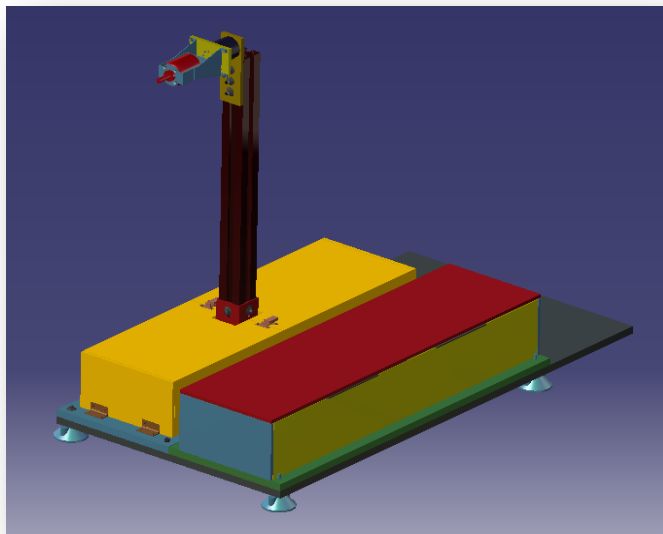




HUGO LÓPEZ PÉREZ

Diseño y construcción de una bancada para caracterización de plantas propulsoras por hélice con motor eléctrico



GRUPO DE INGENIERÍA AEROESPACIAL
DE INGENIERÍA AEROESPACIAL
Escuela técnica superior de ingenieros
HUGO LÓPEZ PÉREZ

ÍNDICE DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. OBJETIVOS	10
1.1.1. Características preliminares de la bancada.....	11
1.1.1.1. Dimensiones	11
1.1.1.2. Facilidad de transporte y accesibilidad	12
1.1.1.3. Adecuación al túnel de viento y a otras plantas propulsoras	13
1.2. MOTOR Y BATERIAS.....	13
1.2.1. Motor	13
1.2.2. Baterías.....	15
1.3. ESPECIFICACIONES	16
1.3.1. Motor	16
1.3.2. Baterías.....	17
1.4. RANGOS.....	19
2. INVESTIGACION DE PLATAFORMAS SIMILARES.....	21
2.1. BANCADAS PARA ENSAYOS ESTÁTICOS	21
2.2. BANCADAS EN TÚNELES DE VIENTO	23
3. DISEÑO DE LA BANCADA	25
3.1. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.....	25
3.1.1. Modelo 1	26
3.1.2. Modelo 2	29
3.1.3. Modelo 3	33
3.1.4. Modelo 4	37
3.2. DISEÑO ELEGIDO	40
3.2.1. Funcionamiento	43
3.2.2. Descripción.....	44
3.2.2.1. Base	44
3.2.2.2. Caja electrónica	48

3.2.2.3.	Bancada Túnel	55
3.2.3.	Material y presupuesto	83
3.2.3.1.	Materiales	83
3.2.3.2.	Presupuesto.....	86
4.	DESCRIPCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	87
4.1.	CÉLULA DE CARGA.....	87
4.2.	SENSOR DE PAR	91
4.3.	ACONDICIONADOR DE SEÑAL	95
4.4.	UNIDAD DE CONTROL A DISTANCIA.....	96
4.5.	PLACA HÉRCULES.....	97
4.6.	SISTEMA DE TELEMETRÍA DEL MOTOR.	98
4.6.1.	Sistema de telemetría 1	98
4.6.1.1.	Esquema eléctrico	98
4.6.1.2.	Unidad de configuración y visualización de datos	100
4.6.1.3.	Unidad de control de velocidad del motor (variador).....	100
4.6.1.4.	Medidor de corriente y voltaje	102
4.6.1.5.	Medidor de revoluciones	103
4.6.1.6.	Multiplexor	104
4.6.2.	Sistema de telemetría 2	105
4.6.2.1.	Esquema eléctrico	106
4.6.2.2.	Medidor de intensidad.....	107
4.6.2.3.	Medidor de voltaje	107
4.6.2.4.	Medidor de revoluciones	108
4.6.2.5.	Elementos varios	111
4.7.	PRESUPUESTO DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	114
5.	CÁLCULOS	115
5.1.	INTRODUCCIÓN	115
5.2.	ESTUDIO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES	117
5.2.1.	Galleta	117
5.2.2.	Placa A	121
5.2.3.	Viga-soporte	125
5.2.4.	Placa 1	126
5.2.5.	Placa 2	129
5.3.	REACCIONES SOBRE LAS BASES.....	131

5.3.1.	Volcado.....	131
5.3.2.	Reacciones de la bancada túnel	136
5.4.	ESTUDIOS AERODINÁMICOS	136
5.4.1.	Resistencia del motor y varios.....	137
4.4.2.	Resistencia del motor, varios y la viga-soporte.....	138
6.	TESTADO Y PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS	141
6.1.	TESTADO DE LOS SENSORES.....	141
6.1.1.	Célula de carga	141
6.1.2.	Sensor de par.....	141
6.1.3.	Sensor de intensidad y voltaje	142
6.1.4.	Sensor de revoluciones del motor	143
6.2.	PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS.....	144
7.	DATOS (ENSAYOS).....	145
8.	CONCLUSIONES Y MEJORAS.....	148
	BIBLIOGRAFÍA	152

AGRADECIMIENTOS

Doy aquí las gracias a todos aquellos que han contribuido a la realización de este proyecto y sin las cuales no se podría haber llevado a cabo. A Alberto García Martínez que contribuyó de una forma notable en la construcción de la bancada durante los meses de verano. Al personal del laboratorio de Mecánica de Fluidos, Manuel González y José Tejada, quienes nos ayudaron en la construcción y diseño de algunas partes de proyecto. También agradecer al profesor Francisco Gavilán y a los ingenieros de telecomunicaciones del Grupo de Ingeniería Aeroespacial, Vicente Payo y Javier Galnares, que se encargaron de la telemetría y los circuitos eléctricos. Y, cómo no, al profesor del proyecto Sergio Esteban Roncero que me ha guiado y ayudado en prácticamente todas las etapas del proyecto. A todas estas personas mis más sinceros agradecimientos.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Túnel de Viento	12
Figura 3 Motor en Catia	14
Figura 2 Motor (38)	14
Figura 4 Bancada	14
Figura 5 Bancada en Catia	15
Figura 6 Baterías (39)	15
Figura 7 Configuración del motor	16
Figura 8 Bancada montada.....	17
Figura 9 Pack de Baterías 1p14s.....	18
Figura 10 Packs de Baterías en catia	18
Figura 11 Plano de baterías.....	19
Figura 12 Bancada estática para medir tracción (4).....	22
Figura 13 Bancada estática para medir revoluciones (5).....	22
Figura 14 Balanza de tres grados de libertad (6).....	23
Figura 15 Sistema de medida de empuje por flexión (7)	24
Figura 16 Modelo 1	28
Figura 17 Modelo 2	31
Figura 18 Modelo 2 Abierto	32
Figura 19 Modelo 3	35
Figura 20 Modelo 3 Abierto	36
Figura 21 Modelo 4	38
Figura 22 Modelo 4 Abierto	39
Figura 23 Bancada en conf. para ensayos estáticos.....	40
Figura 24 Partes de la estructura	41
Figura 25 Partes de la estructura 2	42
Figura 26 Cargas	44
Figura 27 Plano de apoyo.....	45
Figura 28 Apoyo en Catia	45
Figura 29 Apoyo real	46
Figura 30 Plano de base	47
Figura 31 Base en Catia	47
Figura 32 Base montada con los demás componentes.....	48
Figura 33 Plano de bisagra de piano	49
Figura 34 Bisagra de piano en Catia	49
Figura 35 Bisagra de piano instalada.....	49
Figura 36 Montaje de la caja electrónica	51
Figura 37 Plano de Caja electrónica	52
Figura 38 Caja electrónica en Catia	53
Figura 39 Caja electrónica real	53
Figura 40 Caja electrónica abierta en Catia.....	54
Figura 41 Caja electrónica abierta real	54
Figura 42 Montaje de la base y las carcasas	55

Figura 43 Plano de base de bancada túnel	56
Figura 44 Base de bancada túnel en Catia	57
Figura 45 Plano de bisagra	57
Figura 46 Bisagra en Catia	58
Figura 47 Bisagra real (12).....	58
Figura 48 Cierres a presión.....	59
Figura 49 Planos de carcasas.....	60
Figura 50 Carcasas en Catia.....	61
Figura 51 Bancada túnel con carcasas abiertas	62
Figura 52 Bancada túnel con carcasas cerradas.....	62
Figura 53 Montaje del sistema de carga inferior	63
Figura 54 Planos de escuadras del Leroy Merlin.....	64
Figura 55 Escuadras del Leroy Merlin en Catia	64
Figura 56 Planos de Placa 2	65
Figura 57 Placa 2 en Catia	65
Figura 58 Planos de Placa 1.....	66
Figura 59 Placa 1 en Catia	66
Figura 60 Planos de escuadras de Alu-Stock	67
Figura 61 Escuadras de Alu-Stock en Catia	67
Figura 62 Montaje de la célula de carga en Catia	68
Figura 63 Montaje de la célula de carga	68
Figura 64 Planos de base móvil.....	70
Figura 65 Base móvil en Catia	70
Figura 66 Plano de guías.....	71
Figura 67 Guías en Catia.....	71
Figura 68 Guías (punto (13) de la bibliografía).....	71
Figura 69 Instalación de la base móvil sobre las guías y el anclaje en Catia	72
Figura 70 Instalación de la base móvil sobre las guías y el anclaje	72
Figura 71 Montaje del sistema de carga inferior en Catia	74
Figura 72 Planos de Anclaje	75
Figura 73 Anclaje en Catia	75
Figura 74 Perfil de la viga-soporte	76
Figura 75 Viga-Soporte en Catia.....	77
Figura 76 Planos de Placa A.....	78
Figura 77 Placa A en Catia	78
Figura 78 Planos de Galleta.....	79
Figura 79 Galleta en Catia	79
Figura 80 Instalación del sistema de carga superior en Catia	80
Figura 81 Instalación del sistema de carga superior	80
Figura 82 Instalación del sistema de carga superior 2 en Catia	81
Figura 83 Instalación del sistema de carga superior 2	81
Figura 84 Instalación del sistema de carga superior 3 en Catia	82
Figura 85 Instalación del sistema de carga superior 3	82
Figura 86 Aluminio (15)	83
Figura 87 Madera DM (18)	84

Figura 88 Contrachapado (20).....	85
Figura 89 Células de carga SSM (22)	88
Figura 90 Células de carga SSM en Catia.....	88
Figura 91 Célula de carga en la bancada túnel.....	90
Figura 92 Unión de la célula de carga con la placa 1	90
Figura 93 Sensor de par (23)	92
Figura 94 Sensor de par en Catia.....	92
Figura 95 Vista Superior de la Bancada túnel en Catia	94
Figura 96 Vista Superior de la Bancada túnel	94
Figura 97 Acondicionador de señal	95
Figura 98 Transmisor Futaba de 9 canales (24)	96
Figura 99 Receptor Futaba (25).....	97
Figura 100 Placa Hércules II (punto (26) de la bibliografía)	97
Figura 101 Circuito de telemetría 1.....	99
Figura 102 Caja JETIBOX	100
Figura 103 SPIN 99 OPTO	101
Figura 104 Instalación del variador	101
Figura 105 Dispositivo MUI 150	102
Figura 106 Dispositivo MRPM de cálculo de velocidad.....	103
Figura 107 Dispositivo MRPM de sensor de velocidad	104
Figura 108 Sensor fotoeléctrico	104
Figura 109 Expander.....	105
Figura 110 Circuito de telemetría 2.....	106
Figura 111 Sensor de intensidad LTS 25 NP (29).....	107
Figura 112 Sensor de voltaje INA333 (30).....	108
Figura 113 Sensor Hall A1120EUA-T (31)	108
Figura 114 Instalación del sensor Hall 1.....	109
Figura 115 Instalación del sensor Hall 2.....	109
Figura 116 Chips del sensor Hall A3212ELHLT-T (32).....	110
Figura 117 Apantallamiento del chip de sensor Hall.....	110
Figura 118 Multiplexor	111
Figura 119 Cajita electrónica de la bancada 1.....	112
Figura 120 Cajita electrónica de la bancada 2.....	112
Figura 121 Conmutador	113
Figura 122 DPI 150 Druck Precision	114
Figura 123 Cargas	115
Figura 124 Instalación de la placa galleta	118
Figura 125 Pieza de madera de la galleta.....	118
Figura 126 Discretización de la galleta.....	120
Figura 127 Campo de tensiones de la galleta	120
Figura 128 Campo de desplazamientos de la galleta	121
Figura 129 Pieza de madera de la placa A.....	122
Figura 130 Discretización de la placa A.....	123
Figura 131 Campo de tensiones de la placa A.....	124
Figura 132 Campo de desplazamientos de la placa A	124

Figura 133 Viga-Soporte.....	126
Figura 134 Discretización de la placa 1	127
Figura 135 Campo de tensiones de la placa 1	128
Figura 136 Campo de desplazamientos de la placa 1	128
Figura 137 Discretización de la placa 2	129
Figura 138 Campo de tensiones de la placa 2.....	130
Figura 139 Campo de desplazamientos de la placa 2	130
Figura 140 Cargas equivalentes	131
Figura 141 Momento M1	132
Figura 142 Momento M2	132
Figura 143 Fuerza F	133
Figura 144 Peso	133
Figura 145 Total de reacciones sobre la bancada	134
Figura 146 Contrapeso	134
Figura 147 Bancada con contrapeso	135
Figura 148 Reacciones en la bancada túnel	136
Figura 149 Función $f(Re)$	140
Figura 150 Testado del sensor de par	142
Figura 151 Pinza amperimétrica (punto (36) de la bibliografía)	143
Figura 152 Tacómetro (punto (37) de la bibliografía)	143
Figura 153 Empuje Neto.....	145
Figura 154 Par Neto.....	146
Figura 155 CT en túnel de viento	146
Figura 156 CP en túnel de viento	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	16
Tabla 2.....	19
Tabla 3.....	20
Tabla 4.....	86
Tabla 5.....	89
Tabla 6.....	93
Tabla 7.....	125
Tabla 8.....	139

1. INTRODUCCIÓN

Para poder diseñar cualquier tipo de aeronave en donde intervenga un motor y una hélice, ya sea de forma separada o en conjunto (turbohélice), es necesario conocer las características del conjunto, a lo que llamamos planta propulsora y motora. Estos datos relacionan entre sí la tracción proporcionada por la hélice, el consumo del motor y el par generado para distintas velocidades del viento y regímenes de potencia. Con estos datos se puede diseñar el conjunto de la aeronave, de forma que se obtengan las actuaciones que se buscaban en un principio, o se puede decidir si se necesita utilizar un motor o una hélice diferentes. No obstante, en este último caso, como ya se tienen unos datos de la anterior planta, la elección de una nueva planta propulsora y motora resultará más fácil porque ya se tiene como referencia la anterior.

Una vez puesta de manifiesto la importancia de conocer las propiedades de la planta propulsora y motora, en la industria aeronáutica, surgen dispositivos destinados a tales fines. Estos aparatos, que nos sirven para estudiar los conjuntos motor-hélice, se denominan bancadas de ensayos.

En las aeronaves de gran envergadura, como las que hay en la industria comercial y militar, estas bancadas no constituyen un elemento único, es decir, están compuestas por diversos dispositivos y estructuras de apoyo entorno al motor de la aeronave totalmente independientes. Todos estos elementos, durante el funcionamiento del motor, van transmitiendo sus datos de temperatura, presión, consumo, empuje, gasto..., a unas salas de control donde se tratan los datos y se obtiene la información deseada. Para realizar todo este procedimiento se requiere de edificios enteros para las instalaciones y de un personal altamente cualificado para llevar a cabo los ensayos y la toma de datos.

Sin embargo, en el caso de plantas propulsoras menos potentes como las que se utilizan en el aeromodelismo, los UAV's, e incluso las avionetas de pequeña envergadura, las bancadas de ensayo son mucho más pequeñas y menos complejas que sus homólogas mayores. En estos casos lo que prima es el conocimiento del empuje, el par y el consumo a diferentes velocidades de vuelo y posición de palanca. En estos casos basta con tener una cámara de seguridad donde realizar los ensayos y un reducido grupo de personas para la toma de datos.

Este proyecto se centra precisamente en el diseño de una de estas últimas bancadas. Se dispone en el Grupo de Ingeniería Aeroespacial de un UAV el cual posee un motor de combustión interna y se desea cambiar ese motor por uno eléctrico. Por tanto, se necesita estudiar y caracterizar este motor y elegir la combinación de hélice que permita comprobar y verificar que tiene las características necesarias para poder realizar las actuaciones que ya poseía el UAV con el motor de combustión interna.

1.1. OBJETIVOS

Este proyecto consiste en el diseño de una bancada de pruebas para probar combinaciones de motor-hélice para UAV's. El objetivo es tener una bancada genérica que permita la adquisición de datos que permitan a su vez modelar las actuaciones motoras y propulsoras. Por lo tanto, para poder conseguir dichos objetivos la bancada de pruebas ha de estar diseñado y construido de manera que permita realizar las siguientes tareas:

- Caracterización de la planta motora
- Caracterización de la planta propulsora

Para caracterizar la planta motora, se requiere poder medir las siguientes variables:

1. Par en eje.
2. Revoluciones en eje.
3. Potencia de entrada: Intensidad y Voltaje
4. Potencia de salida: RPM y par

Para caracterizar la planta propulsora, se requiere poder medir las siguientes variables:

1. Tracción de la hélice
2. Par en el eje
3. Potencia mecánica
4. Rendimiento

1.1.1. Características preliminares de la bancada

La siguiente sección se centra en describir las principales características de la bancada. La bancada de pruebas tiene que tener:

- Ser capaz de testar diferentes plantas propulsivas todas de combinación motor-hélice, todo y que sólo se probará en motor eléctrico.
- Tendrá que ser portátil y poder probarse en túnel de viento.
- Tendrá que estar elevada para asegurarse que existe al menos un diámetro de hélice de separación en cualquier dirección radial tanto en los ensayos estáticos como en los que se realizan en el túnel de viento. Con tal requisito se pretende que la corriente que llega a la hélice no se encuentre perturbada, lo que revertiría en los resultados.

En esta sección desarrollamos estos requisitos dimensionales y estructurales a los que está sometido el conjunto.

1.1.1.1. Dimensiones

Las dimensiones máximas quedan restringidas por el entorno de menores dimensiones en el que tiene que operar la bancada, en este caso, la parte central del túnel de viento. Esta zona es una sección de 1,85x1,4 m por 1,5 m de profundidad. En un principio la totalidad de la bancada no iba a exceder estos valores de longitud, altura y profundidad, no obstante, una vez que la bancada se divide en tres partes separables (se verá en los apartados posteriores) y solo una de ellas va dentro del túnel de viento, y se cumple sobradamente este requisito.



Figura 1 Túnel de Viento

En cuanto a las dimensiones mínimas no existe ningún tipo de limitación a priori. La bancada es en principio lo más pequeña posible, siendo fijado su tamaño mínimo por los dispositivos y elementos indivisibles (como las guías) que son necesarios.

1.1.1.2. Facilidad de transporte y accesibilidad

La bancada también debe cumplir unos requisitos en cuanto a peso, tamaño y accesibilidad con el objetivo de poder ser transportada por como máximo dos personas en varios trayectos y, a la vez, poder ser accesible a todas sus partes.

- Transporte:

La bancada debe poder ser transportada por un máximo de dos personas en varios trayectos. Para cumplir dicho requisito la bancada debe tener un peso adecuado para tal fin o bien poseer una estructura que permita este transporte, bien mediante la división en partes o mediante sistemas de transporte (ruedas,...).

- Accesibilidad:

La bancada debe ser una estructura modular y accesible que pueda ser desmontada en todas sus partes fundamentales y que una vez montada se pueda acceder a todos los lugares donde es necesario acceder para confirmar un buen funcionamiento. Esto se consigue mediante la utilización exclusiva, para realizar uniones, de elementos de unión desmontables (tornillería, velcro...). De esta forma todas las partes pueden separarse unas de otras con la utilización de un destornillador o la simple fuerza.

Hay que señalar qué por partes fundamentales se distinguen los dispositivos electrónicos (célula de carga, sensor de par, el motor...) y los elementos estructurales. Elementos como cajas y carcasas constituyen un elemento único indivisible, que por otra parte no tendría ningún sentido desmontar.

1.1.1.3. Adecuación al túnel de viento y a otras plantas propulsoras

Para poder funcionar en el túnel de viento la estructura debe poseer unas características que le permitan asentarse de forma firme y segura en el túnel de viento. Además la bancada deberá configurarse para que el conjunto motor-hélice quede en la zona central del túnel de viento donde la corriente está menos perturbada y se pueden alcanzar mayores tamaños de hélices a probar.

Por otro lado, dentro de la estructura de la bancada debe existir una pieza de configuración o forma variable que permita la instalación de diferentes plantas motoras. Esta pieza puede ser un elemento sólido adaptado para poder albergar diferentes motores o un elemento mecánico compuesto por diversas piezas. Esta pieza debe cumplir permitir la instalación de diferentes conjuntos de motor-hélice.

1.2. MOTOR Y BATERIAS

Aunque en este proyecto se fijarán el motor y las baterías a utilizar, la bancada está diseñada para operar con un gran abanico de motores y hélices. El motor elegido, así como las baterías, están destinados a utilizarse en el UAV Céfiro. Para más detalles se puede consultar los puntos (1) y (2) de la bibliografía. El punto (2) ha sido incluido en el trabajo como el Apéndice C.

1.2.1. Motor

El motor que se va a probar en la bancada será el AXI 5345/16 (Figura 2 y Figura 3). Se trata de un motor de corriente alterna proveniente de una serie de motores destinados a la aviación de aeromodelismo.

Por otro lado, para la fijación del motor utilizaremos una bancada Hacker A50 de aluminio (Figura 4 y Figura 5).



Figura 2 Motor (38)

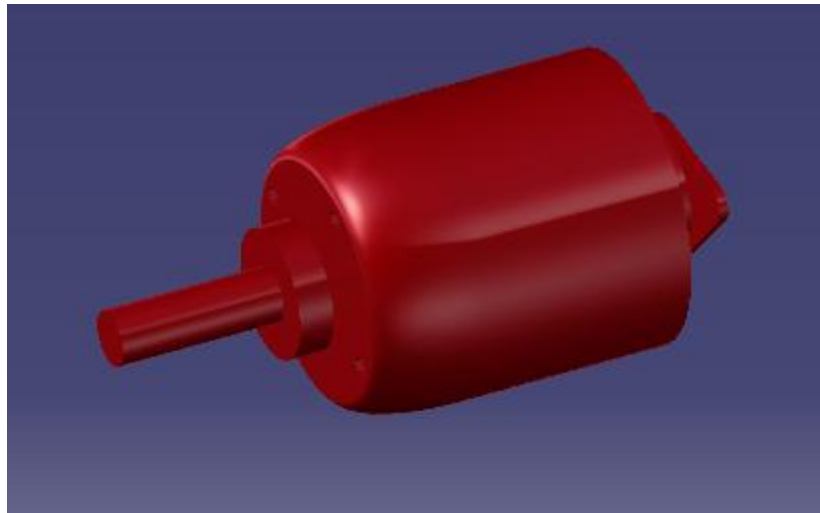


Figura 3 Motor en Catia



Figura 4 Bancada

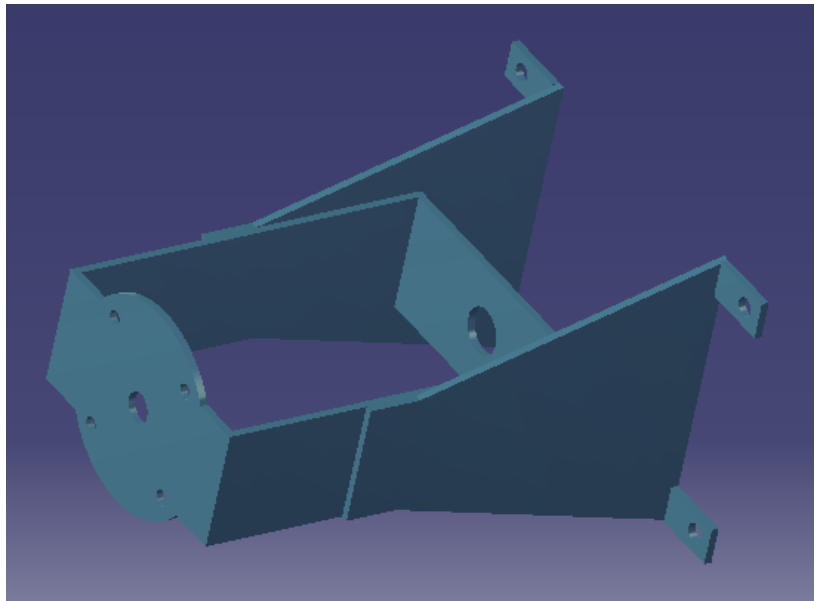


Figura 5 Bancada en Catia

1.2.2. Baterías

Para alimentar al motor anterior se utilizarán las baterías 7s 2300mah A123 26650 Battery Pack T600 de ion-litio (Figura 6). La configuración elegida, así como la potencia que proporcionan, han sido elegidas atendiendo a las necesidades del motor. Nuevamente las razones específicas para las elecciones se pueden encontrar los puntos (1) y (2) de la biografía.



Figura 6 Baterías (39)

1.3. ESPECIFICACIONES

En este apartado exponemos las especificaciones del motor y las baterías.

1.3.1. Motor

- Características

Las características del motor empleado pueden verse en la Tabla 1.

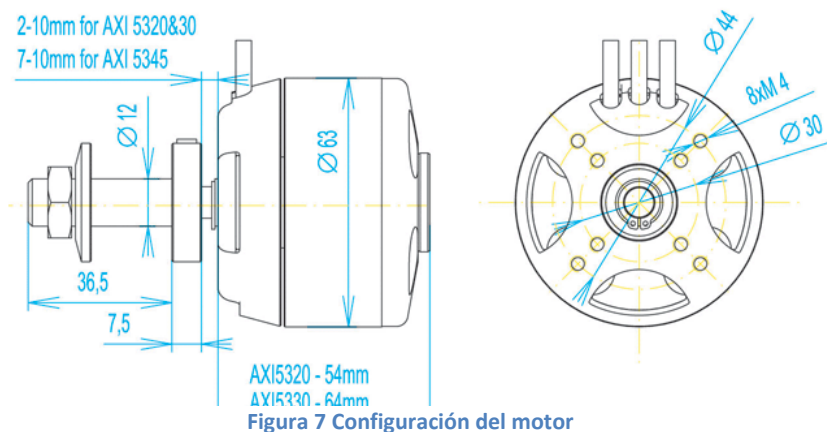
Especificaciones del motor AXI 5345/16	
Constante de velocidad	195 rpm/V
Voltaje de alimentación	26,4 – 44,4 V
Eficiencia máxima	94 %
Intensidad máxima	90 A durante 20 s
Intervalo de intensidades con eficiencia superior a 84%	30 – 75 A
Resistencia interna	34 mΩ
Peso	895 g
Diámetro	8 mm
Corriente sin carga	2,1 A

Tabla 1

- Dimensiones del motor

El motor puede instalarse en dos configuraciones: frontal o radial. En los ensayos de bancada utilizaremos la frontal (Figura 7) porque es la configuración que se utilizará en el UAV.

AXI 53XX + front prop holder



- Dimensiones de la bancada

La bancada del motor se monta según las necesidades de nuestro motor en concreto resultando unas dimensiones concretas (Figura 8).

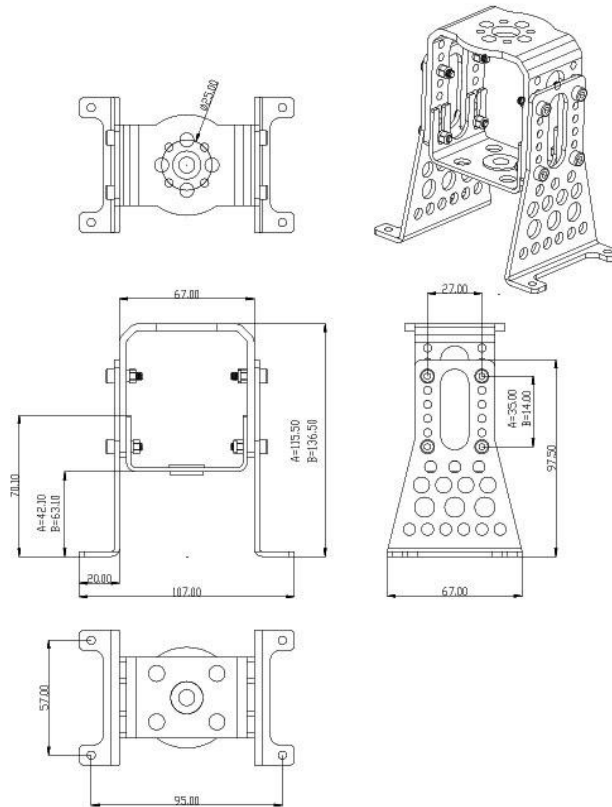


Figura 8 Bancada montada

1.3.2. Baterías

- Configuración

Se tendrán dos paquetes de baterías (Figura 9 y Figura 10) para alimentar el motor en los ensayos. Cada paquete estará compuesto a su vez por dos packs indivisibles de celdas en configuración lineal de siete celdas, ambos conectados en serie. Utilizando la nomenclatura electrónica esta configuración de baterías corresponde a 1p14s, donde la letra p corresponde al número de paquetes y la letra s al número de celdas.

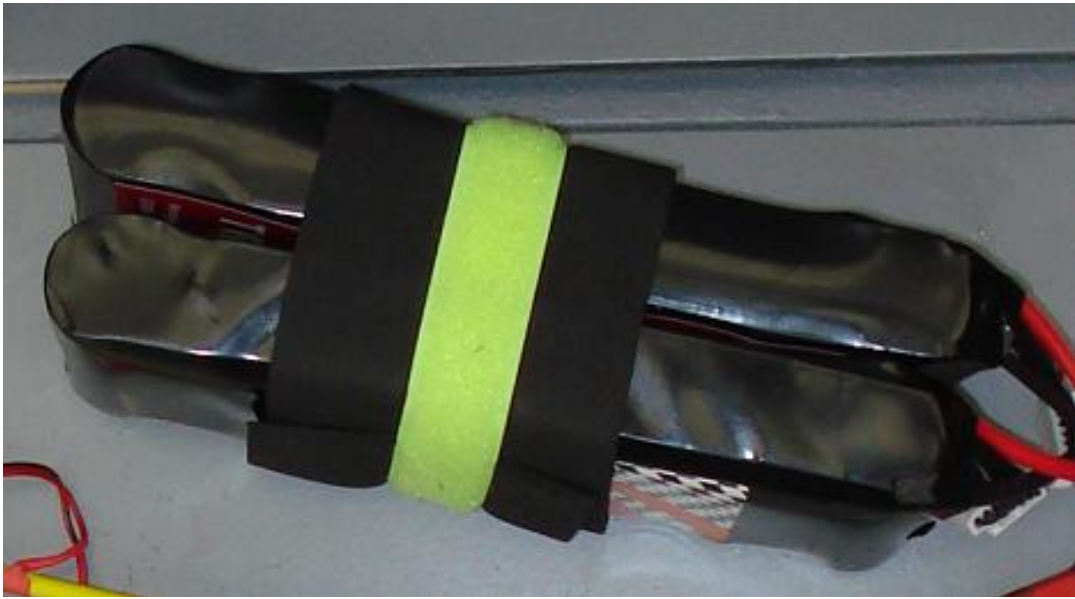


Figura 9 Pack de Baterías 1p14s

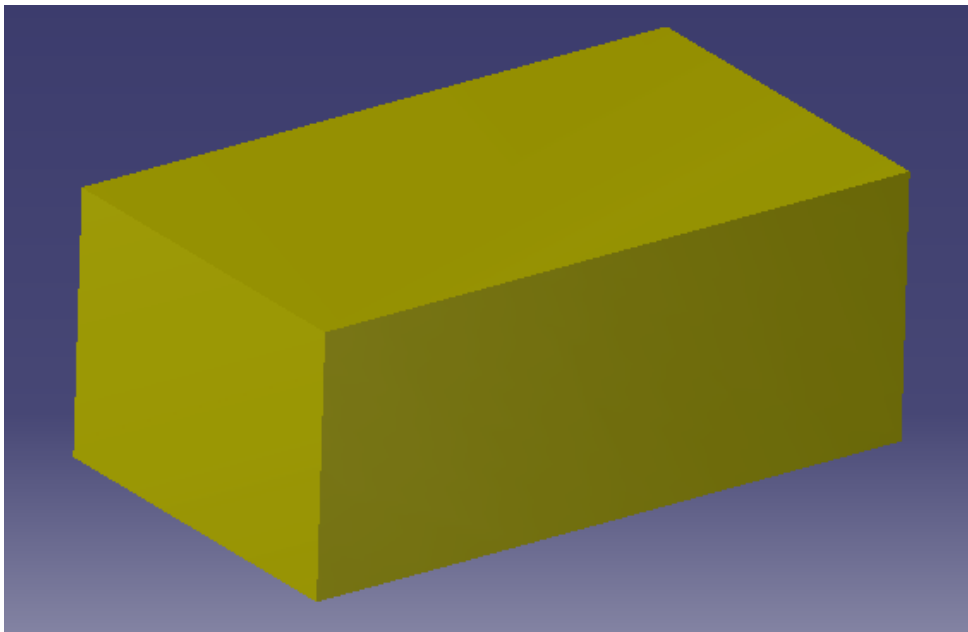


Figura 10 Packs de Baterías en catia

- Características

Las características de las citadas baterías pueden verse en la Tabla 2.

Especificaciones de las baterías T600 de ion-litio pack de 7 celdas	
Tensión nominal del pack	23,1 V
Tensión de la batería totalmente cargada	25,2 V
Mínima tensión	14,0 V
Capacidad	2300 mAh
Descarga continua	30,0 C
Corriente continua	69,0 A
Descarga de rotura	60,0 C
Corriente de rotura	138,0 A
Tasa de carga máxima	4,3 C
Tasa de carga máxima	10,0 A
Química	LiFePO4
Peso	580 g

Tabla 2

- Dimensiones

El pack de siete celdas tiene unas dimensiones aproximadas de 80x196x56 milímetros. Por lo que dos de estos pack unidos tendrán unas dimensiones como se especifican en la Figura 11. Estas dimensiones son empleadas en el dimensionamiento de la estructura.

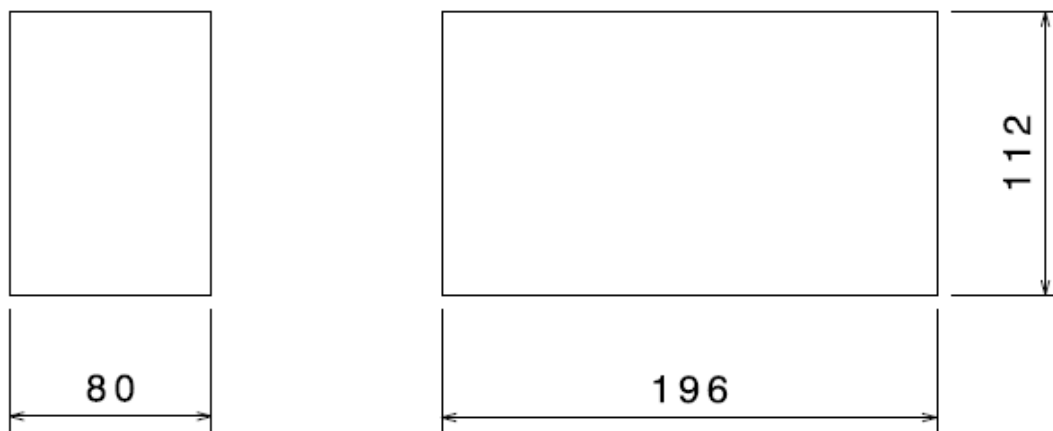


Figura 11 Plano de baterías

1.4. RANGOS

La bancada se diseña de manera que puedan ser probados un amplio rango de motores y hélices. Para tal diseño, se debe por tanto definir un motor limitante (en tamaño, empuje y características generales), de forma que todos los motores que se ensayen deben de estar por debajo del mismo.

Este motor, que llamaremos motor máximo, tendrá las siguientes características:

1. N = 8000 rpm
2. Potencia Motor-Helice = 3,5 KW
3. Empuje Motor-Helice = 245 N
4. Peso máximo = 1,6 kg

De estos parámetros del motor podemos identificar los valores máximos de par y peso de corte que serán importantes a la hora del diseño y la elección de dispositivos.

- Par:

Para calcular el par recurrimos a la ecuación de potencia de un motor en función del par y la velocidad de rotación (véase punto (3) de la bibliografía para más detalle):

$$\text{Potencia(KW)} = \frac{\text{Par(N} \cdot \text{m)} \cdot 2\pi \cdot \text{rotational speed (rpm)}}{60000} \Rightarrow$$

$$\text{Par(N} \cdot \text{m)} = \frac{\text{Potencia(KW)} \cdot 60000}{2\pi \cdot \text{rotational speed (rpm)}} = \frac{3,5 \cdot 60000}{2\pi \cdot 8000} = 4,1778 \text{ N} \cdot \text{m}$$

- Máximo peso de corte (el peso de la carga):

Para calcular este valor se estiman todas las partes que cuelgan del sensor de par:

$$\text{Peso del motor} + \text{bancada} + \text{Helice} + \text{elementos varios} \approx 2 \text{ kg}$$

Estos dos valores junto con las características del motor limitante marcan el techo de todos los motores que pueden ensayarse. Es decir, cualquier conjunto motor-hélice que supere alguno de estos valores no será apto para ensayarse en esta bancada. Estos valores quedan recogidos en la Tabla 3.

Características del conjunto motor-hélice máximos				
N (rpm)	Empuje (N)	Par (N·m)	Potencia (kW)	P. de corte (kg)
8000	245	4,1778	3,5	2

Tabla 3

2. INVESTIGACION DE PLATAFORMAS SIMILARES

En la parte inicial del proyecto se ha llevado a cabo un breve estudio del estado del arte en bancadas de pruebas para UAV's. De este estudio previo se ha llegado a la conclusión de que existen dos grandes grupos de bancadas para motores de UAV's: bancadas de ensayos estáticos y bancadas en túneles de viento (o de ensayos dinámicos). En este apartado se realiza una breve descripción de los dos tipos de bancada.

2.1. BANCADAS PARA ENSAYOS ESTÁTICOS

Nos referimos en este apartado a todo tipo de bancadas o aparatos destinados al conocimiento de los diversos parámetros del conjunto motor-hélice, principalmente la tracción, cuando el viento incidente es nulo.

La mayoría de estas bancadas tienen como objetivo conocer cuál es la tracción dada por el motor y la hélice para una potencia dada. Aunque también es posible que midan otros parámetros, éste, junto al de revoluciones de la hélice son normalmente los que más interés despiertan. Esto es debido a que la mayoría de las bancadas de este estilo son diseñadas y desarrolladas por gente perteneciente al aeromodelismo o bien a grupos de diseño y construcción de UAV's que no tienen un gran presupuesto para gastar en la bancada y les basta con obtener solo los parámetros más importantes.

Suelen constar de una base sólida fijada al suelo, bien mediante tornillería o por algún tipo de contrapeso. En esta base suele ponerse algún tipo de sistema de guías sobre el cual irá otra base. Esta base móvil es en la que se inserta el conjunto motor-hélice por lo que suele estar más reforzada que el resto de la estructura. La base fija y la base móvil no solo están conectadas por las guías sino que también lo estarán por algún tipo de medidor de carga como puede ser una célula de carga (dispositivo mecánico-eléctrico que se usa para medir fuerzas mediante deformaciones y sobre el que se incidirá en el apartado 4), en el mejor de los casos, o un dinamómetro.

Cuando el motor entra en funcionamiento, la hélice proporciona una tracción que se transmite a la base móvil y de ésta al sistema de carga donde es medida. Se crea así un sistema sencillo y eficaz cuya precisión estará determinada por los errores propios del sistema de carga, las pérdidas por rozamiento del sistema de guías y el modelaje de la bancada para representar las condiciones de vuelo.

Dentro de este sistema hay multitud de configuraciones posibles. Desde utilizar la pared como base fija y un carrito para la base móvil, utilizar guías con forma de raíl o ruedas, utilizar una balanza como sistema de carga... Algunos ejemplos se pueden ver en las Figura 12 y Figura 13.



Figura 12 Bancada estática para medir tracción (4)



Figura 13 Bancada estática para medir revoluciones (5)

2.2. BANCADAS EN TÚNELES DE VIENTO

Este tipo de bancadas surgen del sistema de medición de resistencia aerodinámica de muchos túneles de viento. La mayoría de los túneles de viento utilizan un sistema directo para medir la resistencia de los objetos que se están ensayando en los mismos pues es un parámetro de interés. Al medir resistencia también cabe la posibilidad de medir la tracción de una hélice pues es una fuerza en la misma dirección.

Para poder medir la resistencia del cuerpo dentro del túnel se fija éste a una barra o viga que pueda o no estar recubierta por un perfil aerodinámico. Este recubrimiento cumple dos funciones principales: hacer que el soporte perturbe la corriente lo mínimo posible y no añadir la resistencia de la barra a la del cuerpo. Esta barra sale por algún punto del túnel, dependiendo de cómo este haya sido concebido y se conecta a un sistema de medición de carga como por ejemplo el de la Figura 15.

Otra de las opciones más utilizadas es la de utilizar balanzas de varios puntos en los laterales del túnel. Este método sirve fundamentalmente para calcular las fuerzas a las que se ven sometidas las secciones de alas y, en este caso, no solo se miden la resistencia sino también la sustentación generada. Esta es la principal diferencia de este método con respecto al anterior. Obviamente, al utilizar este tipo de sensores más complejos y precisos el precio y la instalación aumentan enormemente. Algunos ejemplos podemos encontrarlos en las siguientes imágenes (Figura 14 y Figura 15).



Figura 14 Balanza de tres grados de libertad (6)

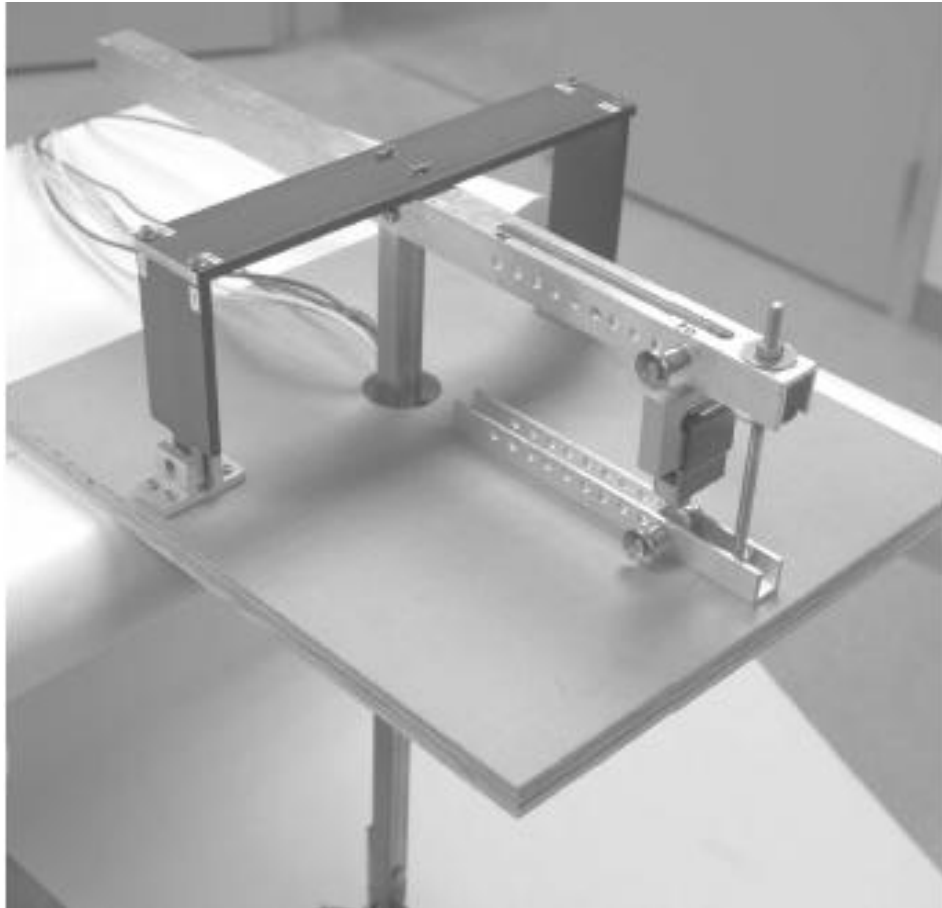


Figura 15 Sistema de medida de empuje por flexión (7)

3. DISEÑO DE LA BANCADA

En este apartado se describe la evolución del modelo de la bancada (descripción, ventajas y desventajas) hasta su diseño final. Para este último diseño se describe en detalle en la segunda parte del capítulo.

3.1. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

En el anterior apartado ha quedado evidenciado que existen dos diseños principales de bancadas para motores eléctricos: los diseños de bancadas para ensayos estáticos y los diseños túneles de viento. Esta bancada tiene que operar en ambos casos por lo que tendrá características de ambos diseños.

Fijándose en las bancadas para operar en los túneles de viento vemos que éstas se diseñan para adaptarse al túnel. Es decir, son estructuras o dispositivos que directamente utilizan la estructura del túnel de viento para realizar sus funciones. Debido a esto son bancadas que no pueden operar, en la mayoría de los casos, de forma independiente al túnel de viento, pues necesitan de su estructura. No obstante, las bancadas de ensayos estáticos suelen ser estructuras totalmente independientes. Necesitan de toda una estructura y dispositivos propios para su funcionamiento. Representan por tanto un mayor nivel de exigencia que sus homólogas.

Debido a lo anterior y como la bancada debe funcionar en ambos medios, ésta se basará mayormente en una bancada de ensayos estáticos pues son las bancadas que mas requisitos exigen. Sin embargo, esta bancada también ha de estar condicionada para su funcionamiento en un túnel de viento. Esto se va a ver reflejado en la existencia en la bancada de superficies protectoras contra el viento, de un firme apoyo en el suelo y en que el conjunto motor-hélice estará justo en el lugar donde menos se perturbe la corriente.

Por otro lado, la solución elegida también depende de los dispositivos que se utilicen para medir los parámetros de interés. Lo primero que se hizo entonces fue buscar los sensores que se iban a utilizar en la bancada. Durante su elección se ha favorecido, dentro de lo posible, a aquellos que fueran fáciles de instalar y que dieran lugar un diseño modular. Una vez se hubieron elegido los dispositivos (véase apartado 4) se diseñó la estructura entorno a los mismos y atendiendo a sus necesidades.

Para el diseño se ha utilizado el programa CATIA V5 (8) que está orientado al diseño de piezas y conjuntos. Este programa es ideal para los diseños de conjuntos desde los muy simples hasta los más complejos y es capaz de dar los planos de las piezas en un formato legible para la máquina de control numérico, lo cual ha sido de importancia durante la fabricación.

3.1.1. Modelo 1

Partiendo de todas estas premisas se diseña un primer modelo muy simple pero donde se describe cómo se miden las diferentes magnitudes y que sirve de base para otros modelos.

- Descripción

Como puede verse de la Figura 16 este modelo consiste fundamentalmente en una base fija (pieza gris) de soporte y una bandeja (pieza verde) montada sobre unas guías (piezas rojas), ambas unidas además por la célula de carga de un solo punto (pieza azul) que era la primera opción para medir la carga. En la pieza que constituye la bandeja tendremos todos los equipos electrónicos (representados en la figura como la placa Hércules II de la que se habla en el capítulo 4 y las baterías) y un tubo que soportará la estructura del motor y algunos sensores. La idea es que cuando la hélice proporcione tracción, ésta se transmita a la bandeja, y de ella a la célula de carga. Esta idea se ha mantenido hasta el modelo final.

Lo que más puede llamar la atención en este primer modelo es la base soporte. Esta consiste en una superficie lisa y firme (en aluminio de 1 centímetro de espesor aproximadamente) preparada para instalar las guías y de la cual salen una especie de patas. Estas extremidades son vigas de perfiles de aluminio articuladas a la base de alguna manera de forma que puedan retraerse hacia el interior y, además, preparadas para soportar algún contrapeso cuando estén extendidas. La idea que hay tras esta configuración es que conforme más alejados se pongan los contrapesos más efectivos serán para prevenir el volcado, luego interesa tener unas patas para alejarlos. Esta idea, debido a su complejidad y coste, ha acabado abandonándose por otra más sencilla en futuros modelos.

Para unir la base y la bandeja se utilizan las guías de alta precisión AMT Linear Guideways (9) que ya estaban en el laboratorio y que también se utilizarán en los modelos sucesivos. Estas guías son una excelente herramienta a usar cuando se desea que una superficie se deslice paralela a otra sin ningún rozamiento (realmente siempre hay algún rozamiento) permitiendo que el empuje de la hélice llegue a la célula de carga sin pérdidas de importancia. Otras de las razones para utilizar estas guías ha sido que constituyen un elemento de diseño que es capaz de separar las cargas que llegan del conjunto motor-hélice: los momentos de la tracción y los pesos descentrados son llevados a través de las guías a las bases y la tracción de la hélice se deja en la base móvil. Esta característica es fundamental pues la célula de carga no está diseñada para soportar momentos. Para más información se puede consultar su manual que no ha sido incluido en el proyecto por ser muy extenso y por poder hallarse en el Grupo de Ingeniería Aeroespacial (punto (9) de la bibliografía).

La bandeja también es otra pieza bastante sólida utilizada para albergar todos los componentes electrónicos y soportar el anclaje del tubo. Su forma delantera está pensada para que las corrientes de aire no incidan directamente sobre los equipos. En cuanto al tubo, éste está pensado para poner el motor a la altura del centro del túnel de viento, donde la corriente está menos perturbada. En su parte superior va una pieza que sirve para unirla al sensor de par (véase apartado 4) y éste a una pieza (galleta) que conecta directamente con la bancada del motor. De esta forma cuando el conjunto motor-hélice ejerza su par, éste se transmitirá a la galleta y de ella al torquímetro donde quedará registrado. Esta idea del tubo y el sensor de par se mantiene en todos los diseños preliminares hasta el diseño final.

- Ventajas

La principal ventaja de este modelo es que se ha conseguido un sistema de transmisión de cargas sencillo y eficaz que se mantiene hasta el diseño final. Por otro lado, se destaca la simplicidad de todo el modelo lo que facilita su construcción.

- Inconvenientes

En primer lugar la bandeja es una pieza con un frontal muy extenso, aunque necesario, por lo que se prevé que las resistencias en el túnel de viento hagan volcar la estructura y, además, se alcanzan valores de resistencia muy altos en la célula de carga. Y, en segundo lugar, los componentes electrónicos están muy desprotegidos por lo que pueden sufrir desperfectos.

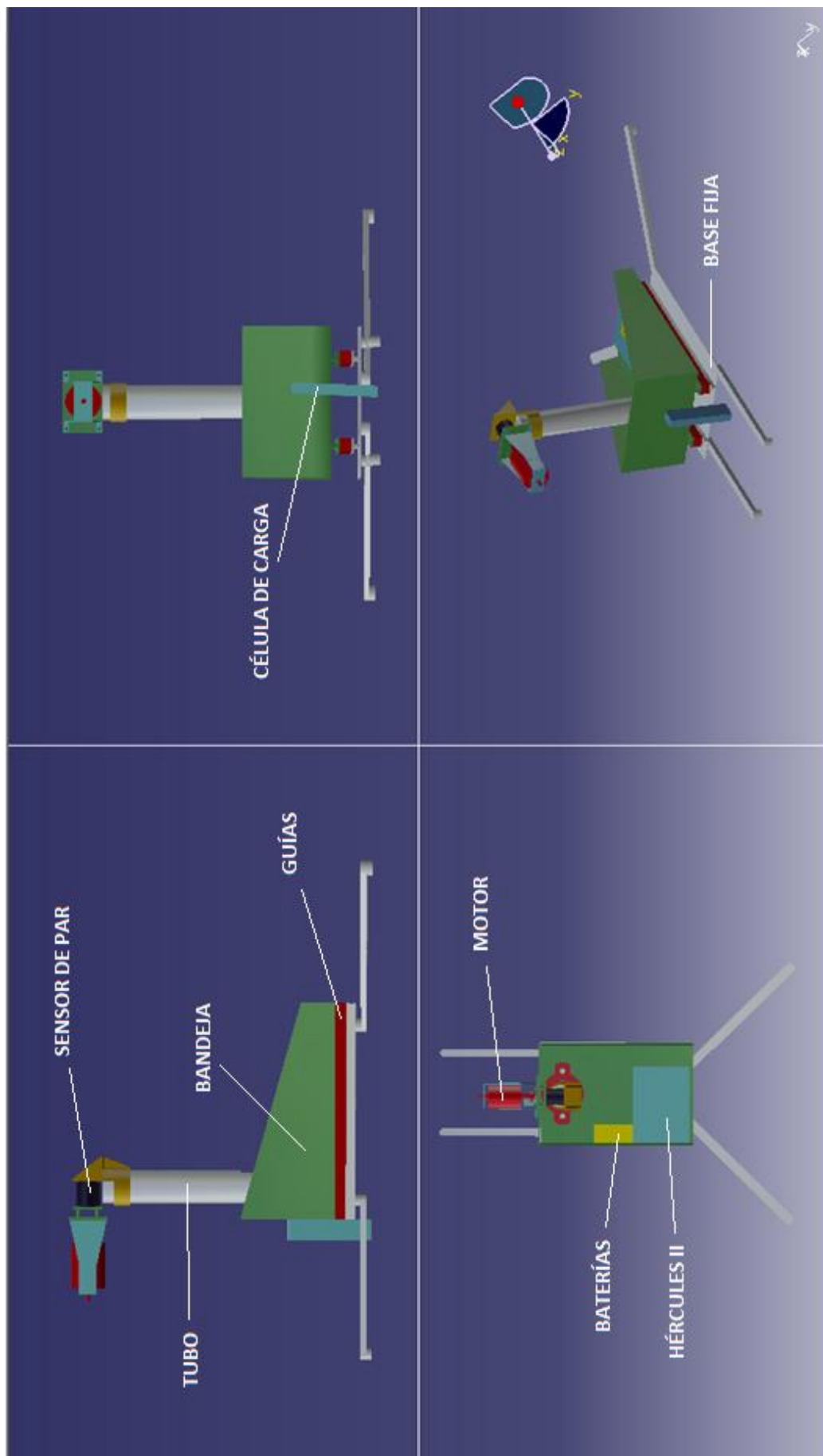


Figura 16 Modelo 1

3.1.2. Modelo 2

Este modelo consiste en una revisión del anterior y la diferencia más importante es que se ha situado los componentes electrónicos y la bandeja móvil en lugares separados. En cuanto a los sistemas y configuraciones para la toma de datos son básicamente los mismos.

