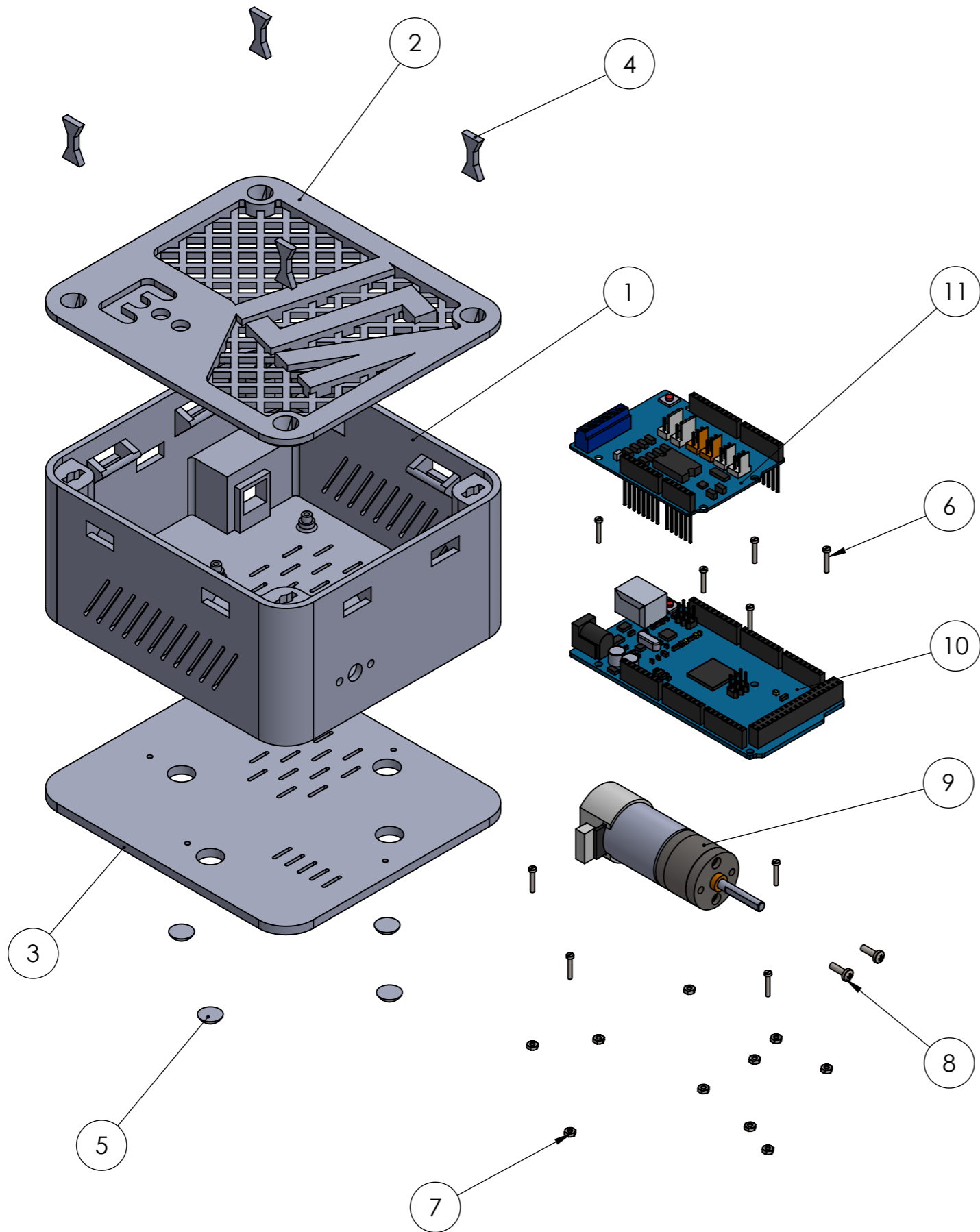
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO,  
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.

PLANO N°:

6

ESCALA:

1:1



IDENTIFICACIÓN	NOMBRE	CANTIDAD
01	Cuerpo principal	1
02	Cubierta	1
03	Acoplamiento base	1
04	Llave	4
05	Apoyo silicona	4
06	Tornillo placa	10
07	Tuerca placa	10
08	Tornillo motor	2
09	Motor Makeblock	1
10	Arduino MEGA 2560	1
11	Arduino Motor Shield	1

	<b>UNIVERSIDAD DE MÁLAGA</b>	
	ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES	
AUTOR: GUILLERMO FERRER LÓPEZ	ENSAMBLAJE	PLANO Nº: 7
FECHA: SEPTIEMBRE 2019		ESCALA: 1:2
FIRMA:		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO, LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM.

# Bibliografía

- [1] 3D HUBS. What is 3d printing? the definitive guide. <https://www.3dhubs.com/get/3d-printing-guide>.
- [2] Muestra de materiales para impresión 3d. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/select-3d-printing-process/4-brackets.jpg>. Accedido: Agosto 2019. Figura adaptada.
- [3] Ben Redwood, Filemon Schöffner y Brian Garret. *The 3D printing handbook. Technologies, design and applications*. 3D HUBS, primera edición, 2017.
- [4] A visual illustration of support structures needed for printing a Y, H and T with FDM. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/supports-3d-printing-technology-overview/visual2.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [5] Additive manufacturing technologies. <https://www.3dhubs.com/get/am-technologies>. Accedido: Agosto 2019. Figura adaptada.
- [6] The FDM printing process. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/intro-fdm-3d-printing/2-fdm-steps.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [7] The SLA 3D printing process. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-sla-3d-printing/8-sla-steps.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [8] The SLS printing process. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-sls-3d-printing/2-sls-steps.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [9] The SLM/DMLS printing process. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-metal-3d-printing/dmls-steps.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [10] The Material Jetting 3D printing process. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-material-jetting/2-mj-steps.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [11] The Binder Jetting printing process. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/introduction-binder-jetting/2-bj-steps.png>. Accedido: Agosto 2019.