- Descripción

En este modelo se ha recubierto prácticamente toda la estructura con carcasas y puede apreciarse en la Figura 17 y la Figura 18. La primera de ellas (pieza rosa) está pensada para ser móvil y permitir manipular la célula de carga. La otra carcasa (pieza azul oscuro) es completamente fija, es decir, va atornillada al conjunto y no se espera que tenga que moverse. También se le ha dado una forma aerodinámica para recubrir el tubo y disminuir las fuerzas de resistencia que mide la célula de carga.

Otra diferencia importante es que los componentes electrónicos ahora se sitúan en la base que sirve de soporte y que ha sido tapada. Esto permite disminuir el tamaño de la base móvil haciendo que se ofrezca menos resistencia a medir por la célula de carga (lo que permite que tenga un rango menor y más preciso). Además debido a esta separación se puede hacer la bancada más alargada y, por tanto, presentar un frente más pequeño a la corriente haciendo que la resistencia del conjunto disminuya y así también el riesgo de volcado en el túnel de viento.

Se destaca también que la base ha sido simplificada quitándose las patas delanteras y se ha añadido una caja en la parte posterior destinada a albergar un contrapeso. Debido a esto dicha zona debe ser reforzada de alguna manera, que no se ha concretado pues antes se ha pasado a otro diseño para el contrapeso.

Por otro lado, ya se puede ver que ciertas piezas de la estructura están concretándose. En este grupo tenemos a la pieza de unión del tubo y el sensor de par, el propio tubo, el anclaje del tubo y la estructura correspondiente a la célula de carga, que ya es del tipo tracción compresión (sobre este tema consulte en el apartado 4.). En lo que respecta al sistema de distribución de cargas este es básicamente el mismo que el del Modelo 1 con la excepción de que la célula de carga es ahora de otro tipo.

- Ventajas

La ventaja fundamental de este modelo con respecto al anterior es que se han conseguido proteger todos los componentes internos de la estructura mediante el uso de carcasas fijas y móviles. Esto permite asegurar que los dispositivos electrónicos no sufren deterioros por estar expuestos al exterior y además permite asegurar que la célula de carga no tiene en sus medidas errores debido a su propia resistencia al viento.

Otra ventaja destacable es la separación de los dispositivos electrónicos de recepción y tratamiento de señales (acondicionadores, placa Hércules II,...) de la base móvil. Esto ha permitido disminuir la superficie de la base móvil y el frente de cara al viento para tener menor resistencia al viento.

Además, se ha elegido un sistema de contrapeso que ha permitido simplificar la base fija ganando en sencillez y eficacia.

- Inconvenientes

Aunque más evolucionado que su antecesor, este modelo todavía presenta varios problemas. El principal de ellos es que la estructura total sigue siendo demasiado grande como para tener la certeza de que no va a salir despedida en el túnel de viento. Se tiene la opción de anclar la bancada al propio suelo pero tampoco se puede estar seguro de que la resistencia al viento no la va a arrancar del suelo (o que se puedan crear desperfectos en el túnel). Por estas razones se ha optado por otro modelo que soluciona este problema.

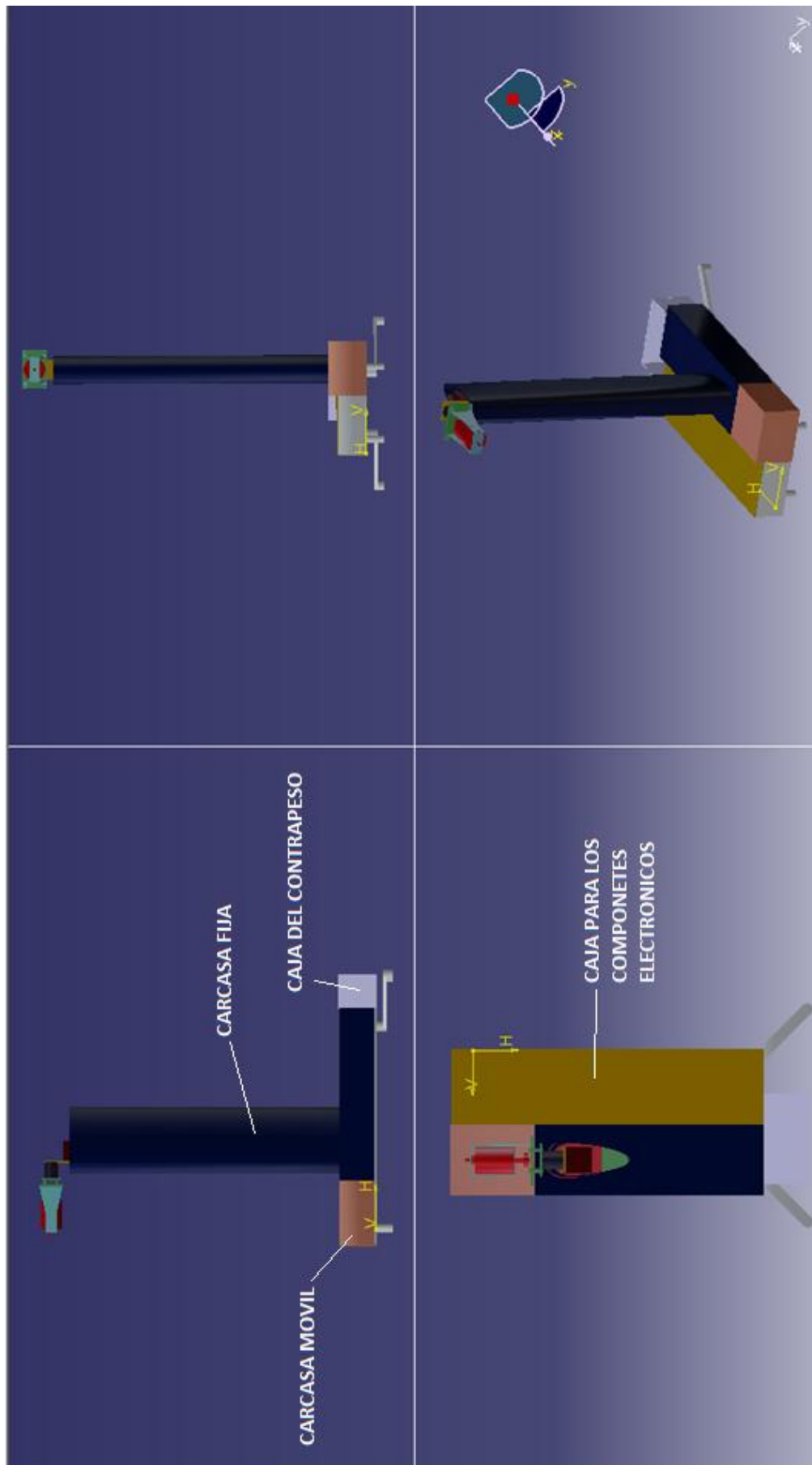


Figura 17 Modelo 2

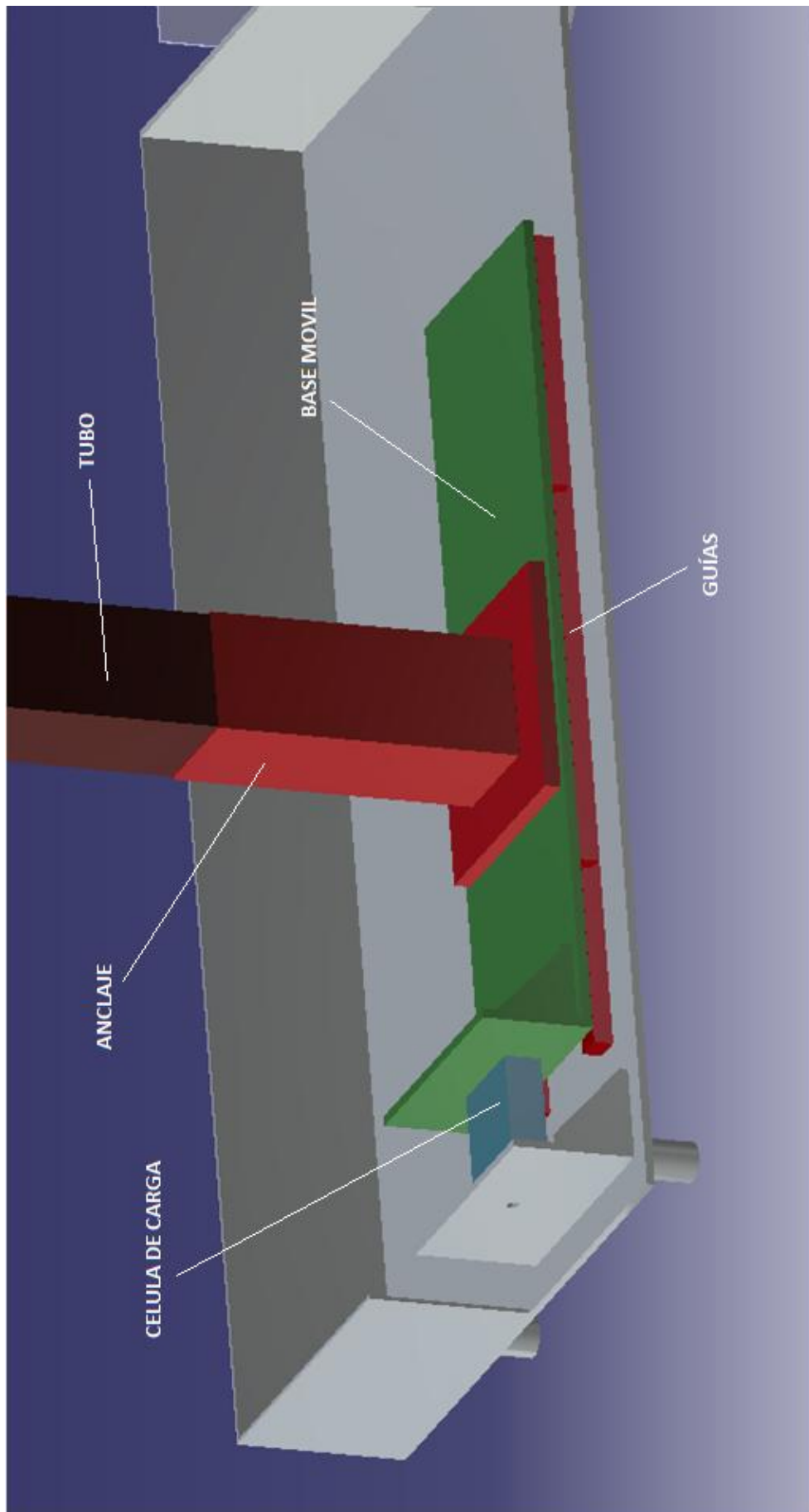


Figura 18 Modelo 2 Abierto

3.1.3. Modelo 3

En este modelo se vuelve a modificar el modelo anterior el cual se divide definitivamente en tres partes para permitir que se tenga la mínima parte de la misma en el túnel de viento. El sistema y configuración de cargas sigue siendo el mismo que en el caso anterior. Dicho modelo puede verse en la Figura 19 y la Figura 20.

- Descripción

Lo más destacado en este modelo es la división en tres partes: una base para las otras dos partes y el contrapeso, una caja para los equipos electrónicos y otra parte destinada a estar en el túnel de viento. Hay que señalar también que ahora hay dos carcasas móviles (piezas amarillas), abandonándose la carcasa fija que cubría el tubo debido a su complejidad y poca necesidad.

También se ha optado por un modelo de base y contrapeso mucho más simple. De hecho esta consiste en una placa cuya anchura y longitud permiten montar las otras dos partes y un contrapeso en la parte trasera. Esto permite simplificar una pieza que desde el primer modelo se ha presentado compleja y además permite utilizar un contrapeso de forma no específica. Con ello se gana en facilidad en la construcción y ahorro obteniéndose una pieza que cumple las mismas funciones que tenía desde el principio.

Su construcción está pensada para realizarse mayormente en aluminio. Las carcasas y la caja para los equipos electrónicos son placas de aluminio de pequeño espesor unidas mediante escuadras y tornillería. Y, por otro lado, las placas bases de las dos partes, la parte que tiene que ir en el túnel y la caja de electrónica, son de aluminio de gran espesor para permitir que otras piezas se atornillen a ella y la parte de abajo quede lisa (mediante el uso de avellanados).

- Ventajas

La ventaja principal con respecto al anterior modelo es que se ha solucionado por completo el problema de meter una estructura muy grande en el túnel de viento. Solo ha de ir dentro del túnel la parte necesaria la cual está bien afianzada al suelo.

Otra característica de este modelo es que en se tienen todos los componentes, es decir, se sabe cómo y se pueden construir todas las partes, y las piezas de más complejidad se tienen localizadas en empresas conocidas. Esto representa un gran avance con respecto a los modelos anteriores que eran mayormente conceptuales.

También puede destacarse que en este modelo se opta por las soluciones más sencillas, tanto en el sistema de contrapeso como en muchas de las piezas como las que se unen al sensor de par. Esto revierte en una mayor facilidad de construcción e instalación que en los modelos anteriores.

- Inconvenientes

El mayor inconveniente de este modelo es el peso y la fabricación. La razón para utilizar aluminio es conseguir una buena resistencia a un bajo peso, sin embargo, existen ciertas piezas en la bancada que no necesitan de una resistencia tan alta como la del aluminio. En este grupo tenemos a las carcasas y las bases de la bancada que pueden construirse en otro material más ligero manteniendo la integridad estructural del sistema.

También el hecho de utilizar aluminio de forma masiva obliga a recurrir a una gran cantidad de elementos de unión como escuadras, piezas en L y tornillería para unir las diferentes partes entre sí, incrementándose el coste y la complejidad del diseño. Además, para fabricar en aluminio es necesaria la utilización de una máquina de control numérico haciendo que la fabricación sea más lenta y compleja que si se utilizasen, por ejemplo, maderas que se pueden unir por colas especiales.

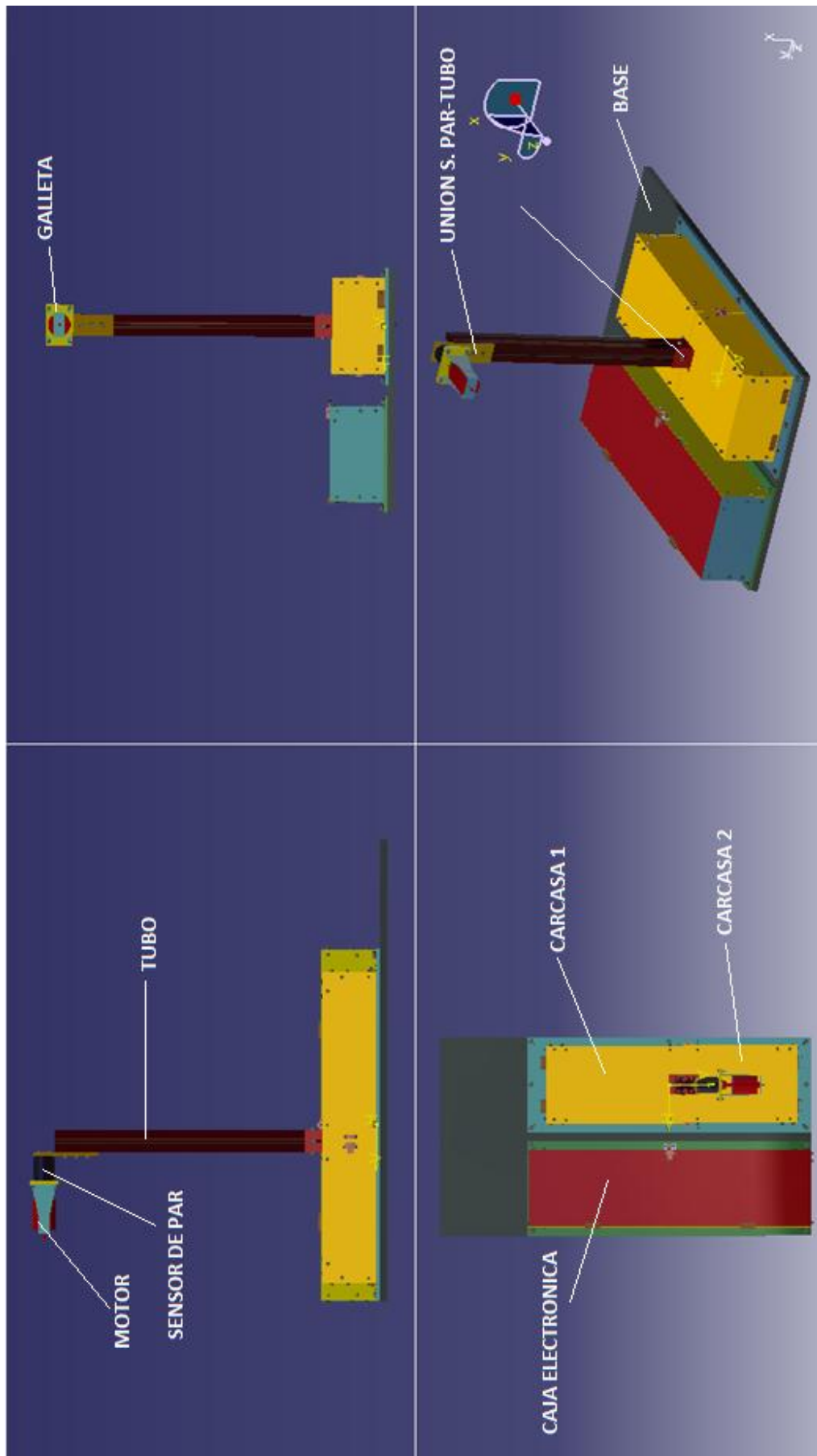


Figura 19 Modelo 3

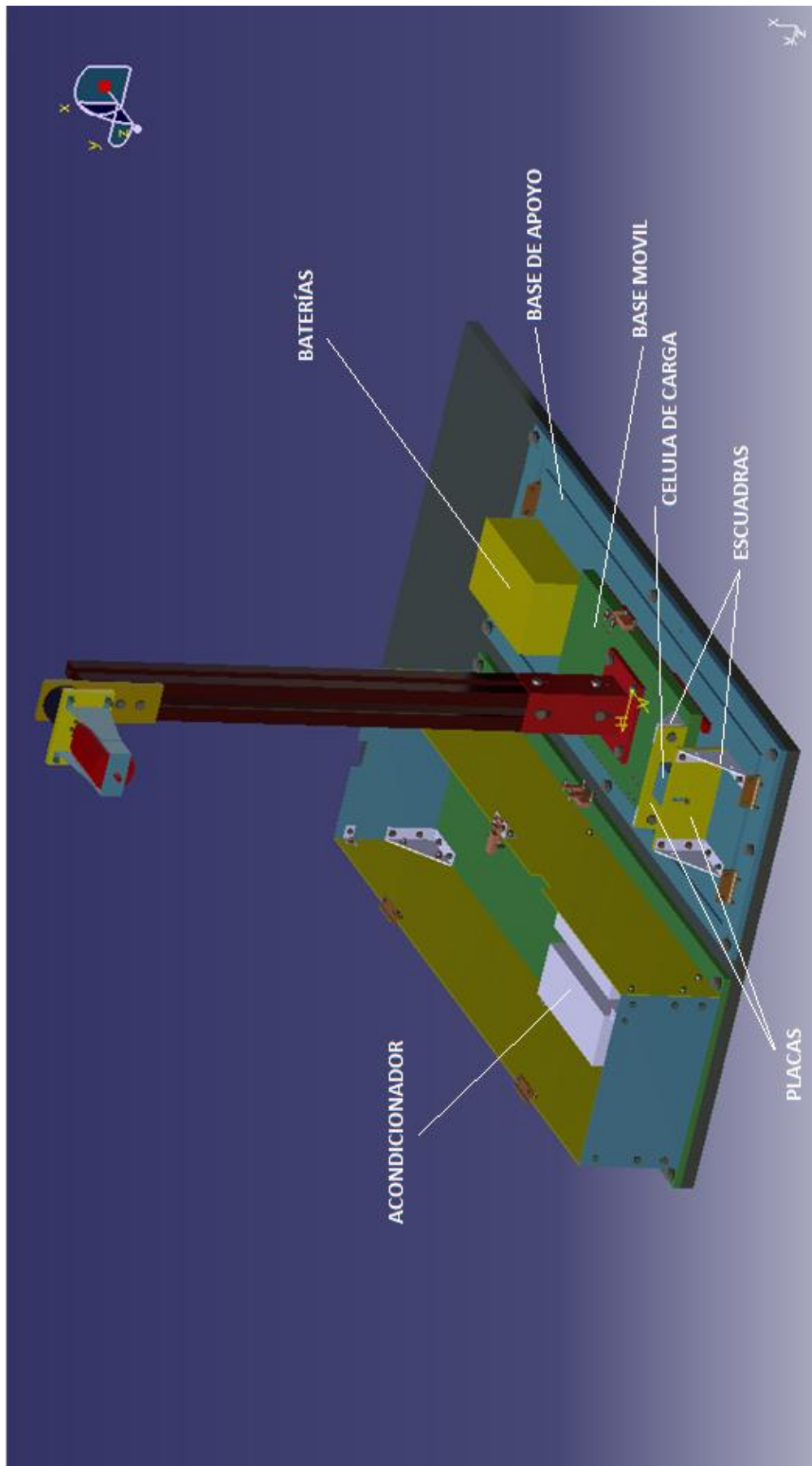


Figura 20 Modelo 3 Abierto

3.1.4. Modelo 4

Este modelo es básicamente el modelo 3 con la salvedad de que algunas partes del mismo se han construido en madera. Se da aquí una denominación de las partes: a la estructura que sirve de soporte se la denomina base fija, a la caja de los componentes electrónicos caja electrónica y a la otra parte bancada túnel. Dicho modelo se puede ver en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la Figura 22 y se detallará en la sección siguiente.

- Descripción

Cuando se trate de ensayos estáticos, la bancada túnel se fija a la estructura de la base, que incorpora su correspondiente contrapeso, junto con la caja electrónica. Y cuando se requieran ensayos en el túnel de viento se fija al suelo del mismo, mientras que la caja electrónica está fuera.

En el diseño final las bases de las estructuras, las carcasas y la caja de la electrónica están hechas en contrachapado y madera compacta, materiales disponibles en el laboratorio del Grupo de Ingeniería Aeroespacial. Concretamente las bases, que son elementos que tienen que transmitir las fuerzas al suelo, están constituidas en madera compacta DM mientras que el resto de elementos están fabricados en contrachapado. Sobre los materiales se hablará en la siguiente sección.

Con esta elección se consigue aligerar el peso y mantener la integridad estructural ya que estas piezas no están sometidas a cargas de importancia. A parte, la construcción es más sencilla y fácil ya que la madera es más manejable que el aluminio. Este modelo se explica a continuación con más detalle.

- Ventajas

Se ha conseguido un modelo de medición y distribución de cargas sencillo y eficaz que se traduce en una mayor facilidad de construcción y toma de datos. Esto se ha llevado a cabo mediante la implementación de un sistema de bandeja móvil donde se ha dispuesto el conjunto motor-hélice la zona central del túnel de viento.

Además, se ha solucionado el problema de cómo tener la estructura en el túnel de viento. Esto se ha conseguido dividiendo la bancada en tres partes de las cuales solo una va en el túnel de viento. Esta división también ha permitido finalmente que la bancada opere tanto para ensayos estáticos (las tres partes están juntas) como para ensayos en el túnel de viento (solo la bancada túnel está en el túnel).

Finalmente, en este último modelo se han refinado la parte correspondiente a los materiales. Aquellos partes que se pudiesen hacer en madera se han hecho descartando la utilización del aluminio consiguiéndose así facilidades en la construcción, ahorro de dinero y menos peso en la estructura.

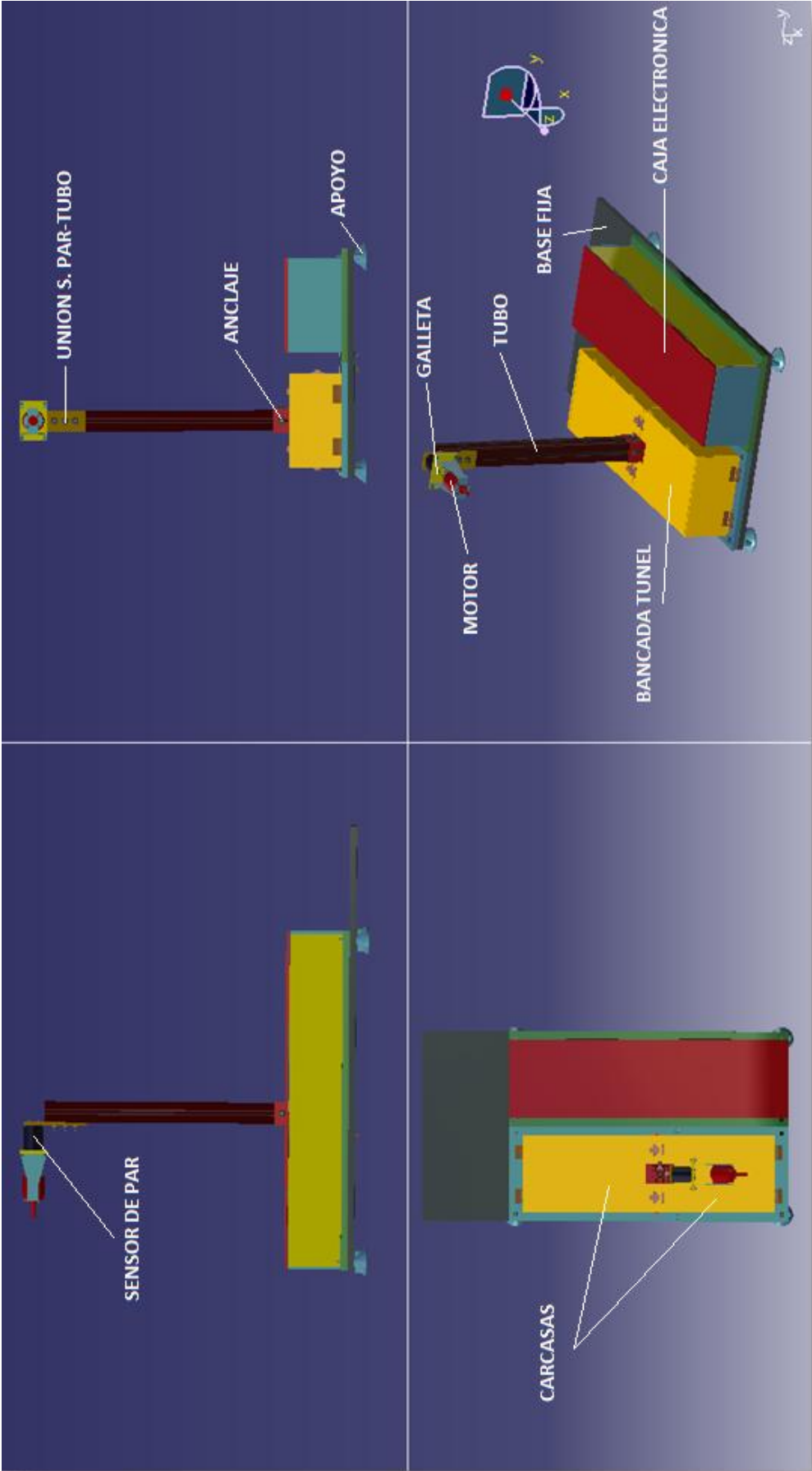


Figura 21 Modelo 4

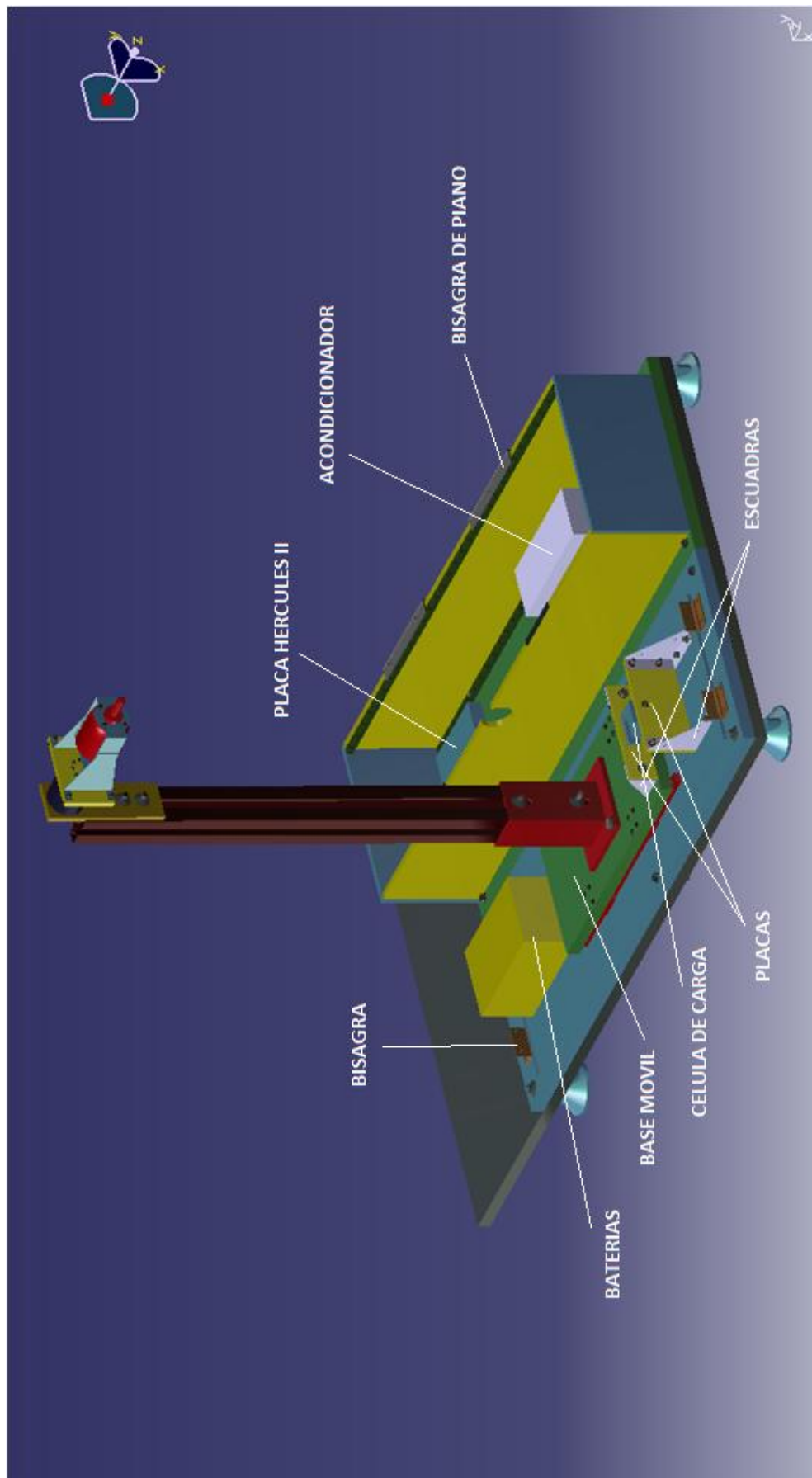


Figura 22 Modelo 4 Abierto

3.2. DISEÑO ELEGIDO

Atendiendo a la evolución desarrollada en el apartado anterior se ha optado finalmente por una solución que aúna sencillez y eficiencia a la hora de estudiar las plantas propulsoras y motoras. En esta sección se describe en detalle dicha elección, es decir, se describe el Modelo 4 que es el que se ha elegido y construido. Para un mayor detalle consulte el Apéndice B donde se encuentran los planos de conjunto e individuales de los elementos de la bancada que se va a describir a continuación.

En la Figura 24 y Figura 25 se ha realizado una denominación de todas las partes y piezas de la estructura. A parte de la denominación, también se puede observar la posición de todas las piezas en el conjunto global y su posición relativa con respecto a las otras piezas. Esta denominación nos sirve en los sucesivos apartados para hacer referencia a las piezas y su posición.



Figura 23 Bancada en conf. para ensayos estáticos

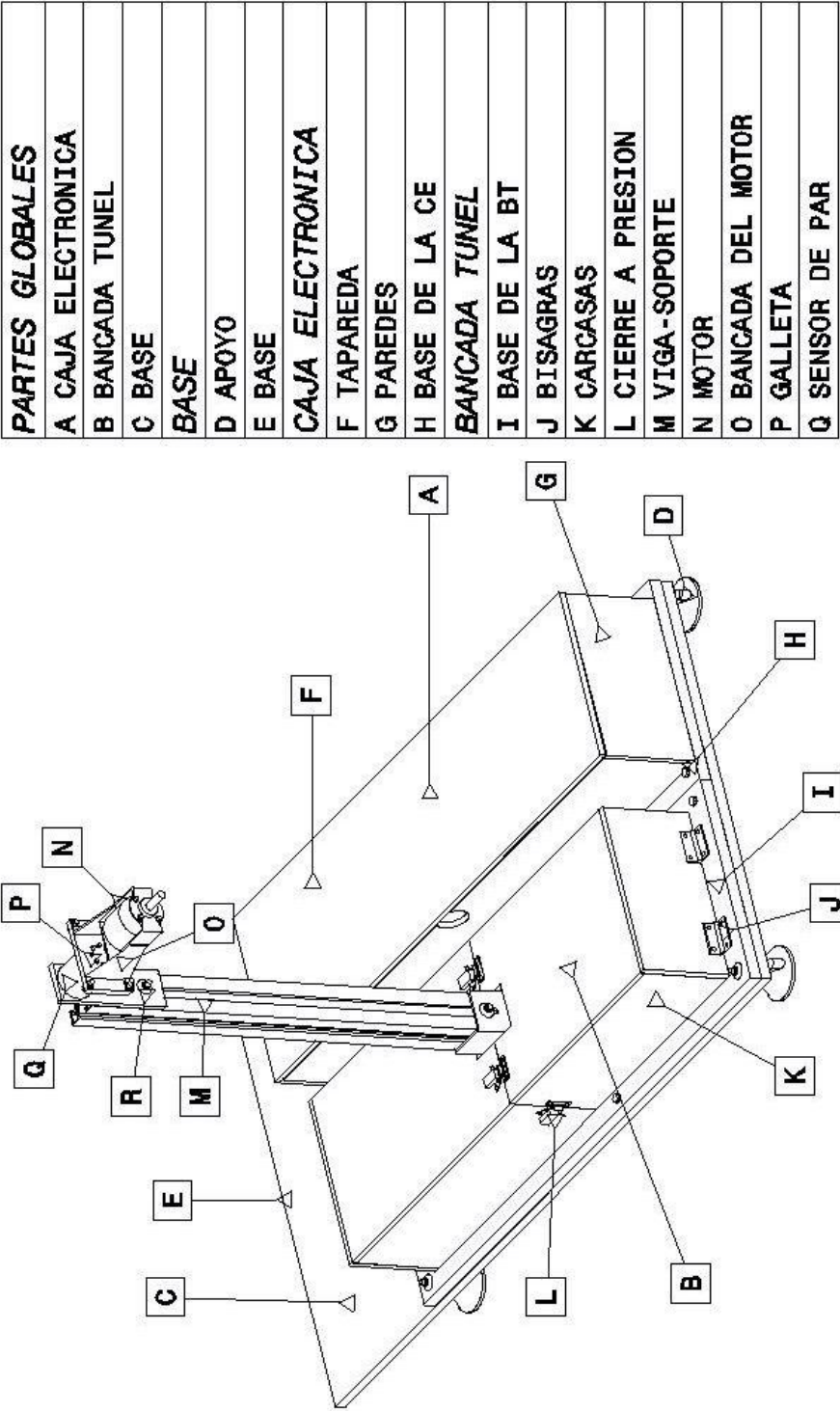


Figura 24 Partes de la estructura

CAJA ELECTRONICA
S TABLONES
T BISAGRA DE PIANO
U PLACA HERCULES
V ACONDICIONADOR
BANCADA TUNEL
W BATERIAS
X ANCLAJE
Y BASE MOVIL
Z GUÍAS
AA ESCUADRA ALU
BB PLACA 1
CC CELULA DE CARGA
DD PLACA 2
EE ESCUADRA LEROY MERLYN

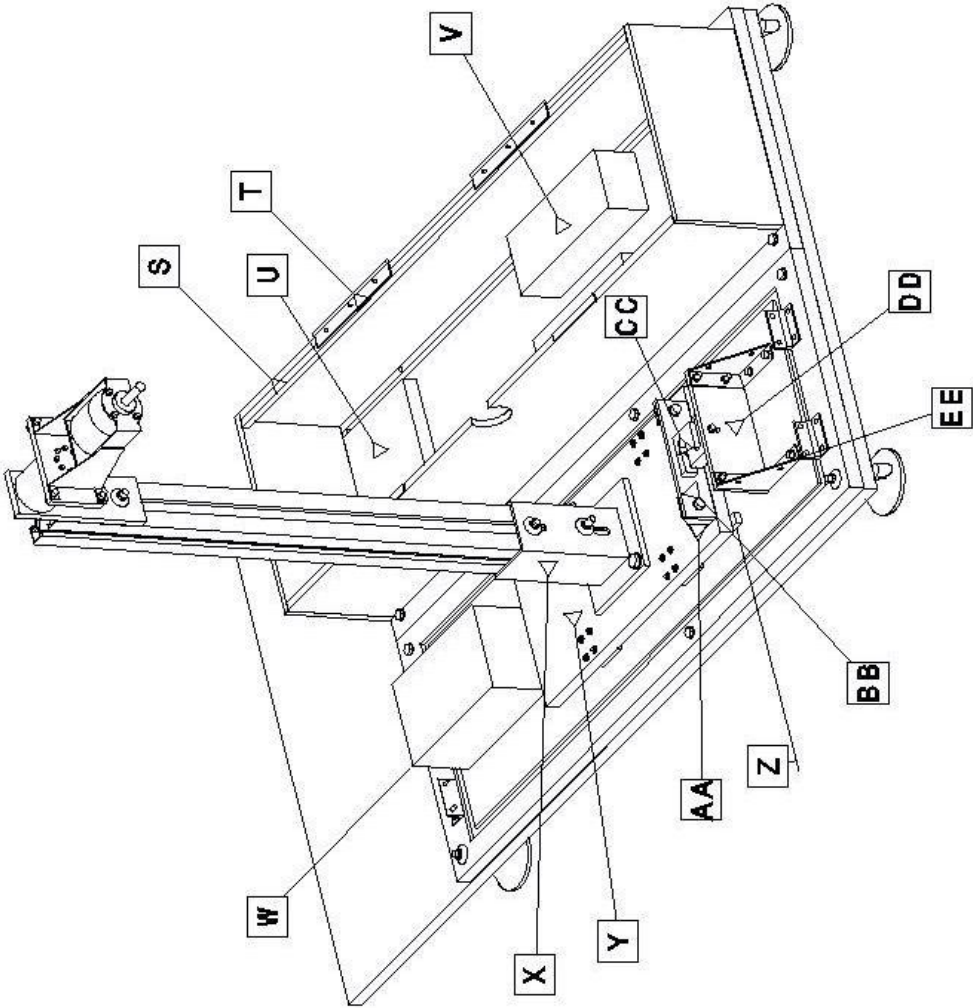


Figura 25 Partes de la estructura 2

3.2.1. Funcionamiento

En esta sección se describe el funcionamiento de la bancada y la interacción entre sus piezas. Se va a empezar con el funcionamiento de la bancada y no con la descripción para poder justificar más tarde, en el apartado de la descripción, las elecciones y configuraciones de las distintas piezas que se deben en parte al funcionamiento que se les exige.

El funcionamiento y la toma de datos de la bancada son idénticos en los dos tipos de ensayos, tanto en los estáticos como en los del túnel de viento. La única diferencia es que mientras que en un caso toda la estructura está junta, en el otro la encontramos separada en partes.

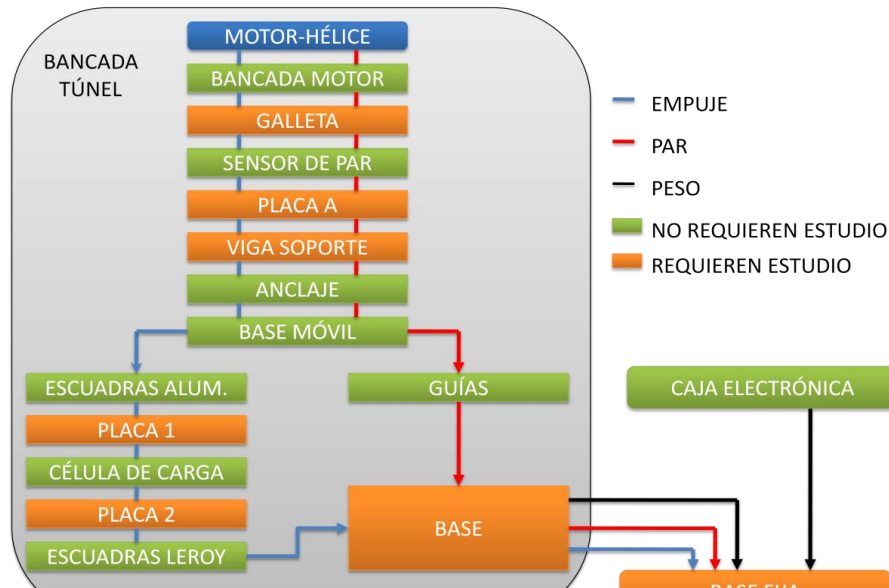
El sistema de cargas puede verse en la Figura 26. Una vez que el motor arranca, mediante la unidad de control telemétrica, la hélice proporciona un empuje y un par apreciables. También se produce un consumo de potencia eléctrica. Para medir todo esto se dispone de dispositivos de telemetría que miden estos valores y una estructura que sirve de apoyo a tal fin, además, de un sistema de cableado. Sobre todos estos dispositivos se hablará con más detalle capítulo 4.

El par y la tracción que producen el conjunto motor-hélice se transmiten a la bancada del motor y de ahí a la galleta (placa inmediatamente después de la bancada motor) que debe aguantar estos esfuerzos. De la galleta, la fuerza y el par pasan al sensor de par donde este último queda registrado y evaluado. A continuación el par y la fuerza son transmitidos a la placa de unión del sensor de par y la viga soporte de donde llegan a través de la misma a la base móvil. Esta base está sobre un sistema de guías de alta precisión que solo transmiten la fuerza en la dirección de la tracción quedando el resto de esfuerzos compensados por las fuerzas de reacción que se crean en los apoyos. La tracción empuja la base móvil en un sentido de forma que actúa sobre la célula de carga, que esta fija en un extremo en la base fija y en el otro en la base móvil, midiéndose aquí la tracción. Esta tracción junto, con el par, pasan a la base de la bancada túnel y de ahí a la base de la bancada o al suelo del túnel de viento. Debido a todo este recorrido de cargas deben hacerse algunos estudios sobre tensiones y desplazamientos en algunas piezas, lo cual se hará en el apartado 5.

En cuanto a la potencia de entrada, está se mide mediante sensores de voltaje y corriente que se encuentran convenientemente dispuestos en el sistema eléctrico de alimentación del motor. Concretamente el dispositivo encargado de medir la corriente se encuentra antes del rectificador del motor y el medidor de voltaje en el cableado justo a la salida de las baterías.

A través de los datos de potencia consumida, voltaje e intensidad se obtienen las revoluciones de la hélice mediante el tratamiento de datos en la unidad electrónica de control del motor o mediante un sensor especial de tipo Hall que mide la rotación directamente.

Todos estos datos más otros, como la velocidad del túnel de viento, son enviados a la placa Hércules, donde son tratados y procesados para su visualización en pantalla y almacenamiento.



3.2.2. Descripción

La bancada está dividida en 3 partes: una de ellas que constituye la base para todo el conjunto (base), otra donde están los equipos electrónicos que no estén obligados a permanecer necesariamente cerca del motor y de las zonas de medida de parámetros (caja de electrónica) y, finalmente, otra parte donde se encuentra el motor, las baterías y el equipo necesario para tomar las medidas oportunas (bancada de túnel). Véase la Figura 24 y la Figura 25.

El hecho de elegir esta configuración puede verse en el desarrollo del apartado 3.1., pero básicamente se ha elegido una división en tres partes para conseguir que en el túnel de viento tengamos una estructura mínima. Ello se hace para asegurar que se perturbe lo mínimo la corriente de aire en el túnel de viento, pues una perturbación de la corriente hace que la hélice no vea la corriente directamente incidente, falseando los resultados que se obtienen. Además, el viento también crea resistencia en la bancada que aumenta con el área frontal de la bancada, con el consiguiente peligro de desprendimiento, porque lo que conviene que esta sea mínima. A continuación se describen todas las partes y piezas que integran la bancada.

3.2.2.1. Base

La estructura de la base (elemento C en la Figura 24) es una plataforma destinada a soportar las otras dos partes de la bancada, unidas a ella mediante tornillería (Figura 32). Por este motivo, tiene su superficie delimitada por los laterales por las dimensiones de los otros dos conjuntos. Por otro lado, se ha dejado una superficie libre por detrás destinada a albergar un contrapeso necesario para mantener la estabilidad durante los ensayos estáticos. Contiene dos elementos claramente diferenciados, la tabla en la que se insertan las otras dos partes de la bancada y los apoyos (Figura 31). Ambos elementos se describen a continuación.

1. Apoyo
2. Base

- Apoyo (elemento D en la Figura 24)

La tabla que sirve de base a la estructura se apoya en cuatro soportes de la empresa Alu-Stock (10) (Figura 28 y Figura 29) especialmente diseñados para soportar esta clase de estructuras, los cuales tienen una altura de 35 milímetros y un radio de 80 milímetros (Figura 27). Estos apoyos están contruidos con poliamidas y son capaces de absorber sin problemas las fuerzas de compresión que actúan sobre los mismos y, además, proporcionar a la bancada una superficie de contacto con el suelo de alto coeficiente de rozamiento. Para la unión con la tabla cada apoyo dispone de una espiga de M8 que se insertan y atornillan en los extremos de la tabla.

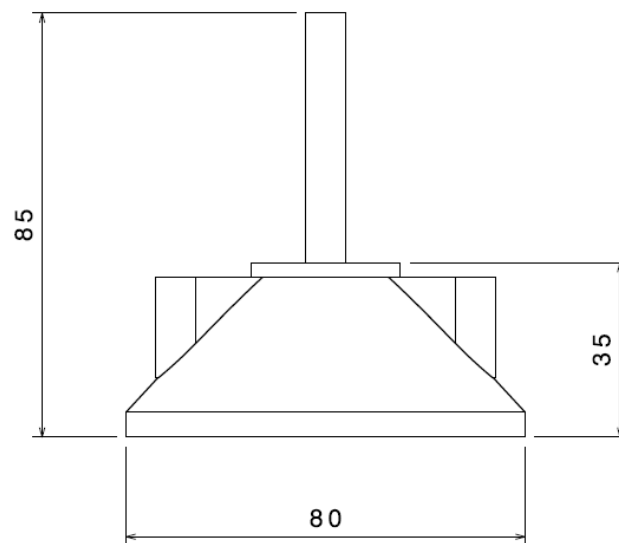


Figura 27 Plano de apoyo

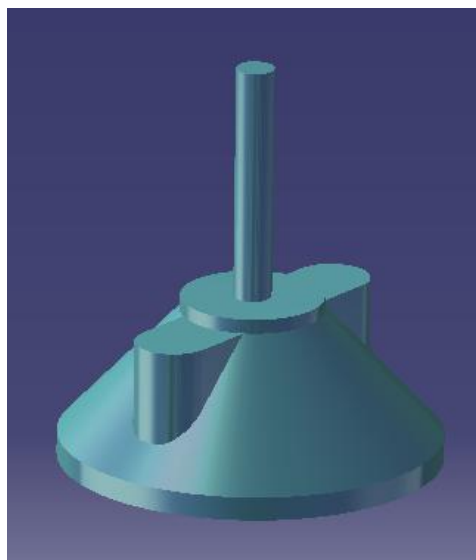


Figura 28 Apoyo en Catia



Figura 29 Apoyo real

- Base (elemento E en la Figura 24)

Esta base es una tabla que está construida en madera compacta DM de 19 milímetros de espesor que posteriormente, tras un ligado, se ha pintado en color gris metalizado. Contiene seis agujeros para atornillar la bancada túnel y otros cuatro para la caja electrónica con tornillos M8 de 80 milímetros. La elección de esta madera y de su espesor ha recaído en la disponibilidad en el laboratorio y en que es una madera que cumple con la función a la que es destinada.

Al unir la tabla con sus cuatro apoyos se obtiene la base de la bancada para los ensayos estáticos (Figura 30 y Figura 31). Para el contrapeso se ha dejado un espacio de 30 centímetros de largo en la parte trasera de la tabla con la idea de utilizar un peso constituido por lingotes de plomo, no obstante, inicialmente se han utilizado losetas de 10 kilogramos y de una superficie de 50x50 centímetros cada una (Figura 32). Debido a esto las losetas no han cabido por completo en el espacio dejado para el contrapeso pero su centro de gravedad sí que está dentro por lo que no hay peligro de que este peso vuelque. Además, para soportar este nuevo peso se ha reforzado la tabla en dicha zona por debajo con otra nueva tabla más gruesa y que hace contacto con el suelo.

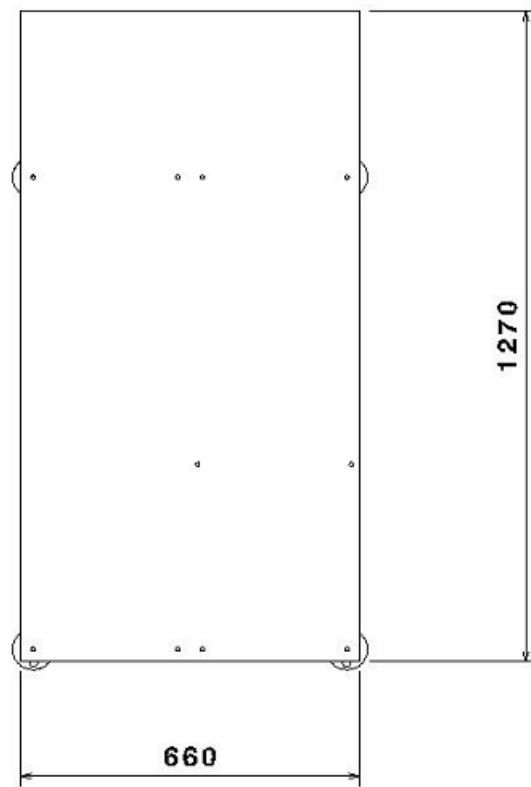


Figura 30 Plano de base

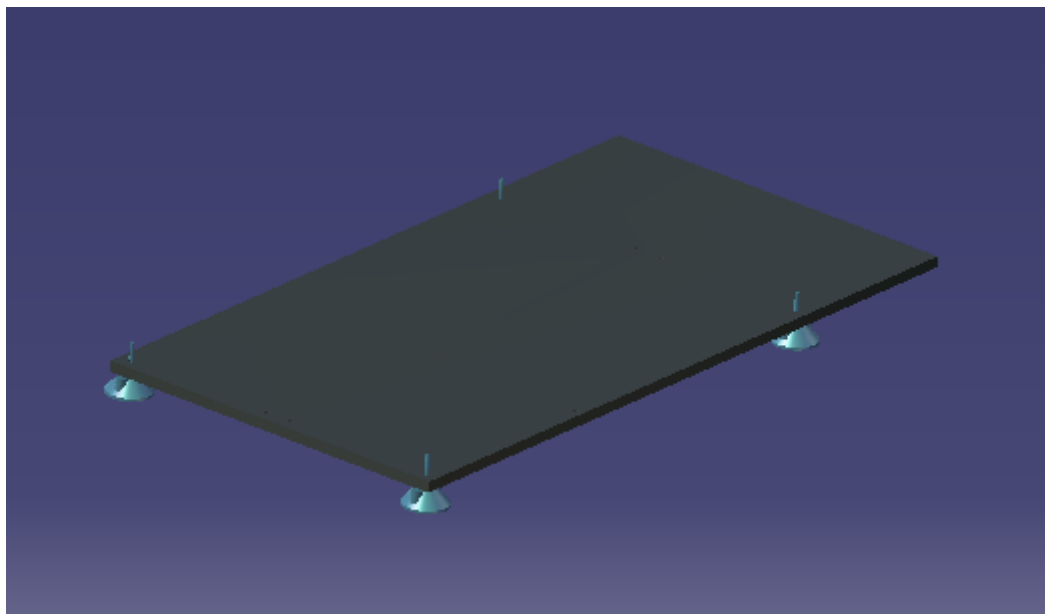


Figura 31 Base en Catia



Figura 32 Base montada con los demás componentes

3.2.2.2. Caja electrónica

La caja electrónica (elemento A en la Figura 24) es precisamente una caja donde se introducen los acondicionadores de señales (tanto de la célula de carga como del sensor de par), la placa Hércules II para procesar los datos y todo aquello que no tenga que ir necesariamente en la bancada túnel. Esta solución se ha adoptado para que la bancada túnel sea lo más pequeña posible, ya que estará dentro del túnel de viento. Mientras más grande sea la bancada túnel mayor será la resistencia frente al viento y por tanto también se tendrá que reforzar más la estructura aumentando la complejidad y el coste y, por otro lado, también se perturbará más la corriente disminuyendo el diámetro máximo de la hélice a probar. Los elementos que la constituyen se describen a continuación.

1. Bisagras de piano
 2. Caja electrónica
- Bisagras de piano (elemento T en la Figura 25)

Para abrir y cerrar la caja electrónica se recurre a un par de bisagras de piano (Figura 33, Figura 34 y Figura 35) ideales para tal fin. Su elección recae en que cumplen la función que se busca y están disponibles en el laboratorio del Grupo de Ingeniería Aeroespacial.

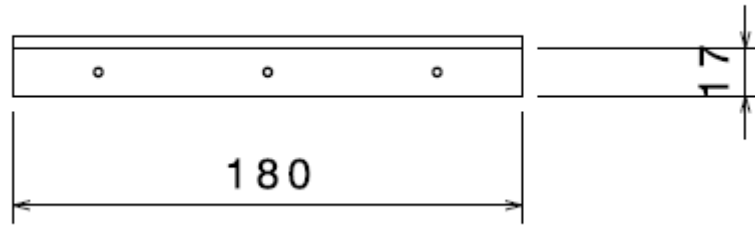


Figura 33 Plano de bisagra de piano

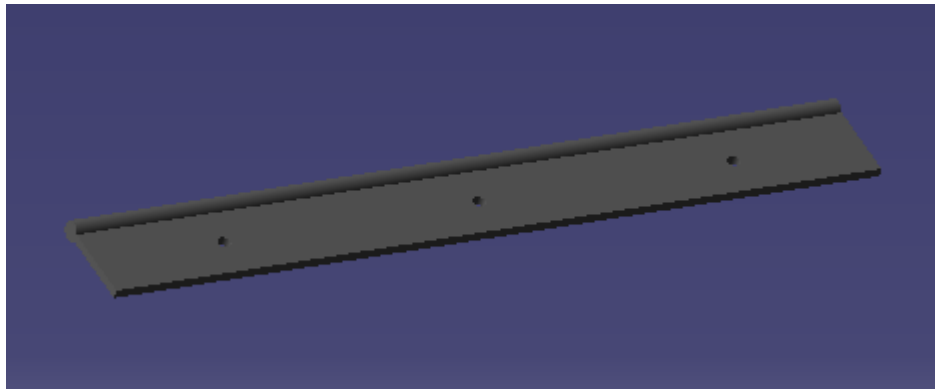


Figura 34 Bisagra de piano en Catia



Figura 35 Bisagra de piano instalada

- Caja electrónica (elementos F, G y H en la Figura 24 y elementos S y T de la Figura 25)

La caja electrónica se realiza sobre una base de madera compacta DM de 19 milímetros de espesor (pieza verde claro) y está formada por placas de contrachapado de 9 milímetros (piezas azules para los frontales y amarillas para los laterales) reforzadas con travesaños (piezas verde oscuro y marrón) y unidas por cola para madera y grapas (Figura 36). Para unir esta caja con la base se han utilizado 6 tornillos de madera dispuestos en los tablones de los laterales de la caja y cola de madera.

La tapadera está compuesta por un tablón de contrachapado (pieza roja) que se une a la caja mediante bisagras de piano (piezas gris oscuro). El sistema de cerrado se ha realizado con dos tiras de velcro (piezas negras). Para unir la tapadera con las bisagras y éstas con la caja se han utilizado tornillos de madera, unos penetran en la tapadera y otros en un travesaño de la caja puesto ahí para tal fin.

La elección de este sistema y sus componentes es debida a la disponibilidad en el laboratorio de todos estos materiales y que, además, se trata del sistema más cómodo y simple de ejecutar.

Por otro lado, se han practicado dos aberturas, una en un lateral y otra en un frontal, por dónde van los cables de los dispositivos a los elementos de la caja electrónica y los cables de alimentación a los distintos dispositivos. Todo el conjunto una vez se ha terminado se ha pintado de gris metal.

Las dimensiones de la caja (Figura 37) vienen determinadas por la anchura de la placa Hércules II mientras que la longitud es la misma que la de la bancada túnel por conveniencia. Al tener esta longitud se ha asegurado que los futuros componentes electrónicos que se deseen instalar van a tener sitio y, además, la estructura también ayuda a rigidizar la base durante los ensayos.

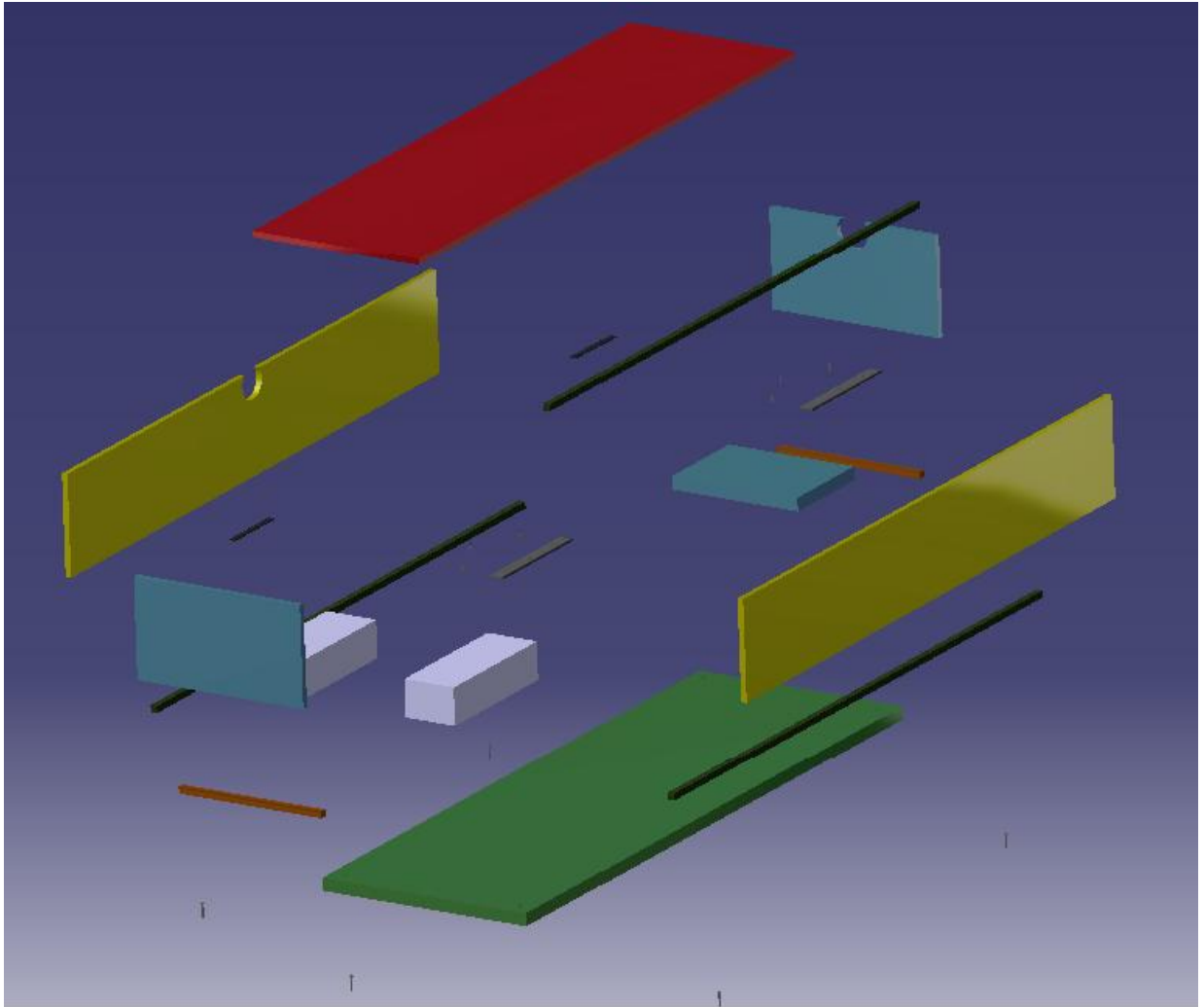


Figura 36 Montaje de la caja electrónica

Nota: las piezas gris claro y la placa horizontal azul son los acondicionadores y la placa Hércules II respectivamente.

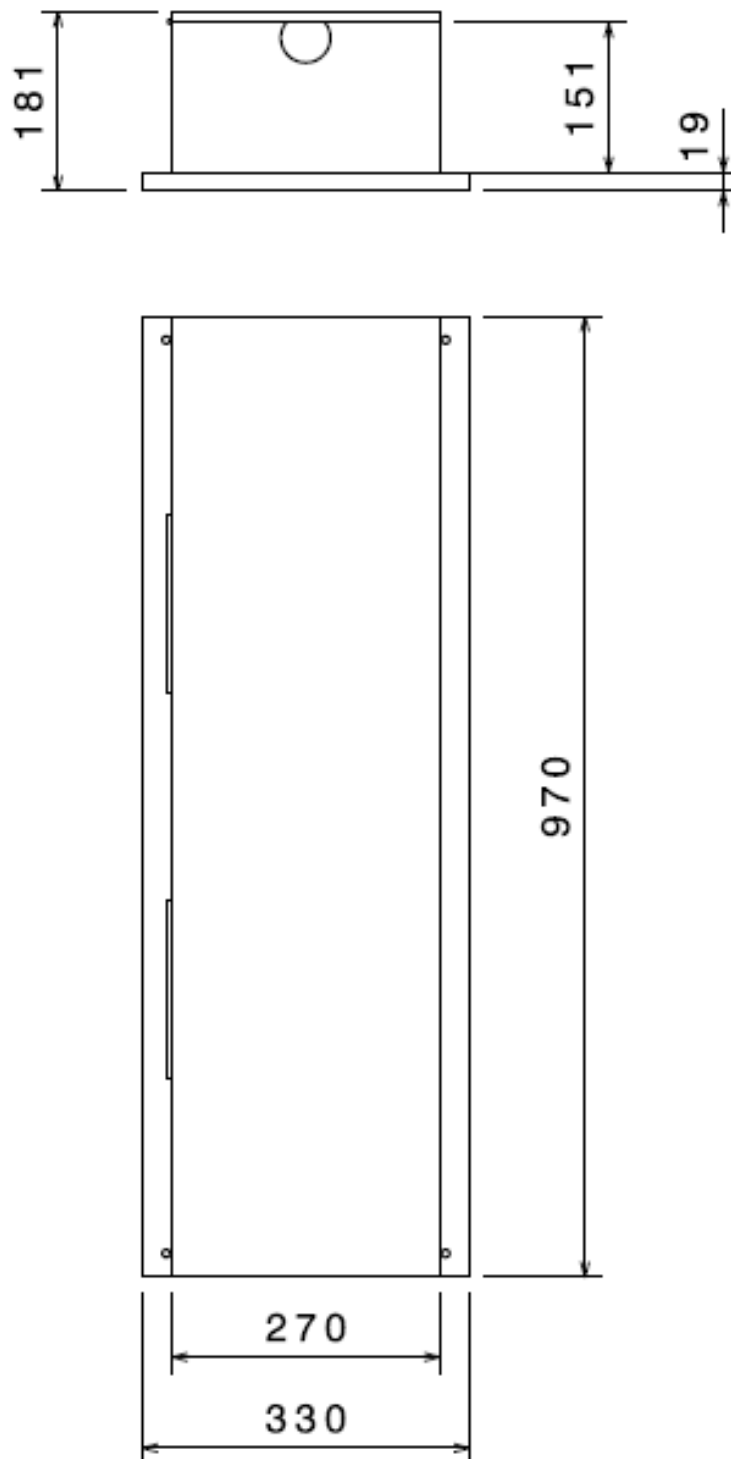


Figura 37 Plano de Caja electrónica

En las siguientes figuras (Figura 38, Figura 39, Figura 40 y Figura 41) se puede ver la caja electrónica totalmente terminada.

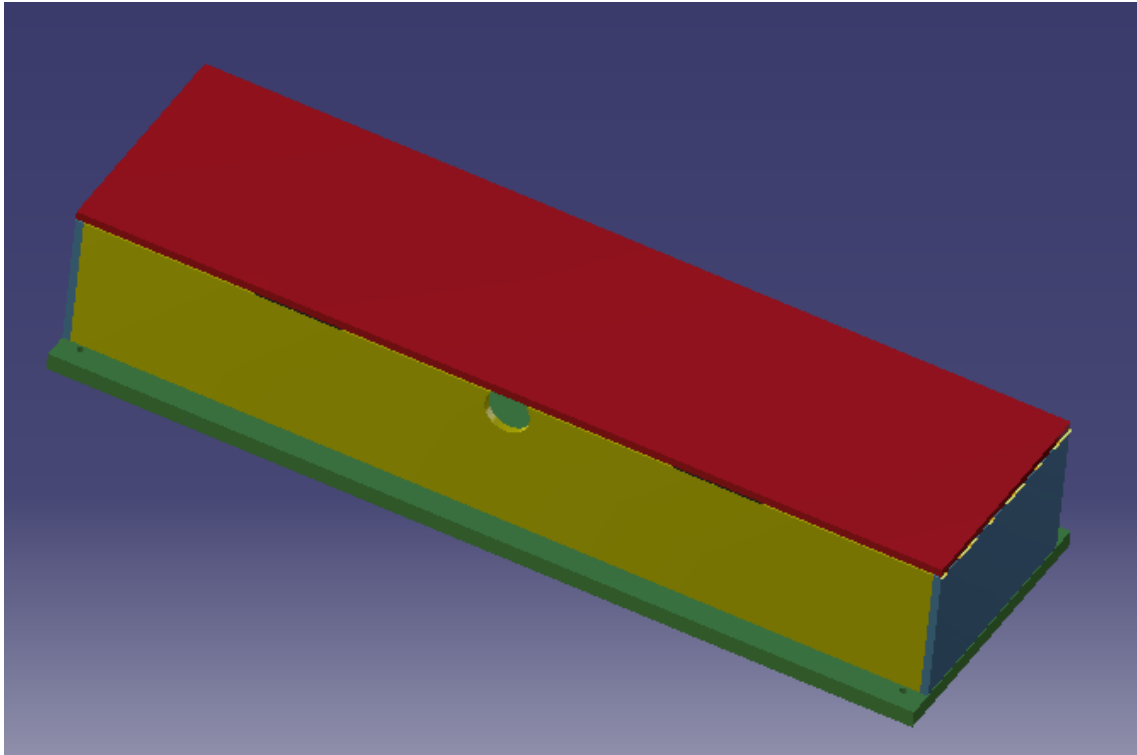


Figura 38 Caja electrónica en Catia



Figura 39 Caja electrónica real

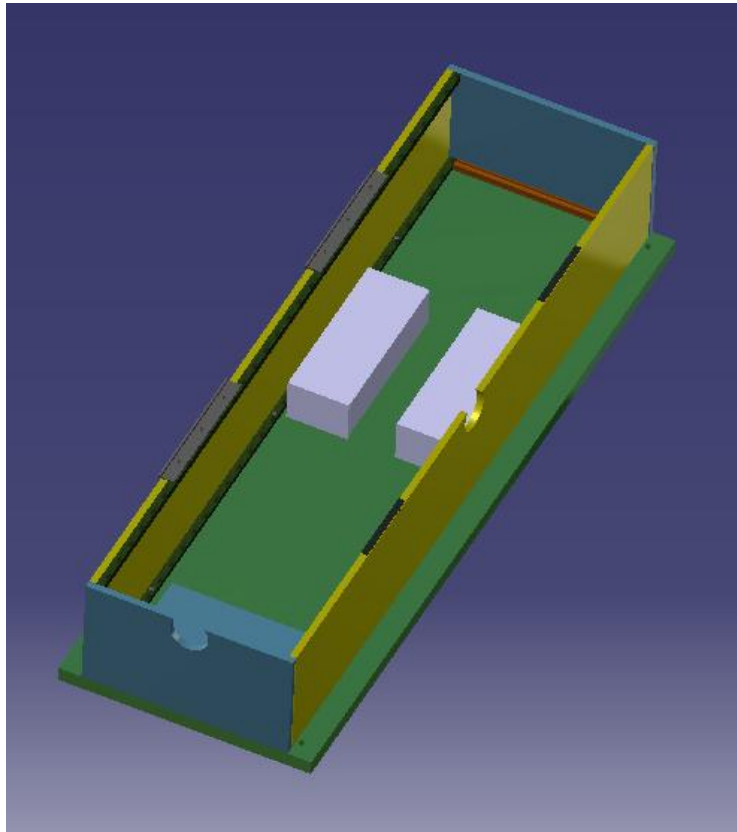


Figura 40 Caja electrónica abierta en Catia



Figura 41 Caja electrónica abierta real

3.2.2.3. Bancada Túnel

La bancada túnel (elemento B de la Figura 24) es en sí misma la bancada propiamente dicha. Consta de una base, una cubierta desmontable o carcasa para proteger los componentes internos del viento, dos guías sobre las cuales hay una pieza móvil llamada base móvil, una placa fijada a la base mediante escuadras de forma perpendicular a la misma, un conjunto igual en la base móvil y un espacio trasero para las baterías.

- Base y carcassas (elementos I y K en la Figura 24)

La base y las carcassas (Figura 42) constituyen las estructuras protectoras y de apoyo para la bancada túnel. Concretizando, sobre la base se han montado todos los demás elementos y las carcassas son las piezas que protegen a los componentes internos, como la célula de carga, de las acciones del viento. Estos elementos están constituidos en diferentes maderas (azul para la base y dorado para las carcassas) y se unen entre sí por bisagras (piezas marrones), cierres a presión (piezas marrones) y tornillería.

1. Base
2. Bisagras
3. Carcassas
4. Cierres a presión

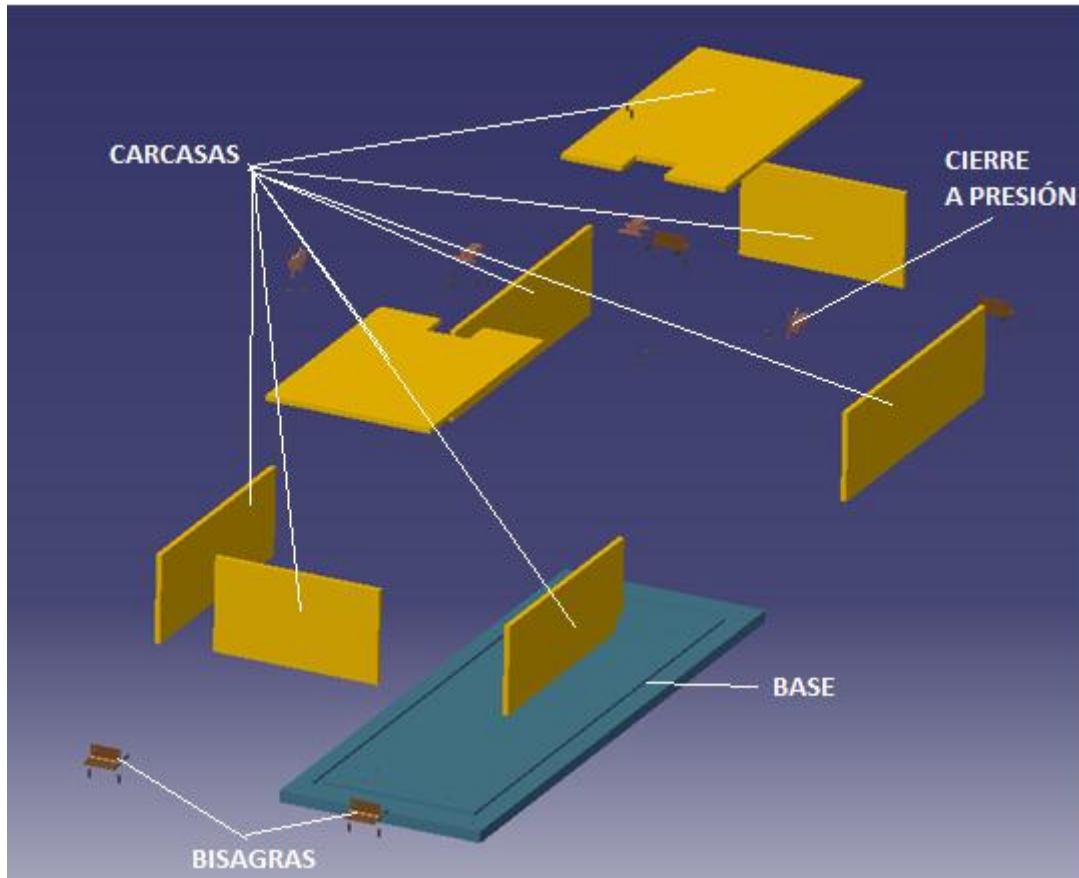


Figura 42 Montaje de la base y las carcassas

Base (elementos I en la Figura 24)

La base de esta estructura (Figura 43 y Figura 44) es otra tabla de madera compacta DM similar en dimensiones a la de la caja electrónica. La diferencia entre esta placa y su homóloga es que en ella se han practicado una serie de agujeros, aparte de los seis para unirlo a la base de la bancada o al túnel de viento, para soportar las guías (8 agujeros de M3), las escuadras de acero (4 agujeros de M6), y las bisagras (2 por bisagra de M3). También se destaca en esta base una ranura con forma de rectángulo que se utiliza para las carcasas.

Otra característica única de esta base es que posee avellanados para las tuercas y las arandelas en todos los agujeros menos en los 6 para afianzar la estructura a otra. Esto es debido a que la superficie inferior de la bancada túnel necesita ser lisa para poder adherirse bien al suelo del túnel de viento o a la base de la bancada túnel.

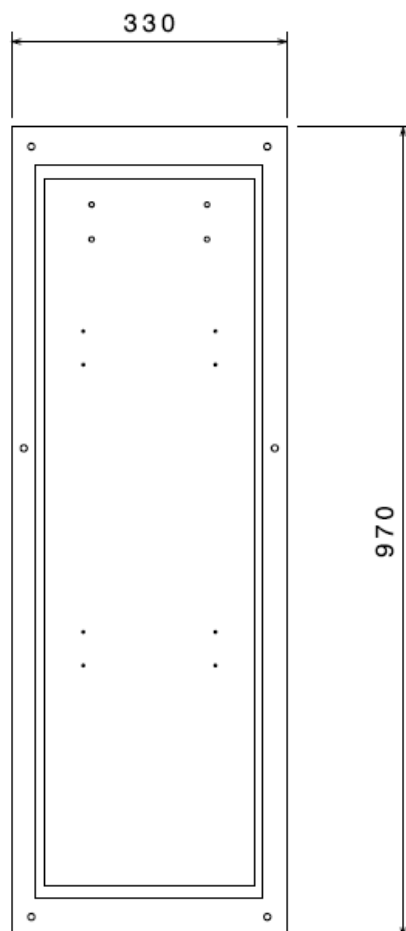


Figura 43 Plano de base de bancada túnel

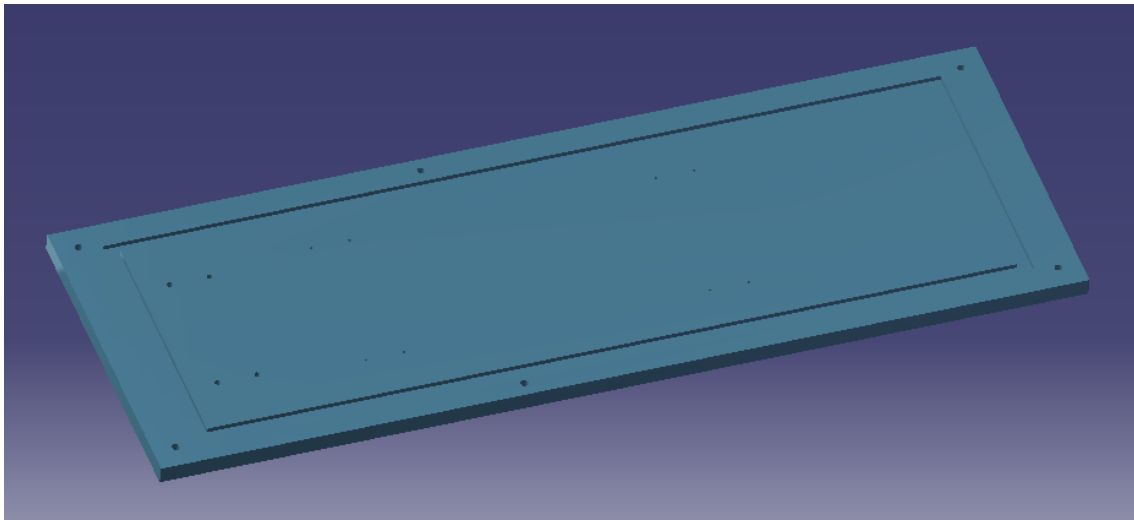


Figura 44 Base de bancada túnel en Catia

Bisagras del Leroy Merlin (elemento J de la Figura 25)

La cubierta desmontable consiste en dos piezas separadas de contrachapado unidas a la base mediante dos bisagras. Estas bisagras de doble hoja (Figura 45, Figura 46 y Figura 47) son del Leroy Merlin (11), están hechas en acero y poseen dos agujeros por hoja. Se han situado dos por delante de las carcasas, cada una de ellas tiene una de sus hojas unida a la carcasa por tornillos para madera mientras que la otra hoja se encuentra unida a la base, también mediante tornillos para madera. De esta forma se ha conseguido que las carcasas puedan girar un ángulo de 90 grados.

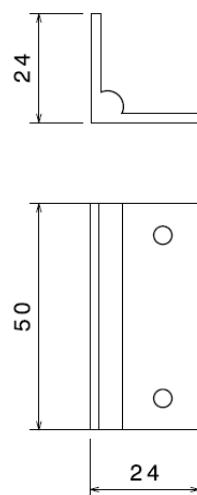


Figura 45 Plano de bisagra

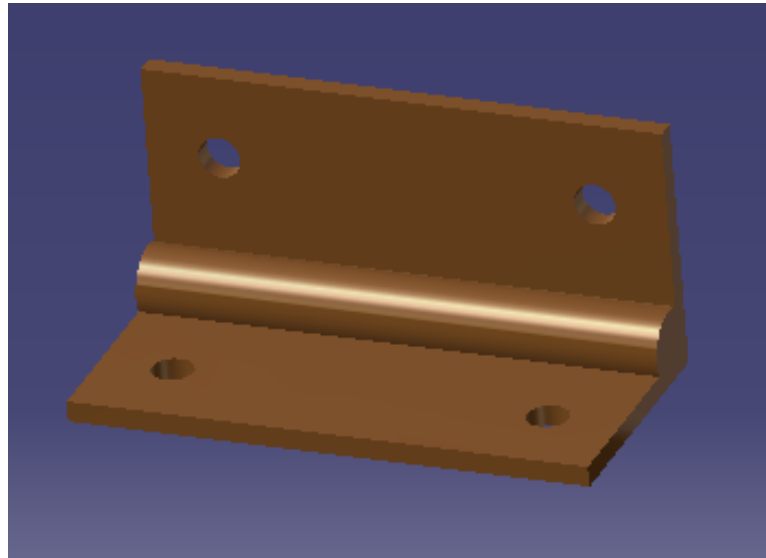


Figura 46 Bisagra en Catia



Figura 47 Bisagra real (12)

Carcasas (elemento K en la Figura 24)

Las dos piezas que constituyen las carcasas están fabricadas en placas de contrachapado de 9 milímetros unidas mediante cola de madera y grapas (Figura 50). Cuando se necesita acceder al interior, basta con hacer rotar las dos partes sobre sus bisagras, quedando estas situadas en los laterales dejando accesible el interior. Y cuando la bancada ésta en funcionamiento se bajan las dos y se unen mediante cuatro cierres a presión (Figura 48) que garantizan un cierre firme. Estos cierres unen a las carcasas mediante tornillos para madera. Por otro lado, para garantizar un buen cierre y que el viento exterior no penetra dentro se han

practicado ranuras en la base por donde entran las paredes de la cubierta y, además, las dos partes cuentan con un hueco que en conjunto permite el paso de la viga soporte.

Se ha optado por esta solución porque es la más sencilla y la que permite interactuar con los elementos internos de la bancada de una forma rápida, y además, conservar un cierre firme y seguro.



Figura 48 Cierres a presión

Por otro lado, las dimensiones de esta “cascara” (Figura 49) corresponden a las mínimas posibles por diseño. La anchura viene determinada en virtud de poder albergar el anclaje de aluminio, luego las guías (las guías no pueden ir debajo del anclaje porque chocan con los tornillos), la ranura para las carcasas y finalmente un espacio para poder atornillar la estructura al túnel o la base fija. La longitud corresponde a albergar la base móvil (tiene la longitud que tiene para poder cubrir las guías y protegerlas del polvo), las baterías, la célula de carga con sus escuadras y un espacio para poder atornillar la estructura al suelo. La altura se ha fijado en la que necesitan las baterías y se ha dejado un espacio adicional por posibles necesidades.

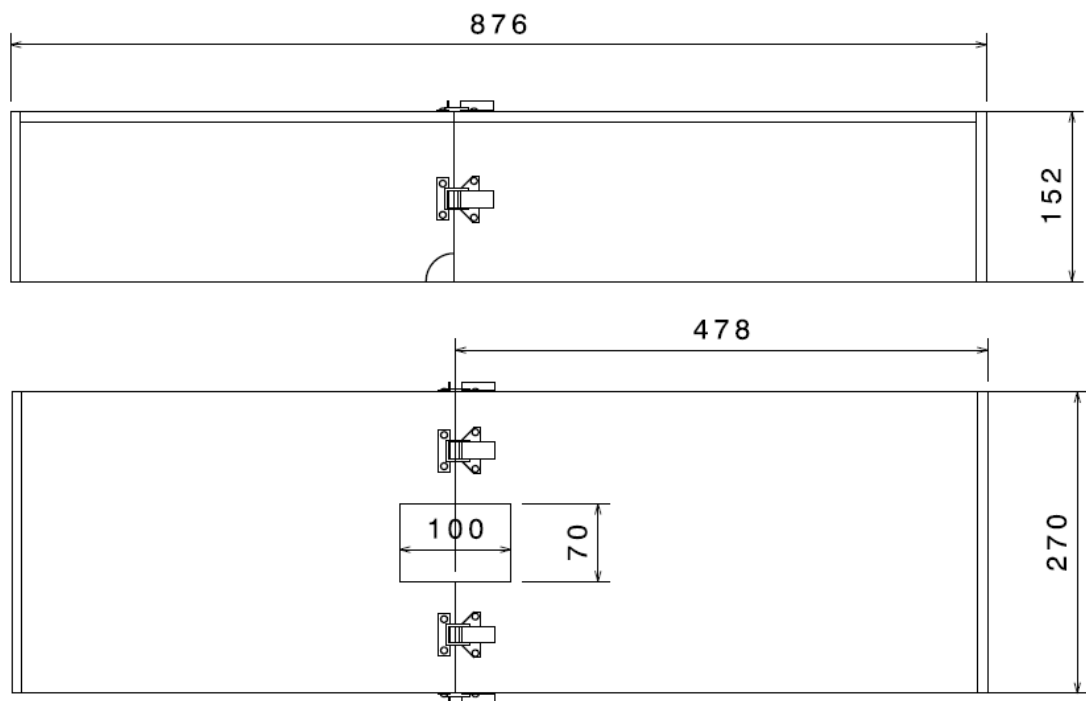


Figura 49 Planos de carcasas

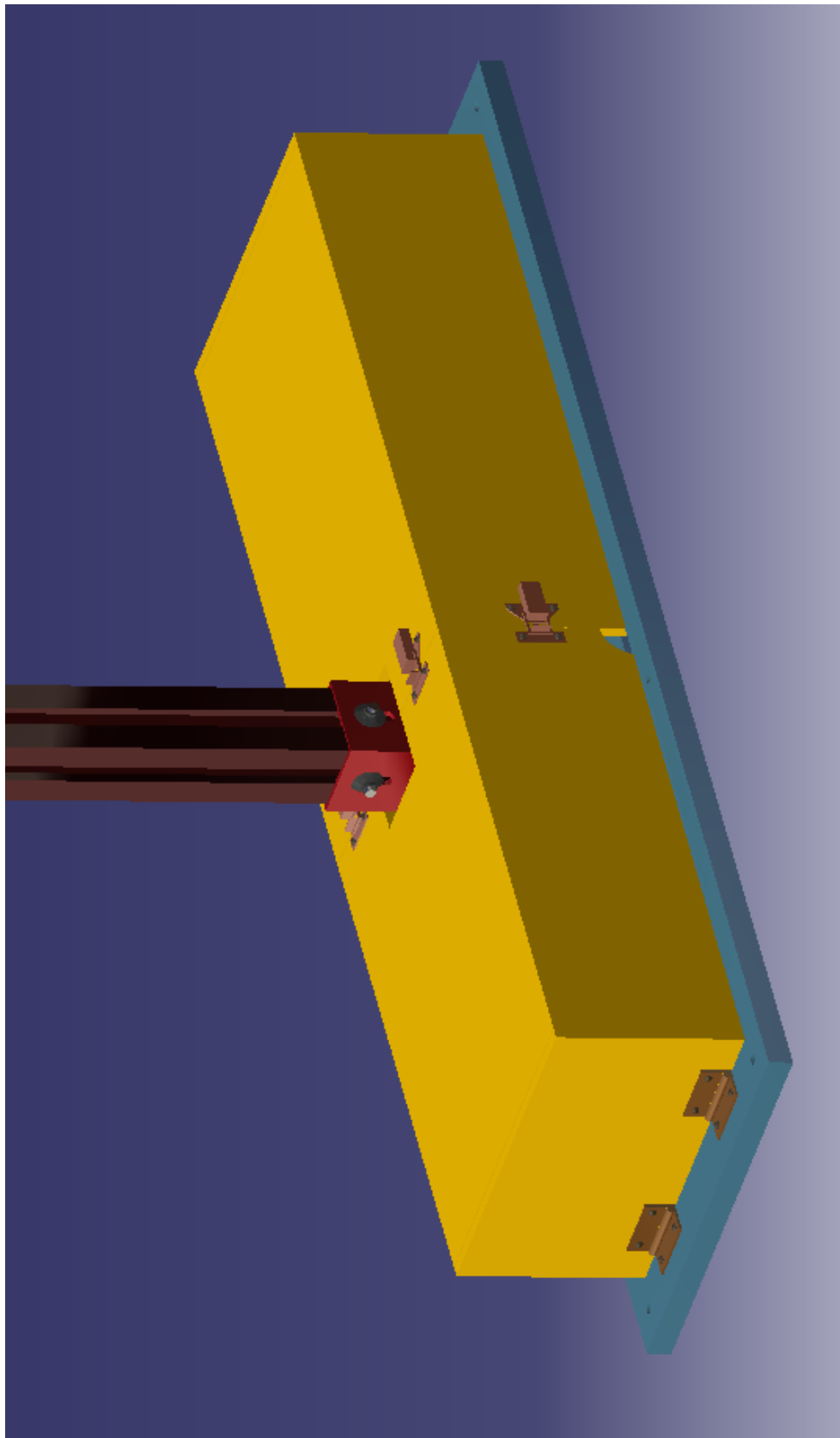


Figura 50 Carcasas en Catia

En la Figura 51 y la Figura 52 se puede observar la estructura con las carcasas abiertas y cerradas.



Figura 51 Bancada túnel con carcasas abiertas



Figura 52 Bancada túnel con carcasas cerradas

- Sistema de transmisión de cargas inferior

Este sistema comprende todos los elementos que se encargan de recoger la carga (tanto fuerzas como momentos) del conjunto motor-hélice (Figura 53), que llegan a través de las reacciones del anclaje de la viga-soporte, y transmitirlo al suelo. En él se tienen escuadras (piezas grises), placas de aluminio (piezas doradas), las guías (piezas rojas), la célula de carga (pieza azul) y la base móvil (pieza verde).

1. Escuadras de placa 2 (o del Leroy Merlin)
2. Placa 2
3. Célula de carga (se describirá en el apartado 4)
4. Placa 1
5. Escuadra de placa 1 (o del Alu-Stock)
6. Base móvil
7. Guías

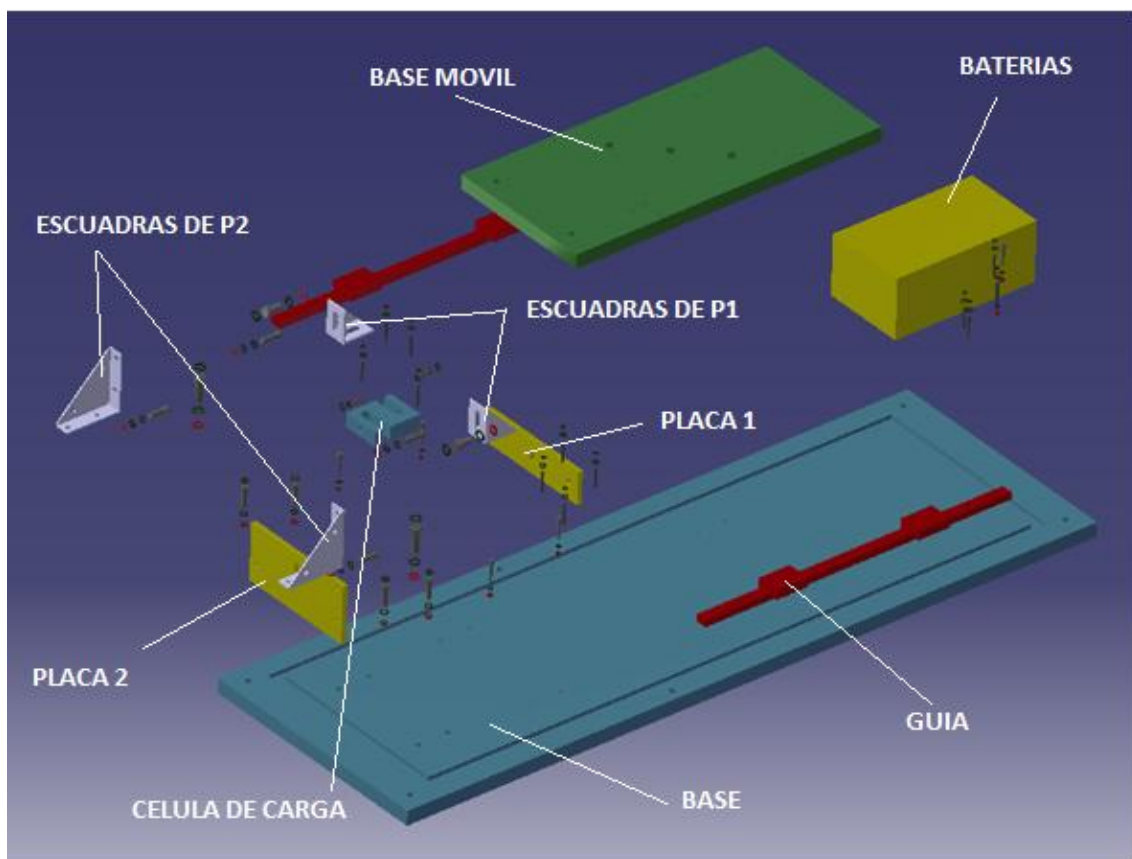


Figura 53 Montaje del sistema de carga inferior

Nota: el bloque de color dorado representa las baterías.

Escuadras de la placa 2 (elemento EE de la Figura 25)

Las escuadras más grandes (Figura 54 y Figura 55) están, por un lado, instaladas en la base de la bancada y por otro sostienen una de las placas de la célula, ambas uniones llevadas a cabo con tornillos M6. Estas escuadras son del Leroy Merlyn y están construidas en acero. Disponen de dos agujeros por pared de 6 milímetros y su función es la de mantener la placa de la célula de carga perpendicular a la misma durante todo el ensayo de manera que las cargas de tracción se transmitan desde la misma hasta la base. Su elección ha recaído en su disponibilidad, bajo coste y buena resistencia.

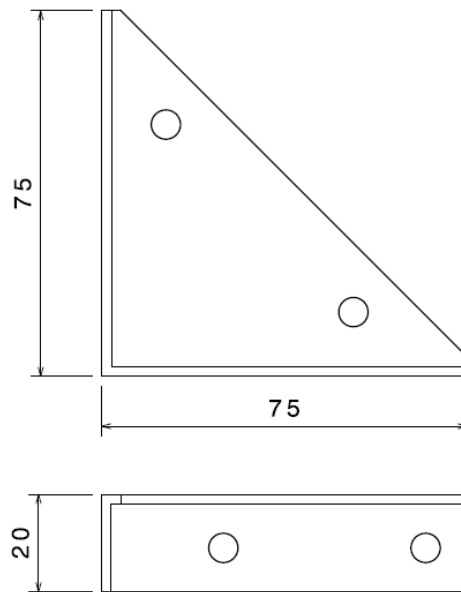


Figura 54 Planos de escuadras del Leroy Merlin

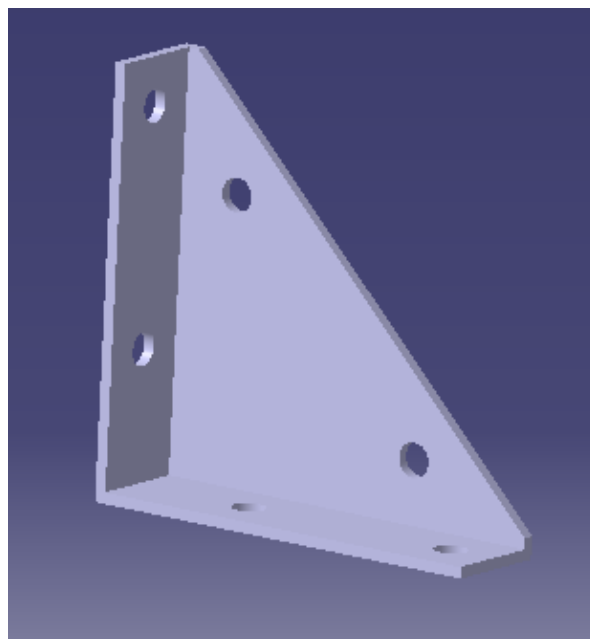


Figura 55 Escuadras del Leroy Merlin en Catia

Placa 2 (elemento DD de la Figura 25)

La placa 2 (Figura 56 y Figura 57) es una pieza rectangular construida en aluminio de gran espesor y diseñada para transmitir el empuje del conjunto motor-hélice a la base de la bancada túnel y servir de superficie pasiva a la célula de carga. Para conseguir su objetivo se encuentra, por un lado, fijada a las escuadras anteriormente mencionadas, mediante cuatro tornillos M6 y, en el otro, está en contacto con la cara pasiva de la célula de carga. En lo que respecta a la unión con la célula de carga se ha realizado un agujero holgado verticalmente para permitir un mejor ajuste de la célula de carga y se ha utilizado un tornillo M6 para realizar la unión. Tiene la altura necesaria para quedar al mismo nivel que su placa homóloga (esta se encuentra sobre la base móvil) y tiene también la misma longitud. Sobre su espesor hablaremos en el capítulo 5.

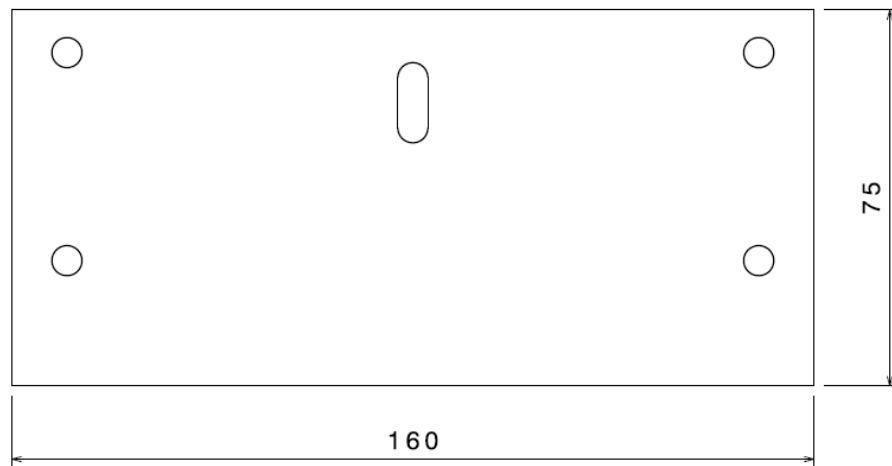


Figura 56 Planos de Placa 2

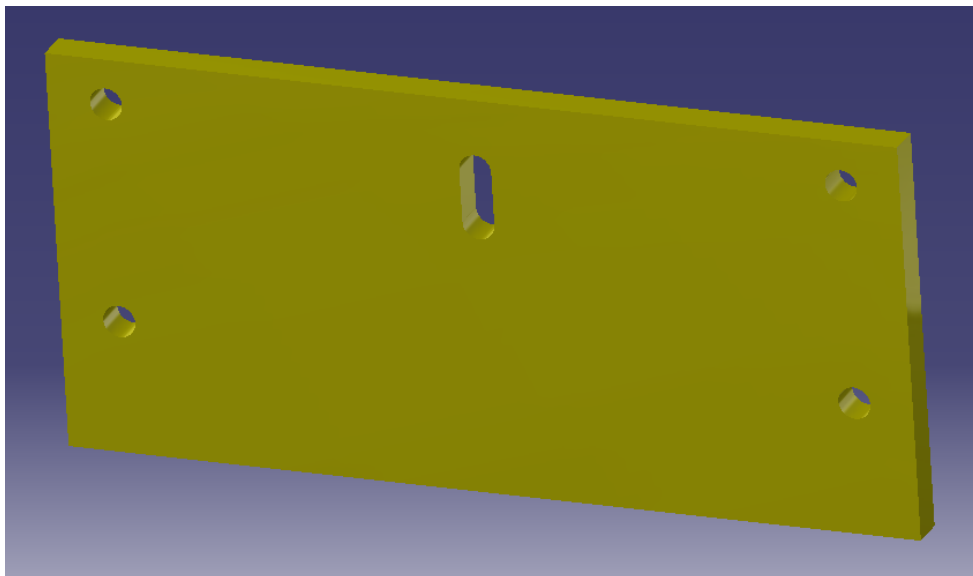


Figura 57 Placa 2 en Catia

Placa 1 (elemento BB de la Figura 25)

La placa 1 (Figura 58 y Figura 59) es una pieza rectangular análoga a la placa 2 construida en aluminio de gran espesor y diseñada para transmitir el empuje del conjunto motor-hélice desde la base de la bancada túnel y servir de superficie activa a la célula de carga. Para realizar tal función se encuentra, por un lado, fijada a las escuadras más pequeñas, que mencionaremos a continuación, mediante cuatro tornillos M8 y, en el otro, está en contacto con la cara pasiva de la célula de carga. En lo que respecta a la unión con la célula de carga también se ha realizado un agujero holgado verticalmente para permitir un mejor ajuste de la célula de carga y se ha utilizado un tornillo M6 para realizar la unión. Tiene la altura de las escuadras más pequeñas para conseguir un apoyo completo de las mismas y suficiente para albergar la cara activa de la célula de carga y en lo que respecta a su longitud es la necesaria para poder fijarse a las escuadras. Sobre su espesor hablaremos en el capítulo 5.

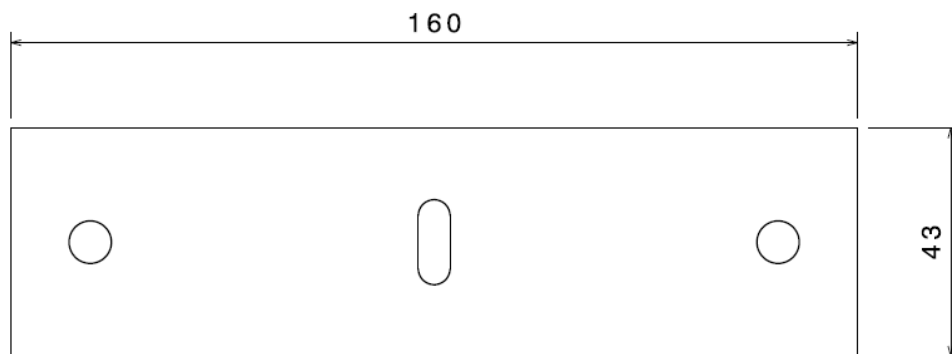


Figura 58 Planos de Placa 1

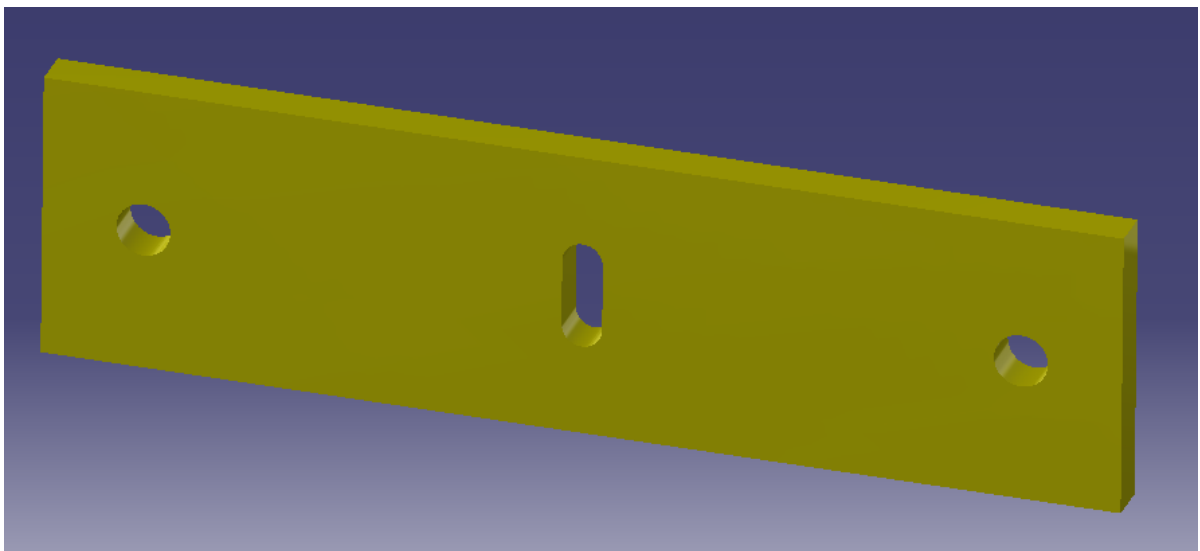


Figura 59 Placa 1 en Catia

Escuadras de la placa 1 (elemento AA de la Figura 25)

Las escuadras (Figura 60 y Figura 61) que se encuentran sobre la base móvil pertenecen a la empresa Alu-Stock, proveedora de perfiles y elementos varios de aluminio. Estas escuadras están constituidas en aluminio de tres milímetros de espesor y poseen un agujero M8 por pared para la instalación de superficies lisas. Se han utilizado para unir la base móvil y la placa 1 mediante tornillería. Su función es análoga a la de las otras escuadras del proyecto, es decir, mantener la placa 1 perpendicular a la base móvil y transmitir la tracción que llega a ésta a la placa. Su elección es debida a que tiene una altura que puede albergar la anchura de la célula de carga, a que estaba disponible en el laboratorio de proyectos anteriores y que posee una buena resistencia para los esfuerzos a los que va a estar sometida. Su altura, además, es la que fija las alturas de las placas 1 y 2.

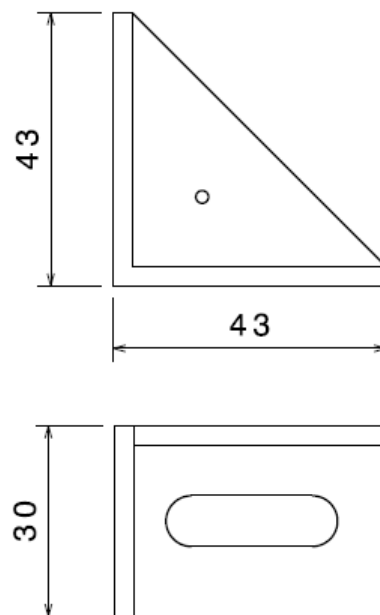


Figura 60 Planos de escuadras de Alu-Stock

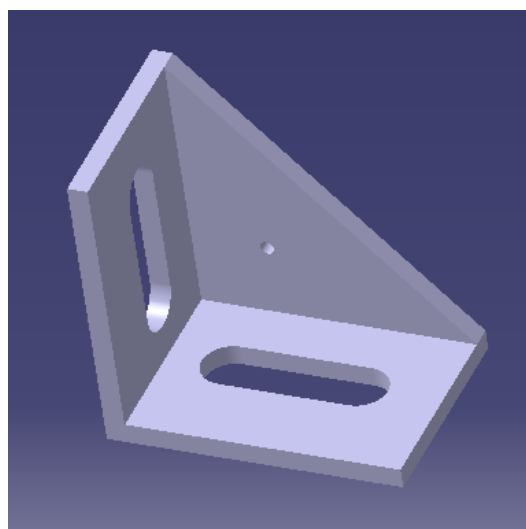


Figura 61 Escuadras de Alu-Stock en Catia

En las siguientes figuras, Figura 62 y Figura 63, se pueden ver la instalación de los elementos anteriormente descritos.