- [12] Selecting a process by material. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/select-3d-printing-process/1-material.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [13] Thermoplastics pyramid. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/intro-fdm-3d-printing/10-thermo-pyramid.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [14] Selecting a process by functionality. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/select-3d-printing-process/2-functional.png>. Accedido: Agosto 2019.
- [15] Selecting a process by visual appearance. [https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/select-3d-printing-process/3-visual\\_appearance.png](https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/select-3d-printing-process/3-visual_appearance.png). Accedido: Agosto 2019.
- [16] Research results for all six polymers displayed in one graph. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/Which-FDM-3D-printing-plastics-is-best-for-my-application/chemistry-comparison.png>. Accedido: Agosto 2019. Figura adaptada.
- [17] Austin Hughes y Bill Drury. *Electric motors and drives. Fundamentals, Types and Applications*. Elsevier, cuarta edición, 2013.
- [18] Benjamin C. Kuo. *Sistemas de control automático*. Prentice Hall, séptima edición, 1996.
- [19] Moment of inertia solid cylinder. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d7/Moment\\_of\\_inertia\\_solid\\_cylinder.svg/255px-Moment\\_of\\_inertia\\_solid\\_cylinder.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d7/Moment_of_inertia_solid_cylinder.svg/255px-Moment_of_inertia_solid_cylinder.svg.png). Accedido: Agosto 2019.
- [20] Assembling 25mm dc gear motor. <https://forum.makeblock.com/t/assembling-25mm-dc-gear-motor/2589>. Accedido: Agosto 2019. Figura adaptada.
- [21] Moment of inertia thick cylinder. [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cc/Moment\\_of\\_inertia\\_thick\\_cylinder\\_h.svg/278px-Moment\\_of\\_inertia\\_thick\\_cylinder\\_h.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cc/Moment_of_inertia_thick_cylinder_h.svg/278px-Moment_of_inertia_thick_cylinder_h.svg.png). Accedido: Agosto 2019.
- [22] Depending on the degree of overhang, your fdm print might need support. <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/3dhubs-knowledgebase/supports-3d-printing-technology-overview/visual1.png>. Accedido: Agosto 2019. Figura adaptada.
- [23] Katsuhiko Ogata. *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, quinta edición, 2010.
- [24] Selecting right 3d printing process. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-right-3d-printing-process>. Accedido: Agosto 2019.

- [25] Sergio Fernández Calvo. Implementación y desarrollo de equipos de prácticas para el aprendizaje de técnicas de control mediante placas arduino y motores de corriente continua. Trabajo fin de máster, Universidad de Málaga. Ingeniería de Sistemas y Automática, 2018.
- [26] Arduino mega 2560. <https://grabcad.com/library/arduino-mega-2560--1>. Accedido: Febrero 2019.
- [27] Arduino motor shield. <https://grabcad.com/library/arduino-motor-shield-1>. Accedido: Febrero 2019.
- [28] UNE-EN ISO/ASTM 52900:2017. Fabricación aditiva. principios generales. terminología. Norma española, Asociación Española de Normalización, Génova 6 - 28004 Madrid, Noviembre 2017.
- [29] Malaga makerspace. <https://malagamakerspace.github.io/>.
- [30] Karl Johan Åström, Jacob Apkarian y Hervé Lacheray. *USB QICii Laboratory Workbook. DC Motor Control Trainer (DCMCT)*. Quanser Innovate Educate.
- [31] Guillermo Ferrer López. Estudio experimental de un intercambiador de calor de carcasa y tubos. modelado y simulación térmica con solidworks flow simulation. Trabajo fin de grado, Universidad de Málaga. Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos, 2018. Disponible en: <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/17661>.
- [32] Dimensiones arduino mega 2560. <https://blog.adafruit.com/2011/02/28/arduino-hole-dimensions-drawing>. Accedido: Julio 2019.
- [33] Rasplib - encoder arduino cpp. [https://github.com/hurstj01/RASPLib/blob/master/RASPLib/src/encoder\\_arduino.cpp](https://github.com/hurstj01/RASPLib/blob/master/RASPLib/src/encoder_arduino.cpp). Accedido: Julio 2019.
- [34] Arduino motor shield rev3. <https://store.arduino.cc/arduino-motor-shield-rev3>. Accedido: Julio 2019.
- [35] Arduino motor shield rev3 schematic. [https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino\\_MotorShield\\_Rev3-schematic.pdf](https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/arduino_MotorShield_Rev3-schematic.pdf). Accedido: Julio 2019.
- [36] What is the default state of the vin connect on the arduino motor shield? <https://www.robotshop.com/community/forum/t/what-is-the-default-state-of-the-vin-connect-on-the-arduino-motor-shield/23959/2>. Accedido: Agosto 2019.