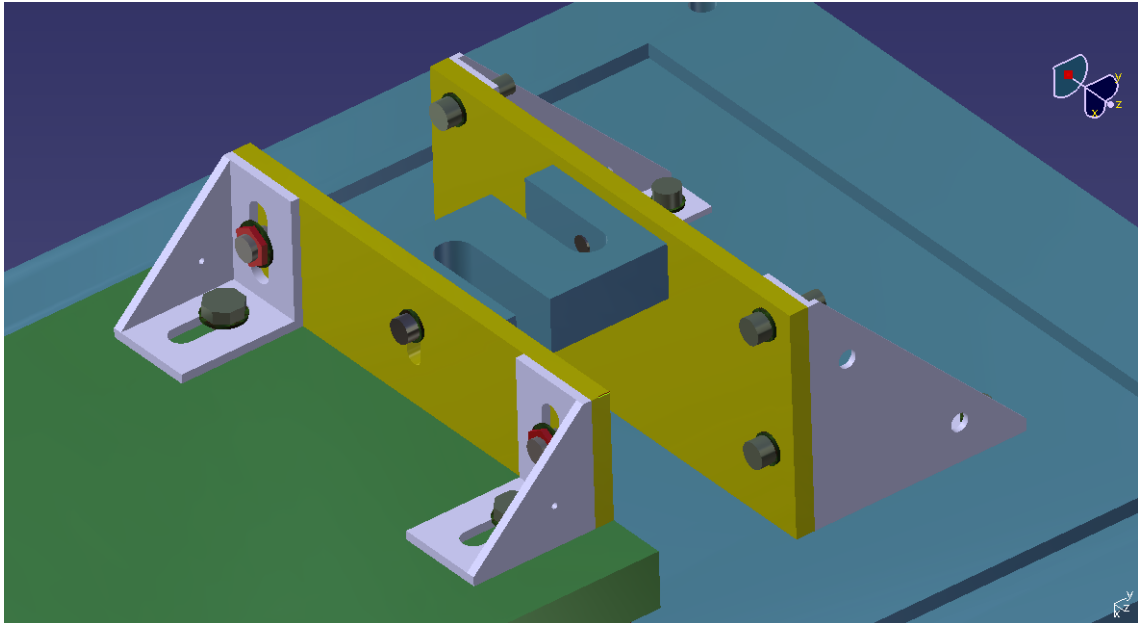


Figura 62 Montaje de la célula de carga en Catia

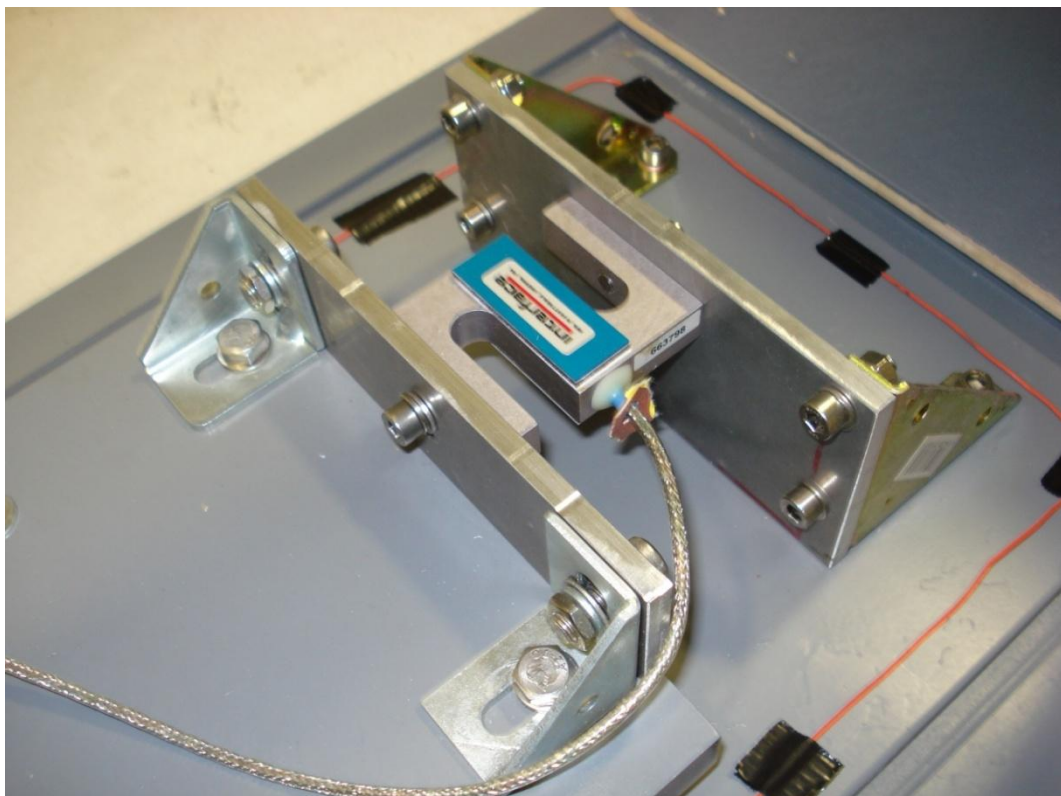


Figura 63 Montaje de la célula de carga

Base móvil (elemento Y en la Base móvil)

La pieza móvil, denominada base móvil (Figura 64 y Figura 65), se ha fabricado en madera compacta DM de 9 milímetros y en ella se han instalado las anteriores escuadras y el anclaje de la viga-soporte. Para ello dispone de dos agujeros pasantes M8 en su parte delantera y otros tres de M12 en el centro respectivamente. En su parte inferior se une a los cuatro apoyos de las guías mediante cuatro tornillos M3 por cada apoyo. La longitud de la tabla está fijada para que cubra las guías que tiene debajo de forma que las proteja, en la medida de lo posible, del polvo. En cuanto a su anchura, viene determinada principalmente por las dimensiones del anclaje pero además debe permitir la unión con los apoyos de las guías (los tornillos del anclaje chocan con las guías si estas se ponen debajo) por lo que la pieza aumenta su anchura con respecto a la del anclaje.

Por otro lado, en esta pieza ha quedado un espacio trasero que puede ser utilizado para alojar distintos componentes. Después de realizar todos los agujeros y avellanados se ha lijado la pieza y se ha pintado de gris metalizado.

En lo que respecta a la posición de las escuadras de aluminio, éstas se han situado lo más cerca del borde de la base móvil (para conseguir una distribución de carga más suave en la misma) pero no llegan a los extremos porque sus tornillos chocarían con las guías. Se ha llegado por tanto a una solución de compromiso entre no poner las escuadras en los extremos y no ponerlas en el centro donde, aparte de que los tornillos de las escuadras pueden chocar con la célula de carga, crean una distribución de carga muy alta en la base móvil. Esta solución es la que fija finalmente las longitudes de las placas de la célula de carga.

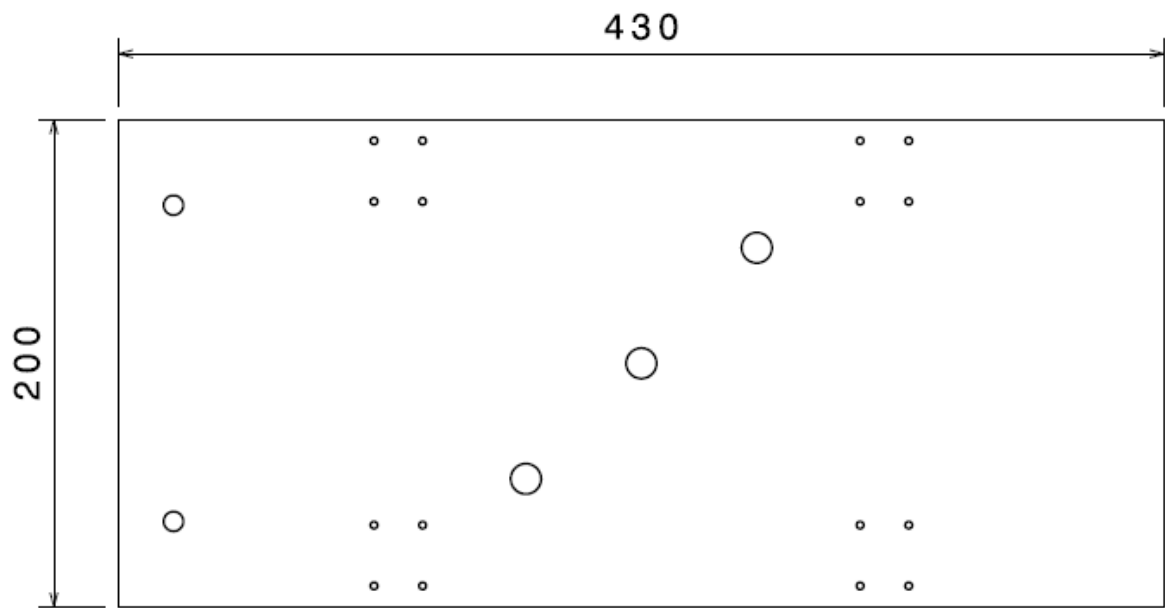


Figura 64 Planos de base móvil

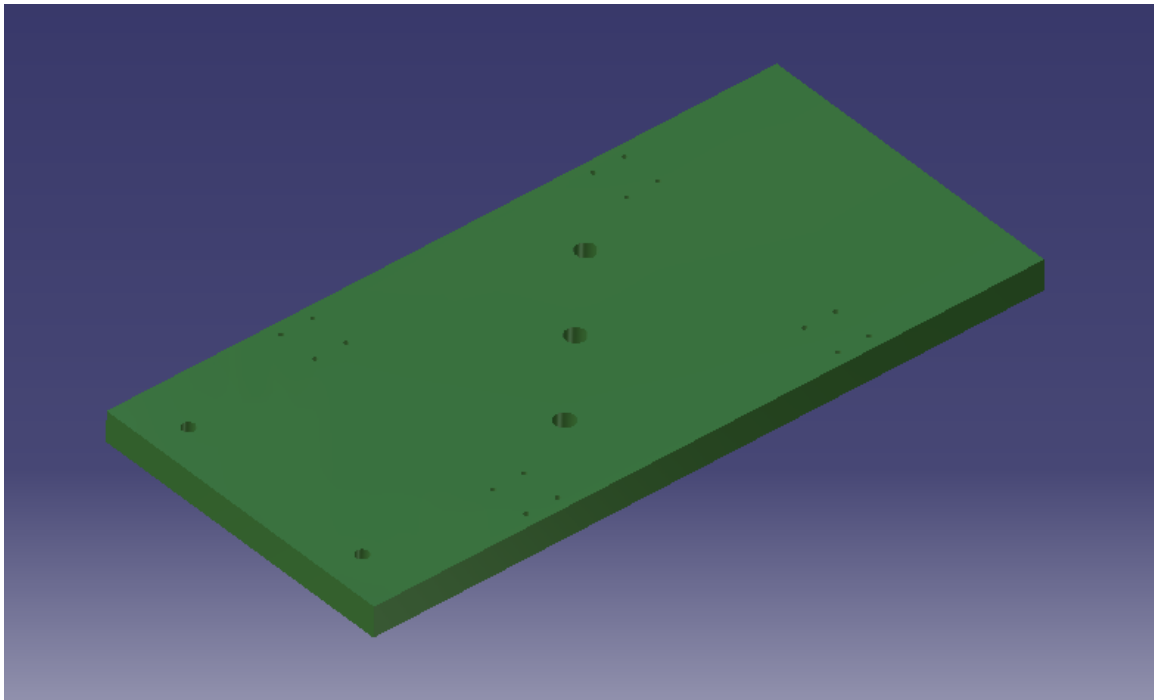


Figura 65 Base móvil en Catia

Guías (elemento Z en la Figura 25)

Como se ha comentado anteriormente las guías que se utilizan son las AMT Linear Guideways (Figura 67 y Figura 68) diseñadas para este tipo de cosas. Su función es la de conseguir un desplazamiento sin rozamientos de la base móvil para permitir que la totalidad de la tracción de la hélice llegue a la célula de carga. Consisten en dos raíles de 430 centímetros con agujeros para su instalación cada 40 centímetros y en dos apoyos de bola por cada raíl, los cuales disponen de cuatro agujeros M3 para unir la superficie a desplazar (Figura 66). Solo se han utilizado cuatro agujeros en cada raíl, dos en cada extremo, para fijarlos a la base de la bancada pues bastaba con eso. Para unir la base móvil se utilizan tornillos M3 y varias tuercas para conseguir una buena distribución de cargas. Los apoyos se han situado simétricamente a la posición del anclaje, lo que equivale a una distribución simétrica para absorber los momentos (también se ha optado por esta solución para dejar un espacio grande y liso en la zona trasera de la base móvil), de forma que los apoyos delanteros estén entre las escuadras de aluminio y el anclaje, fijados los delanteros quedan también fijados los traseros atendiendo a la simetría. Por otro lado, estas guías deben ser engrasadas de vez en cuando con grasa de litio para su correcto funcionamiento.

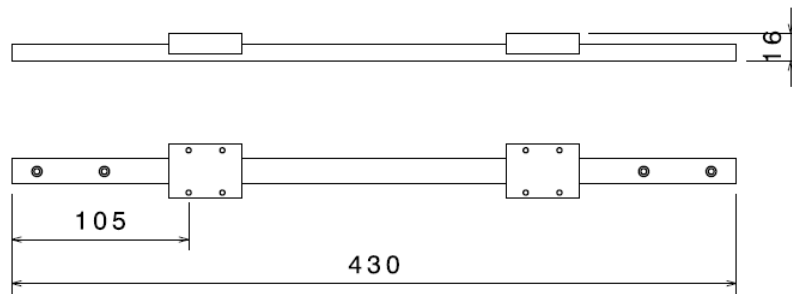


Figura 66 Plano de guías

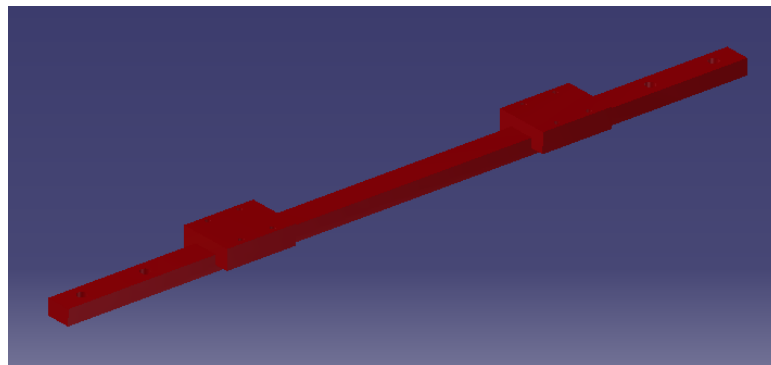


Figura 67 Guías en Catia



Figura 68 Guías (punto (13) de la bibliografía)

Las anteriores piezas completan el sistema de carga inferior mostrado en las siguientes figuras (Figura 69 y Figura 70).

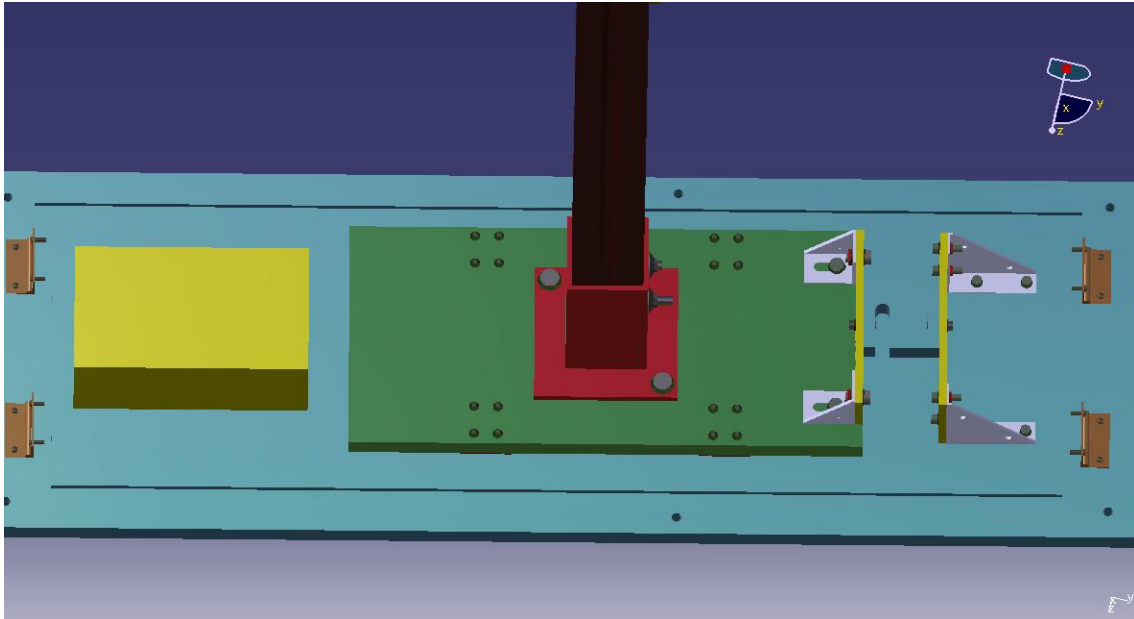


Figura 69 Instalación de la base móvil sobre las guías y el anclaje en Catia

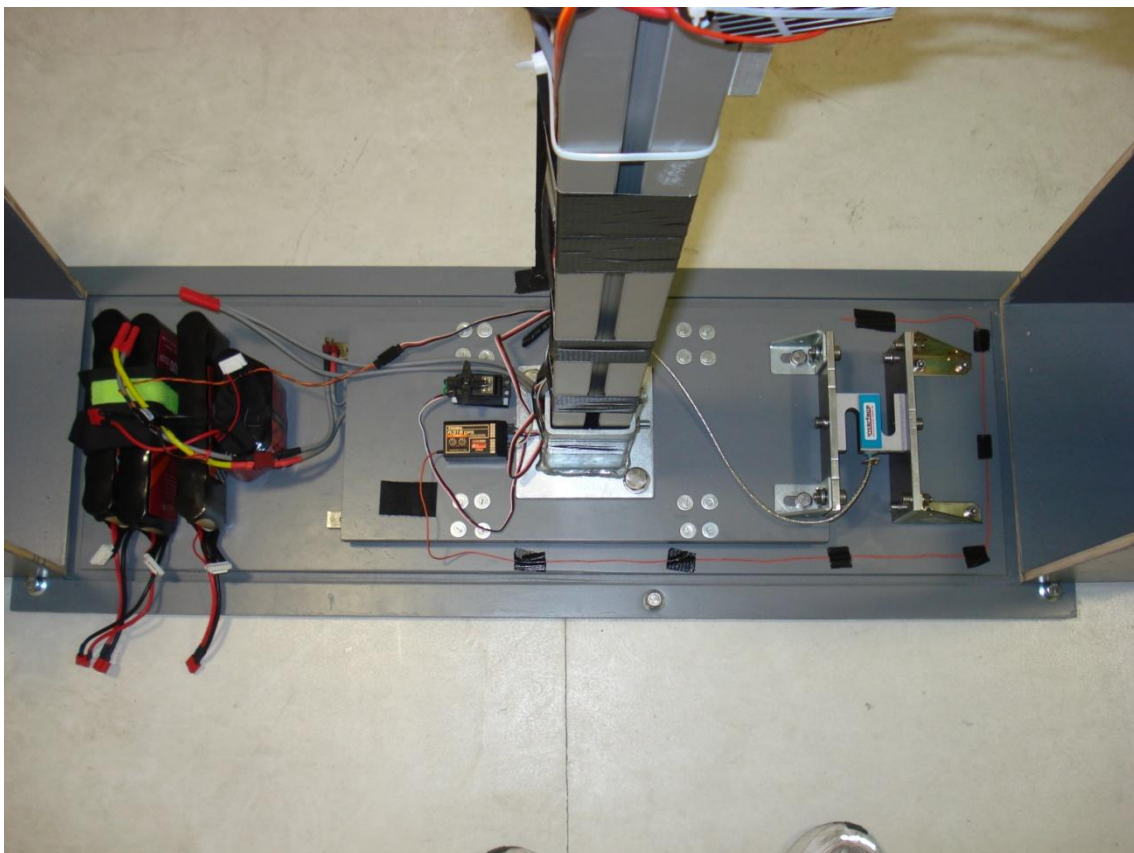


Figura 70 Instalación de la base móvil sobre las guías y el anclaje

Se ha optado por esta configuración para medir y absorber las carga por diversas razones. Primero, se trata de un sistema muy sencillo y muy utilizado en bancadas sin ningún elemento de alta complejidad e instalación, descontando la célula de carga que estaría presente siempre en cualquier configuración. Además, en el laboratorio ya se disponía de las guías de alta precisión que son a la larga el elemento más caro del sistema, por lo que sería absurdo gastar de más en otros elementos necesarios en configuraciones diferentes cuando ya se tiene éste y una muy buena. Finalmente, se ha elegido esta disposición porque es de eficiencia probada, como abalan otras bancadas del mercado y la bancada construida inicialmente por el Grupo de Ingeniería Aeroespacial.

- Sistema de cargas superior

Dentro de este conjunto (Figura 71) tenemos al motor (pieza roja), la bancada del motor (pieza azul), la placa galleta (pieza dorado), el torquímetro (pieza azul oscuro), la placa de unión entre el torquímetro y la viga-soporte (pieza amarilla y que denominaremos como placa A), la viga soporte (pieza rojo oscuro) y el anclaje (pieza roja). La misión fundamental de este sistema es medir el par del motor, llevar las cargas (tanto momentos como fuerzas) hasta la base móvil y asegurar una posición del motor y la hélice adecuados en el túnel de viento.

1. Anclaje
2. Viga-Soporte
3. Placa A
4. Sensor de par (se describirá en el apartado 4)
5. Galleta

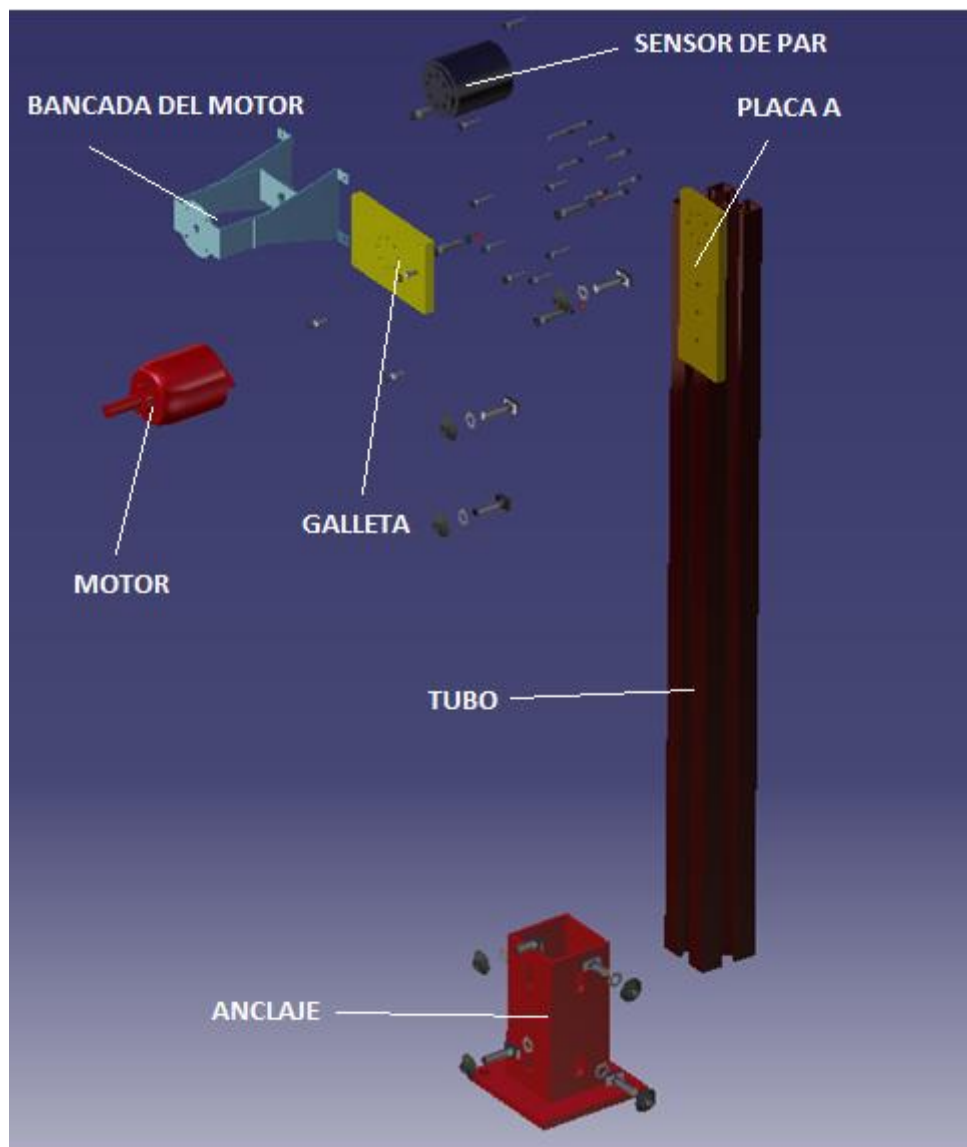


Figura 71 Montaje del sistema de carga inferior en Catia

Anclaje (elemento X de la Figura 25)

El primer elemento que destacamos de este grupo es el anclaje y la viga-soporte. Ambos elementos son de empresa Alu-Stock y están constituidos en aluminio de alta resistencia. El anclaje (Figura 72y Figura 73) es una estructura diseñada específicamente para soportar la viga y fijarla al suelo. Para realizar tal función este elemento posee hasta cuatro agujeros de 9 milímetros de anchura para enganchar la viga y de tres agujeros M12 en la base para anclarse al suelo. La unión con la viga se realiza mediante tornillos de cabeza de martillo fabricados especialmente para estas uniones mientras que para unir la pieza al suelo se utilizan tornillos normales de métrica 12. Posee un espesor de hasta 8 milímetros de aluminio para asegurar un anclaje firme y aunque la pieza no posee un acabado perfecto sí que es suficiente para este proyecto.

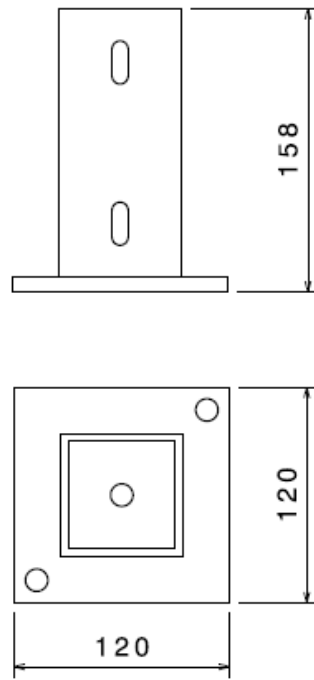


Figura 72 Planos de Anclaje

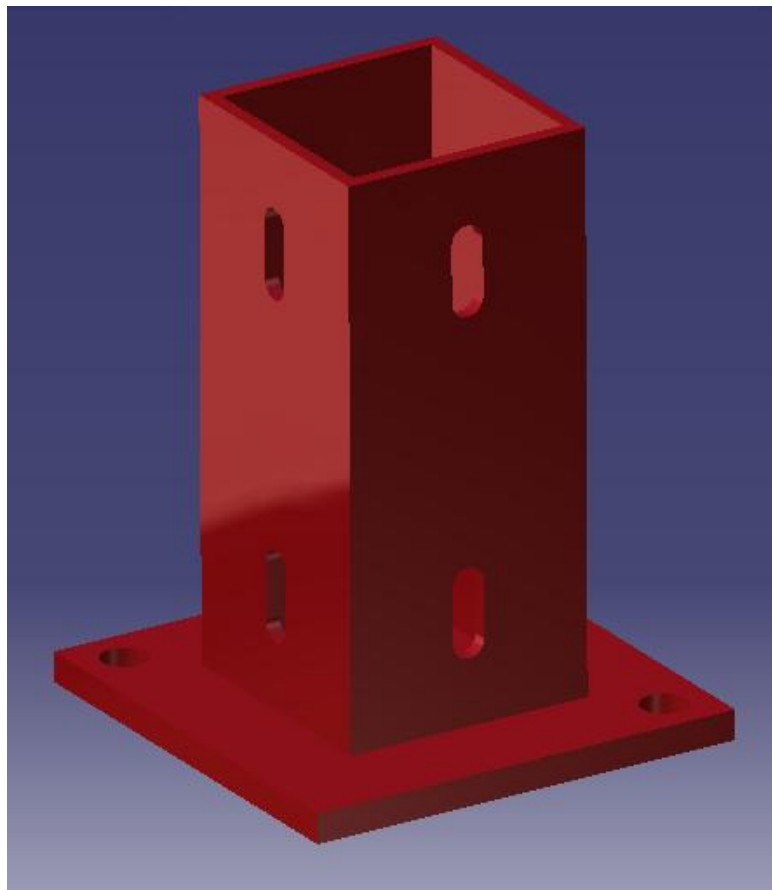


Figura 73 Anclaje en Catia

Viga-soporte (elemento M de la Figura 24)

La viga-soporte (Figura 74 y Figura 75) es un perfil complejo de Alu-Stock fabricado en aluminio de alta resistencia especialmente diseñado para el aguante frente a cargas de flexión. Tiene una sección como se muestra en la figura y una longitud de 80 centímetros. Su función principal es la de soportar el conjunto de motor, hélice, bancada del motor, galleta, sensor de par y placa A de forma que durante los ensayos el conjunto quede prácticamente en una posición fija. Además, tiene la longitud adecuada para que los elementos que soporta queden en la zona central del túnel de viento donde la corriente está libre de perturbaciones.

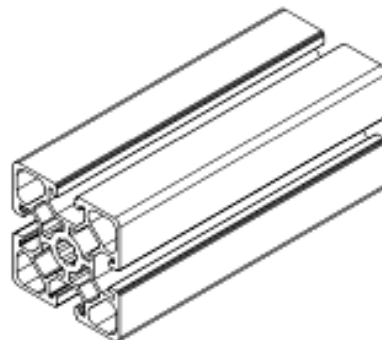
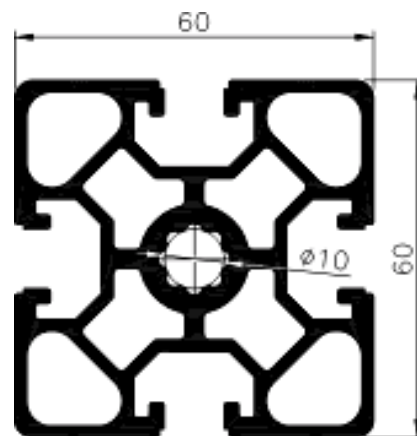


Figura 74 Perfil de la viga-soporte



Figura 75 Viga-Soporte en Catia

Se han elegido estos elementos porque juntos constituyen precisamente la estructura que se buscaba desde el principio, es decir, una estructura que se pueda fijar a la base móvil y que mantenga el motor y la hélice a una altura determinada y, además, están especialmente diseñados para soportar las cargas que generan el conjunto motor-hélice. Por otro lado, la elección también ha recaído en la disponibilidad y en que el Grupo de Ingeniería Aeroespacial ya había tenido contacto con la empresa con buenos resultados. El perfil usado, concretamente, se ha elegido para que los movimientos por flexión fuesen mínimos y también para presentar una pared con la anchura suficiente para hacer un contacto completo con la placa A. Sobre su espesor se hablará en el capítulo 5.

Placa A (elemento R de la Figura 24)

La placa A (Figura 76 y Figura 77), anteriormente mencionada, es una placa rectangular de aluminio de gran espesor cuya función es unir el torquímetro con la viga-soporte. Tiene 8 agujeros en su parte superior configurados exactamente igual que la cara pasiva del sensor de par, al que se une mediante estos con tornillería, y otros tres agujeros M8 en el centro y hacia abajo que se utilizan para unirla a la viga con tornillos de cabeza de martillo. La configuración de esta placa se hace atendiendo a la mayor simplicidad que se puede conseguir para esta

pieza, para ganar en facilidad de construcción, manteniendo la integridad estructural frente a las cargas.

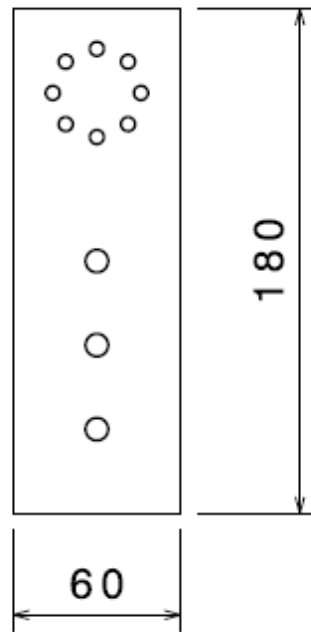


Figura 76 Planos de Placa A

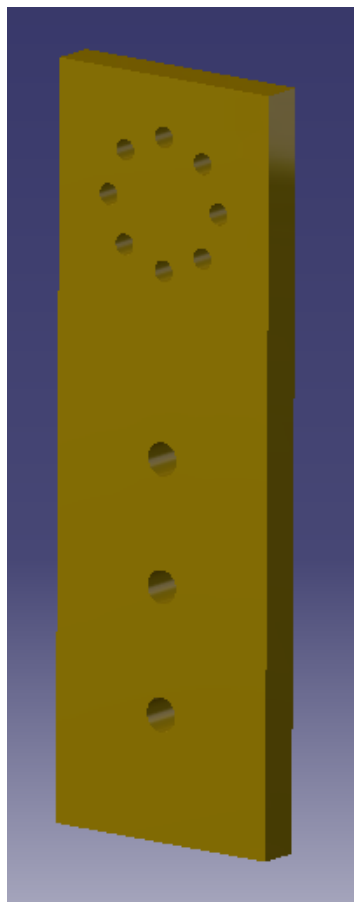


Figura 77 Placa A en Catia

Galleta (elemento P de la Figura 24)

Finalmente tenemos la pieza que hemos denominado galleta (Figura 78 y Figura 79), la cual es una placa construida en aluminio de gran espesor diseñada para unirse por un lado con la bancada del motor y por otro con la cara activa del sensor de par. Para posibilitar tales uniones dispone de agujeros pasantes M4 en cada una de sus esquinas y de ocho en la parte central con la configuración de la cara activa del sensor de par. Todos estos agujeros se realizan de forma que el eje del motor coincida con el eje del sensor de par. La forma de la pieza responde a la máxima sencillez posible para esta pieza, manteniendo siempre la integridad estructural lo cual facilita la construcción y la instalación.

Además, esta pieza constituye el elemento que permitirá probar cualquier motor. Cada motor tendrá asociada una bancada propia, la cual tendrá que disponer de puntos de apoyo. Esta placa posee una superficie que permite poner más de estos puntos de apoyo sin más que perforarla dándole a la bancada su carácter universal.

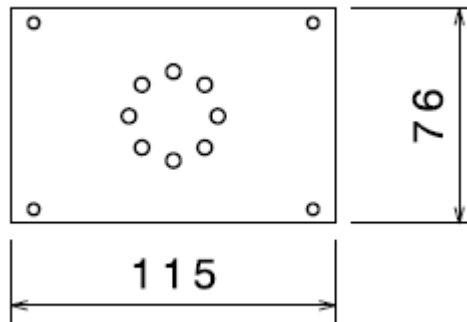


Figura 78 Planos de Galleta

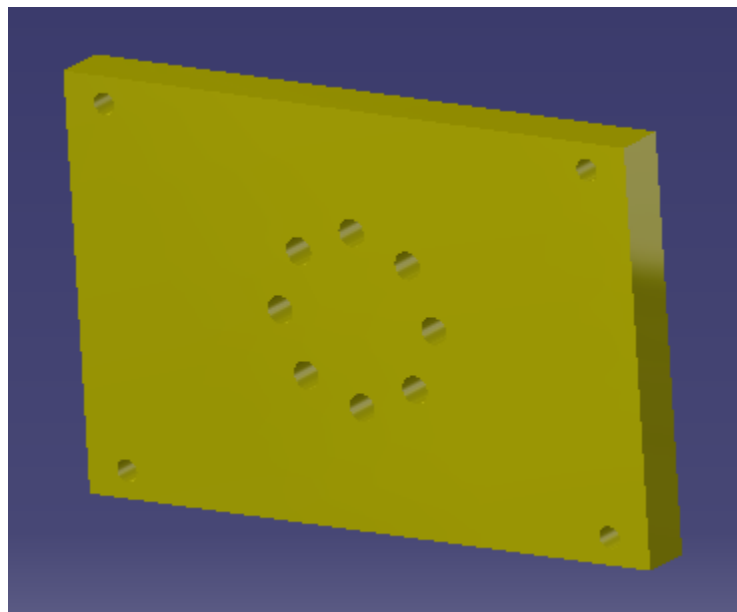


Figura 79 Galleta en Catia

Todas estas piezas unidas mediante tornillería y en conjunto con el motor, la bancada del mismo y el sensor de par forman el sistema de transmisión de cargas superior. En las siguientes imágenes se muestran las figuras del conjunto (Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84 y Figura 85).

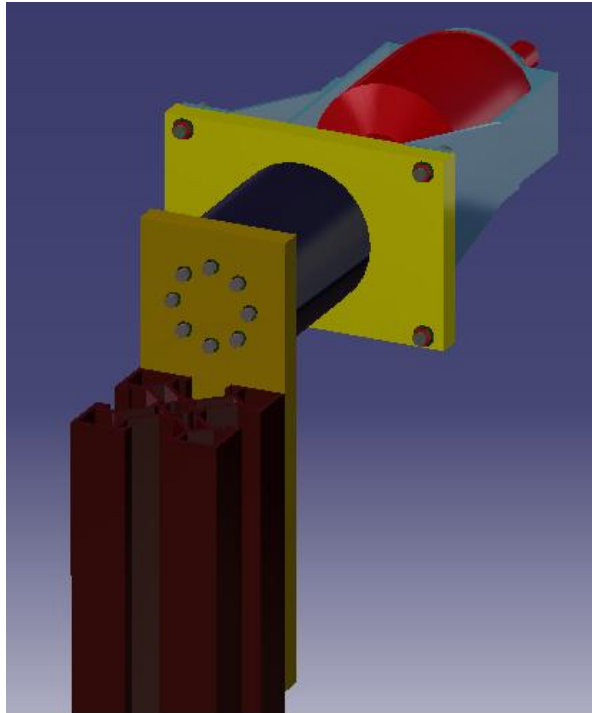


Figura 80 Instalación del sistema de carga superior en Catia



Figura 81 Instalación del sistema de carga superior

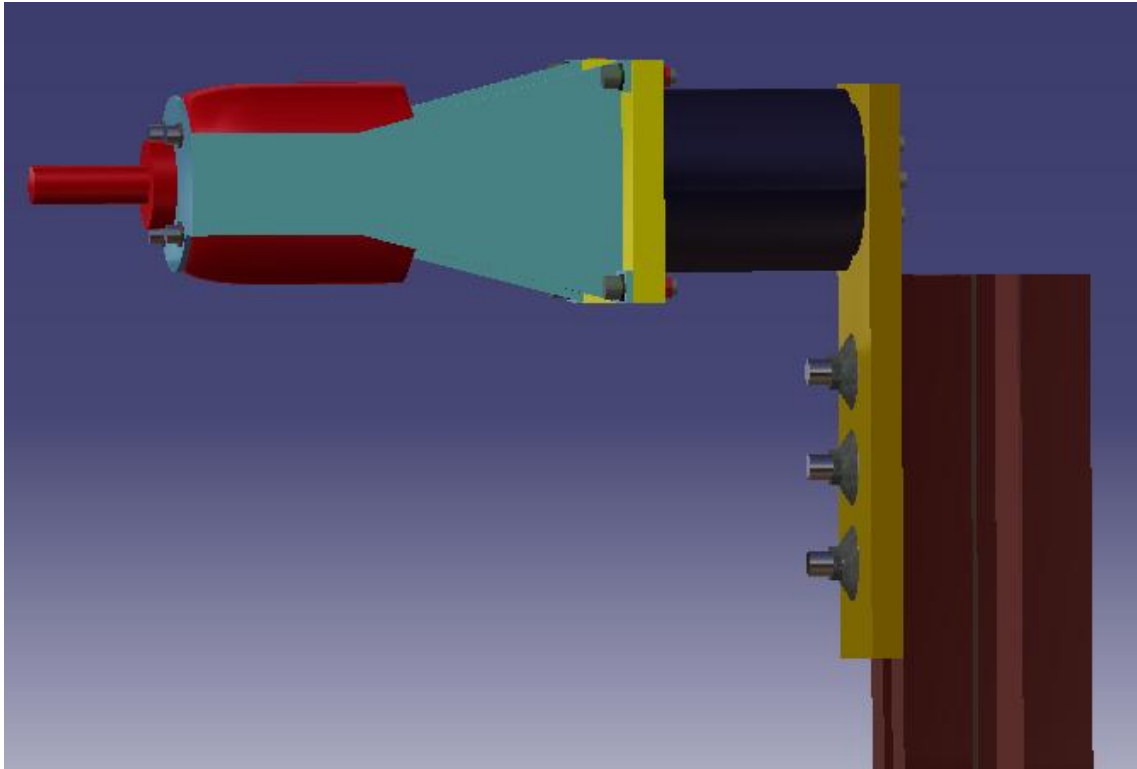


Figura 82 Instalación del sistema de carga superior 2 en Catia

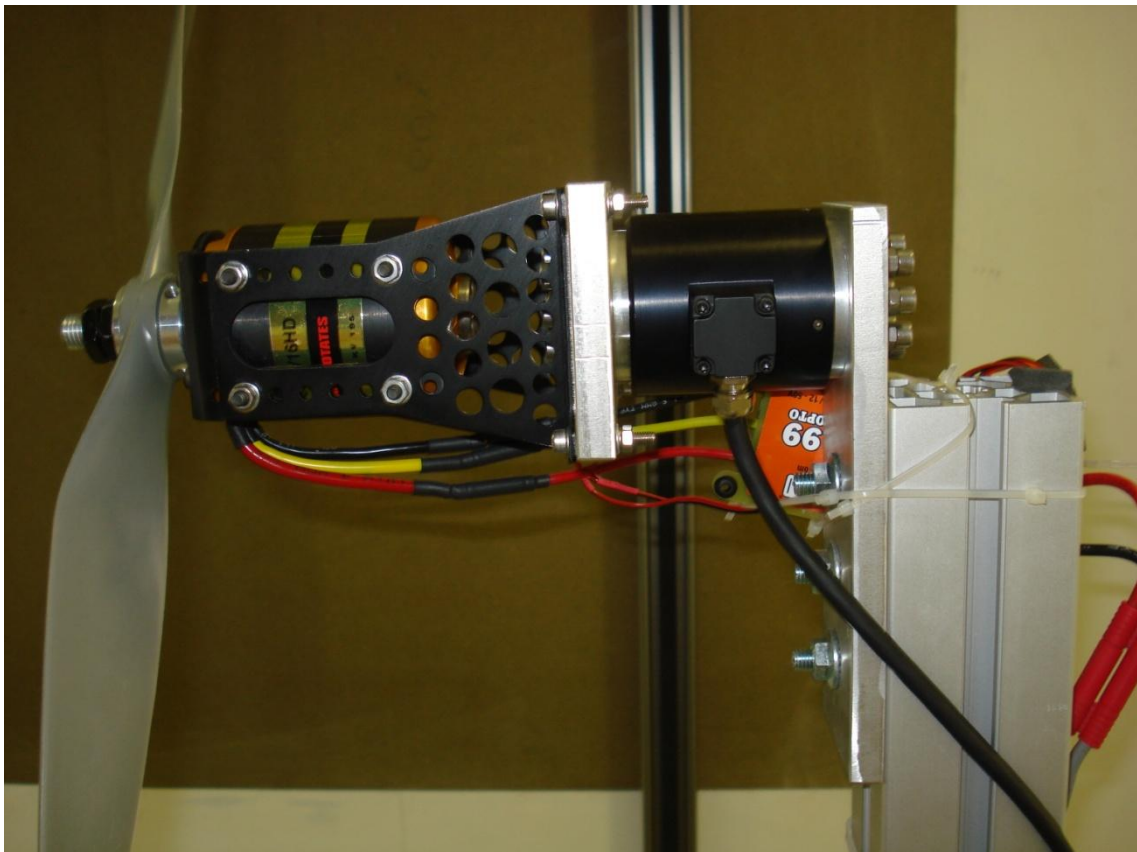


Figura 83 Instalación del sistema de carga superior 2

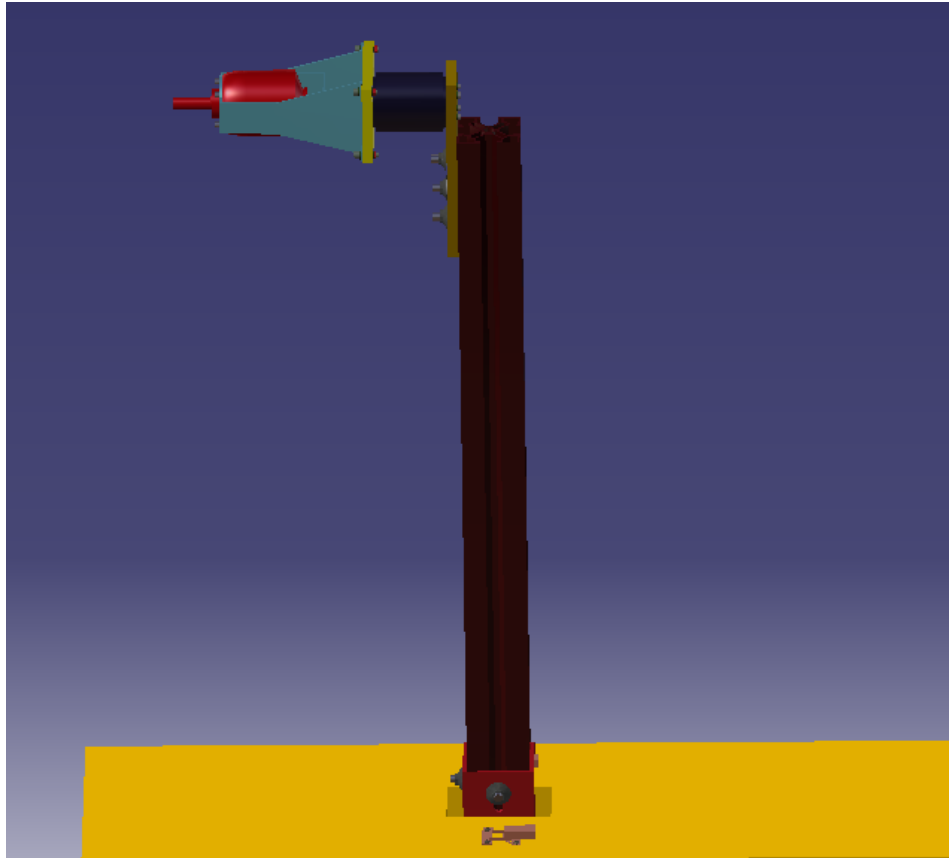


Figura 84 Instalación del sistema de carga superior 3 en Catia



Figura 85 Instalación del sistema de carga superior 3

La configuración desarrollada en este punto ha sido elegida por ser muy sencilla y efectiva. Básicamente en esta estructura encontramos dos configuraciones separadas: la correspondiente a la viga y su anclaje, cuya elección ya se ha explicado, y la referente a la medición del par. Existían dos formas de medir el par, cuya forma determina a la postre toda la configuración, una es la que se ha elegido y la otra manera era mediante un sensor de par dinámico que requería una instalación más compleja y, además, podía introducir errores en las medidas (sobre este tema se habla en el capítulo 4) por lo que acabó descartándose. Por otro lado, también se ha elegido esta configuración debido a que ya se utilizaba en bancadas de túneles de viento siendo por tanto una solución ya probada y que se sabía que funcionaba.

3.2.3. Material y presupuesto

En este apartado se detallan los materiales utilizados durante el proyecto, así como un presupuesto de todas las piezas y dispositivos que se han utilizado.

3.2.3.1. Materiales

Durante el desarrollo del proyecto se han utilizado diversos materiales para la fabricación de piezas dependiendo de las funciones de las mismas. Se ha utilizado aluminio, contrachapado, madera compacta y aceros en piezas individuales.

- Aluminio

El aluminio (Figura 86) es un metal no ferromagnético que posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica y, además, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato por lo que es muy utilizado. Para más información consúltase el punto (14) de la bibliografía.



Figura 86 Aluminio (15)

El aluminio, más concretamente aleaciones con mayor resistencia, se ha utilizado para las piezas que estaban sometidas a esfuerzos importantes para su tamaño, tenemos en este grupo: galleta, la placa A, la viga-soporte, el anclaje, las placas de la célula de carga y las

escuadras (dos de ellas son de acero). El aluminio de la empresa Alu-Stock (la viga soporte, el anclaje y las escuadras) es un aluminio de alta resistencia protegido contra la oxidación, mientras que el de las diferentes placas, obtenido de la empresa Broncesval (16), que se han tenido que construir son también de alta resistencia pero en este caso permiten un fácil moldeado. Para la construcción de dichas piezas se ha utilizado una máquina de control numérico.

- Madera compacta DM

Un tablero DM (Figura 87) es un aglomerado elaborado con fibras de madera (que previamente se han desfibrado y eliminado la lignina que poseían) aglutinadas con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor, en seco, hasta alcanzar una densidad media. Presenta una estructura uniforme y homogénea y una textura fina que permite que sus caras y cantos tengan un acabado perfecto. Se trabaja prácticamente igual que la madera maciza, pudiéndose fresar y tallar en su totalidad. La estabilidad dimensional, al contrario que la madera maciza, es óptima, pero su peso es muy elevado. Para más información consúltese el punto (17) de la bibliografía.



Figura 87 Madera DM (18)

Las bases de las tres partes de la bancada (la base fija, la base de la caja electrónica y las dos bases de la bancada túnel) se han realizado en madera compacta que ya se tenía en el laboratorio. Ésta es barata, capaz de absorber grandes esfuerzos y muy fácil de trabajar, por lo que resulta ideal para ser la base de las estructuras de la bancada.

- Contrachapado

El contrachapado (Figura 88), también conocido como multilaminado, triplay o madera terciada, es un tablero elaborado con finas chapas de madera pegadas con las fibras transversalmente una sobre la otra con resinas sintéticas mediante fuerte presión y calor. Esta técnica mejora notablemente la estabilidad dimensional del tablero obtenido respecto de madera maciza. Para más información consúltase el punto (19) de la bibliografía.



Figura 88 Contrachapado (20)

Para las piezas que no esáan sometidas a esfuerzos importantes se ha optado por contrachapado del que se disponía en el laboratorio. Esta madera es ligera, barata y resulta fácil trabajar con ella. Se han construido con ella las carcasas de la caja electrónica y las de la bancada túnel.

- Elementos de unión

Como elementos de unión se han utilizado tornillos, tuercas, arandelas, bisagras, cierres de presión, grapas y cola de madera. Para unir piezas metálicas entre sí y a las bases se utilizan tornillos y tuercas. Además en todas las uniones roscadas se utilizan arandelas normales (distribuyen la carga) y de presión para asegurar un agarre permanente. La cola de madera y las grapas se han utilizado para unir las piezas de contrachapado y formar las carcasas. Para permitir que las carcasas de la bancada túnel puedan girar y cerrarse se utilizan 4 bisagras (dos por cada carcasa) y 4 cierres a presión. De la misma forma se utilizan otro tipo bisagras más grandes para abrir y cerrar la tapadera de la caja electrónica y velcro para mantenerla cerrada.

Estos elementos de unión se han obtenido de empresa con las que se encontraba en contacto el Grupo de Ingeniería Aeroespacial. De Alu-Stock han salido las escuadras más pequeñas, del Leroy Merlin son las escuadras de acero, las bisagras, el velcro, los cierres de presión... y la tornillería de empresa Suminox (21).

- Pinturas

Una vez construidas todas las piezas de madera y habiéndose practicado todos los agujeros para las uniones, se han lijado todas las piezas para abrir nuevos poros en las

superficies. Y a continuación se han pintado con una pintura acrílica de color gris metalizado que la protegerá frente a las inclemencias medioambientales.

3.2.3.2. Presupuesto

Se expone aquí el presupuesto de todas las piezas de la bancada, exceptuando el de los componentes electrónicos que se verán en el capítulo 4. Cabe destacar la gran cantidad de elementos de los que se disponía en el laboratorio y que ha sido una de las razones por las que se han utilizado.

Pieza o Dispositivo	Cantidad	Precio (€)
Base Fija	0,838 m ²	En laboratorio
Base de la caja electrónica	0,289 m ²	En laboratorio
Base de la banc. Túnel	0,289 m ²	En laboratorio
Base móvil	0,086 m ²	En laboratorio
Apoyos	4	En laboratorio
Escuadras Leroy Merlin	2	6,20
Ecuadras De alu Stock	2	8
Bisagras de piano	2	En laboratorio
Bisagras normales	4	15
Contrachapado de la c. elec	0,631 m ²	En laboratorio
Contrachapado de las carcasas	0,559 m ²	En laboratorio
Piezas de aluminio de 1 cm	0,098 m ²	10
Piezas de aluminio de 6,5 cm	0,019m ²	En laboratorio
Anclaje	1	20
Viga Soporte	1	50
Tornillería en general	-	20
Apoyos	4	En laboratorio
Elementos varios	-	En laboratorio

Tabla 4

4. DESCRIPCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

En las sucesivas secciones de este capítulo se van a describir todos los dispositivos electrónicos, como ya se anticipó en los capítulos 2 y 3, que forman parte de la bancada y su función en la misma. Para una mayor información se ha creado el Apéndice A, donde están reunidos la mayoría de los manuales de los dispositivos que se describen a continuación.

4.1. CÉLULA DE CARGA

Una célula de carga es un dispositivo eléctrico que es capaz de hallar la fuerza aplicada en una dirección y sentido determinados por la misma mediante la deformación del propio dispositivo. Concretamente la fuerza deforma unas galgas que se hallan dentro de la célula provocando que la corriente eléctrica que las recorre varíe con respecto a su estado inicial. Estas variaciones se corresponden con unas determinadas cargas que se encuentran tabuladas, es decir, cada deformación de las galgas se corresponden con unas variaciones de la corriente y éstas con una determinada fuerza.

Debido a que las deformaciones de la célula de carga son muy pequeñas se obtienen variaciones muy pequeñas de la corriente por lo que es necesario tratar las señales eléctricas. Este tratamiento consiste fundamentalmente en la amplificación de la señal y, por otro lado, en acondicionarla para ser recibida por otros dispositivos de adquisición de datos, en este caso la placa Hércules. Este dispositivo electrónico es el llamado acondicionador de señal que se describirá después.

Durante el desarrollo de este proyecto se planteó la utilización de dos posibles tipos de célula de carga: de un solo punto y de tracción-compresión. Ambos tipos de célula miden la carga en una única dirección pero mientras que la célula de un solo punto mide en un único sentido, la de tracción-compresión mide en los dos sentidos.

En los ensayos estáticos, la fuerza, en este caso la tracción, irá en un único sentido luego podemos utilizar tanto la célula de un solo punto como la de tracción-compresión. Pero en los ensayos dinámicos, debido a la resistencia al viento que ofrecerá el motor y la viga soporte tendremos dos fuerzas de distinto sentido en juego. En este caso si la tracción del conjunto motor-hélice es mayor que la resistencia tendremos una fuerza neta en el sentido de la tracción pero si sucede lo contrario (es necesario llegar a estos casos para caracterizar la planta propulsora) la fuerza neta estará en el otro sentido. Este hecho nos obliga en principio a tener que utilizar la célula de tracción-compresión.

Se ha constatado que las células de un solo punto pueden llegar a medir cargas negativas hasta unos ciertos valores (unos pocos Newtons). Es decir, si las cargas en el sentido contrario son muy pequeñas se pueden medir con este dispositivo. Para ver las magnitudes de las cargas negativas se realiza un estudio aerodinámico de la resistencia del motor en el túnel de viento (apartado 5). Este estudio sitúa la resistencia entorno a los 10 Newton por lo que se descarta por completo este tipo de célula de carga y se opta por el otro.

Una vez se hubo elegido el tipo de célula de carga se ha estudiado el mercado atendiendo a las células de carga de tracción-compresión que se ofertaban, al precio de las mismas y a sus rangos de carga. Atendiendo a lo anteriormente dicho se ha elegido la célula SSM Interface mostrada en la Figura 90 y la Figura 91:



Figura 89 Células de carga SSM (22)

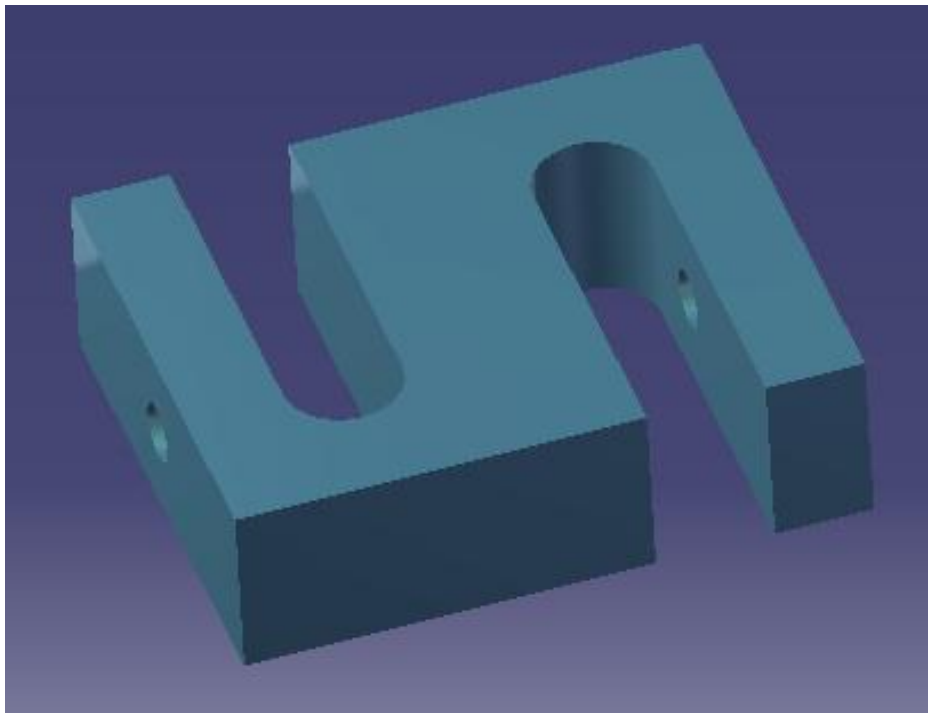


Figura 90 Células de carga SSM en Catia

Esta célula de carga posee las siguientes características mostradas en la Tabla 5:

Especificaciones para la célula SSM Interface		
Precisión (Error Máximo)		
No linealidad % FS	±0.05	
Histéresis % FS	±0.03	
No repetitividad % RO	±0.02	
Creep, en 20 min %	±0.025	
Temperatura		
Rango de compensación °C	-15 a 65	
Rango de operación °C	-55 a 90	
Efecto en salida %/°C	±0.0015	
Efecto en cero %/°C	±0.0027	
Eléctrica		
Salida Nominal mV/V	3	
Equilibrio en cero % RO	±1	
Puente de resistencia Ohm	350	
Voltaje de excitación	MAX 15 VDC	
Resistencia de aislamiento Megohm	> 5000	
Mecánica		
Calibración	Tensión	
Sobrecarga segura % CAP	150	
Longitud del cable ft	10	
Frecuencia Natural/Deflección		
Carga (N)	Deflección (in)	Frec. Natural (Hertz)
500	0.004	1850

Tabla 5

Como puede comprobarse de la tabla los rangos de errores son admisibles, las características eléctricas son apropiadas para la utilización que se le va a dar y la carga máxima que puede medir es superior a que se espera alcanzar durante los ensayos.

En cuanto a la posición de la célula de carga, como ya se ha dicho, estará comprendida entre dos placas de aluminio (Figura 91 Célula de carga en la bancada túnel). Una de ellas sujeta a la bandeja móvil y otra fija a la base. Durante los ensayos ambas placas han de aguantar las fuerzas sin deformarse hasta el punto de comprometer la estabilidad de la célula de carga. La placa unida a la base fija actúa como la superficie de referencia y la otra placa la activa, con esta distinción se orienta la célula de carga.

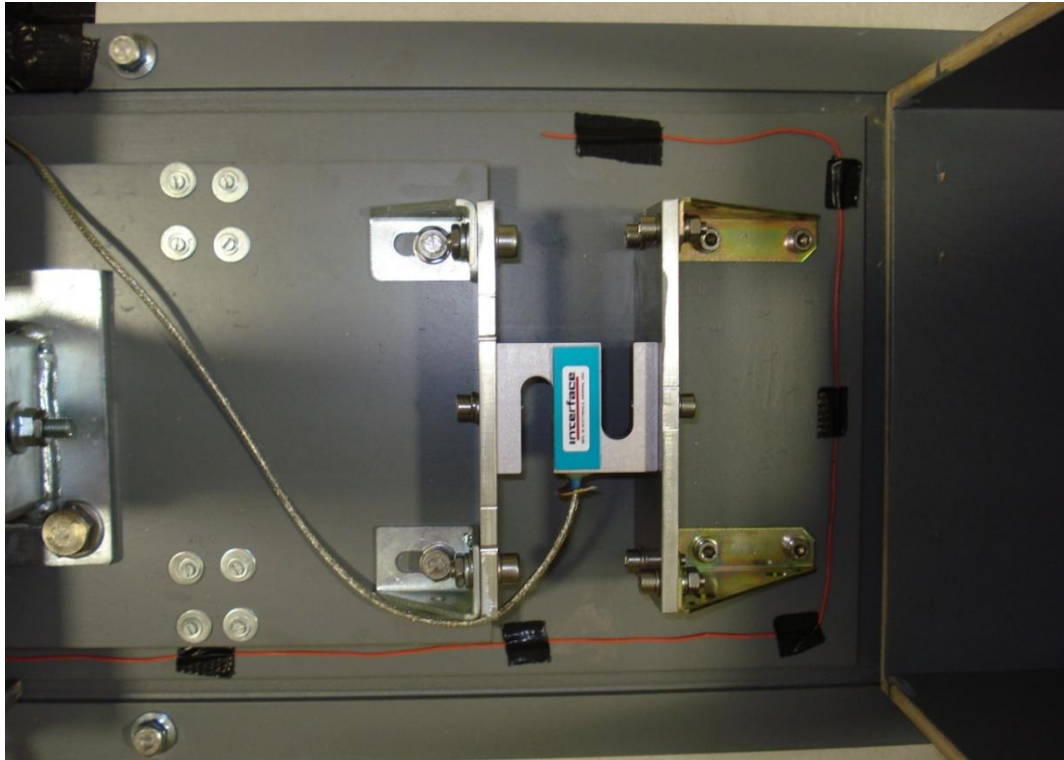


Figura 91 Célula de carga en la bancada túnel

Finalmente, para unir la célula a las placas se dispone de unos tornillos especiales, haciendo de tuerca el propio sensor (Figura 92). Para conseguir un buen alineamiento de la célula el agujero practicado en las placas está extendido verticalmente. Por otro lado, para evitar aflojamientos del sistema de sujeción se han utilizado tuercas de presión.



Figura 92 Unión de la célula de carga con la placa 1

4.2. SENSOR DE PAR

Un sensor de par es un dispositivo eléctrico usado para medir el par de reacción de un cuerpo mediante acoplamiento mecánico al eje de forma análoga a cómo lo hace la célula de carga, es decir, mediante el análisis de la deformación sufrida. Dependiendo de cómo se tomen las medidas del par tendremos un sensor de par estático o dinámico.

Los sensores de par dinámicos realizan las medidas mediante el estudio de la rotación del eje motor. Disponen de una parte dinámica ensamblada al eje motor y que gira solidariamente con él y una parte estática desde la que se toman las medidas. El inconveniente de estos sensores es que hay que tener en cuenta que se añade resistencia al motor debido a que se engancha al motor otra carga, la parte dinámica del sensor. Este hecho falsea en cierta forma los resultados pues para una potencia dada el sensor nos dará medidas de par más bajas que las que realmente tendríamos con esa potencia al no tener que tirar de la carga adicional. Por otro lado, se trata de un sensor de compleja instalación en nuestro caso pues es necesario realizar un acoplamiento al eje del motor. Por lo tanto, habría que o bien utilizar el eje de la hélice por lo que el sensor estaría delante de la misma perturbando la corriente (más desviación del modelo real) o sacar un nuevo eje por la parte posterior y adaptar la bancada del motor para poder meter el sensor.

Debido a los anteriores inconvenientes se ha optado por la elección de un sensor de par estático, más fácil de instalar y con menores problemas en cuanto a errores. Este tipo de sensores se basan en la deformación torsional de uno de sus componentes internos, más concretamente unas galgas extensiométricas, por donde circula una corriente eléctrica. De la misma forma que ocurría en las células de carga la deformación torsional, en este caso, produce una variación en corriente eléctrica que el sensor junto con su amplificador traduce en el par buscado.

Para el correcto funcionamiento de este sensor se necesitan dos superficies de apoyo. Una superficie plana que ha de servir de apoyo y referencia estática al sensor y el elemento que está sometido al par de torsión que se desea medir. Una vez identificadas estas superficies se ha fijado el sensor a las mismas mediante un agarre firme de 8 tornillos por superficie. Esta instalación, por tanto, no necesita ponerse delante del motor como la otra y puede ir detrás directamente de la bancada del motor sin presentar problemas estructurales de instalación.

Teniendo en cuenta el tipo de sensor, el precio y la carga máxima a la que va a estar sometido el mismo se ha realizado un estudio de mercado y se ha elegido el sensor de par estático Model MRT2 Reaction Torque Transducer (Figura 93 y Figura 94).



Figura 93 Sensor de par (23)

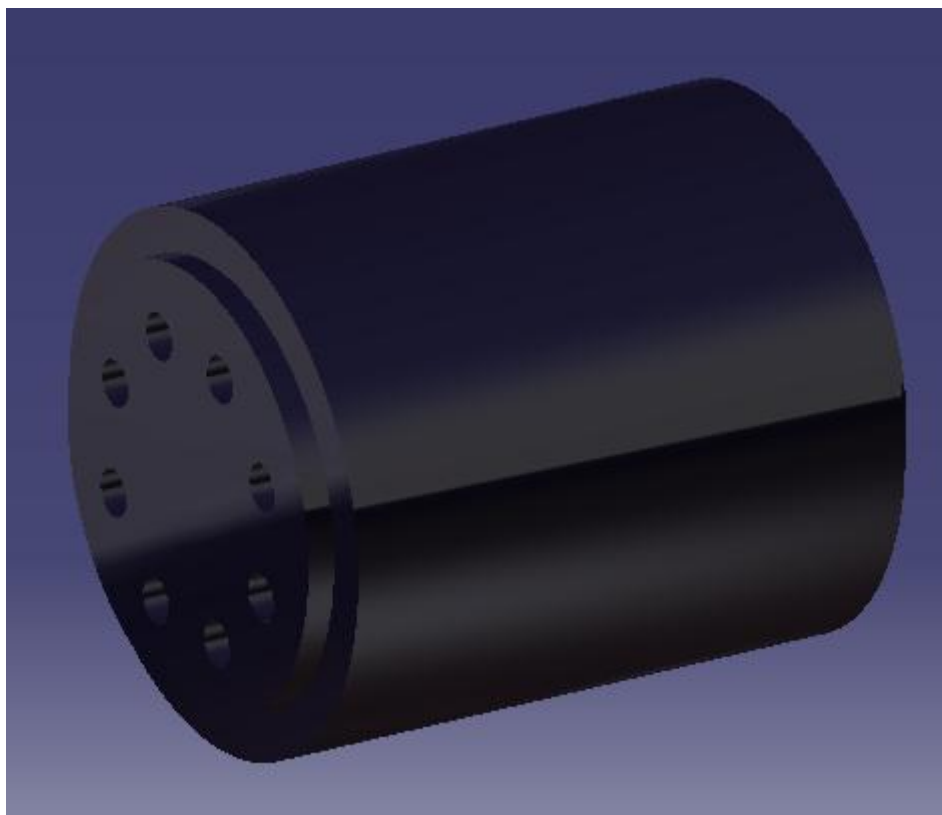


Figura 94 Sensor de par en Catia

Este sensor posee las siguientes especificaciones recogidas en la Tabla 6:

Especificaciones para la célula SSM Interface	
Capacidad Nm	10
Precisión (Error Máximo)	
No linealidad % FS	± 0.10
Histéresis % FS	± 0.10
No repetitividad % RO	± 0.05
Temperatura	
Rango de compensación °F	15 a 115
Rango de operación °F	-65 a 200
Efecto en salida %RO/100°F	± 0.10
Efecto en cero %/100°F	± 0.20
Eléctrica	
Salida Nominal mV/V	2.00 ± 0.30
Puente de resistencia Ohm	700 ± 7
Voltaje de excitación VDC MAX	20
Conexión Eléctrica	5' cable integrado
Mecánica	
Torsión Segura %RO	150
Deflexión en la capacidad rad	0.003
Momento de sobrecarga %CAP MAX	100
Corte N MAX	333
Material	Aluminio

Tabla 6

Para conseguir una buena sujeción se han utilizado tornillos con arandelas de presión en las dos uniones. Esto garantiza que no se soltarán o aflojarán los tornillos. De cara al funcionamiento es necesario que el sensor se apoye en superficies de aluminio para no crear problemas eléctricos y esto da mayores motivos para haber realizado esas dos piezas en aluminio (Figura 95 y Figura 96).

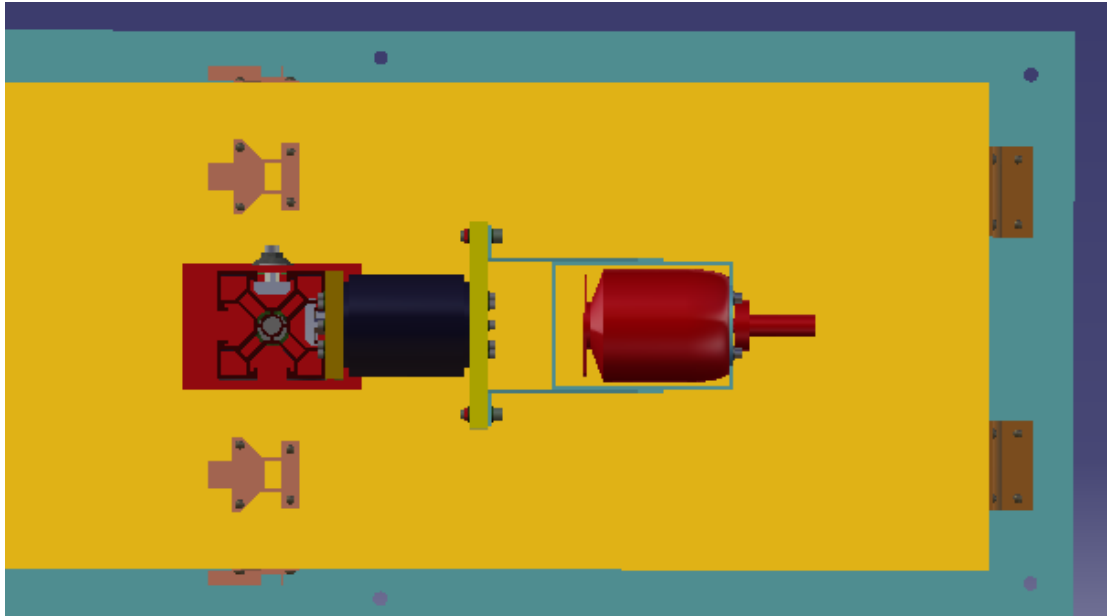


Figura 95 Vista Superior de la Bancada túnel en Catia

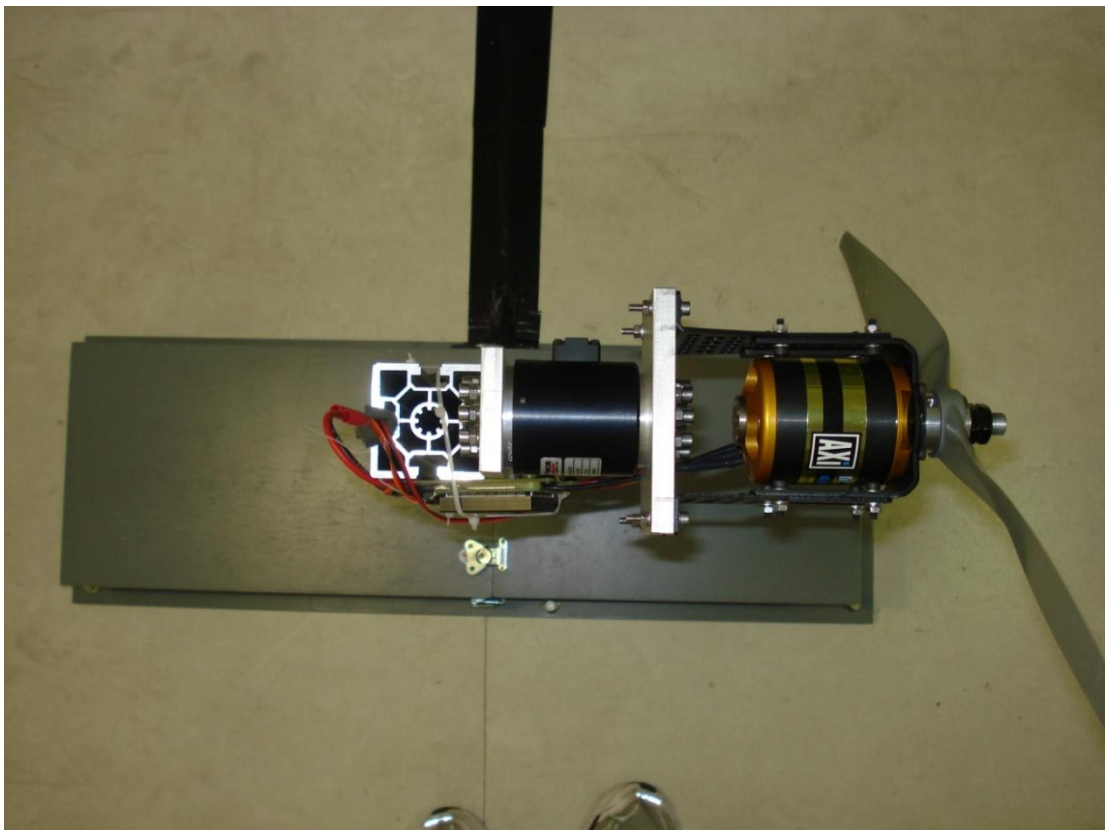


Figura 96 Vista Superior de la Bancada túnel

4.3. ACONDICIONADOR DE SEÑAL

Como ya se anticipó en el apartado de la célula de carga, para el funcionamiento de dispositivos como la misma y el sensor de par, es decir, sensores basados en pequeñas deformaciones es necesario el uso de un acondicionador de señal (Figura 97).

Cada aplicación de medida en la industria, o como en nuestro caso, hace uso de múltiples sensores cuya salida eléctrica depende de varios factores como el rango de temperatura de trabajo, la frecuencia de respuesta, precisiones requeridas, etc. La mayoría de estos sensores, como son la célula de carga y el sensor de par, necesita un sistema capaz de acondicionar la señal antes que esta sea registrada por un sistema de adquisición de datos.

El acondicionamiento de señal previo a la adquisición de los datos supone la linealización de la señal, el filtrado de la misma, la amplificación de la salida eléctrica, etc. Dependiendo del tipo de sensor en uso y de la unidad de recepción de los datos se realizarán los tratamientos que dicten los mismos.

Este elemento electrónico, además, no solo sirve para acondicionar la señal de la forma antes descrita, sino que también sirve de alimentación al sensor. La energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la célula de carga y el sensor de par va a provenir de la red eléctrica pública. Esta corriente (alterna) está a una intensidad y voltaje inadecuados para los sensores, por lo que el acondicionador también se encarga de modificar esta señal y ajustarla a los requisitos de los dispositivos.



Figura 97 Acondicionador de señal

Se recuerda que las características de este sensor así como las distintas configuraciones que puede adoptar se encuentran en el Apéndice A.

4.4. UNIDAD DE CONTROL A DISTANCIA

La unidad de control a distancia la componen 2 elementos: el mando a distancia y el receptor de señal. Juntos permiten arrancar, para y variar la velocidad de rotación del motor dentro de la configuración establecida previamente en la unidad JETIBOX (este dispositivo electrónico se describe en este mismo capítulo). La elección de estos dispositivos es debida a que ya se tenían en el Grupo de Ingeniería Aeroespacial.

El mando a distancia es un mando de la empresa Futaba de 9 canales estándar para aviones de aeromodelismo (Figura 98). Dispone de una gran cantidad de funciones aunque para los ensayos solo se ha utilizado la palanca de potencia. Esta se encuentra escalonada para permitir una mayor precisión a la hora de dar potencia al motor. Este mando ha permitido trabajar con el motor a distancia sin necesidad de estar cerca del mismo.



Figura 98 Transmisor Futaba de 9 canales (24)

El receptor que se ha elegido es un Futaba R319 DPS (Figura 99) que consta de varios puertos de comunicación, uno de alimentación y una antena consistente en un cable que se despliega en la base de la bancada túnel. Para verificar que el motor está conectado a las baterías y el sistema de control a distancia funciona, se ha instalado en uno de los puertos un servomecanismo con el fin de moverlo a distancia para verificar el buen funcionamiento. Para alimentar el sistema se utiliza un conjunto compacto de pilas en serie. Otro de los puertos va directamente a la unidad de control de velocidad del motor.



Figura 99 Receptor Futaba (25)

4.5. PLACA HÉRCULES

Para la toma de datos de los diferentes sensores que se tienen en la bancada se hace uso de la placa Hércules II de Diamond Systems (Figura 100). Se trata de una placa con un formato de alta integración EBX basada en el procesador VIA Eden de clase Pentium 3.

Ofrece una serie de beneficios para el diseñador de sistemas integrados ya que básicamente es una CPU completa en una sola tarjeta. Es decir, provee de procesador, video, audio, Ethernet, E/S y adquisición de datos, además de poseer una amplia gama para su alimentación.



Figura 100 Placa Hércules II (punto (26) de la bibliografía)

Esta placa junto con un teclado y una pantalla han sido las herramientas fundamentales que se han utilizado para la visualización de los datos y su almacenamiento.

4.6. SISTEMA DE TELEMETRÍA DEL MOTOR.

El sistema de control del motor y los sensores de corriente, voltaje y revoluciones constituyen la telemetría del motor. Durante este proyecto se han utilizado dos sistemas de telemetría: uno más simple y barato y otro más complejo y preciso. El hecho de que se hayn utilizado dos sistemas para tomar las medidas es consecuencia de que el primero no era tan bueno como se supuso en un inicio pues no se pudo volcar la información del mismo en la placa Hércules II.

Ha de señalarse que la elección de estos dispositivos electrónicos no entraba dentro de este proyecto (solo se sabía que debían estar en la bancada, cuál era su función y qué condiciones se debían dar para una correcta instalación) cediendo estas decisiones a personal más cualificado del Grupo de Ingeniería Aeroespacial. Se agradece aquí la colaboración del profesor Francisco Gavilán y los ingenieros de telecomunicaciones del Grupo de Ingeniería Aeroespacial, Vicente Payo y Javier Galnares, que han llevado a cabo dichas elecciones.

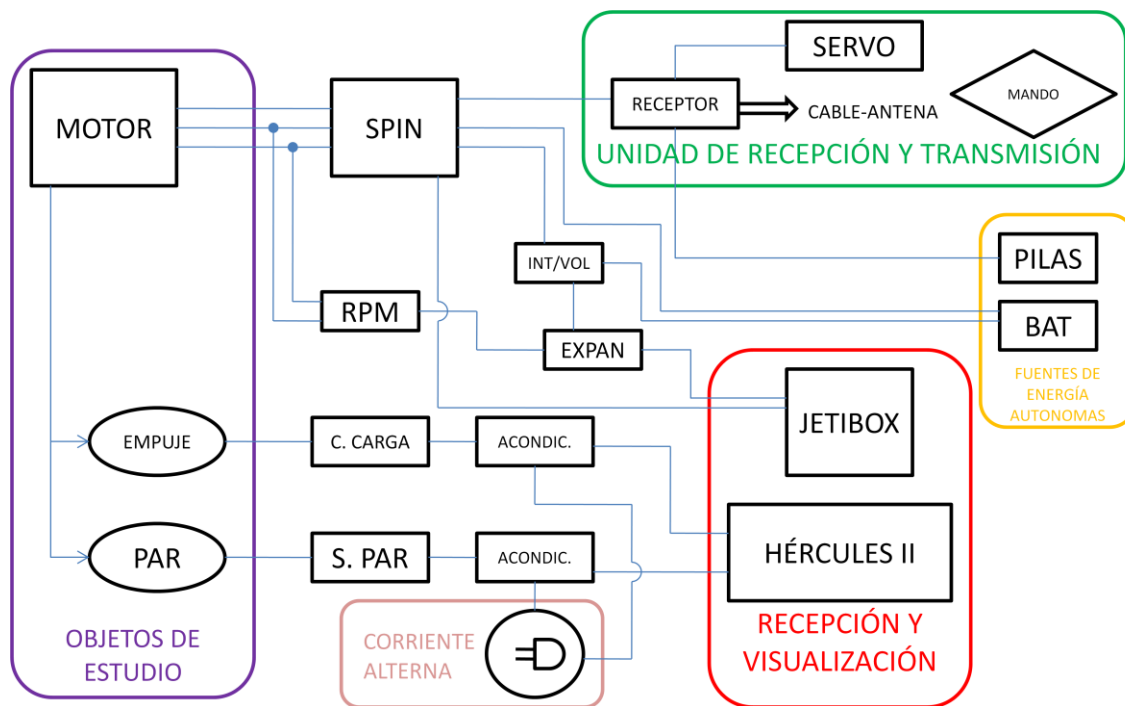
4.6.1. Sistema de telemetría 1

En un primer momento se ha elegido un sistema de dispositivos de la empresa JETI Model. Esta empresa está dedicada a la venta y distribución de aparatos de telemetría para aeromodelismo y cuenta entre sus ofertas con los dispositivos que se estaban buscando. Se describe en esta sección los dispositivos utilizados en este sistema. Toda la información de estos dispositivos así como sus imágenes pueden encontrarse en el punto (27) de la bibliografía. Los componentes del sistema son:

1. JETIBOX
2. SPIN 99 OPTO
3. MUI 150
4. MRPM JETI Model
5. EXPANDER

4.6.1.1. Esquema eléctrico

El primer sistema de telemetría está compuesto por una unidad de configuración y visualización de datos, llamada JETIBOX, un variador, llamado SPIN 99 OPTO, un medidor de intensidad y voltaje, MUI 150, un medidor de revoluciones, MRPM JETI Model, y un conector, EXPANDER. Estos dispositivos se han interconectado mediante cableado adoptando la configuración mostrada en la Figura 101.



El sistema eléctrico de la figura está compuesto por todos los dispositivos nombrados en el apartado, y que se describirán a continuación, y se encuentran conectados mediante un sistema de cableado adecuado a cada dispositivo. Dentro de este sistema de cables tenemos buses de datos, cables multiplexores, cables normales..., los cuales se encuentran distribuidos por la bancada túnel y fijados mediante cintas adhesivas. Concretamente, los cables que van al motor están integrados dentro de las ranuras de la viga soporte y los que parten de la bancada túnel, en el caso de los ensayos dinámicos, se fijan con cintas adhesivas al suelo para evitar que se desprendan por la acción del viento.

Como puede observarse existen dos elementos para visualizar y almacenar los datos: la JETIBOX (voltaje, intensidad y revoluciones del motor) y la placa Hércules II (empuje y par). Se presenta aquí el inconveniente de este sistema eléctrico, y es que mientras que la placa Hércules II puede almacenar los datos, para un posterior tratamiento, la JETIBOX no posee ningún sistema para guardar la información. Éstos tienen que ser recogidos a mano por un usuario mientras que lo ideal sería enviar todos los datos a la placa integrada.

Por esta razón se ha buscado un nuevo sistema de telemetría que pueda transmitir los datos a la placa Hércules II. Este sistema es el sistema de telemetría 2 que se explicará en la siguiente sección.

4.6.1.2. Unidad de configuración y visualización de datos

Para programar el régimen del motor y su configuración se ha utilizado la caja JETIBOX (Figura 102). Este elemento es un terminal de comunicación universal, que puede ser utilizado con cualquier otro producto de la marca JETI Model compatible. Posee un potente software que permite una fácil instalación (unión con los otros dispositivos) y lectura de datos mediante una pantalla de menú sencilla. La JETIBOX funciona como un terminal de dos vías, para la comunicación con otros aparatos, que muestra los datos almacenados en los productos de JETI Model. Con el uso de cuatro botones, el usuario puede navegar por el menú y fijar valores o configuraciones para el resto de dispositivos. De esta manera se pueden visualizar los datos de los sensores de intensidad y voltaje, además de programar el motor mediante el terminal de control llamado SPIN 99 OPTO.



Figura 102 Caja JETIBOX

4.6.1.3. Unidad de control de velocidad del motor (variador)

La caja JETIBOX configura el régimen del motor en primera instancia pero no se puede comunicar directamente con el mismo. El elemento que permite tal comunicación es el velocímetro SPIN 99 OPTO (Figura 103), que se trata de un dispositivo que se conecta directamente al motor, mediante tres conectores, también a las baterías y, por otro lado, a la unidad de control mediante un terminal. Cuando desde la unidad de control se dan órdenes concernientes al motor, estas llegan al velocímetro y es éste el que las ejecuta mediante el tratamiento de la energía de las baterías (transforman la corriente continua de las baterías en corriente alterna trifásica que consume el motor) y la regulación del consumo de las mismas.



Figura 103 SPIN 99 OPTO

Este dispositivo tiene que ir necesariamente cerca del motor para poder realizar las conexiones con el mismo de una forma estándar (los cables del variador, de pequeña longitud, no pueden alargarse ya que afectaría a la señal). Se ha instalado, por tanto, en el extremo superior de la viga soporte mediante presillas garantizándose que no se iba a desprender (Figura 104).

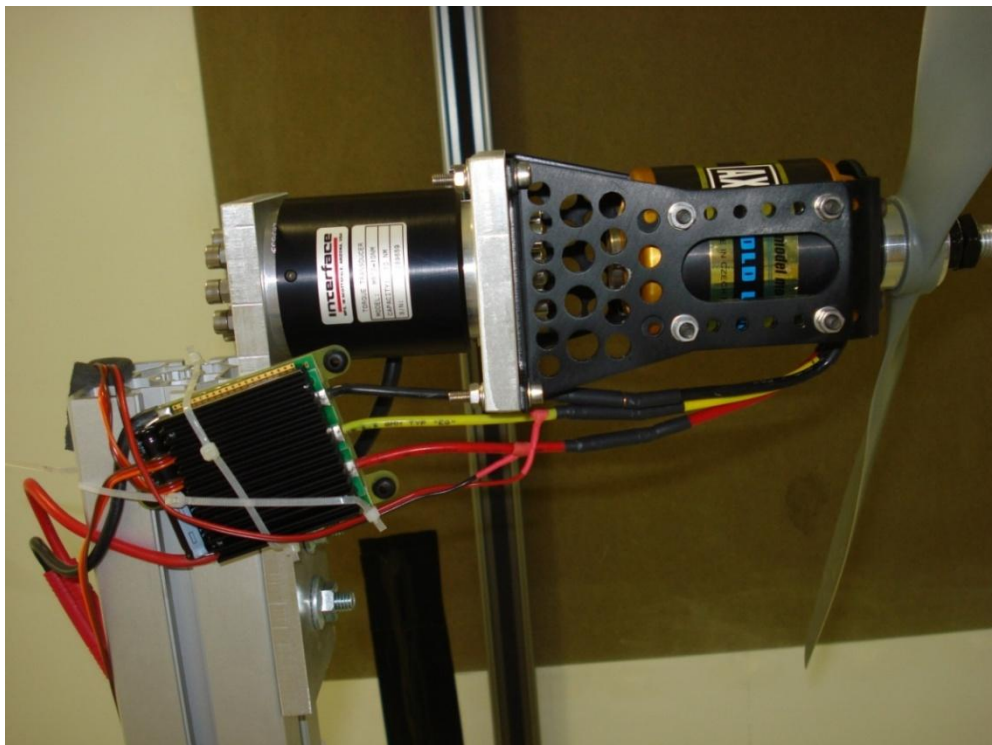


Figura 104 Instalación del variador

4.6.1.4. Medidor de corriente y voltaje

Para medir la corriente y voltaje que consume el motor se dispone de un único sensor. Este sensor, MUI 150 de JETI Model (Figura 105), está situado justo a la salida de las baterías para minimizar los errores debidos a las pérdidas que tienen lugar por la resistencia de los cables que llevan al motor. Para poder realizar las medidas es necesario que parte del mismo forme parte directa en el circuito y, además, dispone de unos terminales para conectar de forma indirecta con los cables positivo y negativo de las baterías. Finalmente, el sensor también dispone de un cable que le conecta con la JETIBOX a la que envía los datos.

Este sensor transmite los valores de voltaje e intensidad en tiempo real a la pantalla de la JETIBOX y dispone de alarma. Es posible fijar, con la unidad de control, ciertos parámetros máximos de voltaje, intensidad o potencia que no se deseen sobrepasar de forma que cuando esto sucede este sensor avisa con una alarma acústica. Dicha función sirve para poder prevenir sobrecargas o calentamientos peligrosos para el motor.



Copyright (c) 2009, JETI model s.r.l.

Figura 105 Dispositivo MUI 150

4.6.1.5. Medidor de revoluciones

Para medir las revoluciones del motor se dispone de dos sensores. Uno basado en el análisis de corriente trifásica que llega al motor y otro que constituye en sí mismo un sensor fotoeléctrico. El sensor del primer tipo, MRPM JETI Model (Figura 106), posee dos terminales que se conectan a dos de las fases trifásicas que llegan al motor. También posee otro terminal que le conecta directamente con la JETIBOX. Mediante el estudio de las dos fases del motor, este dispositivo, es capaz de calcular las revoluciones a las que gira el motor y de transmitir las en tiempo real a la unidad de control.



Figura 106 Dispositivo MRPM de cálculo de velocidad

El segundo sensor posee un cable que le conecta con la JETIBOX y otro que está unido a un dispositivo eléctrico que es capaz de emitir y recibir luz (Figura 106 y Figura 107). Éste constituye un sensor fotoeléctrico que se utiliza para medir la velocidad de la siguiente forma.

El dispositivo emisor y receptor de luz se coloca a una distancia determinada de la hélice, sobre la cual se ha dispuesto un material (normalmente un adhesivo o pintura) en un único punto con unas características reflectoras preestablecidas. Entonces el sensor emite de forma continua una luz, cuando el trozo de la hélice que posee el material reflector pasa por delante del dispositivo, la luz se refleja y el dispositivo la detecta. Es ahora cuando el sensor calcula la velocidad teniendo en cuenta que el tiempo que se sucede entre dos detecciones constituye una vuelta. Esta información se envía a la unidad de control conforme se van refrescando los resultados.



Figura 107 Dispositivo MRPM de sensor de velocidad



Copyright (c) 2009, JETI model s.r.o.

Figura 108 Sensor fotoeléctrico

4.6.1.6. Multiplexor

Debido a que la caja JETIBOX solo dispone de dos terminales de entrada y se tienen tres dispositivos (medidor de voltaje e intensidad, velocímetro y medidor de revoluciones) es necesario un elemento conector. Este elemento, EXPANDER de JETI Model (Figura 109), permite transmitir la información de hasta cuatro elementos, aunque solo se utilizan dos, de JETI Model en un solo cable. Este cable conecta a la unidad de control y permite la visualización de los datos de los dos dispositivos sin problemas de simultaneidad.



Copyright (c) 2009, JETI model s.r.o.

Figura 109 Expander

4.6.2. Sistema de telemetría 2

Este sistema de telemetría trata de paliar las carencias del anterior sistema mediante unos sensores que pueden “hablar” directamente con la placa Hércules II. Además, este sistema trabaja en conjunto con el otro, es decir, aunque ambos sistemas son independientes se utilizan a la vez. De esta manera se puede ver lo que ocurre con el motor a través de la JETIBOX y en la pantalla de ordenador que está conectada a la placa integrada.

Para configurar el motor y hacerle llegar la energía de las baterías se seguirá utilizando la JETIBOX y el SPIN OPTO del sistema anterior. Así los nuevos elementos del sistema que se describen en este apartado son:

1. LTS 25 NP
2. INA333
3. A1120EUA-T y A3212ELHLT-T
4. Elementos de apoyo (cajita de bancada, conmutador, multiplexor y medidor del túnel de viento)

4.6.2.1. Esquema eléctrico

Este sistema nuevo de telemetría está compuesto por los componentes del sistema de telemetría 1 y los nuevos de este sistema nombrados anteriormente. Dentro de estos nuevos dispositivos tenemos un medidor de intensidad, LTS 25 NP, un medidor de voltaje, INA333, un sensor de rpm, A1120EUA-T y A3212ELHLT-T, y varios elementos de apoyo al sistema. Este sistema se interconecta mediante cableado como se muestra en la Figura 110.

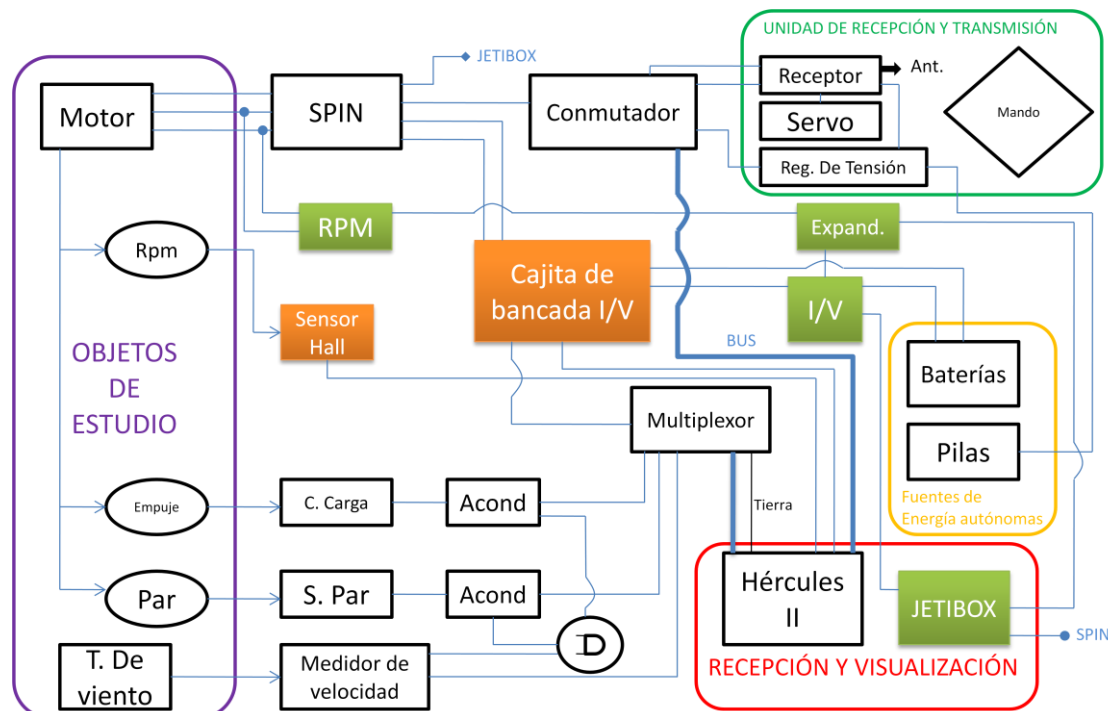


Figura 110 Circuito de telemetría 2

En este esquema del circuito se pueden ver todos los dispositivos que existen en la bancada y sus interconexiones. En color verde tenemos los sensores del sistema de telemetría 1 y en color naranja los del segundo sistema de telemetría. También se han resaltado ciertos cables que realizan funciones diferentes a la mayoría de los otros.

Este circuito es mucho más complejo que el primero, el cual está integrado en el mismo, pero es también mejor. Ahora se dispone de dos medidas de telemetría, una en el JETIBOX puramente visual y otra en la placa Hércules II que es la que se guarda. Se ha resuelto así el problema del primer sistema de telemetría y, además, se han instalado varias mejoras como la obtención de los datos del túnel de viento, la palanca del mando y la opción de utilizar baterías en serie.

4.6.2.2. Medidor de intensidad

En este otro sistema de telemetría se ha elegido el LTS 25 NP (Figura 111) de la empresa LEM. Se trata de un traductor de corriente altamente sofisticado y de gran precisión. Como puede observarse de la imagen está altamente compactado para un manejo más cómodo. Para medir la intensidad de la corriente eléctrica utiliza el efecto Hall.

El efecto hall es un fenómeno que se produce cuando por un conductor circula una corriente eléctrica y, además, éste está sometido a un campo magnético perpendicular. Es entonces cuando aparece una separación en las cargas eléctricas que da lugar a un campo eléctrico en el interior del conductor, perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado. Todas estas magnitudes están relacionadas entre sí, de forma que se pueden hallar unas en función de otras. Existe una gran variedad de sensores que utilizan este fenómeno para medir diferentes magnitudes, entre ellos la corriente y el movimiento.

Este sensor necesita de un soporte electrónico en el que insertarse y como no acceso mediante éste a los cables de la corriente que se desea medir. El soporte también servirá para conectar el dispositivo con la placa Hércules. Los datos son enviados a través de cables y en tiempo real. Para más información puede verse el punto (28) de la bibliografía.



Figura 111 Sensor de intensidad LTS 25 NP (29)

4.6.2.3. Medidor de voltaje

Para medir el voltaje de las baterías se utiliza el amplificador INA333 (Figura 112) de Texas Instruments. Está altamente integrado y que posee unas cualidades de atenuación del ruido y precisión excepcionales. Puede realizar múltiples funciones, aunque en este proyecto se utiliza solo para calcular el voltaje.

Al igual que el sensor de intensidad, el INA333 necesita de un soporte electrónico que le ponga en contacto con el circuito de alimentación del motor y que le permita enviar sus datos a la placa Hércules II. Estos datos son enviados en tiempo real. Para más información puede verse el punto (28) de la bibliografía.



Figura 112 Sensor de voltaje INA333 (30)

4.6.2.4. Medidor de revoluciones

Para medir las revoluciones del motor se ha utilizado un sensor de tipo Hall de la empresa Allegro. Estos sensores son especialmente adecuados para medir revoluciones de cuerpos y llevan utilizándose con éxito en la industria durante mucho tiempo. Éste en concreto está dividido en dos partes: una que corresponde al sensor propiamente dicha y otra que se encarga del acondicionamiento de la señal. La elección de este dispositivo de medida ha recaído en su bajo precio, excelentes prestaciones y en que es un sensor que se utiliza precisamente para tales fines.

El sensor de tipo Hall es el A1120EUA-T (Figura 113) que se muestra en la imagen. Este dispositivo, al basarse en el efecto Hall, necesita de una pieza que se mueva con el motor y que provoque variaciones en el campo magnético. Para tal fin se ha creado una pieza metálica alargada con un agujero en el centro que se acopla al eje del motor por la parte trasera, y en cuyos extremos tiene imanes. El sensor se instala en la bancada del motor cerca de los extremos de la pieza metálica y funciona de la siguiente manera (Figura 114 y Figura 115). Cuando uno de los imanes pasa cerca del sensor, éste emite un pulso eléctrico de manera que dos pulsos eléctricos significan que se ha dado una vuelta. Conociendo esta información se mide el tiempo que hay entre dos pulsos sucesivos, es decir, cada vuelta y así se conoce la velocidad de rotación. Los pulsos eléctricos y el tiempo son enviados directamente a la otra parte del sensor.



Figura 113 Sensor Hall A1120EUA-T (31)

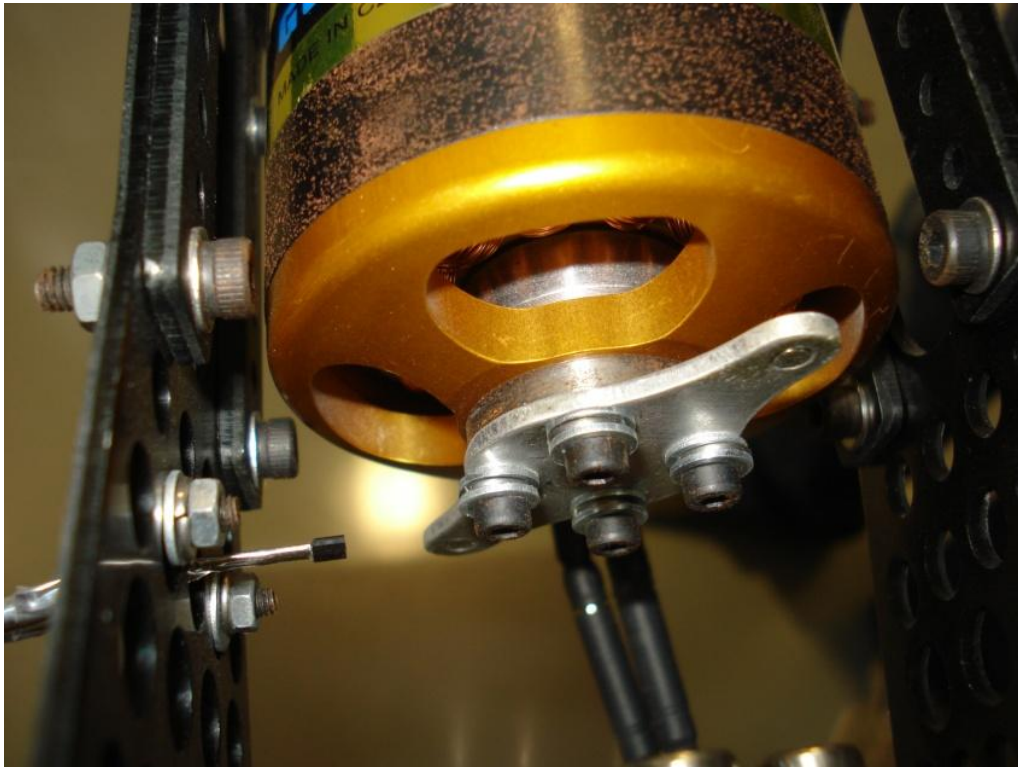


Figura 114 Instalación del sensor Hall 1

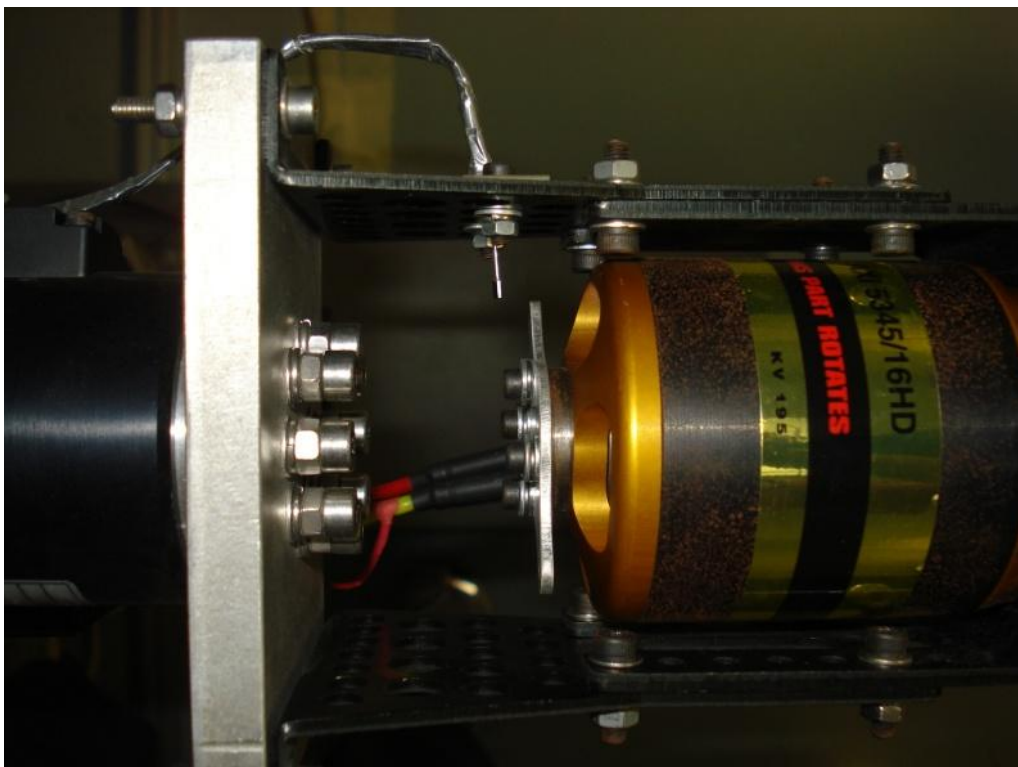


Figura 115 Instalación del sensor Hall 2

El otro elemento del sensor es el A3212ELHLT-T (Figura 116) de la empresa Allegro y compatible con el anterior dispositivo. Este aparato se encarga de convertir la señal del sensor en otra más adecuada para la recepción de la placa Hércules II. Para ello limpia la señal, la amplifica y la trata de diversas formas. Este elemento es básicamente un chip altamente integrado que necesita de un soporte para su instalación. Para tal fin se aporta una placa base donde se instala este componente, se hace llegar la señal del sensor y dispone de unos terminales para llevar la señal a la placa Hércules II.



Figura 116 Chips del sensor Hall A3212ELHLT-T (32)

Durante los ensayos se percibió de que el sensor era influido por el motor (otra fuente de campos magnéticos), por lo que todo el conjunto, menos el sensor, tuvo que ser apantallado (Figura 117).



Figura 117 Apantallamiento del chip de sensor Hall

4.6.2.5. Elementos varios

Aquí englobamos todos los dispositivos o elementos que sin ser de gran importancia en el circuito principal se han utilizado en el proyecto. El objetivo de estos otros elementos ha sido el de servir de soporte o ayuda a los aparatos descritos anteriormente. Tenemos:

1. Multiplexor
2. Cajita electrónica de la bancada
3. Conmutador
4. DPI 150 Druck Precision

- Multiplexor

El primero de estos elementos de apoyo que se pueden nombrar es el multiplexor (Figura 118) para la placa Hércules II. Éste consiste en una placa base de electrónica sobre la que hay insertados unos conectores y un terminal para un cable de banda ancha. Los terminales son utilizados para conectar los acondicionadores de los sensores de fuerza y par, la alimentación de los mismos, el sensor que mide los parámetros del túnel de viento y la cajita electrónica de la bancada (ésta se describirá a continuación) y, por otro lado, el terminal de banda ancha se utiliza para conectarse a la placa Hércules II.

La función de este dispositivo es la de condensar toda la información que llega de los diferentes sensores del sistema de telemetría 2 y varios (fuerza, par, tensión, intensidad, rpm y velocidad del túnel de viento) en una conexión de banda ancha para la placa Hércules II. También existe un cable que va desde uno de los terminales del multiplexor a la placa integrada para unir la tierra de todos los dispositivos con la de la placa.

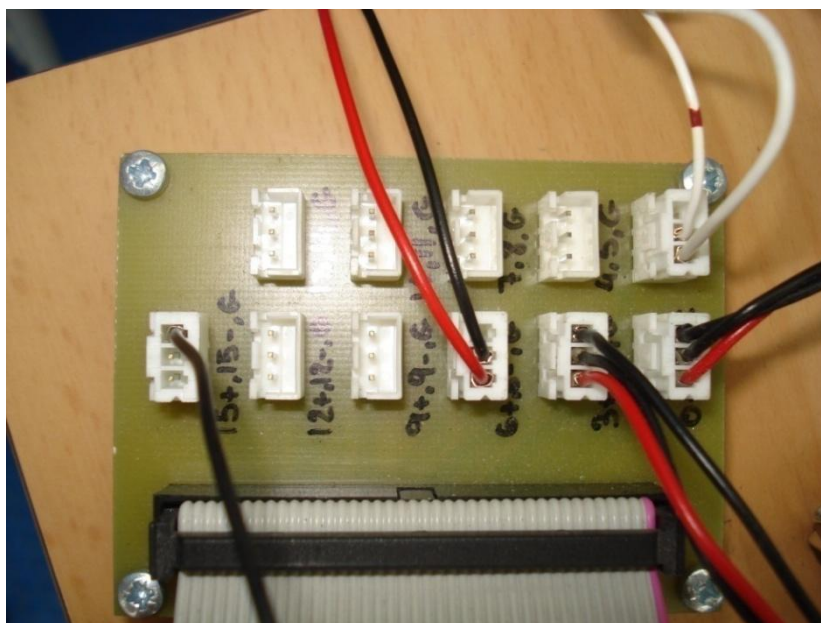


Figura 118 Multiplexor

- Cajita electrónica de la bancada

Otro elemento de relativa importancia es que se ha denominado cajita electrónica de la bancada (Figura 119 y Figura 120). Ésta se encuentra en la bancada túnel y consiste básicamente en un soporte para la instalación de los sensores de intensidad y voltaje. Además de esta función también ha servido para la configuración en paralelo de las baterías.

Así, este elemento, consta de una serie de terminales para conectar las baterías (dos baterías en serie por terminal) de forma que quedan en serie. Inmediatamente debajo de la placa de terminales se encuentra la placa donde están integrados los sensores de voltaje e intensidad. Estos sensores están ahí precisamente para tomar las medidas de los cables de las baterías.

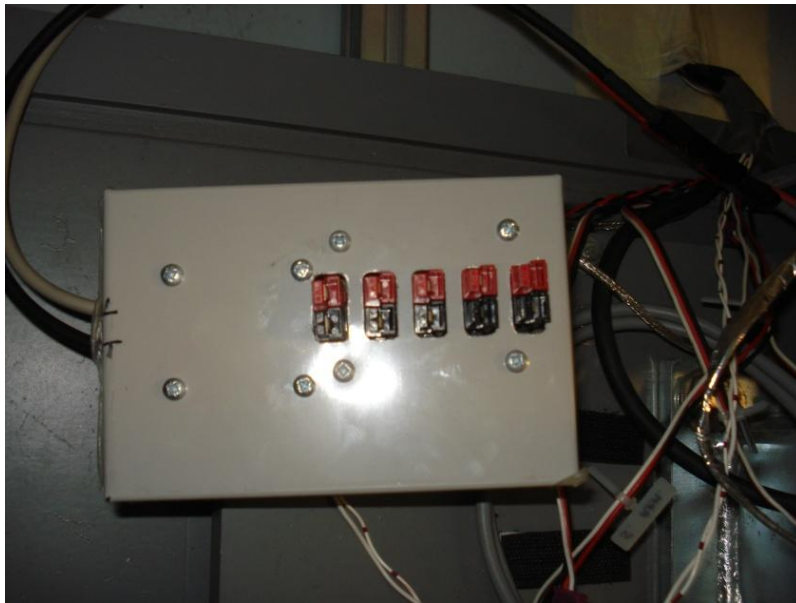


Figura 119 Cajita electrónica de la bancada 1

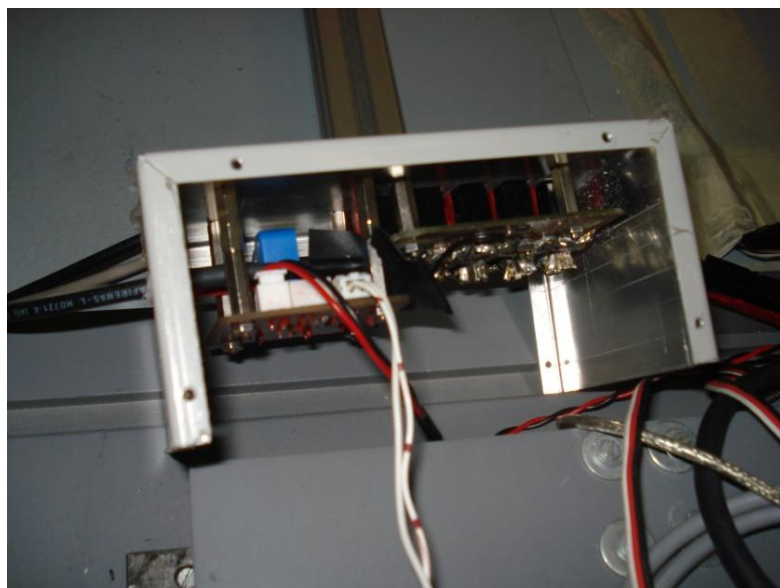


Figura 120 Cajita electrónica de la bancada 2

- Conmutador

El siguiente elemento que se describe es el conmutador del sistema de control remoto (Figura 121). Este elemento sirve para interconectar el motor, el sistema de recepción remoto y la placa Hércules II. Su aportación fundamental, aparte de la dicha anteriormente, es que nos muestra el estado de palanca del mando en la placa Hércules II.

Para realizar tales funciones dispone de cables normales, bus de información y un cable de banda ancha. Una de sus conexiones es al regulador de tensión (nuevo elemento en el sistema de recepción y transmisión) que se encarga de adecuar la tensión para el receptor Futaba y el servo.

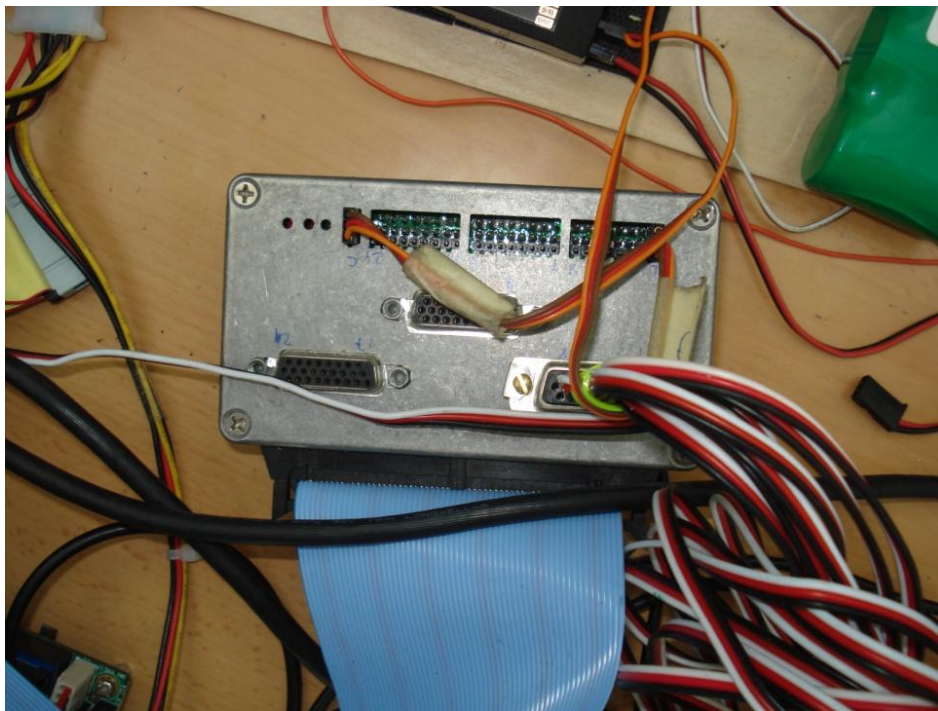


Figura 121 Conmutador

DPI 150 Druck Precision

Finalmente se nombra el medidor del túnel de viento DPI 150 Druck Precision (Figura 122) que ya se utilizaba en el laboratorio. Este dispositivo es una unidad para medir la velocidad del túnel de viento. Proporciona entre otras cosas la temperatura, la presión, la densidad y la velocidad del aire en el interior. Se ha dispuesto de una conexión del mismo con la placa Hércules II para poder recoger la información del mismo aunque en la actualidad sólo se toma la velocidad.



Figura 122 DPI 150 Druck Precision

4.7. PRESUPUESTO DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Los dispositivos electrónicos han sido obtenidos de la empresa Alaba Ingenieros, JETI Model y de otras empresas de electrónica. La primera de ellas está especializada en los sensores de carga y en ella se han conseguido la célula de carga y el sensor de par. La telemetría que primeramente se probó inicialmente fue comprada en la empresa JETI Model, especializada en ese tipo de sensores, y finalmente, se optó también por otros dispositivos de diversas empresas electrónicas. Se presenta en la tabla un presupuesto de todos estos elementos.

Sensor de par	Cantidad	Precio(€)
Célula de carga	1	375
Sensor de par	1	1140
S. de voltaje e intensidad Jeti Model	1	47,07
S. Rpm Jeti Model	1	29,58
Expander	1	29,58
JETIBOX	1	25,42
Variador	1	211,86
Transmisor y receptor Futaba	1	En laboratorio
Sensor de intensidad LTS25NP	1	17,04
Sensor de voltaje INA333	1	4,85
Sensor rpm de tipo Hall	1	2,1
Acondicionador	2	376

5. CÁLCULOS

En este apartado se profundiza en una serie de cálculos estructurales que se han tenido que llevar a cabo para garantizar la robustez y buen funcionamiento de la bancada. Además de los cálculos aerodinámicos que se han necesitado para la realización del proyecto.

5.1. INTRODUCCIÓN

La bancada es en sí misma un instrumento que está sometido a cargas. Las cargas tienen dos orígenes, el peso de los componentes y las fuerzas generadas por el conjunto motor-hélice. Las primeras no son tan importantes como las segundas en cuanto al funcionamiento aunque en algunos casos se han tenido que tener en cuenta.

El estudio de cargas se lleva a cabo principalmente en la bancada túnel por ser la parte en la que actuarán las cargas más importantes. La caja electrónica no está sometida a ninguna carga de importancia mientras que la base está sometida principalmente a una carga de compresión (debida al peso de los equipos y el contrapeso) que puede aguantar perfectamente debido al material del que está compuesta.

Para poder ver que piezas necesitan de estudios de esfuerzos se realiza un seguimiento de las fuerzas generadas por el motor y la hélice (Figura 123). En el siguiente esquema se muestra este recorrido y las piezas que necesitan algún tipo de estudio:

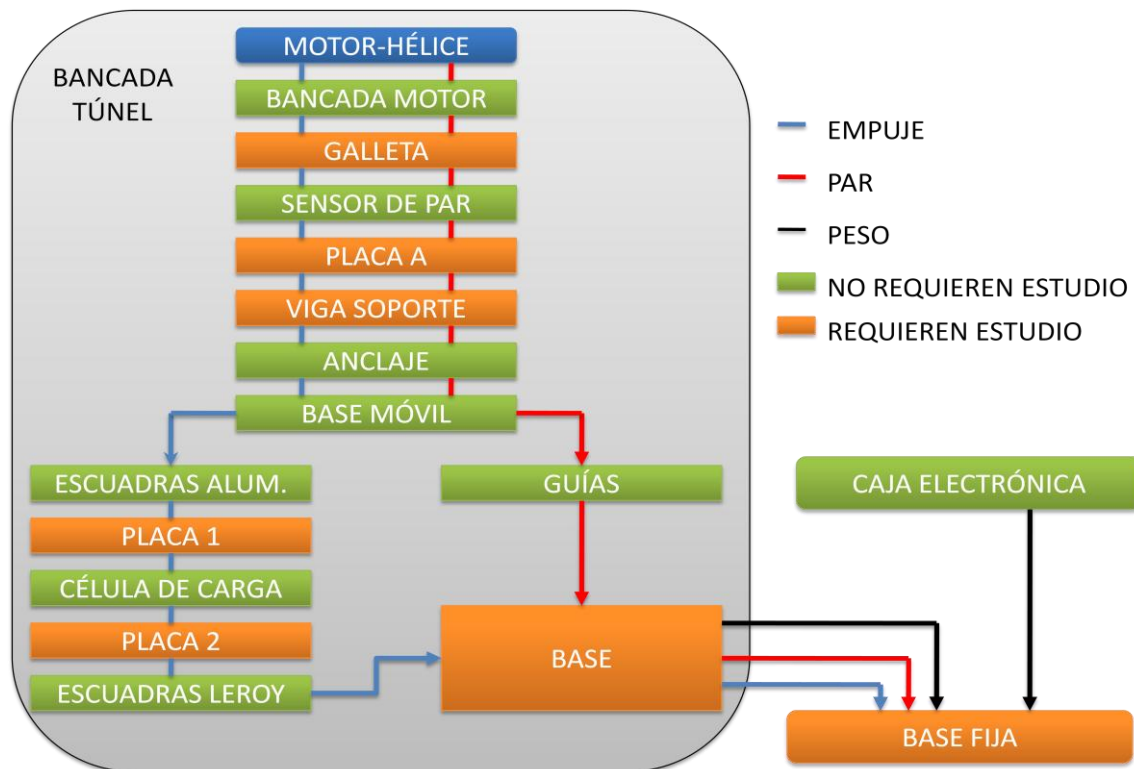


Figura 123 Cargas

Como se puede observar no todos los elementos que transmiten las cargas son objeto de estudio. Esto es debido a que se consideran desde todo punto de vista lo suficientemente rígidos como para asegurar su integridad estructural y funcional. Dentro de este grupo tenemos a la bancada del motor, el sensor de par, la base móvil, el anclaje de la viga soporte, las escuadras y las placas de la base móvil.

La bancada del motor, por ejemplo, está diseñada en aluminio de alta resistencia por una empresa de aeromodelismo y está preparada para soportar las cargas del tipo de motores que se desean estudiar en el futuro. En cuanto al sensor de par se ha consultado con la empresa proveedora para verificar que podía resistir el empuje máximo con el que se trabaja en la bancada. El anclaje de la viga soporte es un elemento construido en aluminio y diseñado para fijar la viga y soportar cargas mucho mayores que la de los ensayos. La base móvil es la pieza más controvertida dentro de este grupo, pues es una pieza que debe aguantar y distribuir todas las fuerzas. Es la encargada de recibir las fuerzas generadas por el conjunto motor-hélice y conducirlas hacia las guías y la célula de carga. No obstante, las distribuciones de fuerzas se hayan concentradas en zonas pequeñas (relativamente hablando) de forma que estas acaban traduciéndose principalmente en compresiones. Al estar la pieza construida en madera compacta puede absorber perfectamente estos esfuerzos. Por otro lado, las escuadras son piezas muy sólidas de acero y aluminio y que poseen un diseño orientado a aguantar las cargas a las que se van a someter en este proyecto. Finalmente la base fija de la bancada túnel es una pieza de las mismas características que la base móvil y que además estará unida al suelo, considerándose que puede absorber todas las cargas a las que está sometida. No obstante tanto la base de la bancada túnel como la base de la bancada sí que requieren un estudio concerniente a las reacciones que generan en el suelo para estudiar el problema del volcado.

El resto de piezas si necesitan de un estudio cuyo objetivo es hallar las tensiones y desplazamientos para verificar que no se alcanzan deformaciones permanentes y desplazamientos excesivos. Para realizar estos estudios se ha utilizado el programa Patran-Nastran y ecuaciones correspondientes a la Teoría de Estructuras.

Por otro lado, hay que decir que menos la viga-soporte todas las piezas tienen agujeros necesariamente, los cuales pueden actuar como concentradores de tensiones dando lugar a la aparición de grietas que deben ser controladas en caso de aparición. No obstante, en estas perforaciones van tornillos firmemente fijados de forma que introducen un campo de compresión en la zona haciendo que la aparición de grietas sea improbable. Por todo esto se recomienda tener un control visual de estas piezas para ver si aparecen grietas y así prevenir futuros accidentes.

Nota: para conseguir abordar mejor el tema de los concentradores de tensiones y la aparición de grietas se necesitaría hacer experimentos de fatiga sobre estas piezas. Algo desmesurado para este proyecto y que se cree que no merece la pena.

Finalmente también se han llevado a cabo los estudios aerodinámicos necesarios en el proyecto.

5.2. ESTUDIO DE TENSIONES Y DEFORMACIONES

En este apartado se hace incidencia sobre la construcción, el funcionamiento y los campos de tensiones y desplazamientos de las piezas galleta, placa A, viga-soporte y placas 1 y 2. Estas piezas han sido diseñadas como se especificó en el capítulo 3 y atendiendo sobre todo a la disponibilidad de materiales, por lo que no se han buscado un diseño completamente depurado en cuanto a dimensiones dando lugar a un diseño un poco sobredimensionado. No obstante, se ha permitido esta libertad para ganar en tiempo, dinero y seguridad.

1. Galleta
2. Placa A
3. Viga-Soporte
4. Placa 1
5. Placa 2

5.2.1. Galleta

- Función y construcción

La placa que denominamos galleta es una pieza construida en aluminio de gran espesor (1 cm) diseñada para unirse por un lado con la bancada del motor y por otro con la cara activa del sensor de par (Figura 124). Para posibilitar tales uniones dispone de agujeros en cada una de sus esquinas y de ocho en la parte central. En cuanto a su espesor se fijó en 1 cm siguiendo las recomendaciones del profesorado del Grupo de Ingeniería Aeroespacial que ya tenía experiencia en el campo (el espesor será un parámetro fundamental en la rigidez de la estructura).



Figura 124 Instalación de la placa galleta

Para su elaboración se requería gran precisión debido a que los agujeros destinados para el sensor de par deben ser exactos. Debido a ello se realizó una réplica en contrachapado (Figura 125) para comprobar que todo era correcto. Una vez verificada la pieza, se realiza en aluminio con una máquina de control numérico.



Figura 125 Pieza de madera de la galleta

- Cargas y estudio de tensiones y desplazamientos

Esta pieza está sometida a 3 cargas durante el transcurso de los ensayos: la tracción de la hélice, el par y el momento generado por el peso del motor y la hélice. De estas 3 fuerzas la tracción de la hélice constituye con creces la fuerza principal, de ahí que la pieza esté diseñada para soportar principalmente esta fuerza. El estudio que lleva a cabo en esta sección es sobre el máximo valor de la fuerza principal incrementada por un factor de seguridad que en este caso será de 1'22, para prevenir posibles sobrecargas (la fuerza resultante de aplicar este factor, 300 Newton, será la que se utilice en los sucesivos estudios). Nota: no es que no existan las dos últimas fuerzas sino que sencillamente son despreciables frente a los efectos que produce la tracción de la hélice. Para poder hallar las tensiones y deformaciones se ha recurrido al programa Patran-Nastran especializado en el cálculo estructural. En este programa lo primero que se realiza es una discretización de la pieza en elementos rectangulares más pequeños. A continuación, se establecen las cargas y los apoyos y finalmente se resuelve el campo de tensiones y desplazamientos. Para simplificar el cálculo, en un intento por compensar precisión y coste (entendido éste como complejidad del problema y tiempo de cálculo), se suponen que las cargas son uniformes y se sitúan lo más fielmente posible al problema. Con estas simplificaciones obtenemos unos campos de tensiones y desplazamientos casi idénticos a los reales, distando de estos en muy poco.

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las siguientes figuras (Figura 126, Figura 127 y Figura 128).

De los resultados mostrados en las figuras mencionadas se pueden deducir una serie de conclusiones. En cuanto a las tensiones, se observa un campo de creciente-decreciente con respecto al centro y que alcanza la máxima en las zonas centrales superior e inferior. Esta tensión máxima es de 1'86 MPa y está por debajo del límite elástico y de fatiga del aluminio. Ello quiere decir que se producirán deformaciones de tipo únicamente elásticas, o lo que es lo mismo deformaciones que tras cesar la carga desaparecerán por completo. En cuanto a que no se sobrepase el límite de fatiga, quiere decir, que la pieza podrá aguantar una cantidad de ciclos por encima del millón.

Nota: en los aluminios no existe límite de fatiga propiamente dicho, así que se redefine el límite de fatiga como aquella tensión máxima del ciclo de carga en la que se produce la rotura del material cuando se alcanza el millón de ciclos.

En cuanto a los desplazamientos, son crecientes conforme nos vamos alejando del centro de la pieza. Tienen sus máximos en las esquinas de la pieza y tienen un valor de $6'02 \cdot 10^{-6} m$, valor que resulta muy aceptable.

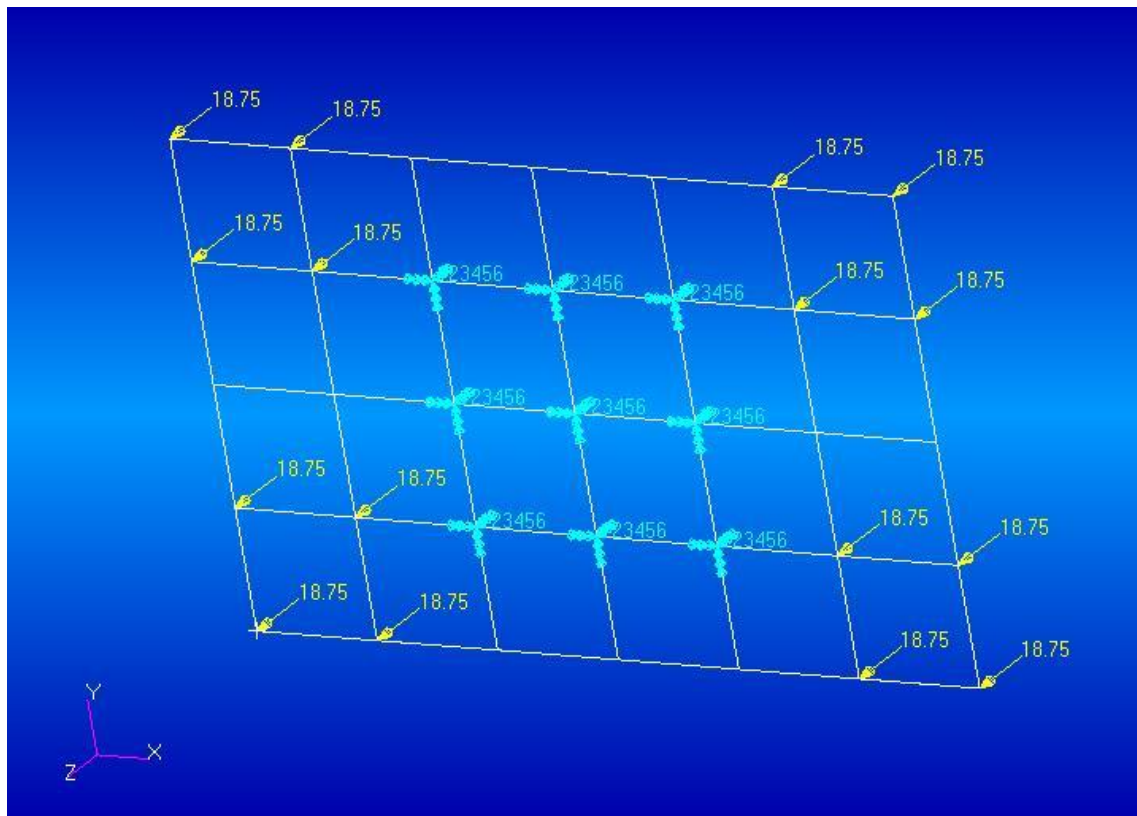


Figura 126 Discretización de la galleta

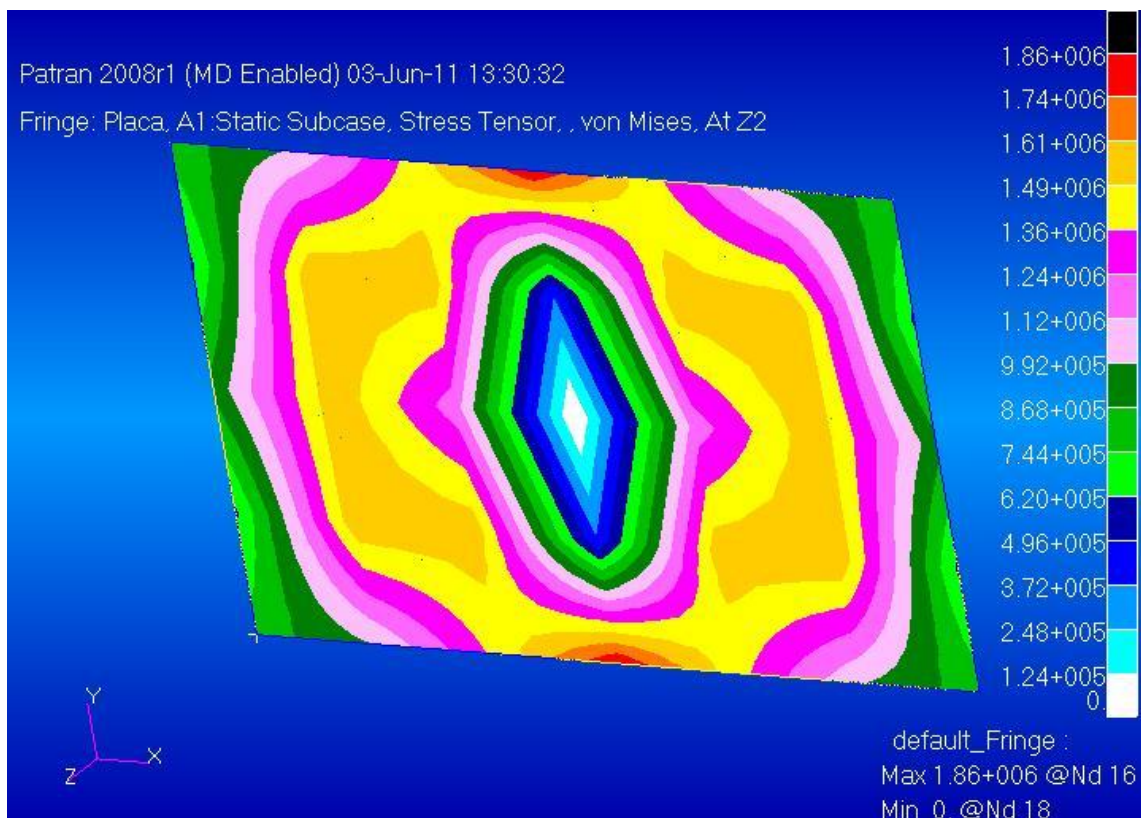


Figura 127 Campo de tensiones de la galleta

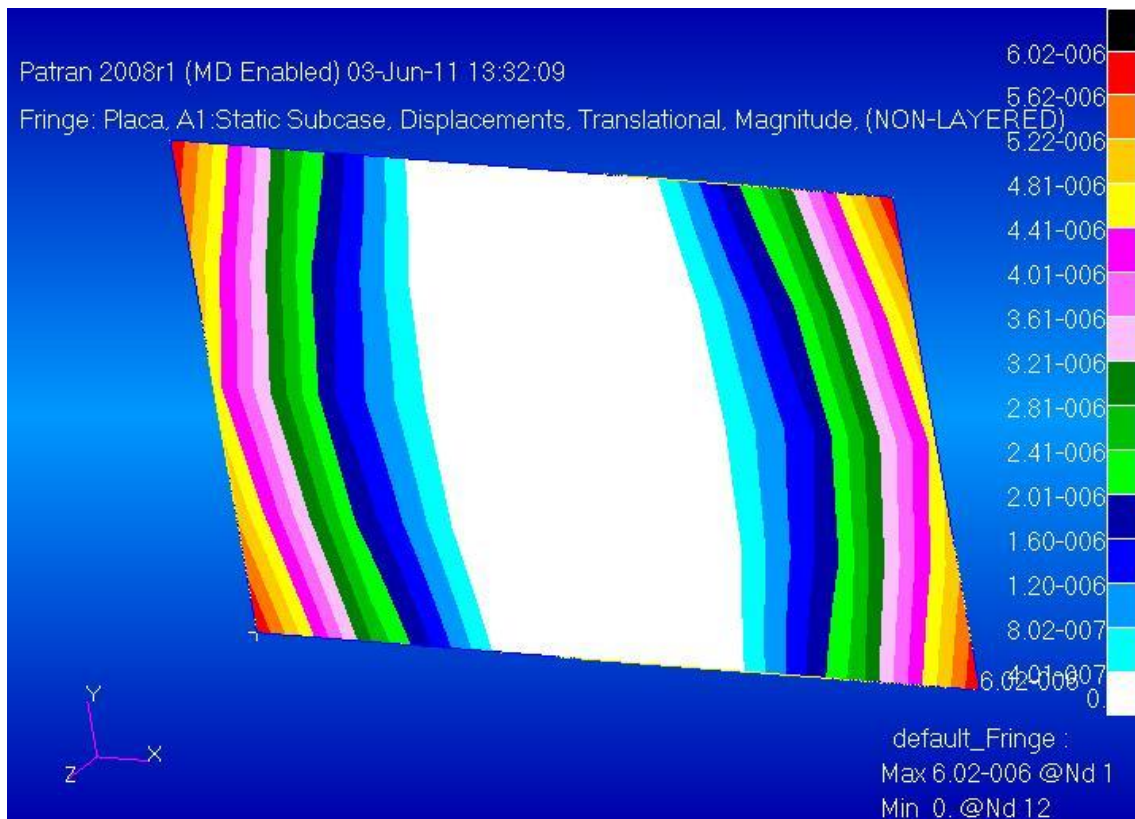


Figura 128 Campo de desplazamientos de la galleta

5.2.2. Placa A

- Función y construcción

Esta placa, que se denomina de ahora en adelante placa A, es una pieza de características similares a la anterior construida en aluminio de gran espesor y diseñada para unirse por un lado con el sensor de par y por otro con la viga-soporte. Para conseguir tales uniones posee tres agujeros en su parte inferior y de ocho en la parte superior. En cuanto a su espesor se fija en 1 cm siguiendo las recomendaciones del profesorado del Grupo de Ingeniería Aeroespacial que ya tenía experiencia en el campo.

Al igual que se hizo en la galleta, también aquí se ha realizado un modelo en contrachapado (Figura 129). Esto es debido, nuevamente, a la necesidad de precisión en los agujeros que requiere el sensor de par. Una vez se ha confirmado la geometría se ha pasado a construir la pieza mediante una máquina de control numérico.

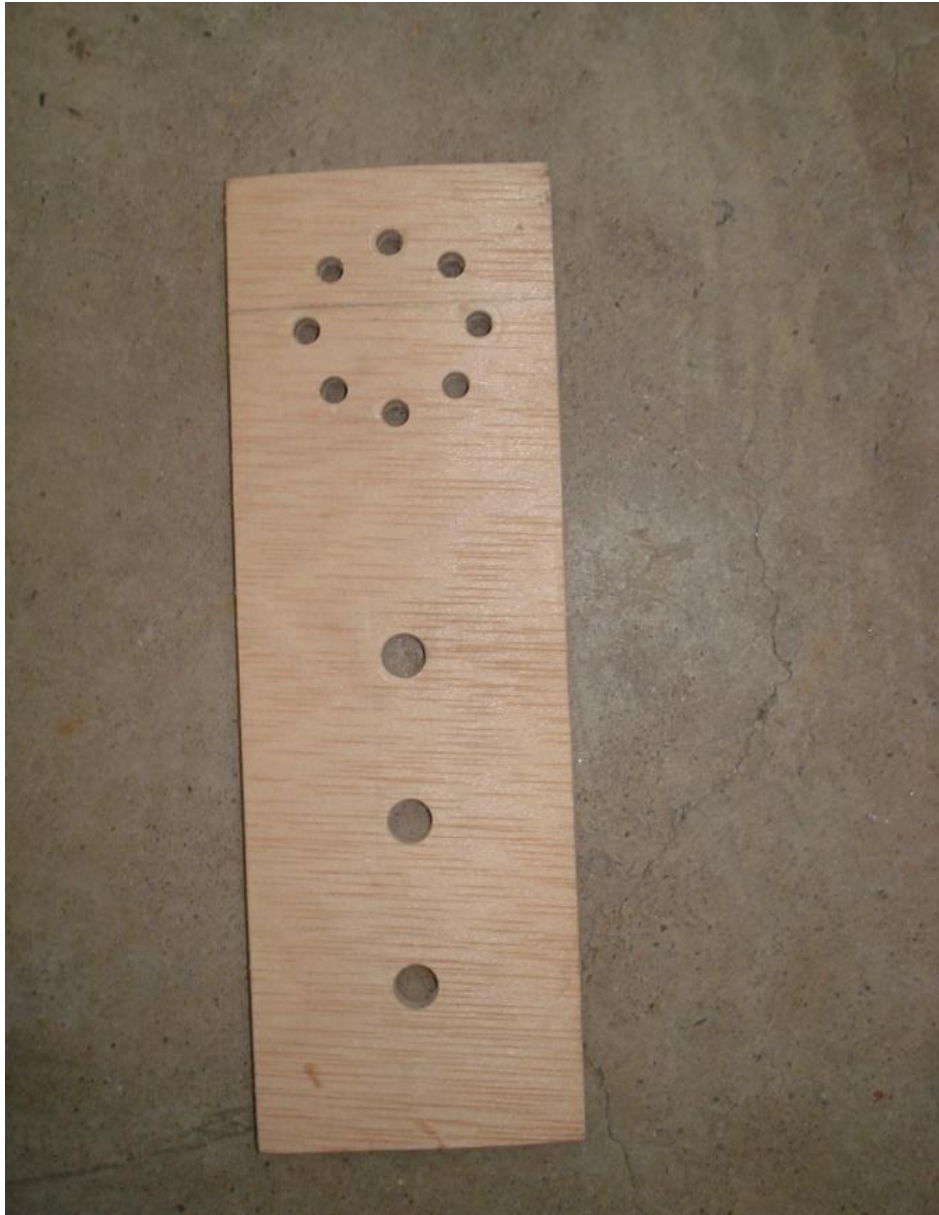


Figura 129 Pieza de madera de la placa A

- Cargas y estudio de tensiones y desplazamientos

Las cargas a las que está sometida esta pieza son las mismas a las que está sometida la anterior placa. Ahora el par debido al peso de la estructura que hay delante (hélice, motor, galleta y sensor de par) es mayor pero sigue siendo despreciable frente a la tracción que proporciona la hélice. Recurriendo al programa Patran-Nastran se han realizado los estudios de tensiones y desplazamientos que se quieren hallar. Los resultados obtenidos se muestran las figuras siguientes (Figura 130, Figura 131 y Figura 132).

De esas figuras puede verse que en este caso el campo de tensiones está concentrado en la zona de la placa A que queda inmediatamente después de que ésta esté en contacto con

una de las paredes de la viga como se puede ver en la Figura 131. Es decir, la zona que queda en voladizo. Aunque la tensión máxima, $9'81 \text{ MPa}$, es superior que en el caso anterior sigue siendo inferior al límite elástico y de fatiga.

Los desplazamientos van aumentando conforme nos acercamos al extremo superior de la pieza (Figura 132). Se llega al máximo justo en el extremo con un valor de $5'29 \cdot 10^{-5} m$, que sigue siendo un valor aceptable.

En este cálculo no se aprecia la distribución que tiene lugar en la parte en que la pieza está unida a la viga-soporte, zona inferior en blanco de la pieza, pues se ha supuesto en el estudio que permanece empotrada. Si se realizará un estudio de esa zona en detalle, teniendo en cuenta las uniones mediante tornillería, podrían verse como aparecen campos concéntricos de tensiones entorno a los agujeros de unión provocados por la presencia de las arandelas, las tuercas y las fuerzas de reacción. Debido a esto se han dispuesto de hasta tres agujeros para la unión, ya que si solo hubiese uno el campo de tensiones concéntricos sería muy alto.

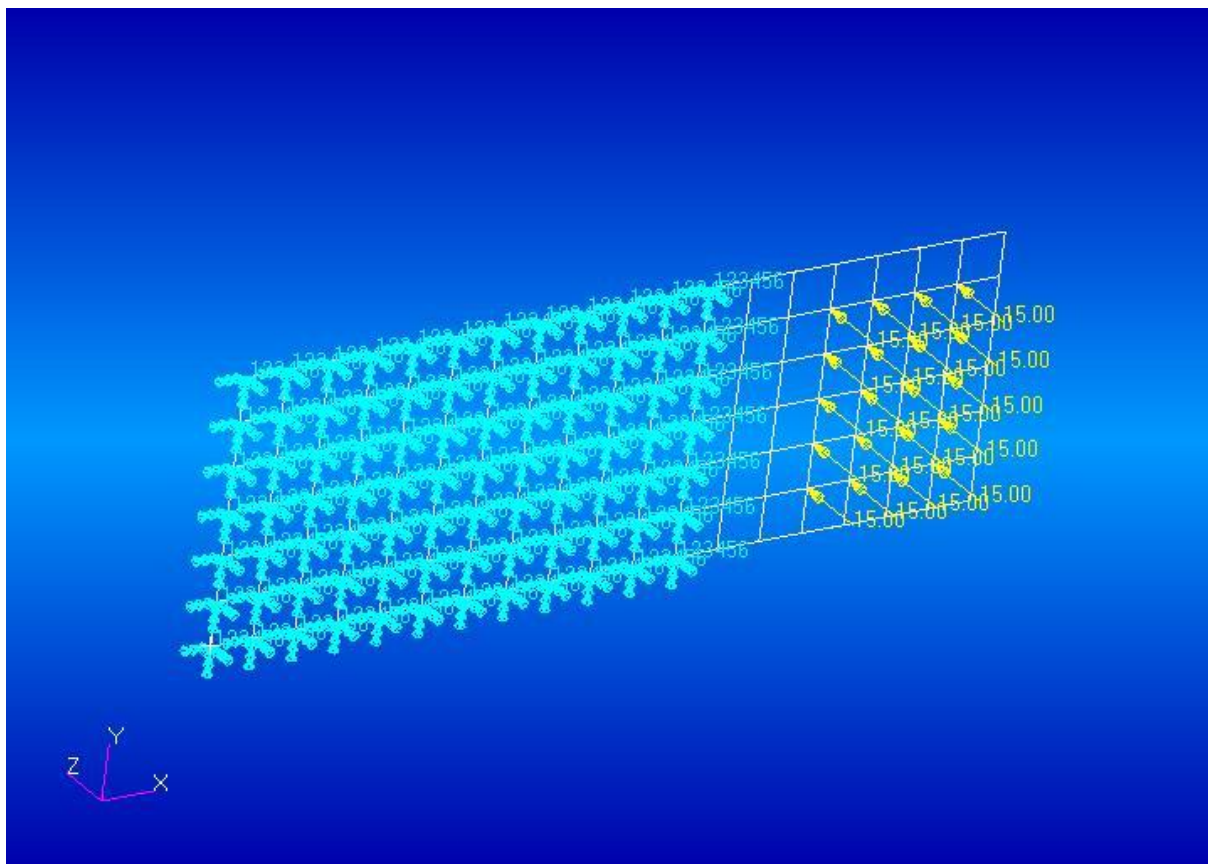


Figura 130 Discretización de la placa A

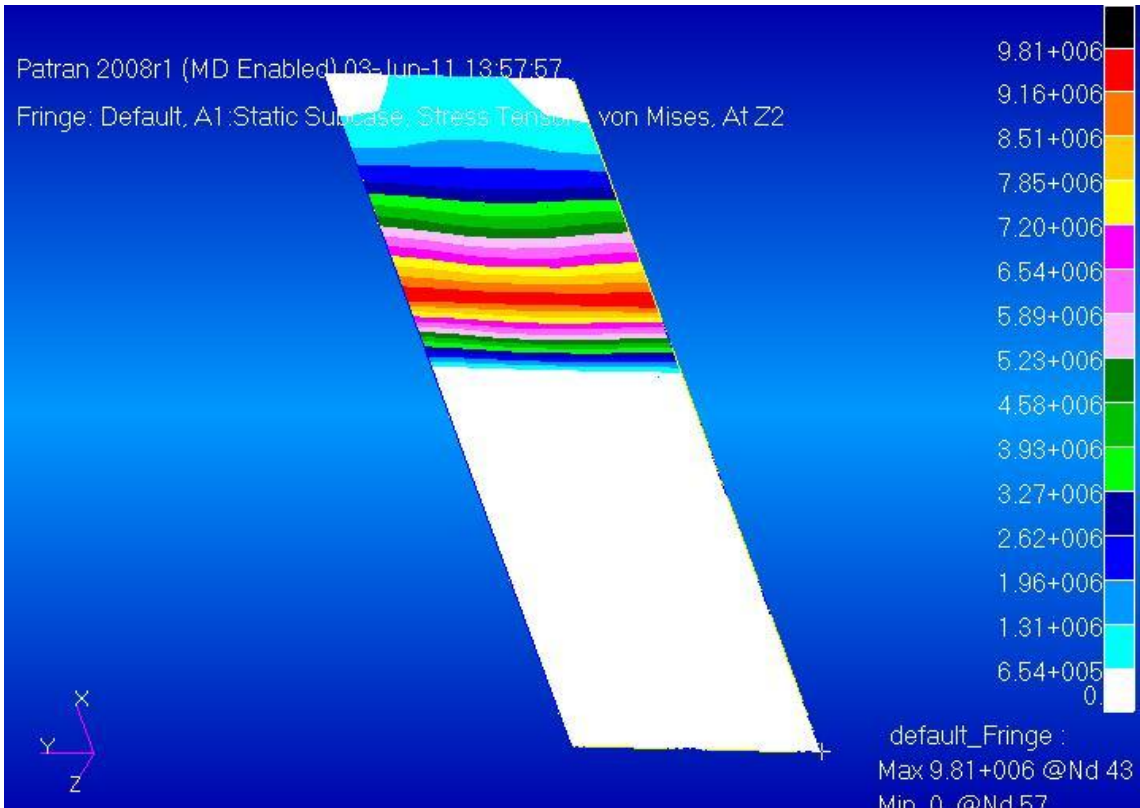


Figura 131 Campo de tensiones de la placa A

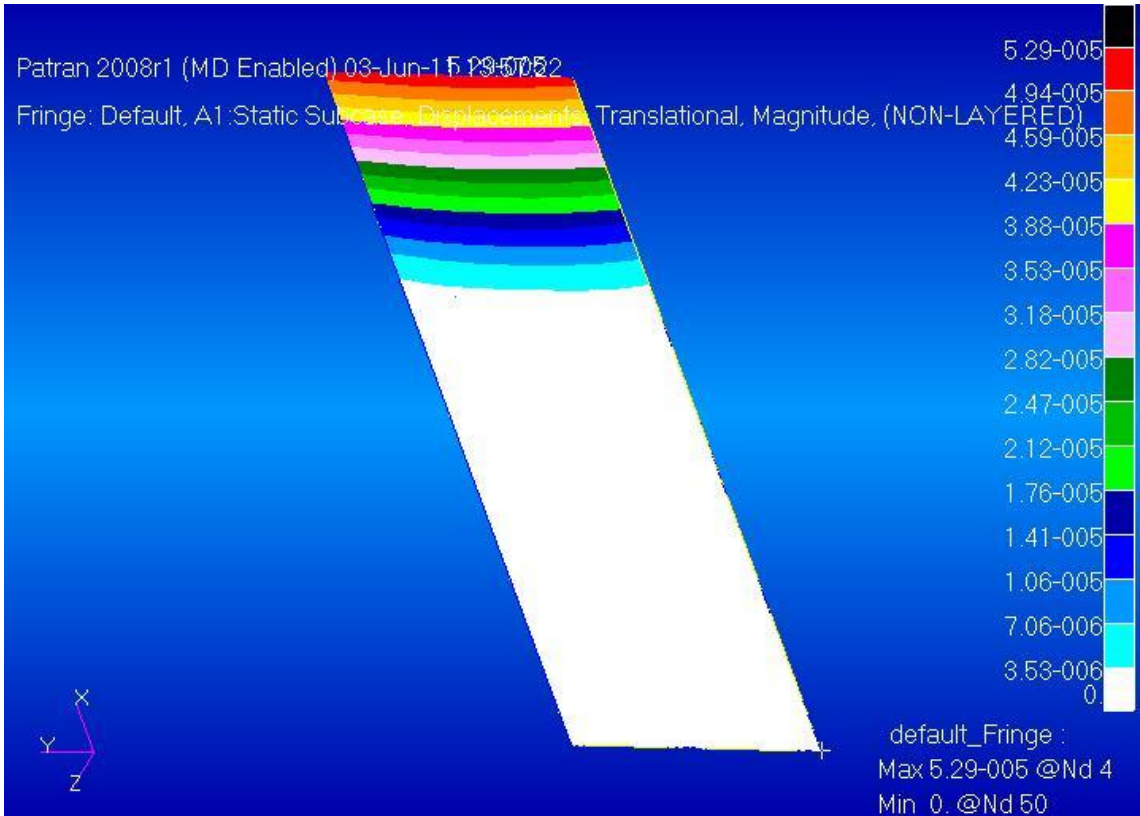


Figura 132 Campo de desplazamientos de la placa A

5.2.3. Viga-soporte

- Función y construcción

La viga-soporte posee un perfil que está construido en aluminio mediante extrusión y tiene como misión la de proporcionar una estructura que mantenga el conjunto motor-hélice en la zona central del túnel de viento. Posee las características que se muestran en la Tabla 7:

ESPECIFICACIONES DE LA VIGA	
Peso (kg/m)	3,333
Perímetro total (mm)	904,422
Xc (mm)	30,00
Ixc (cm ⁴)	39,680
Yc (cm)	30,00
Iyc (cm ⁴)	39,680
Espesor medio (mm)	2,00
Módulo de Young E (GPa)	70
Área del perfil A (m ²)	1,81e-3
Longitud L (m)	0,8
Longitud efectiva Lefectiva (m)	0,656

Tabla 7

Nota: la longitud efectiva es la correspondiente a la parte de la viga que queda fuera del anclaje que es la que se va a deformar.

A esta viga no solo se le ha exigido que no se deforme de forma permanente sino que, además, no debe flectar de forma apreciable, pues entonces el motor vería una corriente a un cierto ángulo de ataque. Esto falsearía los datos obtenidos del experimento puesto que en los mismos se suponen que la corriente llega sin ningún ángulo de ataque. Por este motivo se ha elegido este perfil que destaca por poseer una gran rigidez a flexión.

Otro de los motivos para elegir este perfil, aparte del mencionado y de lo dicho en el capítulo 3, es que la empresa constructora facilita un apoyo compatible con la propia viga y que posee una geometría que nos beneficia en el diseño. Además el perfil permite el uso de tornillería sobre el mismo para conectar la placa A de una forma segura y fácil.

- Cargas y cálculo de desplazamientos

Las cargas en este caso son nuevamente la tracción del motor, el par del mismo (4,41 Nm) y el par por no tener la carga justo en el extremo ($0,03 \cdot 300 = 9 \text{ Nm}$) y el par generado por el peso de los componentes que están por delante (despreciable a efectos) (Figura 133). La carga más importante con diferencia es la de la tracción, no obstante, también se toman en cuenta los otros momentos que contribuyen a la flexión de la viga.

Aquí las tensiones no son tan importantes, pues es obvio que la viga no superará las tensiones límite, pero sí lo son los desplazamientos por las razones anteriormente mencionadas. Para calcular los desplazamientos del punto superior se ha recurrido en este caso a las ecuaciones de Teoría de Estructuras porque la simplicidad del problema lo permite. Para mayor detalle puede consultarse el punto (33) de la bibliografía.

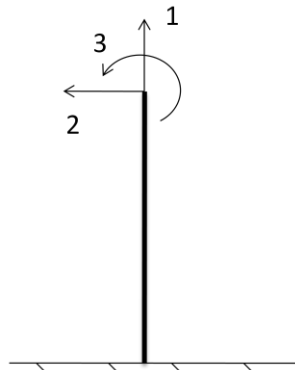
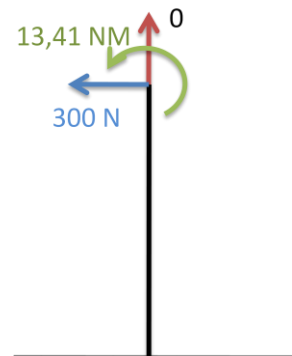
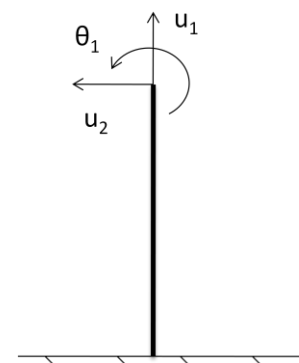
SIST. DE COORDENADASFUERZASDESPLAZAMIENTOS

Figura 133 Viga-Soporte

Las ecuaciones correspondientes al problema estático son:

$$F = K \cdot u \Rightarrow \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ M_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\ \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{4EI}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \theta_1 \end{pmatrix}$$

Conocidas las fuerzas y la matriz de rigidez de los datos del problema es posible hallar los desplazamientos sin más que resolver la ecuación matricial. Los resultados obtenidos son:

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,012e8 & 0 & 0,004e8 \\ 0 & 1,931e8 & 0 \\ 0,004e8 & 0 & 0,002e8 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 300 \\ 4,41 + 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,104e-3 \text{ m} \\ 0,001e-3 \text{ m} \\ 0,317e-3 \text{ rad} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \theta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,104 \text{ mm} \\ 0,001 \text{ mm} \\ 0,018 \text{ grados} \end{pmatrix}$$

De estos resultados se ha concluido que la barra está prácticamente en la misma posición durante todo el ensayo. Por ello puede considerarse que la hélice va a ver siempre la corriente del túnel de viento de forma perpendicular, como se pretendía.

5.2.4. Placa 1

- Función y construcción

La placa 1 es una pieza rectangular construida en aluminio de gran espesor y diseñada para transmitir el empuje del conjunto motor-hélice y servir de superficie activa a la célula de carga. Para conseguir su objetivo se encuentra situada, por un lado, en el extremo de la base móvil y en el otro está en contacto con la cara activa de la célula de carga. Para fijarse a la base móvil de forma perpendicular se han dispuesto unas escuadras de aluminio ideales para tal fin. Estas escuadras se atornillan a la base y a la placa donde se han practicado sus correspondientes

agujeros. En lo que respecta a la unión con la célula de carga se ha realizado un agujero holgado verticalmente para permitir un mejor ajuste de la célula de carga. En cuanto a su espesor se fija en 7 milímetros siguiendo las recomendaciones del profesorado del Grupo de Ingeniería Aeroespacial y además para aprovechando retales que ya existían en el laboratorio. En concreto para fabricar esta pieza y la siguiente, mediante control numérico, se ha utilizado un retal de 20x20 centímetros.

- Cargas y estudio de tensiones y desplazamientos

La única carga que se ejerce en esta pieza es la de la tracción del conjunto motor-hélice ya que el par y las otras cargas se quedan en la base móvil. Se ha recurrido de nuevo al programa de cálculo de estructuras y se han obtenido los resultados que se muestran en las figuras siguientes (Figura 134, Figura 135 y Figura 136).

Como ha quedado evidenciado de los resultados mostrados en las figuras mencionadas en lo que respecta a las tensiones estas alcanzan sus mayores valores en la zona entre la célula de carga y la de las escuadras y su valor máximo es $4,27 \text{ MPa}$, tensión inferior al límite elástico y al de fatiga por lo que no existe ningún problema a priori. Por otro lado, los desplazamientos más importantes se presentan en el centro de la placa, como cabría esperar, y su máximo corresponde a $1,42e - 2 \text{ mm}$.

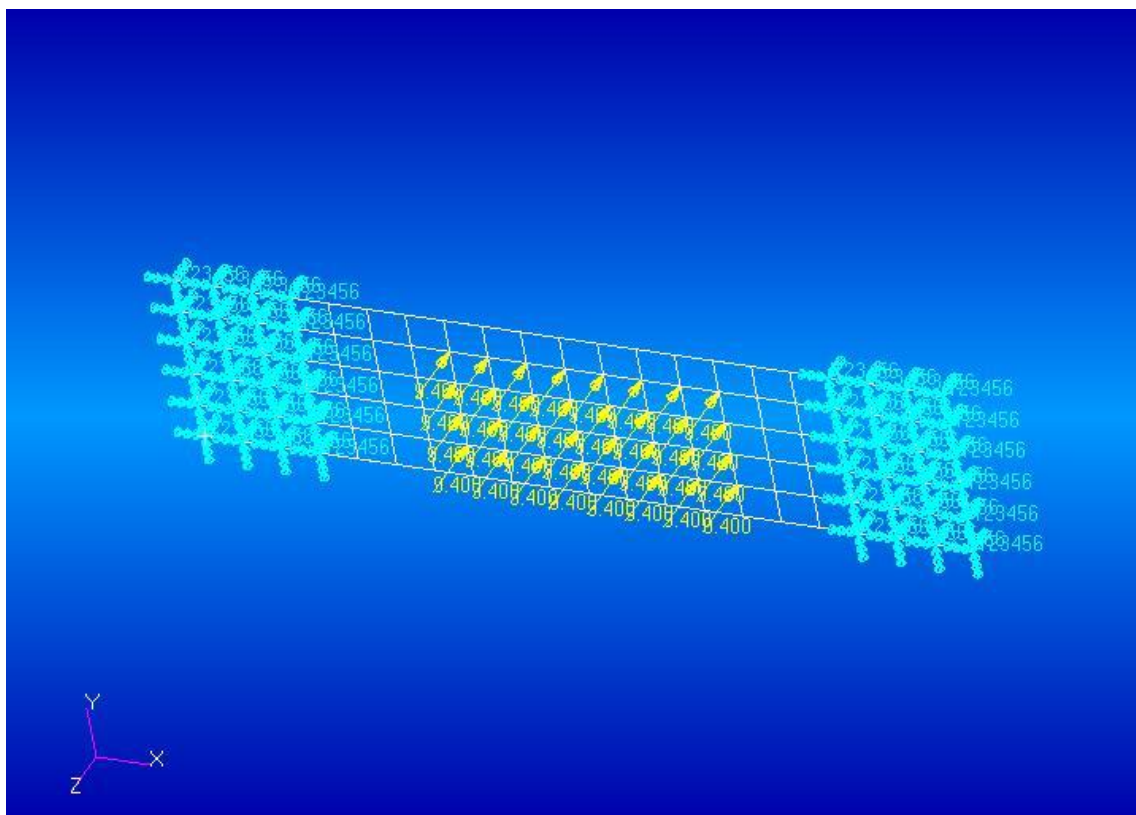


Figura 134 Discretización de la placa 1

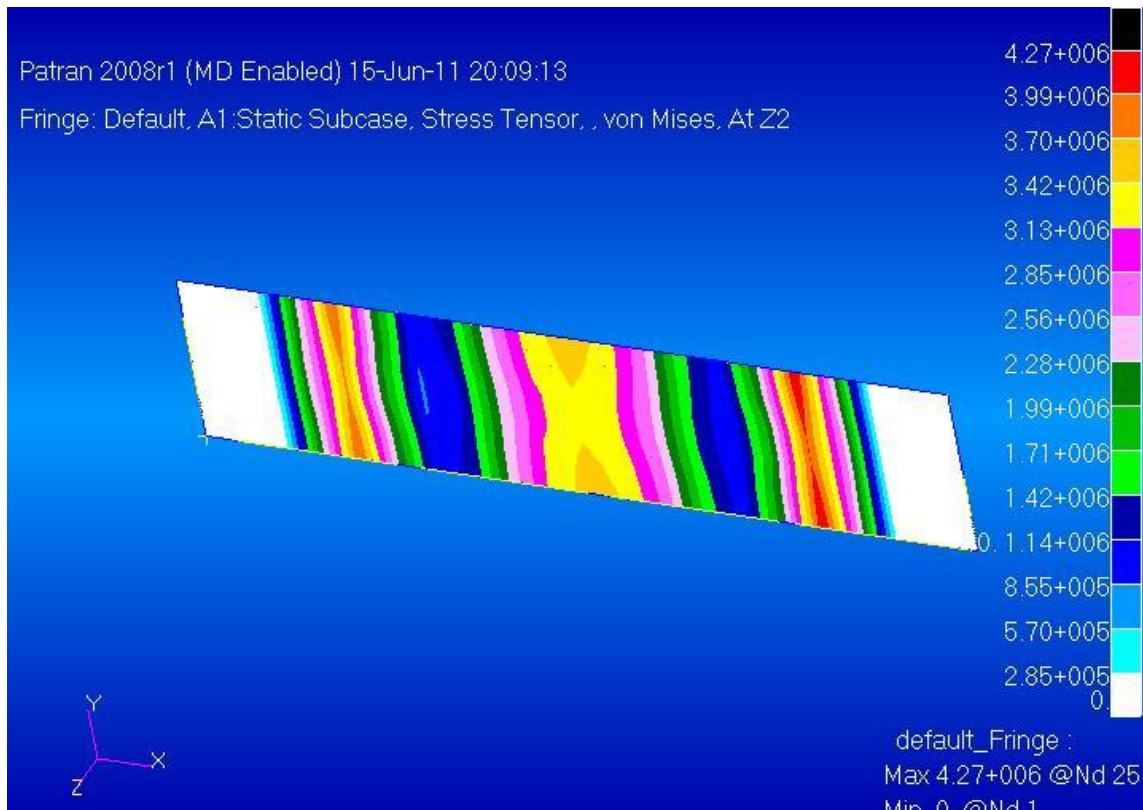


Figura 135 Campo de tensiones de la placa 1

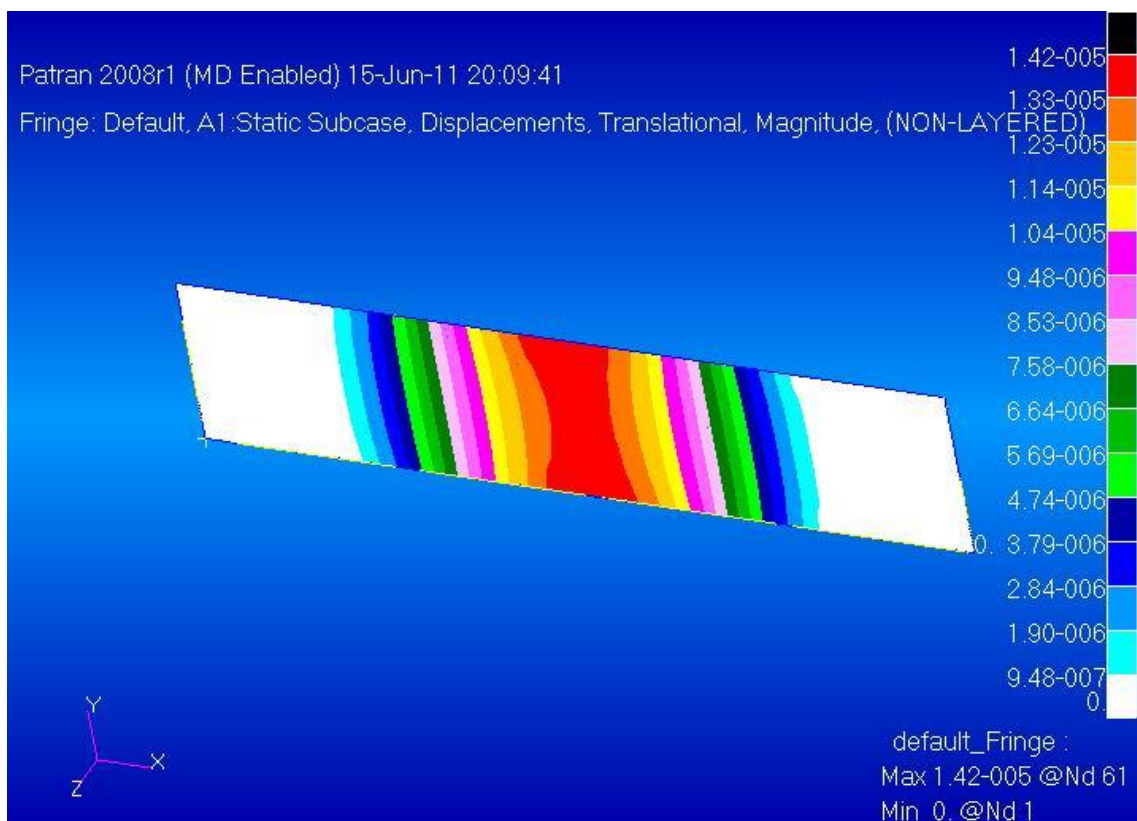


Figura 136 Campo de desplazamientos de la placa 1

5.2.5. Placa 2

- Funcionamiento y fabricación

Esta placa es análoga a la anterior con la salvedad de que tiene que ser más ancha para compensar la altura a la que está la base móvil de la base de la bancada túnel. Su función es la transmitir el empuje del motor a la base fija de la bancada y de servir de superficie de referencia a la célula de carga. Para mantenerla unida a la base y de forma perpendicular se utilizan unas escuadras de acero, elegidas fundamentalmente por su precio, disponibilidad y buena resistencia, que se unen a la placa mediante cuatro tornillos. En lo que respecta a la unión con la célula se ha utilizado el mismo agujero que el que se ha utilizado en la pieza anterior. Para su fabricación se ha recurrido al mismo retal que el que se ha utilizado para la hacer la anterior placa y al control numérico.

- Cargas y estudio de tensiones y desplazamientos

Nuevamente la única carga que se ejerce en esta pieza es la de la tracción del conjunto motor-hélice que le llega de la célula de carga. Se ha recurrido otra vez al programa de cálculo de estructuras y se han obtenido los resultados que se muestran en las figuras siguientes (Figura 137, Figura 138 y Figura 139).

Los resultados también han sido similares a los de la placa 1 tanto en tensiones como en desplazamientos. La tensión máxima, $3,73 \text{ MPa}$, es un poco inferior a la anterior aunque a los desplazamientos les pasa lo contrario y alcanzan un máximo de $1,89 \text{ e} - 2 \text{ mm}$. Ambas magnitudes dentro de lo esperado y aceptable.

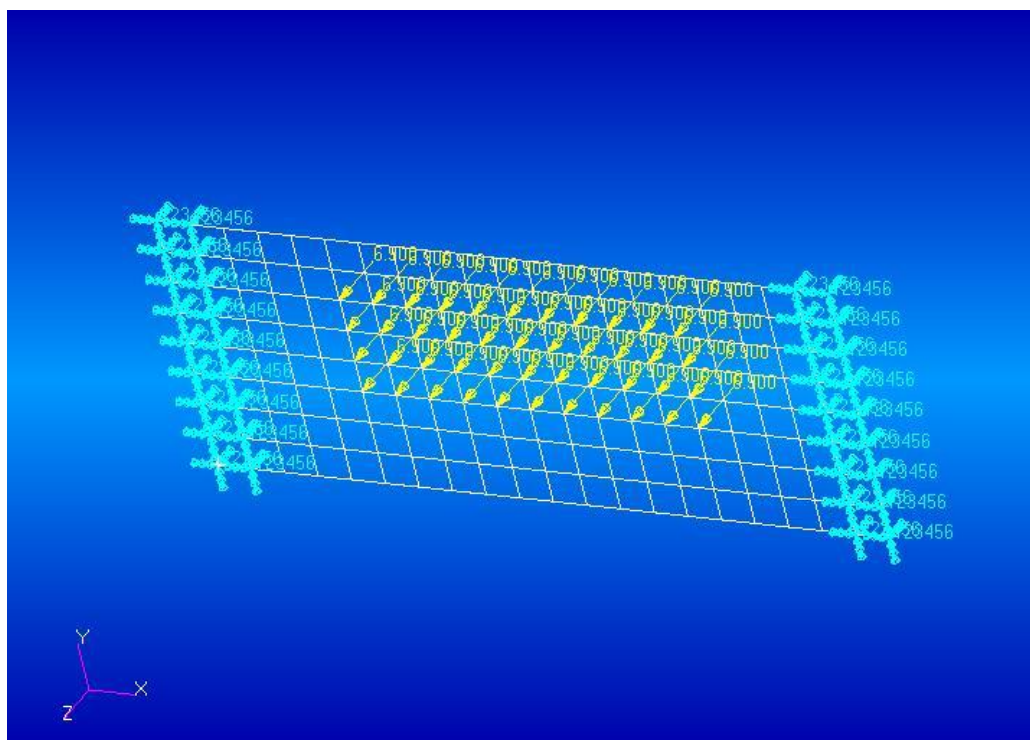


Figura 137 Discretización de la placa 2

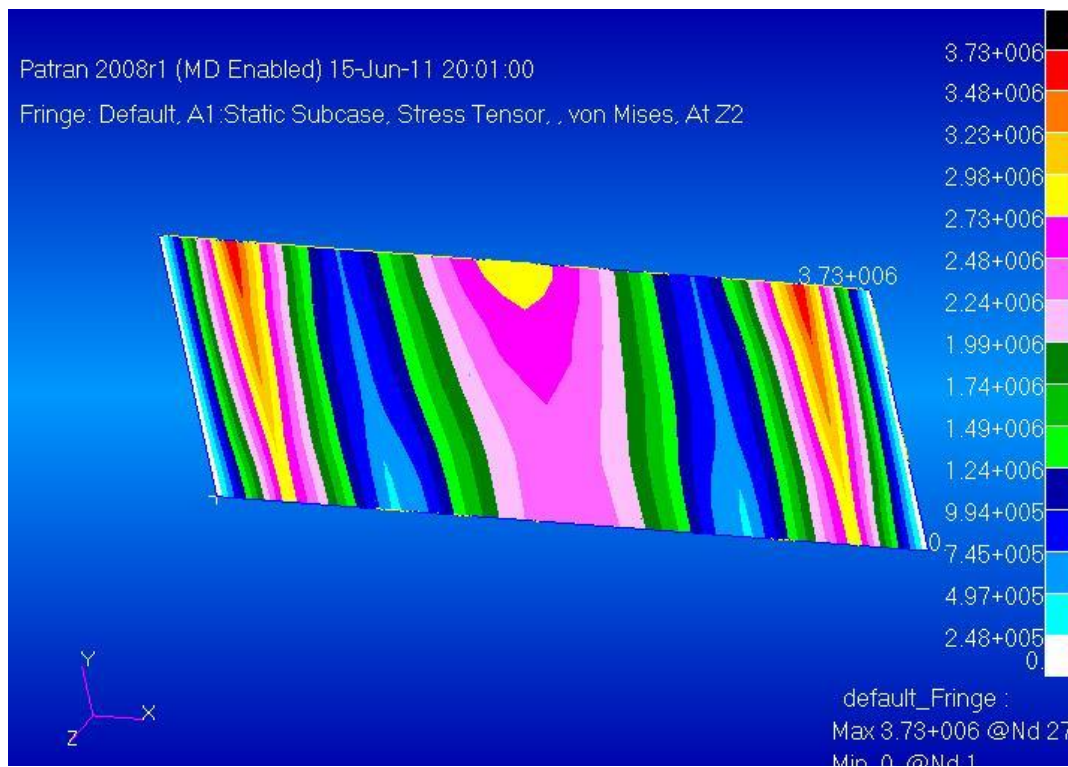


Figura 138 Campo de tensiones de la placa 2

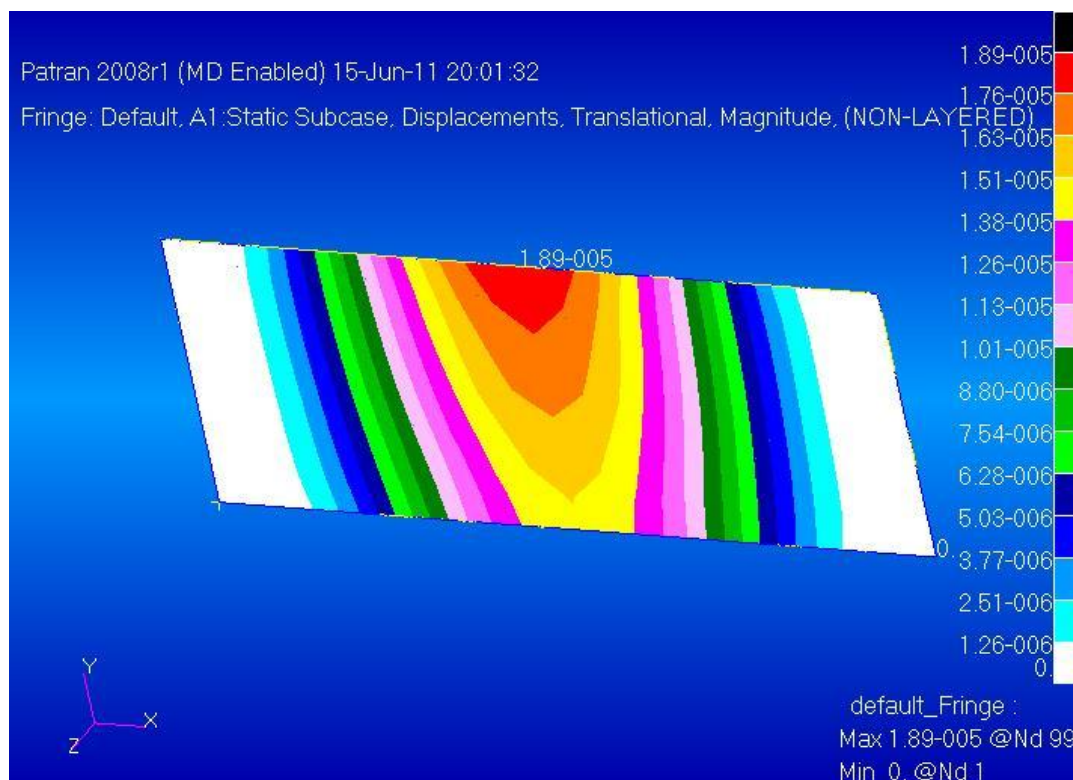


Figura 139 Campo de desplazamientos de la placa 2

5.3. REACCIONES SOBRE LAS BASES

Debido a que la bancada es una estructura sobre la cual se ejercen una serie de fuerzas y se desea que se mantenga en una posición fija es conveniente hacer un estudio sobre el tipo de reacciones que son necesarias para mantenerla en dicha posición. En el caso de los ensayos estáticos este estudio es esencial para ver si es necesario poner un contrapeso y en ese caso cuánto para que la estructura no vuelque. Y, por otro lado, en los ensayos dinámicos se necesita conocer las fuerzas que se ejercerán sobre el suelo del túnel de viento para ver si éste puede soportarlas.

5.3.1. Volcado

En este estudio se ha realizado una cuantificación de las cargas que se producen en los apoyos de la bancada cuando actúa el empuje de la hélice y el peso de la bancada. Inicialmente se ha tomado como base la ideal, es decir, una placa que comprende la bancada túnel y la caja electrónica. Si resulta que en alguno de los apoyos hay una fuerza vertical, entonces se producirá el vuelco de la misma y es entonces cuando se debe plantearse aumentar la base para poner un contrapeso.

Por otro lado, se han hecho una serie de hipótesis previas destinadas a simplificar el problema. La primera de ellas es que se suponen pequeños desplazamientos y deformaciones de forma que el estado de carga inicial (conocido) es igual que el final (desconocido). Esta hipótesis es bastante sólida si tenemos en cuenta los resultados de desplazamientos del anterior apartado. La segunda hipótesis consiste en suponer que el peso de la bancada se distribuye uniformemente sobre la base. Y finalmente, se trata a la bancada como un solo cuerpo, lo que permite aplicar el método de cargas equivalentes.

Una vez definidas las hipótesis se ha pasado a calcular las cargas en los apoyos, mediante el método de cargas equivalentes. Éste se basa en que una fuerza puede ser llevada a otro punto si se aplican también en ese punto los momentos correspondientes a esa fuerza de forma que el sistema resultante sea el mismo. Con esta idea se llevan todas las cargas al centro de gravedad de la base y a partir de ahí se aplica otra vez el método para llevar las cargas a los apoyos. El hecho de llevar las cargas al centro de gravedad es porque desde este punto es muy fácil calcular el sistema de cargas equivalentes en los apoyos mediante simetría.

Concretamente, en el problema en cuestión, la tracción de la hélice se convierte en una fuerza (F) y dos momentos (M_1, M_2) (Figura 140). Realizándose los cálculos pertinentes se tiene:

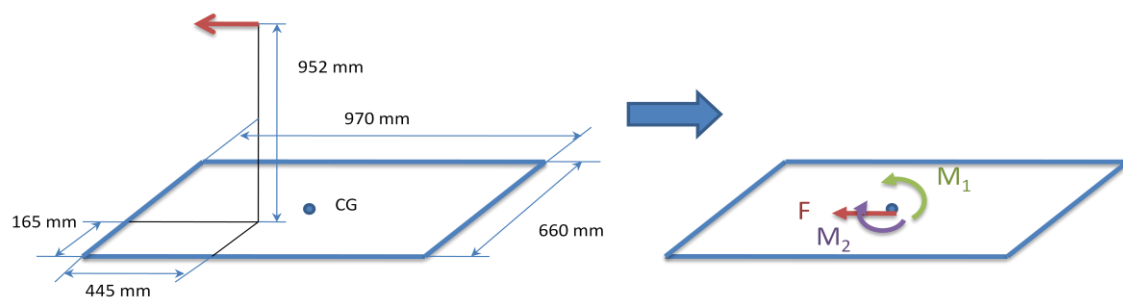


Figura 140 Cargas equivalentes

$$F = 300 \text{ N}$$

$$M_1 = 1\text{m} \cdot 300\text{N} = 285,6 \text{ Nm}$$

$$M_2 = 0'165\text{m} \cdot 300\text{N} = 49,5 \text{ Nm}$$

Una vez halladas las fuerzas resultantes en el CG de la base se pasa a dividir el problema en otros tres más sencillos donde el objetivo es llevar las fuerzas a los apoyos. Estos problemas son muy sencillos y basta con aplicar simetría para solucionarlos. Después se han sumado todos los resultados y el resultado del peso de la bancada para hallar la solución al problema completo (en este caso se puede aplicar el principio de superposición).

- Momento M_1 (Figura 141)

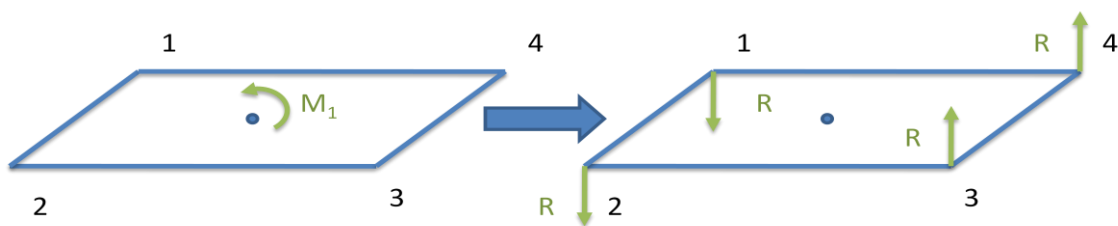


Figura 141 Momento M_1

R reacciones verticales en los apoyos debidas al momento M_1

$$R = \frac{M_1}{4 \cdot 0,485} = 147,21 \text{ N}$$

- Momento M_2 (Figura 142)

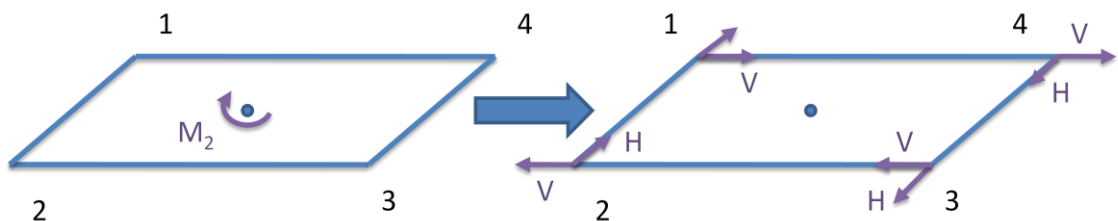


Figura 142 Momento M_2

V reacciones horizontales en la dirección de la tracción en los apoyos debidas al momento M_2
H reacciones horizontales perpendiculares a V en los apoyos debidas al momento M_2

$$V = \frac{M_2}{4 \cdot \sqrt{0,485^2 + 0,33^2}} \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{0,485}{0,33}\right)\right) = 11,87 \text{ N}$$

$$H = \frac{M_2}{4 \cdot \sqrt{0,485^2 + 0,33^2}} \cdot \sin\left(\arctan\left(\frac{0,485}{0,33}\right)\right) = 17,44 \text{ N}$$

- Fuerza F (Figura 143)

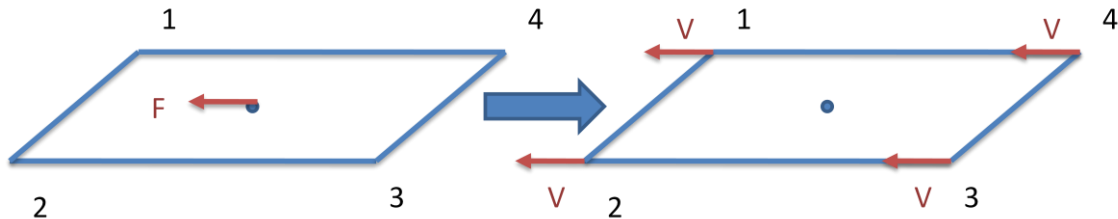


Figura 143 Fuerza F

V reacciones horizontales en la dirección de la tracción en los apoyos debidas a la fuerza F

$$V = \frac{F}{4} = 75 \text{ N}$$

- Peso (Figura 144)

Los tres estados de carga anteriores corresponden a la tracción de la hélice. Sin embargo, para completar el problema se debe añadir el peso de la estructura que está tasado en 20 kg aproximadamente.

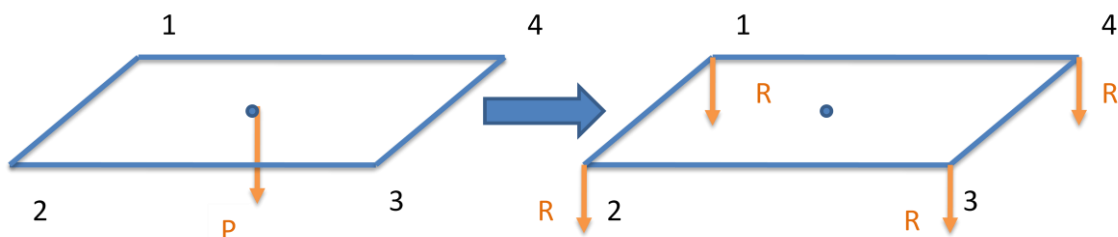


Figura 144 Peso

R reacciones verticales en los apoyos debidas al peso P

$$R = \frac{P}{4} = 49 \text{ N}$$

Una vez que se tienen todos los estados de carga se suman y se obtiene el resultado final mostrado en la Figura 145.

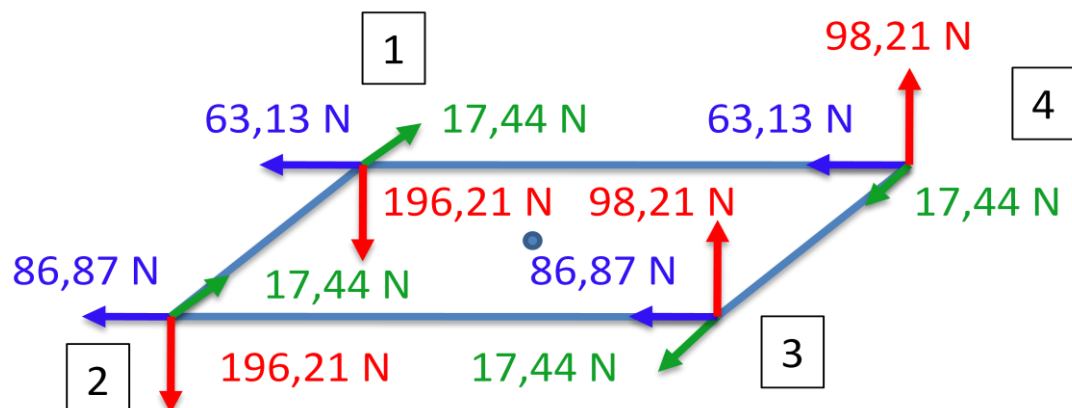


Figura 145 Total de reacciones sobre la bancada

Como puede comprobarse en los apoyos traseros existen fuerzas verticales hacia arriba lo cual indica que la bancada volcará cuando se ponga a máxima potencia. Para solucionar este problema se alarga la base por detrás y se coloca un peso (Figura 146).

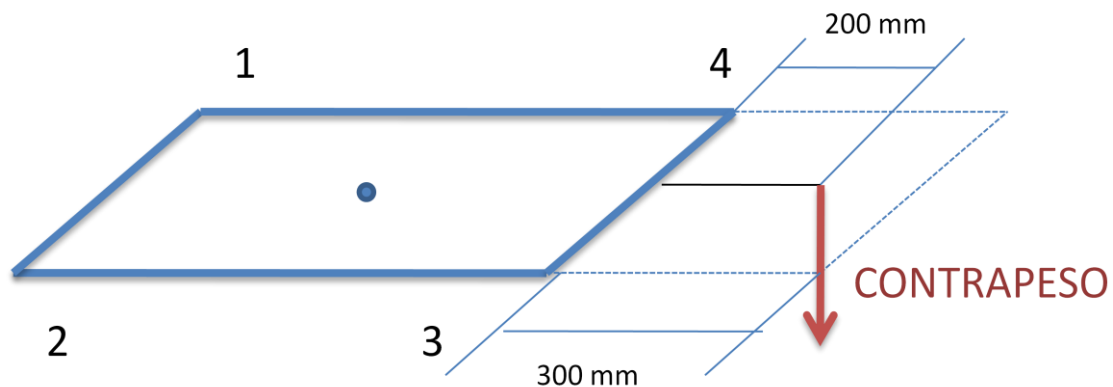


Figura 146 Contrapeso

Como se muestra en la Figura 146 se ha expandido la base unos 0,3 metros para poder situar un contrapeso en voladizo a 0,2 metros. Se ha calculado este contrapeso para que en los apoyos 3 y 4 se tenga una carga de un kilogramo que asegure un agarre al suelo. Para realizar tal cálculo se lleva el contrapeso a la línea que une los apoyos 3 y 4 mediante el método de equivalencia de cargas y se establece la igualdad de que haya un kilo en el apoyo.

$$F = \frac{98,21 + 9,8}{\frac{1}{2} + \frac{0,2}{4 \cdot 0,485}} = 179,09 \text{ N} = 18,27 \text{ kg}$$

Esta carga de 18,27 kg se ha puesto en la bancada mediante losetas de suelo de 10 kg aproximadamente. Sin embargo, debido a que el peso es muy grande es necesario poner una placa de madera debajo de la zona de la bancada destinada al contrapeso de forma que aguante su peso (Figura 147). Al realizar esto no se puede suponer la carga en voladizo como se ha hecho, no obstante, lo que va a ocurrir es que a medida que crezca la tracción de la hélice, la reacción en los apoyos va a disminuir con ella hasta que se haga cero de forma que es entonces cuando empieza a actuar el contrapeso impidiendo que la bancada se levante por detrás. Y es entonces cuando es válido el cálculo desarrollado anteriormente.

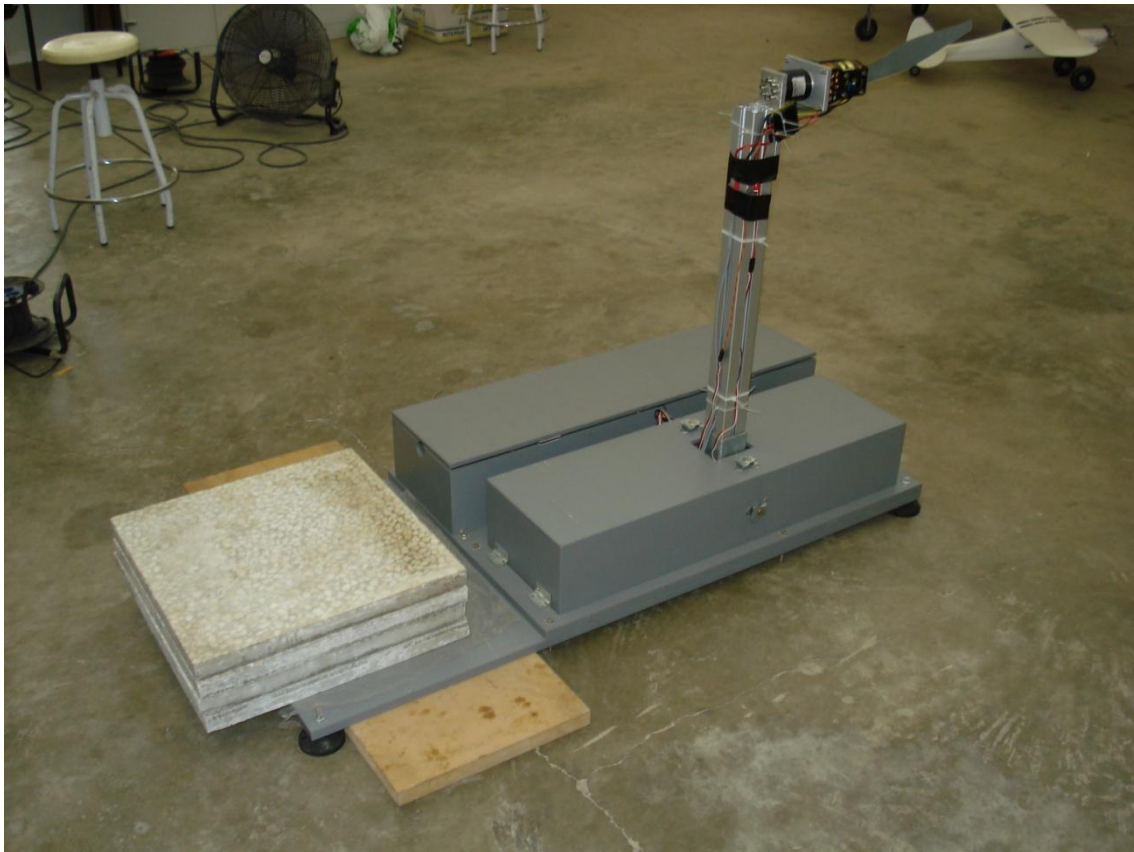


Figura 147 Bancada con contrapeso

Nota: aunque en la figura los apoyos están en la parte trasera, quedando un poco en voladizo, deberían estar delante de la placa de madera marrón (esta es la tabla de apoyo). No obstante, la propia tabla de refuerzo actúa como apoyo.

Finalmente, también se ha calculado que la estructura en conjunto tiene un peso que permite la aparición de una fuerza de rozamiento que contrarresta la tracción de la hélice. Además de esto, la tabla de apoyo sirve también como tope.

5.3.2. Reacciones de la bancada túnel

En este caso la base es la de la bancada túnel (330x970x19 mm) de forma que se tiene un problema donde interviene la tracción, un solo momento (la carga está más centrada ahora) y el peso de la bancada túnel que se estima en 14 kg. Se han realizado los mismos cálculos que en que en el apartado y se han obtenido los resultados mostrados en la Figura 148.

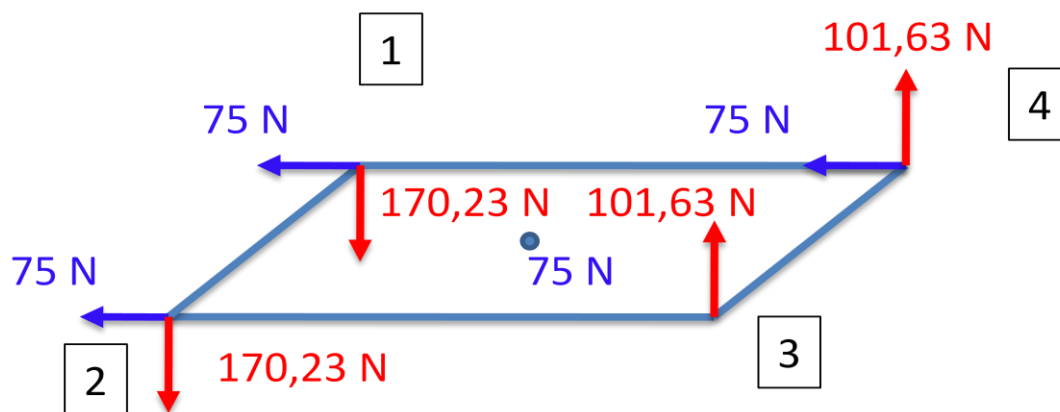


Figura 148 Reacciones en la bancada túnel

Estas cargas pueden ser soportadas por el túnel de viento (se consultó con el personal del túnel de viento) y, además, se han practicado otros dos agujeros en la base para tener un agarre de 6 puntos con cargas más distribuidas.

5.4. ESTUDIOS AERODINÁMICOS

Se presentan aquí dos estudios aerodinámicos que resultan de interés en el proyecto. El primero de ellos es sobre la resistencia del motor en el túnel de viento a la máxima velocidad para comprobar las magnitudes de resistencias que se alcanzan. El segundo es sobre la resistencia que ofrece la viga soporte y lo que soporta en el túnel de viento para todo un régimen de funcionamiento.

5.4.1. Resistencia del motor y varios

Este ensayo nace a raíz de la necesidad de elegir una célula de carga de un solo punto o una de tracción compresión. Las células de carga de un solo punto pueden medir un poco en el sentido opuesto, por lo que si la resistencia del motor y varios en el peor de los casos es muy pequeña podemos elegir esta célula. Es necesario por tanto hacer un estudio de la resistencia del motor y varios (por varios se entiende la bancada del motor, la galleta, el sensor de par y la placa A).

Se ha considerado solo la resistencia del motor y varios porque en un principio la viga-soporte (el otro elemento expuesto a la corriente y que afecta a la célula de carga) está recubierta con una carcasa aerodinámica especial.

Para realizar dicho estudio se ha fijado una geometría general del cuerpo a estudiar en una situación particular (en una corriente a 25 m/s) y se utilizan dos métodos por separado sacados de la resistencia de aviones y que pueden consultarse el punto (34) de la bibliografía. Estos métodos, aunque poseen fundamentos físicos, son más bien estadísticos y experimentales. Como geometría general se ha tomado un cubo de 0'15x0'1x0'2 metros que es más o menos un poliedro donde están contenidos el motor y varios.

1) Skin Friction Method

En este método se calcula la resistencia a través del coeficiente Cd_0 . Para calcular este parámetro se han utilizado las características geométricas del cuerpo:

$$S_{wet} = 150 \cdot 100 \cdot 2 + 200 \cdot 150 \cdot 2 + 200 \cdot 100 \cdot 2 = 130000 \text{ mm}^2$$

$$S_{ref} = 150 \cdot 200 = 30000 \text{ mm}^2$$

$$Cf_e = 0,0065$$

Donde Cf_e es un coeficiente de equivalencia sacado de una tabla que puede encontrarse en la referencia citada. La fórmula que se utiliza entonces es:

$$Cd_0 = Cf_e \frac{S_{wet}}{S_{ref}} = 0,02817$$

Entonces se calcula la resistencia como:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S_{ref} Cd_0 = 0,3117 \text{ N}$$

2) Component Buildup Method

Este método es similar al anterior, salvo que para calcular el Cd_0 se halla el Cf_e de otra forma y también interviene un nuevo factor de forma. La expresión resultante es:

$$Cd_0 = Cf_e \cdot FF_c \cdot \frac{S_{wet}}{S_{ref}}$$

- Cf_e

Para calcular este coeficiente se ha recurrido a una gráfica que da el coeficiente en función del material predominante, la longitud máxima del cuerpo y la velocidad a la que está sometido. Fijando todos estos valores se ha obtenido:

$$Cf_e = 3,52118 \cdot 10^{-3}$$

- FF_c

Este coeficiente se calcula con la expresión:

$$FF_c = 1,4 \cdot FF_i = 1,4 \cdot \left(1 + \frac{60}{f^3} + \frac{f}{400}\right)$$

Donde f es un parámetro que está relacionado con la sección frontal del cuerpo y tiene un valor de 1'1. Resultando:

$$FF_c = 64,512$$

Con estos valores se obtiene un coeficiente de $Cd_0 = 0,9843$. Se ha utilizado la expresión de la resistencia en función de Cd_0 y se ha obtenido una resistencia de $D = 10,89 \text{ N}$.

Se ha realizando una media entre los dos métodos y se ha otenido una resistencia final de $D = 5,6 \text{ N}$. Fuerza que no puede medir la célula de carga de un solo punto.

4.4.2. Resistencia del motor, varios y la viga-soporte

En los ensayos en el túnel de viento los valores dados por la célula de carga son el resultado de la tracción del motor más la resistencia de las piezas que están al descubierto. Por lo que para hallar la tracción real se debe calcular esta resistencia y quitársela a los valores de la célula de carga. Es, por lo tanto, necesario realizar un estudio aerodinámico de esta resistencia.

Para calcular de forma precisa esta resistencia se recurre al análisis dimensional, las ecuaciones de la mecánica de fluidos y la experimentación. Este análisis se ha desarrollado a partir del punto (35) de la bibliografía. Del análisis del problema de la resistencia de un cuerpo genérico se deduce que ésta posee la siguiente dependencia:

$$D = f(\rho, \mu, U_\infty, T_\infty, p_\infty, p, T, \text{geometría})$$

D : resistencia, ρ : densidad del aire, μ : viscosidad del aire,

U_∞ : velocidad del aire, T_∞ : temperatura del aire, p_∞ : presión del aire,

p : presión sobre el objeto, T : temperatura del cuerpo

Si se aplica el análisis dimensional se obtiene:

$$\frac{D}{\rho U_{\infty}^2 l^2} = f\left(\frac{x}{l}, \frac{\mu}{\rho U_{\infty} l}, \frac{p - p_{\infty}}{\rho U_{\infty}^2}, \frac{T - T_{\infty}}{T_{\infty}}\right)$$

l : una longitud característica, x coordenada dimensional

A continuación se ha recurrido a las ecuaciones de la mecánica de fluidos y a la física que rige el problema. La primera observación que se realiza es que se puede suponer el problema incompresible ya que el número de Mach y las variaciones de temperatura durante los ensayos son muy pequeños. Esto se traduce, a través de las ecuaciones, en que el problema no depende de los términos de presión y temperatura. Al desperdiciar estos términos se está introduciendo errores de $\max\{O(M^2), O(\Delta T)\}$, perfectamente aceptables.

Por otro lado, como la geometría del cuerpo no va a variar durante los ensayos (la bancada es siempre la misma) el término de geometría también puede quitarse. Con estas simplificaciones se tiene que:

$$\frac{D}{\rho U_{\infty}^2 l^2} = f\left(\frac{\mu}{\rho U_{\infty} l}\right) = f(Re)$$

Re : Número de Reynolds

Es decir, la resistencia depende proporcionalmente de la densidad, la velocidad al cuadrado, una longitud característica del cuerpo (da igual que longitud mientras se utilice la misma en el número de Reynolds) al cuadrado y una función que depende del Reynolds. Si se conoce esta función, $f(Re)$, se puede conocer la resistencia para cualquier densidad del aire y velocidad durante el experimento, o dicho de otro modo, se puede conocer la resistencia en cualquier punto del experimento.

Para hallar esta función se han realizado una serie de experimentos midiendo la resistencia (se deja el motor parado y sin hélice) con la célula de carga a distintas velocidades (lo que equivale a variar el número de Reynolds). Se ha mantenido la densidad fija en $\rho = 1,186 \text{ kg/m}^3$ y se han calculado los números de Reynolds y los valores de la función. Se han obtenido así los resultados recogidos en la Tabla 8.

Nº de Reynolds	f(Re)
430243,092	0,02274815
589524,577	0,02581299
746975,241	0,02789026
913580,013	0,03027136
1082015,61	0,03111946
1226650,52	0,0322441
1396916,93	0,03349447
1547044,31	0,03296991
1702664,15	0,03366009
1849129,89	0,03442882

Tabla 8

Con esta tabla queda determinada la función $f(Re)$ de forma que un programa puede interpolar estos valores para hallar la función para cualquier valor. Gráficamente se tienen los resultados en la Figura 149.

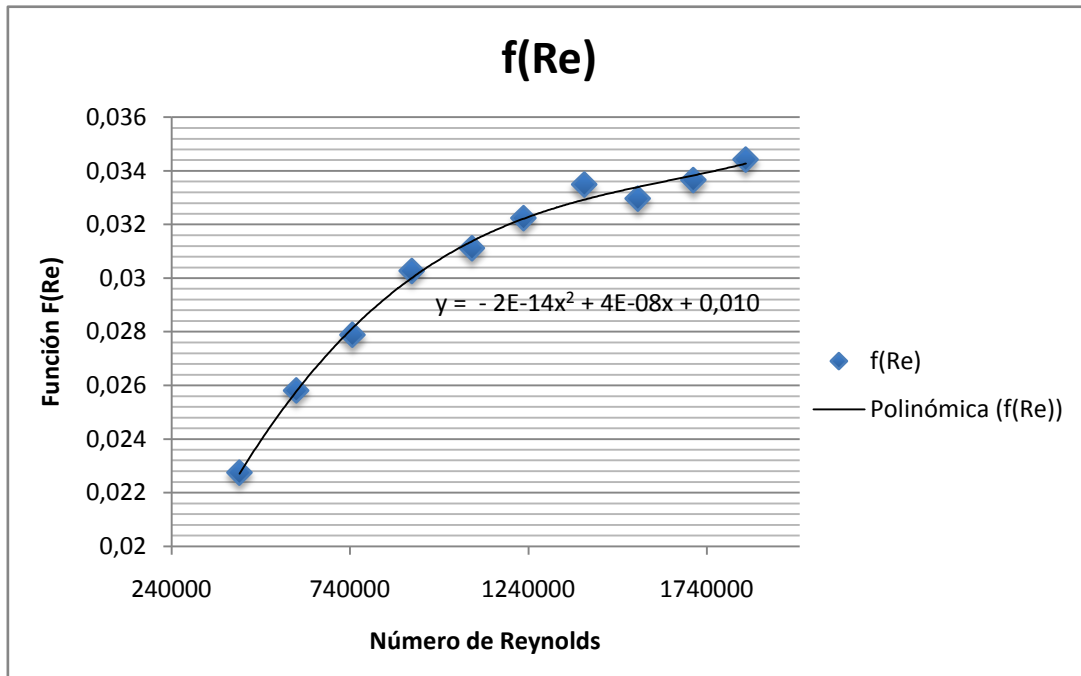


Figura 149 Función $f(Re)$

6. TESTADO Y PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS

En este apartado se ha englobado el tema de los testados de los sensores (verificar que las medidas tomadas son correctas) y las rutinas para la toma de datos.

6.1. TESTADO DE LOS SENSORES

Para garantizar que los diferentes sensores toman las medidas correctamente es necesario realizar una serie de pruebas destinadas a verificar la autenticidad de las medidas. A estas pruebas se las denominan testados de los sensores.

Se tienen hasta cinco sensores diferentes en la bancada, cada uno de los cuales tiene que tomar medidas sobre magnitudes diferentes, por lo que se han llevado a cabo otros tantos testados. Cada una de estas pruebas es diferente a las otras por medir distintas magnitudes, no obstante, tienen en común ciertos aspectos. Primeramente, todos estos experimentos se han realizado simulando al máximo las condiciones en las que se van a encontrar los dispositivos en la bancada. De esta manera se ha garantizado el buen funcionamiento del dispositivo, no solo de forma individual, sino a nivel de integración en la bancada. Por otro lado, para verificar la autenticidad de las medidas se han dispuesto de otros dispositivos externos, y que ya se sabía que medían correctamente, para poder comparar los valores o bien se tenían certezas, basadas en cálculos matemáticos y físicos, de forma que se sabían las medidas que debían dar los sensores.

6.1.1. Célula de carga

La prueba de testado de la célula de carga se ha realizado de la siguiente forma. Inicialmente, se dispone la bancada, montada completamente, cerca de una mesa la cuál dispone de una presa mecánica. En esta presa se sujeta un tubo de metal horizontalmente, de forma que queda justo a la altura del motor de la bancada y a una distancia de unos veinte centímetros.

Por otro lado, se dispone en el ensayo de un peso en forma de disco de plomo y de un soporte para el mismo de los cuales se conocen sus masas. Este soporte posee en su parte superior de un elemento de unión a un cable de acero. El ensayo consiste entonces en enganchar este cable al eje del motor y hacerlo pasar por el tubo de la presa hidráulica. De esta forma se consigue mantener una fuerza constante y conocida (será igual al peso del disco de plomo y su soporte) en la dirección del eje del motor lo que equivale a simular la tracción que va a dar la hélice.

Una vez dispuestos todos los elementos del ensayo se han comprobado que los valores que da la célula de carga se corresponden con el peso de la carga que se estaba utilizando. La prueba se ha repetido con diferentes pesos de forma que podemos afirmar que efectivamente la célula de carga mide correctamente.

6.1.2. Sensor de par

En este caso se procede de forma similar a como se procedió en el anterior sensor, es decir, se utiliza una carga conocida para verificar las medidas del dispositivo. Una vez se tiene la bancada montada completamente, se utiliza el mismo disco de plomo y soporte que en el

ensayo anterior y se enganchan en uno de los tornillos de la galleta (Figura 150). Como se conoce el peso y la distancia del mismo al centro del eje del motor se puede saber el par que ejerce esta fuerza que simula el par del conjunto motor-hélice.

Conociendo entonces el par que se genera se han realizado varios ensayos con diferentes pesos comprobándose que el sensor de par daba en todos ellos las medidas correctas. Se puede decir entonces que el sensor de par está bien calibrado.

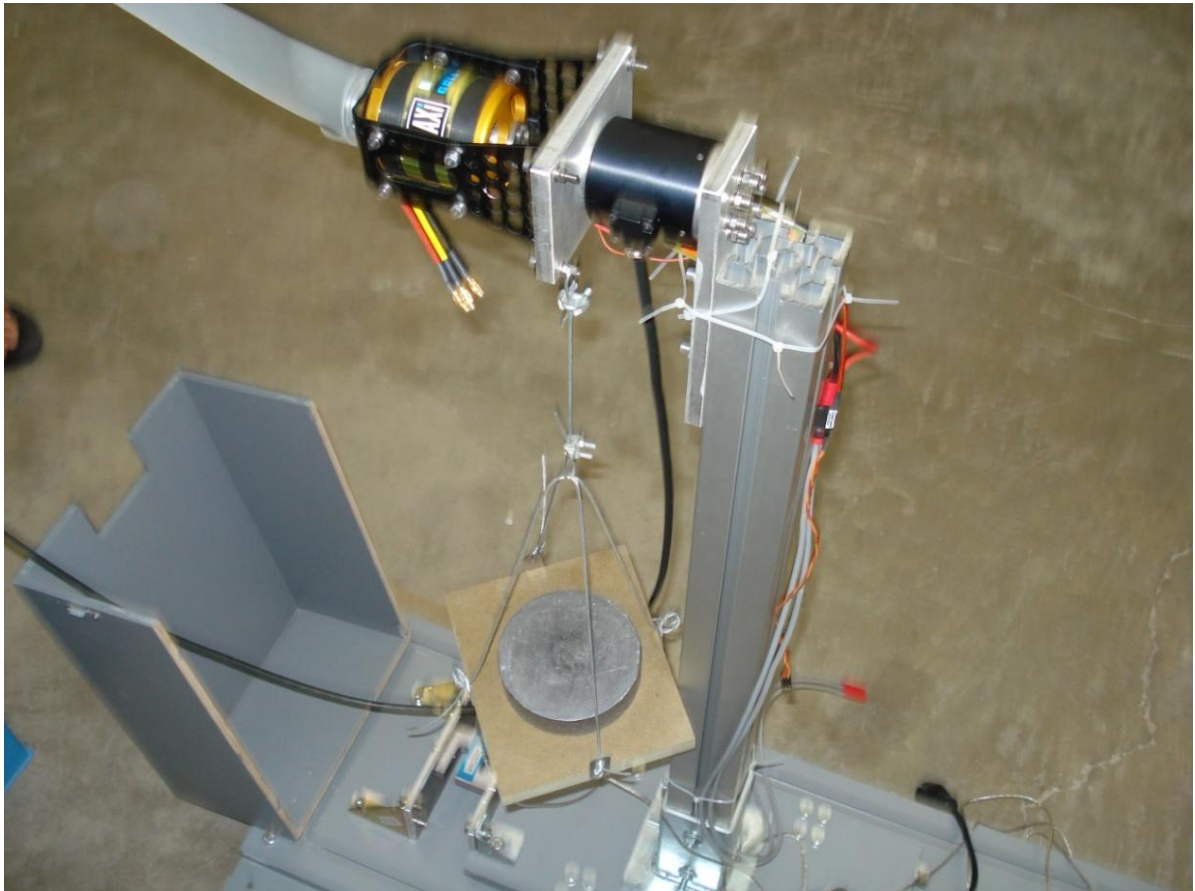


Figura 150 Testado del sensor de par

6.1.3. Sensor de intensidad y voltaje

Para verificar los datos que dan los sensores de intensidad y voltaje se ha utilizado una pinza amperimétrica (Figura 151). El ensayo ha consistido en poner en funcionamiento el motor con su hélice y sus baterías y utilizar la pinza amperimétrica en los cables de las baterías para hallar la intensidad y el voltaje. Se ha variado la velocidad del motor y se han tomado varias medidas para comprobar que los datos de los sensores correspondían efectivamente con los de la pinza amperimétrica.



Figura 151 Pinza amperimétrica (punto (36) de la bibliografía)

6.1.4. Sensor de revoluciones del motor

En este experimento se pone en funcionamiento el motor con su hélice y se utiliza un tacómetro (Figura 152) para obtener una medida, de autenticidad probada, para compararla con la del sensor. Se han tomado varias medidas a diferentes velocidades y en todas ellas las revoluciones dadas por el tacómetro coinciden con las del sensor.



Figura 152 Tacómetro (punto (37) de la bibliografía)

Todos estos experimentos han servido para verificar que las medidas de los sensores utilizados son correctas. Si por cualquier motivo se duda de los datos obtenidos por los dispositivos, estas pruebas se pueden volver a realizar sin más coste que el tiempo para hacerlas.

6.2. PROCEDIMIENTO DE TOMA DE DATOS.

En esta sección se exponen los pasos para la toma de datos en los experimentos de una forma correcta y segura. Esta rutina no depende del tipo de ensayo que se está realizando, ya sea estático o dinámico.

Inicialmente se prepara la bancada para el ensayo en cuestión. Primeramente, se verifica que no existen piezas sueltas en la bancada, algún tornillo aflojado o desperfectos de importancia, todo ello en beneficio de la seguridad. A continuación se acopla al motor a la hélice correspondiente y se monta la bancada para el ensayo estático o el dinámico. En el primero de ellos se monta la bancada túnel y la caja electrónica en la base fija sobre la que se coloca el contrapeso. Y en el segundo caso, se atornilla la bancada túnel al túnel de viento y se coloca el resto de elementos fuera. Finalmente se conectan las baterías y los dispositivos de alimentación externa, y se configura el motor con la JETIBOX.

Una vez está lista la bancada se procede a inicializar la placa Hércules II. Para ello se enciende la misma y se accede a la pantalla de comandos. Dentro de ella, nada más empezar, se tiene que escoger o escribir una serie de cosas que se describen en orden a continuación.

- 1) En la pantalla se escoge la configuración SLACKWARW 6.2.9 de las tres que existen.
- 2) Una vez se configura la Hércules II, en la ventana de comandos se pide el Username Login y el Password. En nuestro caso el nombre de usuario es "root" y la contraseña "Cefiro2009".
- 3) Después de la identificación para tener acceso a la placa integrada se inicializa la interfaz gráfica escribiendo "starx".
- 4) En la interfaz gráfica que se presenta se tienen una serie de iconos por todo el escritorio. Se debe picar uno que tiene aspecto de pantalla de ordenador situado en la parte superior izquierda de la pantalla. Al acceder a este icono se está inicializando la pantalla de comandos para ejecutar órdenes en la placa.
- 5) Dentro de esta nueva pantalla de comandos se escribe "setxkbmap es" (pone el teclado en español) y a continuación "cd Desktop/Motor". Escribiendo esta última orden se accede a la carpeta destinada a ensayos de la bancada y donde está el programa que la placa integrada utiliza para convertir las señales que le llegan de los sensores en la información que deseamos (empuje, par, voltaje...).
- 6) Finalmente para dar comienzo al programa de toma de datos se escribe "./main". Una vez se ha escrito esta última orden la placa muestra una pantalla donde se van apareciendo los datos de los sensores.

En la pantalla de datos aparecen en columnas el empuje, el par, el voltaje, la intensidad, las revoluciones del motor, la posición de palanca (0.21 corresponde a 0% de palanca y 0.79 a 100% de palanca) y la velocidad del túnel de viento, en el caso de ensayos dinámicos, en este mismo orden y en unidades del sistema internacional.

Cuando se pone en marcha el motor, con el uso del sistema de control remoto, la pantalla muestra la evolución de las magnitudes que se están midiendo. Cuando se desea terminar el experimento se baja la palanca al 0% y se presiona en el teclado Ctrl+C para terminar la recogida de datos. Una vez terminado el ensayo se guardan los datos en la carpeta Motor y se desconectan las baterías del motor dando por finalizado el experimento.

7. DATOS (ENSAYOS)

Una vez se terminó la bancada universal se han realizado una serie de experimentos con distintas hélices. De estos experimentos y de datos teóricos o experimentales de otras fuentes se pudo contrastar la información dada por la bancada con la que ya se tenía de los otros medios. Se pudo concluir entonces que los resultados dados por la bancada eran, cuanto menos, muy veraces.

De estos ensayos se sacaron los parámetros buscados para el cálculo de las actuaciones y los consumos, además de su evolución con respecto a otros parámetros. Se pone como ejemplo el siguiente caso.

En los primeros experimentos se ha utilizado la hélice APC 22x10E sobre la cual se quería obtener sus características en conjunto con el motor que se ha estado utilizando. Por otro lado, los ensayos se llevaron a cabo con el primer sistema de telemetría que se ha visto en el proyecto debido a que el segundo todavía no estaba operativo. Operando como se dicta en el capítulo 6 y realizando parte de la toma de datos de forma manual (los sensores de intensidad, voltaje y revoluciones del sistema de telemetría 1 no están integrados con la placa Hércules II) se realizaron los primeros ensayos. Para mayor información consulte el punto (1) de la bibliografía que constituye el PFC de Alberto García Martínez, proyecto que pudo completarse gracias a la construcción de la bancada.

Se han realizado tanto ensayos estáticos como dinámico en el túnel de viento. En concreto, para un ensayo dinámico manteniendo constante las revoluciones del motor en 3500 rpm se han obtenido los resultados que se muestran en la Figura 153 y la Figura 154.

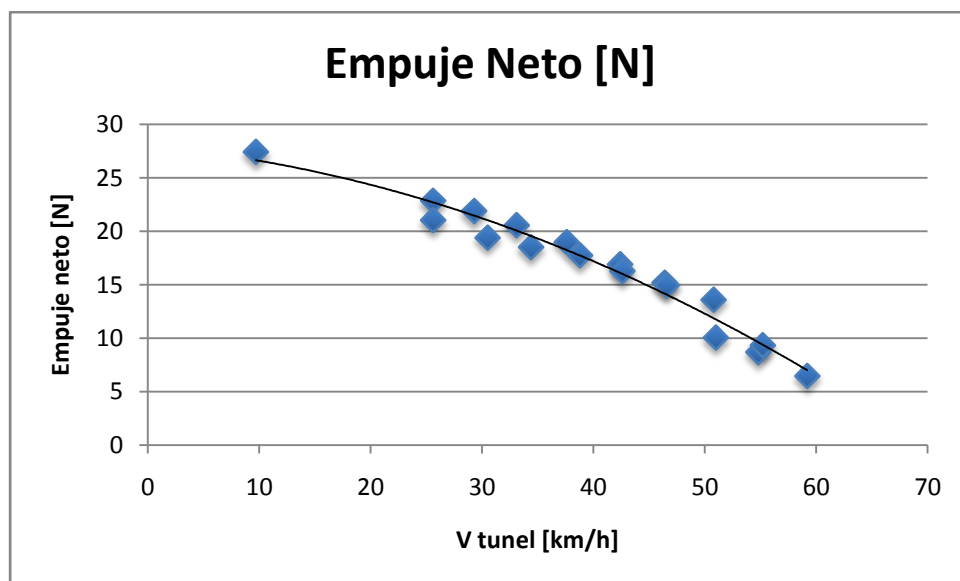


Figura 153 Empuje Neto

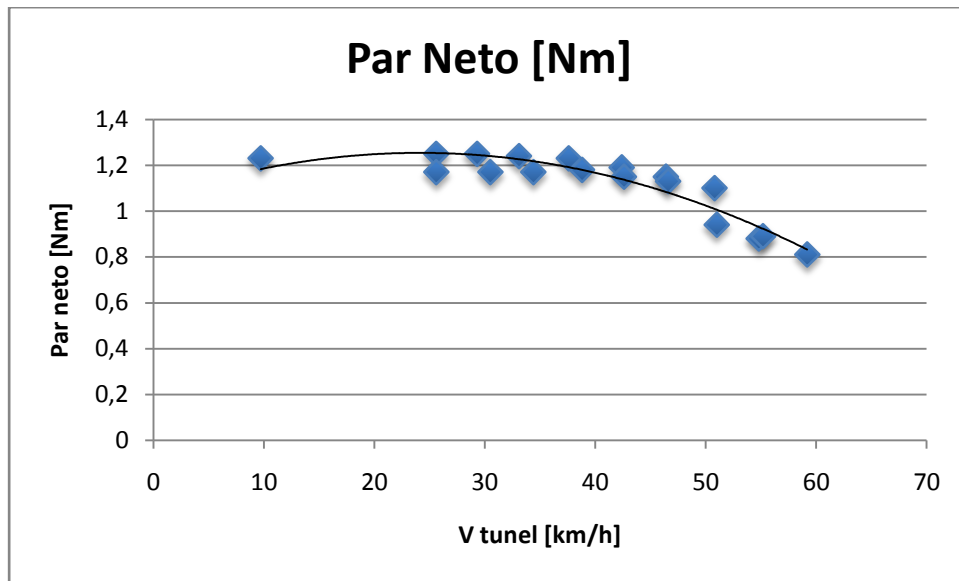


Figura 154 Par Neto

Los resultados que se han tomado de intensidad, voltaje y revoluciones (se comprobó por el sensor que se mantenían fijas como se deseaba) se han utilizado para hallar los coeficientes de tracción, par y potencia a través de sus definiciones. Con estos cálculos se obtienen la Figura 155 y la Figura 156.

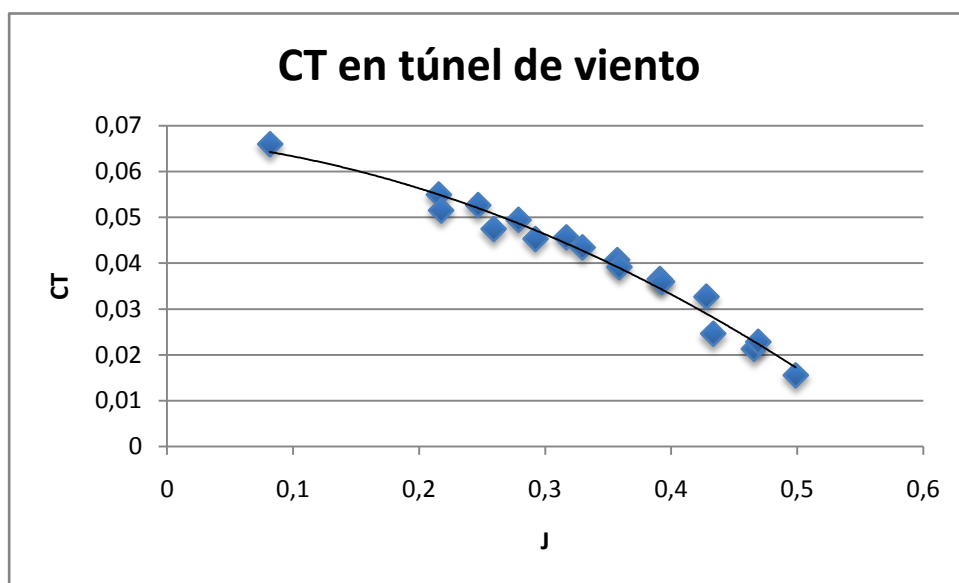


Figura 155 CT en túnel de viento

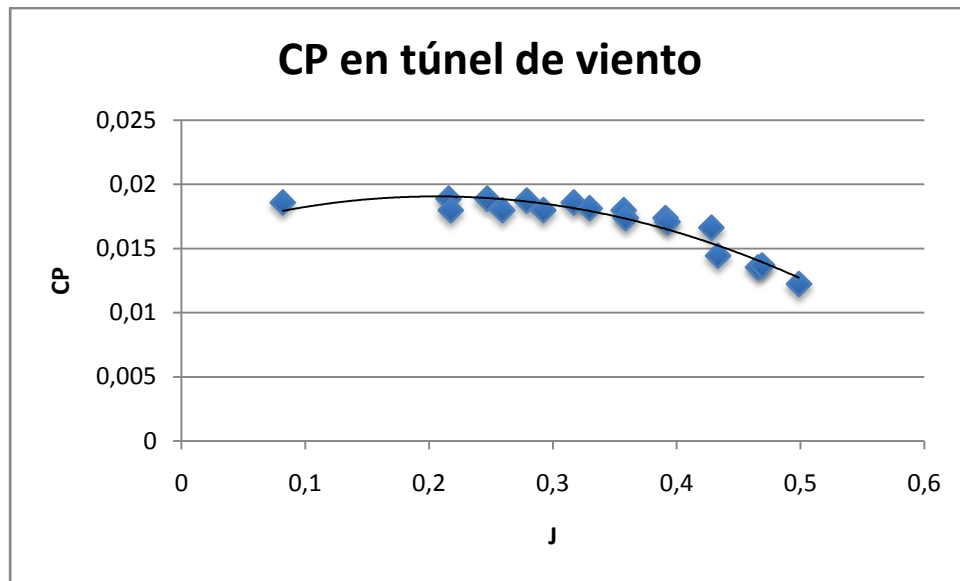


Figura 156 CP en túnel de viento

Nota: las definiciones de los coeficientes así como el significado del parámetro J de las gráficas pueden encontrarse en el punto (1) de la bibliografía. En ese documento al que se remite podrá encontrarse la información necesaria sobre los parámetros que se necesitan para caracterizar las hélices y las plantas propulsoras, como se deben hallar a partir de otros y sus valores normales. Baste decir en este proyecto que son valores para determinar las actuaciones de la planta propulsora y que se obtienen de los datos proporcionados por la bancada.

Por otro lado, las distribuciones del coeficiente de tracción y potencia muestran tendencias coherentes con los resultados esperados, así como los valores de empuje y par. Esto nos da la certeza de que la bancada funciona correctamente y no hay errores de gran importancia.

Cabe también señalarse que después de estos primeros experimentos se han llevado a cabo una batería de ensayos estáticos y en el túnel de viento. Dichos ensayos han sido utilizados como base para el PFC de Elio Carrasco y en ellos se ha podido comprobar el buen funcionamiento de la bancada.

8. CONCLUSIONES Y MEJORAS.

- Conclusiones

Los objetivos de este proyecto eran la obtención de un aparato capaz de hallar los parámetros de un conjunto motor-hélice mediante la realización de ensayos y la toma de datos. Puede decirse que, desde un punto de vista objetivo, se han alcanzado todos estos objetivos.

Para caracterizar la planta propulsora y motora era necesario poder hallar el par y el empuje del conjunto motor-hélice, las revoluciones de la hélice, la potencia consumida por el motor y el voltaje y la intensidad de la corriente proporcionada al motor por las baterías. Todo ello se ha conseguido con los sensores expuestos en el capítulo 4, con una veracidad probada a través de testados para cada dispositivo.

Por otro lado, se ha conseguido un diseño accesible, versátil y económico como se buscaba desde el principio. En el diseño se han utilizado los materiales más convenientes en cada una de sus partes consiguiéndose así una estructura de integridad probada mediante cálculos de tensiones y desplazamientos. Además, el diseño elegido también ha permitido que se consigan realizar experimentos estáticos y dinámicos, uno de los más importantes objetivos del proyecto.

También hay que destacar que la bancada es un aparato de eficiencia y funcionamiento ya probados. Esto es así pues lleva en funcionamiento un año, hasta la fecha actual, no presentando ningún problema y dando buenos resultados, alcanzándose velocidades del túnel de viento de hasta 90 km/h. Además se ha comprobado que no existen grietas en las placas en la zona de los agujeros.

- Mejoras

En cuanto a las mejoras pueden destacarse dos importantes y otra menos relevante. La primera de ellas es que debería haberse hecho un refuerzo estructural en la pieza de la bancada fija, pues durante los ensayos, debido al peso de la bancada y las fuerzas del conjunto motor-hélice, la pieza flectaba. Es necesario por tanto reforzar la estructura mediante algún medio. Una opción es atornillar vigas de aluminio debajo de la pieza en cuestión para garantizar una mejor resistencia a la flexión. Pero sin ninguna duda, la mejor alternativa es quitar los apoyos de la estructura y dejar la base fija directamente apoyada en el suelo y realizar avellanados para los tornillos. De esta forma la pieza no podrá flectar ya que el propio suelo se lo impide y no hay riesgo de que se mueva hacia adelante por el efecto de la tracción, porque el peso de la estructura y el contrapeso crean la suficiente fuerza de rozamiento como para contrarrestarla.

La segunda mejora es en referencia a las baterías. Durante los ensayos se constató que dos baterías eran insuficientes y que además era conveniente que se refrigeraran de alguna manera. Desgraciadamente el diseño se pensó para que la bancada túnel fuera lo más pequeña posible (para disminuir su resistencia en el túnel de viento y perturbar lo menos posible la corriente incidente) por lo que solo se dejó espacio para dos o tres baterías. Para solucionar este problema se han propuesto dos soluciones. Primeramente se pueden trasladar las baterías fuera de la bancada túnel al exterior asumiendo las pérdidas de potencia que ello implicaba pero permitiendo tener un número ilimitado de baterías y, además, teniendo la

posibilidad de refrigerarlas. Esta opción es la más sencilla y fácil de implementar y resolvería de una forma rápida el problema. La segunda solución es más compleja pero más elegante. Ésta consiste en alargar la base fija de la bancada túnel por detrás y poner en esta posición una caja transpirable (sus superficies están llenas de agujeros) cuyas dimensiones sean las adecuadas para contener las baterías necesarias. Al tener otro cuerpo exterior en la bancada aumentará la resistencia y se perturbará más la corriente pero como la nueva parte está por detrás de la hélice y a distinta altura no tiene por qué representar un problema.

La otra mejora menos importante es la consecución de unas carcasas con una forma más aerodinámica. Esto tendría como consecuencias una menor resistencia en el túnel de viento y que se perturbará menos la corriente.

A parte de estas mejoras siempre se pueden realizar más (siempre es posible mejorar todo lo que se hace). Otra posible mejora sería la de asentar mediante velcro y tornillería toda la electrónica dentro de la caja electrónica ya que en la actualidad se tienen todos los componentes sobre las mesas de trabajo.

Con todas estas mejoras darían a la bancada unas características mejores para la realización de ensayos y pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Martínez, Alberto García.** *Caracterización de un sistema de propulsión por hélice con motor eléctrico*. Sevilla : Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Aeorospacila y Mecánica de Fluidos, 2011.
2. **Lucena, Andrés Fernández.** *Reporte interno del Céfiro*. Sevilla : Universidad de Sevilla, Departamento de Ingeniería Aeoroespacila y Mecánica de Fluidos, 2010.
3. **www.wikipedia.com.** [En línea] [Citado el: 23 de Junio de 2012.] <http://en.wikipedia.org/wiki/Torque>.
4. **Roncero, Sergio Esteban.** *Foto de Bancada* . [Imagen JPG] Universidad de Chicago (USA) : Grupo de trabajo, 2005.
5. **web, Administrador de la.** **www.moskitorc.com.** [En línea] Foro del Club de Aeromodelismo Mosquito R.C. [Citado el: 23 de Junio de 2012.] <http://www.moskitorc.com/phpBB3/viewtopic.php?f=3&t=380&sid=a07870d3a470e50dfb4889bb21d5258b>.
6. **web, Administrador de.** <http://www.discoverarmfield.co.uk>. [En línea] Armfield. [Citado el: 23 de Junio de 2012.] <http://www.discoverarmfield.co.uk/data/esp/c15/>.
7. **Selig, John B. Brandt y Michael S.** *Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers*. Urbana (Illinois, USA) : Universidad de Illinois de Urbana-Champaign, 2011.
8. **Insagurbe, Eduardo Torrecilla.** *El gran libro de Catia*. s.l. : MARCOMBO, S.A. 9788426716637.
9. **INC., Precision Motion Industries.** *AMT Linear Guideway*. Taiwan : Precision Motion Industries INC., 2004.
10. **web, Administrador de la.** **Alu-Stock.** [En línea] [Citado el: 11 de Julio de 2012.] <http://www.alu-stock.es/>.
11. —. **Leroy Merlin.** [En línea] [Citado el: 11 de Julio de 2012.] <http://www.leroymerlin.es/>.
12. —. <http://www.leroymerlin.es>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.leroymerlin.es/productos/ferreter%C3%ADa/ferreter%C3%ADa-para-muebles/pernios-y-bisagras/listvariante/variante.html?uuid=284848b1-a084-4e53-a401-9d832fcf9d7a&idfal=0130205>.
13. —. **www.hz-lianchi.com.** [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://hz-lianchi.com/en/main.asp>.
14. —. <http://es.wikipedia.org>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>.
15. **administrador, Web de.** <http://www.actiweb.es>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.actiweb.es/aluminio/>.

16. **web, Administrador de la.** Broncesval S.A. [En línea] [Citado el: 11 de Julio de 2012.] <http://www.broncesval.com/>.
17. —. <http://es.wikipedia.org>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] http://es.wikipedia.org/wiki/Tablero_de_fibra_de_densidad_media.
18. **web, Administrador de.** www.reformasguaita.blogspot.com.es. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://reformasguaita.blogspot.com.es/2009/03/informe-dm-tablero-de-fibra-de-madera.html>.
19. **web, Administrador de la.** <http://es.wikipedia.org>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://es.wikipedia.org/wiki/Contrachapado>.
20. —. <http://www.zonagravedad.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.zonagravedad.com/modules.php?name=News&file=print&sid=434>.
21. **web, Administrador de.** Suminox Salnes. [En línea] [Citado el: 11 de Julio de 2012.] <http://www.suminox-salnes.com/>.
22. **web, Administrador de la.** <http://www.interfaceforce.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.interfaceforce.com/ssm-sealed-s-type-load-cell-us-metric-p-29.html>.
23. **web, Administrador de.** <http://www.interfaceforce.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.interfaceforce.com/mrt2-miniature-reaction-torque-transducer-p-74.html>.
24. **web, Administrador de la.** <http://www.kitsmodelismo.es>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.kitsmodelismo.es/emisoras-rc-de-modelismo-y-radio-control/290-emisora-futaba-f9-9cpcm-supersintetizada-fss.html>.
25. **web, Administrador de.** <http://www.futaba-rc.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.futaba-rc.com/receivers/futl7610.html>.
26. —. <http://www.directindustry.es>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.directindustry.es/prod/diamond-systems/chasis-industriales-reforzados-54967-594979.html>.
27. **model, Jeti.** <http://jetimodel.com/>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.]
28. **web, Administrador de la.** Alldatasheet. [En línea] [Citado el: 11 de Julio de 2012.] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/172078/LEM/LTS25-NP.html>.
29. —. <http://octopart.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://octopart.com/lts%2B25-np-lem-2138439>.
30. —. <http://www.designnews.pl>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.designnews.pl/menu-gorne/arttykul/article/ti-prezentuje-wzmacniacz-pomiarowy/>.

31. —. <http://octopart.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.]
<http://octopart.com/a1120eua-t-allegro-9567716>.
32. —. <http://www.alibaba.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.]
http://www.alibaba.com/product-gs/530150210/A3212ELHLT_T_IC_SWITCH_HALL_EFFECT.html.
33. **Abascal, José Domínguez.** *Apuntes de Teoría de Estructuras*. Sevilla (España) : Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad de Sevilla, 2006.
34. **Rymer, Daniel P.** *Aircraft Design*. s.l. : Amer Inst Of Aeronautics &, 2010. ISBN: 1563478293.
35. **Sánchez-Pastor, Antonio Barrero Ripoll y Miguel Pérez-Saborid.** *Fundamentos y Aplicaciones de la Mecánica de Fluidos*. Sevilla : Mc Graw Hill, 2005. ISBN: 84-481-9890-5.
36. **web, Administrador de.** <http://www.forolinternas.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] <http://www.forolinternas.com/viewtopic.php?f=10&t=1087>.
37. **web, Administrador de la.** <http://www.seguridadplus.com>. [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2012.] http://www.seguridadplus.com/tacometro_digital_1215_1.htm.
38. **web, Adminstrador de la.** AXI Model Motors. <http://www.modelmotors.cz>. [En línea] [Citado el: 9 de Julio de 2012.]
<http://www.modelmotors.cz/index.php?page=61&product=5345%20HD&serie=16&line=GOLD>
.
39. —. A8 Power Company. [En línea] [Citado el: 9 de Julio de 2012.]
<http://www.a8power.com/ProductShow.asp?id=15>.

APÉNDICE A

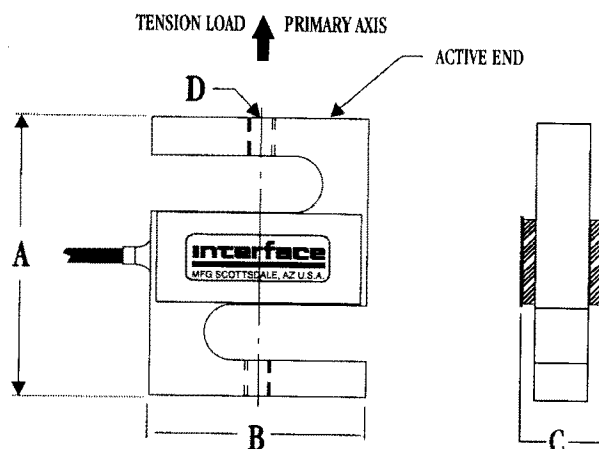
ÍNDICE DE DISPOSITIVOS

CÉLULA DE CARGA SSM.....	1
REACTION TORQUE TRANSDUCER MRT2	3
ACONDICIONADOR DE SEÑAL SGA	4
A1120 EUA-T	5
A3212ELHLT-T.....	18

INSTALLATION DIMENSIONS

INCHES
(mm)

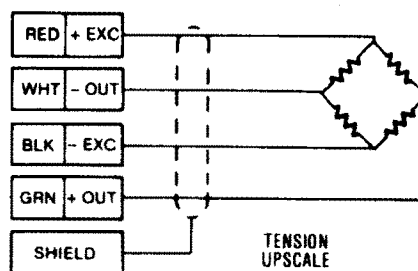
MODEL		A	B	C	D
SSM-50	in.	2 1/2	2	7/8	1/4 - 28 UNF-2B
	mm	64	51	22	1/4 deep, top & bottom
SSM-100, 150, 250	in.	2 1/2	2	3/4	1/4 - 28 UNF-2B
	mm	64	51	19	1/4 deep, top & bottom
SSM-500, 750 1000, 2000, 3000	in.	3	2	1 1/4	1/2 - 20 UNF-2B
	mm	76	51	32	1/2 deep, top & bottom
SSM-5000	in.	3 1/2	2 1/2	1 3/4	5/8 - 18 UNF-2B
	mm	89	64	44	5/8 deep, top & bottom



ELECTRICAL INFORMATION

The SSM-50 thru SSM-250 is supplied with a 4-conductor shielded cable (AWG28) 10ft. (3m) long. The SSM-500 thru SSM-5000 load cells are supplied with rugged cable (PVC Jacket AWG22) 10ft. (3m) long or a Bendix PC04E-10-6P connector. A PC06W-10-6S mating connector is available at additional cost.

CONNECTOR (SSM-500 thru 5000)		CABLE (ALL MODELS)	
PIN	FUNCTION	COLOR	FUNCTION
A	+Excitation	Red	+Excitation
B	+Output	Green	+Output
C	-Output	White	-Output
D	-Excitation	Black	-Excitation
E	No Connection	Shield	No Connection
F	No Connection		



Wiring Code Complies with ISA S37.8 "Specification and Tests for Strain Gage Force Transducers" and SMA Load Cell Terminology.

APPLICATION NOTES

- The Sealed Super-Mini load cell is specially designed for outdoor usage and thus can be used in scale pits and batching plants or other locations that are directly exposed to the weather.
- At least one diameter thread engagement is desirable; normal engagement is shown below:
 SSM-50 thru SSM-250: 1/4" (6mm) to 1/2" (12mm)
 SSM-500 thru SSM-3000: 1/2" (12mm) to 5/8" (16mm)
 SSM-5000: 5/8" (16mm) to 3/4" (19mm)
- SSM-50 thru and including SSM-1000 are anodized aluminum. All other units are electroless nickel plated steel.

Bottoming out of the mounting stud can cause irreparable damage to the load cell.

- Jam nuts may be used; however, react torque only on the load cell structure adjacent to the jam nut and limit torque to:

SSM-50:	20-inch pounds	(2.2Nm)
SSM-100 thru SSM-250:	40-inch pounds	(4.5Nm)
SSM-500 thru SSM-1000:	200-inch pounds	(22.5Nm)
SSM-2000 thru SSM-3000:	800-inch pounds	(90Nm)
SSM-5000:	1000-inch pounds	(113Nm)

- The force to be measured should be applied to the active end of the cell to eliminate possible errors due to cable interaction. The active end of the cell is separated from the cable/connector side by the slot (cutout) in the flexure (the serial number is always shown on the inactive end.)

PERFORMANCE DATA

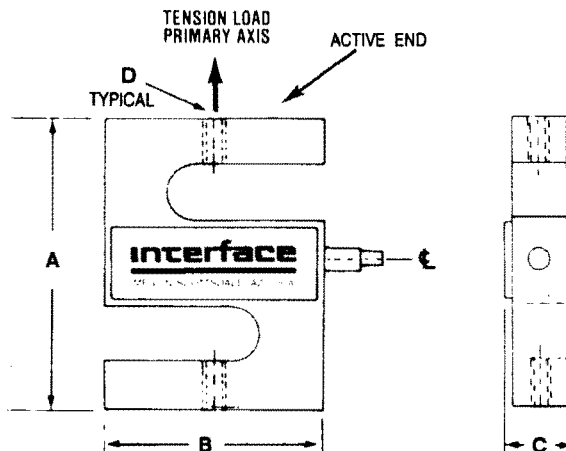
Rated Output-mV/V Nominal	3
Input Resistance-Ohms	350 ± 50/-3.5
Output Resistance-Ohms	350 ± 3.5
Recommended Excitation-VDC	10
Non-Linearity-% FS	< ±0.05
Hysteresis-% FS	< ±0.03
Temperature Range, Compensated-°F (-15 to 65°C)	0 to 150
Temperature effect on zero-% Rated Output/100°F (55.6°C)	±0.15
Zero Balance-% Rated Output	< ±1

SEALED SUPER-MINI LOAD CELL

INTERFACE, INC.
7401 E. Butherus Dr.
Scottsdale, Arizona 85260 U.S.A.
Telephone (480) 948-5555 • FAX: (480) 948-1924
WARRANTY & CERTIFICATION STATEMENT ON OTHER SIDE

INSTALLATION DIMENSIONS

MODEL	A	B	C	D
SSM-200N	64	51	22	M6 x 1 - 6H
SSM-500N, 1000N	64	51	19	M6 x 1 - 6H
SSM-2000N, 5000N, 10kN	76	51	32	M12 x 1.75 - 6H
SSM-1-20kN	89	64	44	M16 x 2 - 6H

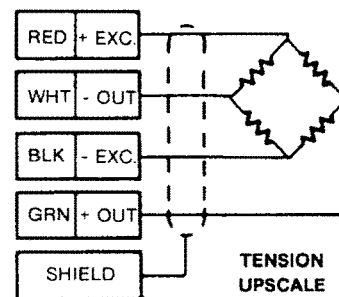


ELECTRICAL INFORMATION

The SSM-200N through SSM-1000N are supplied with a 4-conductor shielded cable (AWG 28) 3m long. The SSM-2000N through 20kN load cells are supplied with a rugged cable (PVC Jacket AWG 22) 3m long, or a Bendix PC04E-10-6P connector. A mating connector, PC06W-10-6S is available at additional cost.

Wiring Color code complies with ISA S37.8 "Specifications and Tests for Strain Gage Force Transducers" and SMA Load Cell Terminology.

Connector (SSM-2000N-20kN)		Cable (All Models)	
Pin	Function	Color	Function
A	+ Excitation	Red	+ Excitation
B	+ Output	Green	+ Output
C	- Output	White	- Output
D	- Excitation	Black	- Excitation
E	No Connection	Shield	No Connection
F	No Connection		



APPLICATION NOTES

- The Sealed Super-Mini load cell is specifically designed for outdoor usage and thus can be used in scale pits and batching plants or other locations that are directly exposed to the weather.
- At least one diameter thread engagement is desirable; normal engagement is shown below:

SSM-200N, SSM-500N, SSM-1000N	6mm to 12mm
SSM-2000N, SSM-5000N, SSM-10kN	12mm to 16mm
SSM-20kN	16mm to 20mm

- Jam nuts may be used, however care should be exercised to not apply excessive torque across the load cell. Torque should be reacted against the load cell structure immediately adjacent to the jam nut and should not exceed the following recommended torque:

SSM-200N	2.2N·m (0.2 kg·m)
SSM-500N, SSM-1000N	4.5N·m (0.5 kg·m)
SSM-2000N, SSM-5000N	22.5N·m (2.3kg·m)
SSM-10kN	90N·m (9.2 kg·m)
SSM-20kN	113N·m (12 kg·m)
- The force to be measured should be applied to the active end of cell to eliminate possible errors due to cable interaction. The active end of the cell is separated from the cable/connector side by the slot (cutout) in the flexure (the serial number is always shown on the inactive side).

BOTTOMING OUT OF THE MOUNTING STUD CAN CAUSE IRREPARABLE DAMAGE TO THE LOAD CELL.

PERFORMANCE DATA

Input Resistance — Ohms 350 + 50/-3.5
 Output Resistance — Ohms 350 ± 3.5
 Recommended Excitation — VDC 10
 Maximum Excitation — VDC or VAC 15
 Non-Linearity — % Rated Output < ± 0.05
 Hysteresis — % Rated Output < ± 0.03
 Temp. Range Compensated — °C -15 to 65
 Temperature effect on zero —
 % Rated Output/55 °C < ± 0.15
 Zero Balance — % Rated Output < ± 1

METRIC SEALED SUPER-MINI LOAD CELL

INTERFACE, INC.
 7401 E. Butherus Dr.
 Scottsdale, Arizona 85260 U.S.A.
 Telephone (480) 948-5555 • FAX (480) 948-1924
 www.interfaceforce.com

WARRANTY & CERTIFICATION STATEMENT ON OTHER SIDE

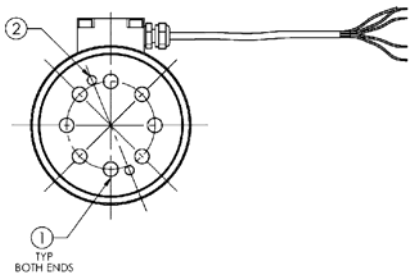
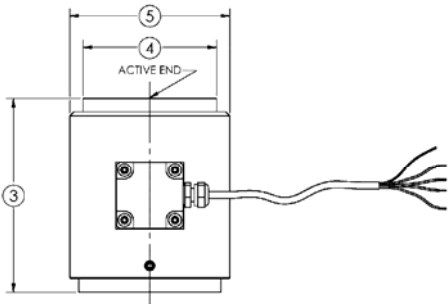
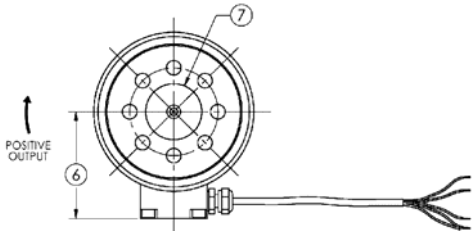
Model MRT2 Miniature Reaction Torque Transducer

- Capacities from 10 to 50 Nm
- Proprietary Interface temperature compensated strain gages
- Small size – 70 x 60 mm (2.75 x 2.25 in)
- Excellent linearity and repeatability
- Low deflection – high torsional stiffness



DIMENSIONS

See Drawing	CAPACITY (Nm)
	10, 20, 50
	Inch (mm)
(1)	M5 x 0.8 – 6H x 0.32 Deep 8 PL EQ SP on 1.240 B.C.
(2)	.125 + .0005/- .0000 2 PL EQ SP on 1.375 B.C.
(3)	2.75
(4)	1.875
(5)	2.25
(6)	1.50
(7)	.7874 + .0008/- .0000



SPECIFICATIONS

Standard Capacities (Nm)	10	20	50
Equivalent (in-lb)	88.5	177	443
ACCURACY- (MAX ERROR)			
Nonlinearity-% FS	±0.10		
Hysteresis-% FS	±0.10		
Nonrepeatability-% RO	±0.05		
TEMPERATURE			
Effect on Zero- % /100°F	±0.20		
Effect on Output- %RO/100°F	±0.10		
Operating Range-°F	-65 to 200		
Compensated Range-°F	15 to 115		
ELECTRICAL			
Output-mV/V	2.00 ±0.30		
Excitation – VDC MAX	20		
Bridge Resistance – Ohms	700 ±7		
Electrical Connection	5' integral cable		
MECHANICAL			
Safe Torsion – % RO	150	150	150
Deflection at Capacity – rad	0.003	0.003	0.002
Overhung Moment – %CAP MAX	100	100	100
Shear – N MAX	333	400	900
Material	Aluminum		

MRT2
7/16/10

Model SGA AC/DC Powered Signal Conditioner



- User selectable analog output $\pm 10V$, $\pm 5V$, 0-10V, 0-5V, 0-20 mA, 4-20 mA
- 110 VAC, 220 VAC OR 18-24 VDC power
- Switch selectable filtering 1 Hz to 5 kHz
- Single channel powers up to 4 transducers
- Selectable full scale input range 0.06 to 30 mV/V
- Switch selectable offset $\pm 70\%$ FS
- Sealed ABS enclosure

SPECIFICATIONS

POWER

AC 110 VAC 60 Hz
or 220 VAC 50 Hz
DC 18-24 VDC

EXCITATION

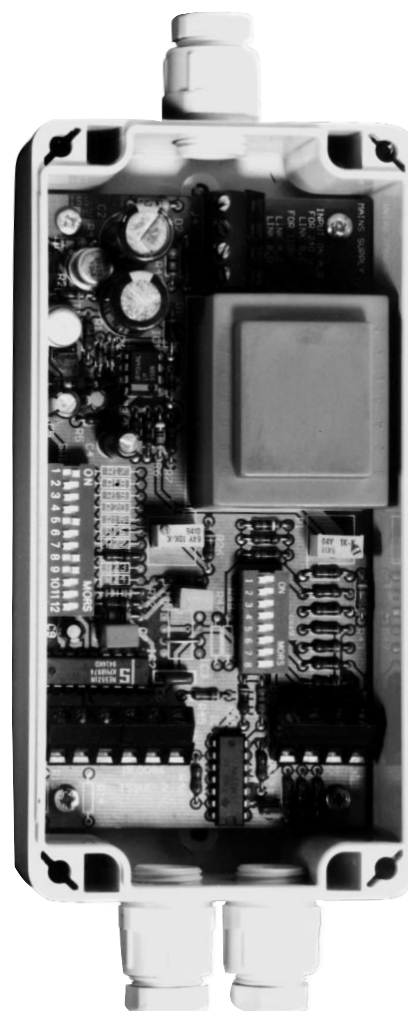
Voltage 10 VDC $\pm 5\%$
Current 118 mA

PERFORMANCE

Output $\pm 10V$, $\pm 5V$ Bipolar
0-5V, 0-10V Unipolar
0-20 mA, 4-20 mA Unipolar
Input Range ± 0.06 to ± 30 mV/V
Switch selectable
Max Bandwidth 6 kHz
Filter 1 Hz to 5 kHz
Switch selectable
Offset $\pm 70\%$ FS
Course and fine adjust
Nonlinearity 0.03% FS
Span Temp. Coefficient 0.004%/°F Max
Zero Temp. Coefficient 0.5 μV /°F Max

ENVIRONMENTAL

Operating Temp. $+32^\circ F$ to $+122^\circ F$
Dimensions 6.3 in X 3.1 in X 2.2 in
Enclosure Sealed ABS case,
Compression cable seals



ACCESSORIES

AC Power Cord (PWRCRD-SGA-110)

Chopper Stabilized Precision Hall Effect Switches

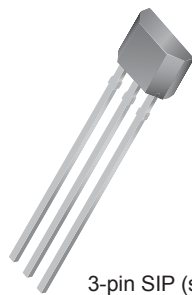
Features and Benefits

- Unipolar switchpoints
- Resistant to physical stress
- Superior temperature stability
- Output short-circuit protection
- Operation from unregulated supply
- Reverse battery protection
- Solid-state reliability
- Small package sizes

Packages:



3-pin SOT23W (suffix LH)



3-pin SIP (suffix UA)

Not to scale

Description

The A1120, A1121, and A1125 Hall-effect, unipolar switches are extremely temperature-stable and stress-resistant sensor ICs, especially suited for operation over extended temperature ranges to 150°C. Superior high-temperature performance is made possible through dynamic offset cancellation, which reduces the residual offset voltage normally caused by device overmolding, temperature dependencies, and thermal stress.

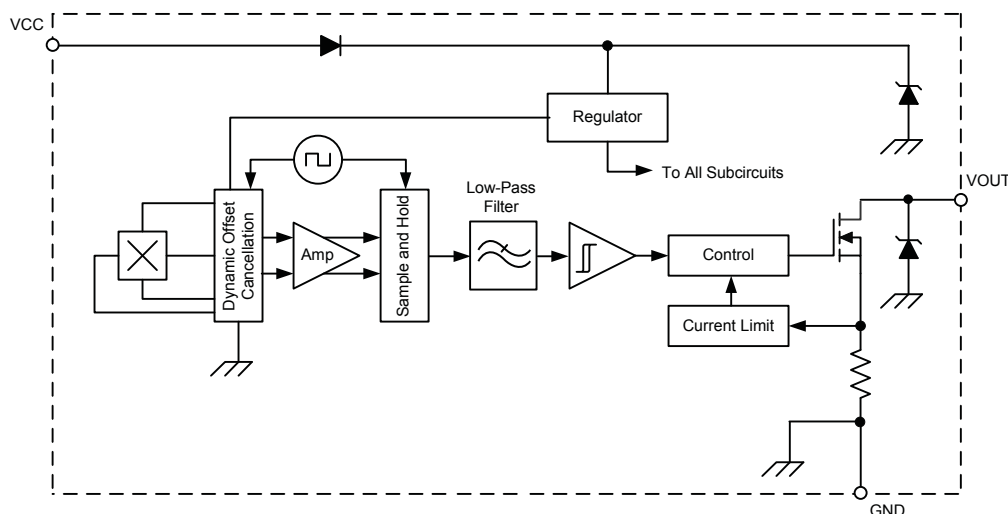
Each device includes on a single silicon chip a voltage regulator, Hall-voltage generator, small-signal amplifier, chopper stabilization, Schmitt trigger, and a short-circuit protected open-drain output to sink up to 25 mA.

An on-board regulator permits operation with supply voltages of 3 to 24 V. The advantage of operating down to 3 V is that the device can be used in 3 V applications or with additional external resistance in series with the supply pin for greater protection against high voltage transient events.

For the A1120 and A1121, a south pole of sufficient strength turns the output on. Removal of the magnetic field turns the output off. The A1125 is complementary, in that for these devices, a south pole turns the A1125 output off, and removal of the magnetic field turns the output on.

Two package styles provide a magnetically optimized package for most applications. Package type LH is a modified SOT23W, surface mount package, while UA is a three-lead ultra-mini SIP for through-hole mounting. Each package type is lead (Pb) free (suffix, -T), with a 100% matte tin plated leadframe.

Functional Block Diagram





Selection Guide

Part Number	Packing ¹	Mounting	Ambient, T _A	Switchpoints (Typ.)		Output In South (Positive) Magnetic Field
				B _{OP}	B _{RP}	
A1120ELHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount	-40°C to 85°C	35	25	On (logic low)
A1120ELHLT-T ²	7-in. reel, 3000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount				
A1120EUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	3-pin SIP through hole				
A1120LLHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount	-40°C to 150°C			
A1120LLHLT-T ²	7-in. reel, 3000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount				
A1120LUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	3-pin SIP through hole				
A1121ELHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount	-40°C to 85°C	95	70	
A1121ELHLT-T ²	7-in. reel, 3000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount				
A1121EUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	3-pin SIP through hole				
A1121LLHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount	-40°C to 150°C			
A1121LLHLT-T ²	7-in. reel, 3000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount				
A1121LUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	3-pin SIP through hole				
A1125ELHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount	-40°C to 85°C	35	25	Off (logic high)
A1125EUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	3-pin SIP through hole				
A1125LLHLX-T	13-in. reel, 10000 pieces/reel	3-pin SOT23W surface mount	-40°C to 150°C			
A1125LUA-T	Bulk, 500 pieces/bag	3-pin SIP through hole				

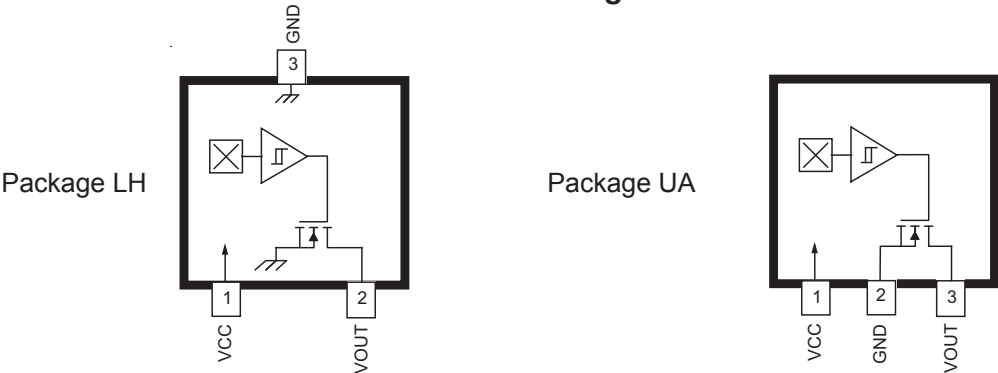
¹Contact Allegro for additional packing options.

²Available through authorized Allegro distributors only.

Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Forward Supply Voltage	V_{CC}		26.5	V
Reverse Supply Voltage	V_{RCC}		−30	V
Output Off Voltage	V_{OUT}		26	V
Continuous Output Current	I_{OUT}		25	mA
Reverse Output Current	I_{ROUT}		−50	mA
Operating Ambient Temperature	T_A	Range E	−40 to 85	°C
		Range L	−40 to 150	°C
Maximum Junction Temperature	$T_J(max)$		165	°C
Storage Temperature	T_{stg}		−65 to 170	°C

Pin-out Diagrams



Terminal List

Name	Description	Number	
		Package LH	Package UA
VCC	Connects power supply to chip	1	1
VOUT	Output from circuit	2	3
GND	Ground	3	2

ELECTRICAL CHARACTERISTICS Valid over full operating voltage and ambient temperature ranges; unless otherwise noted

Characteristics	Symbol	Test Conditions		Min.	Typ. ¹	Max.	Unit ²
Electrical Characteristics							
Forward Supply Voltage	V _{CC}	Operating, T _J < 165°C		3	–	24	V
Output Leakage Current	I _{OUTOFF}	A1120, A1121	V _{OUT} = 24 V, B < B _{RP}	–	–	10	μA
		A1125	V _{OUT} = 24 V, B > B _{OP}	–	–	10	μA
Output Saturation Voltage	V _{OUT(SAT)}	A1120, A1121	I _{OUT} = 20 mA, B > B _{OP}	–	185	500	mV
		A1125	I _{OUT} = 20 mA, B < B _{RP}	–	185	500	mV
Output Current Limit	I _{OM}	A1120, A1121	B > B _{OP}	30	–	60	mA
		A1125	B < B _{RP}	30	–	60	mA
Power-On Time ³	t _{PO}	V _{CC} > 3.0 V, B < B _{RP(min)} – 10 G, B > B _{OP(max)} + 10 G		–	–	25	μs
Chopping Frequency	f _C			–	800	–	kHz
Output Rise Time ^{3,4}	t _r	R _L = 820 Ω, C _S = 20 pF		–	0.2	2	μs
Output Fall Time ^{3,4}	t _f	R _L = 820 Ω, C _S = 20 pF		–	0.1	2	μs
Supply Current	I _{CC(ON)}	A1120, A1121	V _{CC} = 12 V, B > B _{OP}	–	–	4	mA
		A1125	V _{CC} = 12 V, B < B _{RP}	–	–	4	mA
	I _{CC(OFF)}	A1120, A1121	V _{CC} = 12 V, B < B _{RP}	–	–	4	mA
		A1125	V _{CC} = 12 V, B > B _{OP}	–	–	4	mA
Reverse Supply Current	I _{RCC}	V _{RCC} = –30 V		–	–	–5	mA
Supply Zener Clamp Voltage	V _Z	I _{CC} = 5 mA; T _A = 25°C		28	–	–	V
Zener Impedance	I _Z	I _{CC} = 5 mA; T _A = 25°C		–	50	–	Ω
Magnetic Characteristics							
Operate Point	B _{OP}	A1120, A1125		–	35	50	G
		A1121		50	95	135	G
Release Point	B _{RP}	A1120, A1125		5	25	–	G
		A1121		40	70	110	G
Hysteresis	B _{HYS}	A1120, A1125	(B _{OP} – B _{RP})	–	10	–	G
		A1121		10	25	42	G

¹Typical data are at $T_A = 25^\circ\text{C}$ and $V_{CC} = 12\text{ V}$, and are for initial design estimations only.

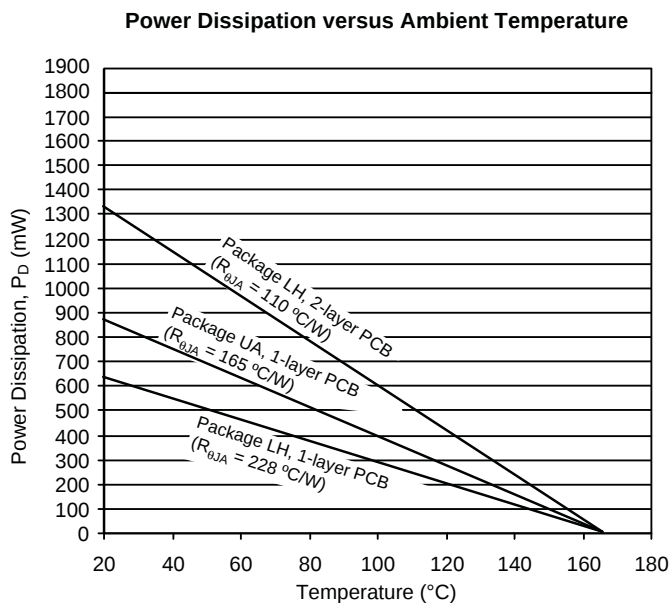
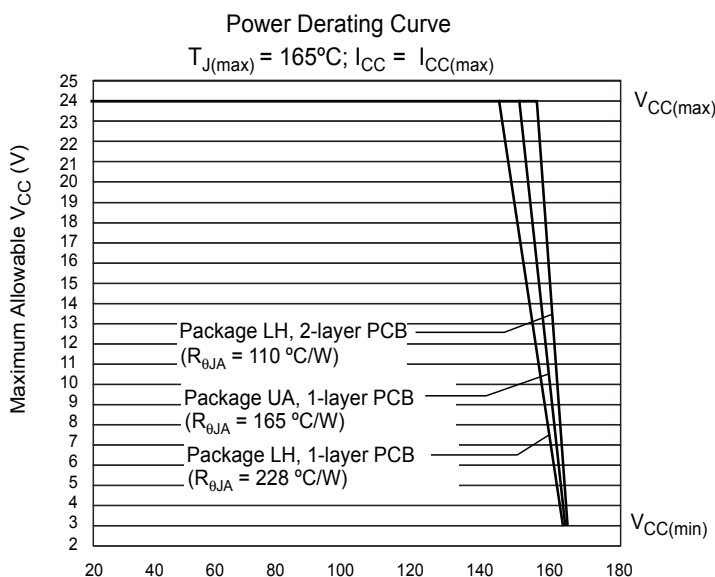
²1 G (gauss) = 0.1 mT (millitesla).

³Guaranteed by device design and characterization.

⁴ C_S = oscilloscope probe capacitance.

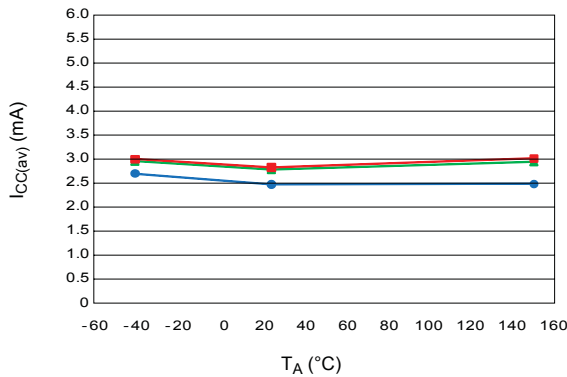
THERMAL CHARACTERISTICS may require derating at maximum conditions, see application information

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Value	Units
Package Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	Package LH, 1-layer PCB with copper limited to solder pads	228	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
		Package LH, 2-layer PCB with 0.463 in ² of copper area each side connected by thermal vias	110	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
		Package UA, 1-layer PCB with copper limited to solder pads	165	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

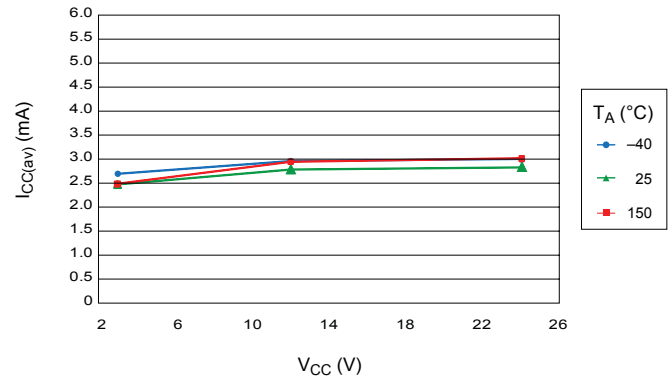


Characteristic Performance A1120, A1121, and A1125 Electrical Characteristics

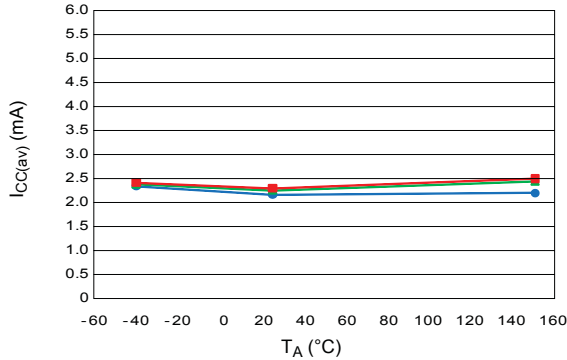
Average Supply Current (On) versus Ambient Temperature



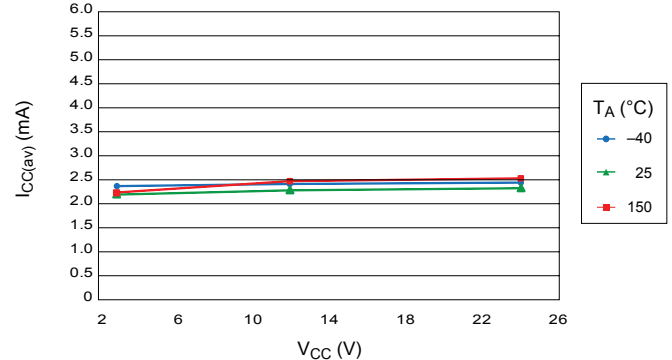
Average Supply Current (On) versus Average Supply Voltage



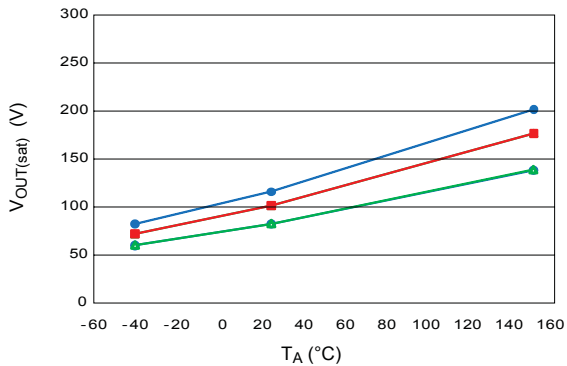
Average Supply Current (Off) versus Ambient Temperature



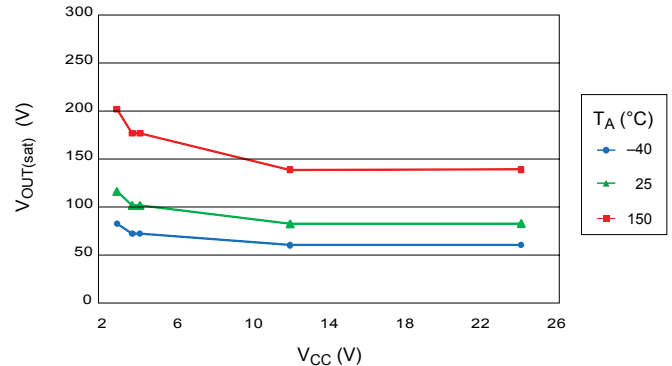
Average Supply Current (Off) versus Average Supply Voltage



Average Output Saturation Voltage versus Ambient Temperature

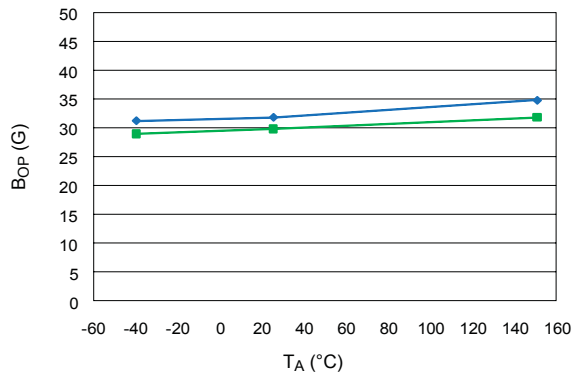


Average Output Saturation Voltage versus Supply Voltage

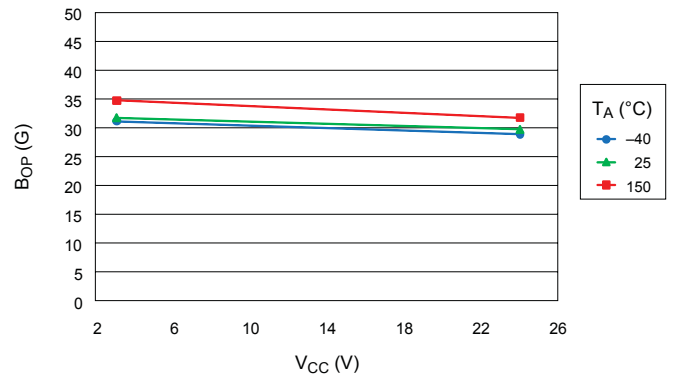


A1120 and A1125 Magnetic Characteristics

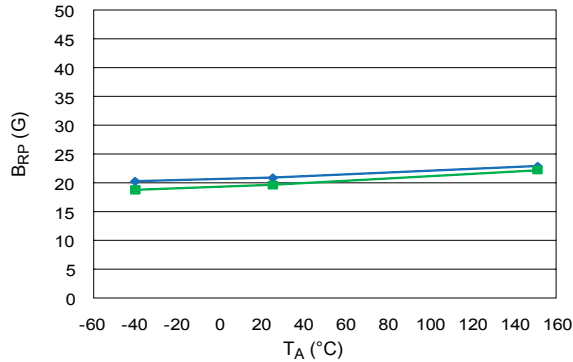
Average Operate Point versus Ambient Temperature



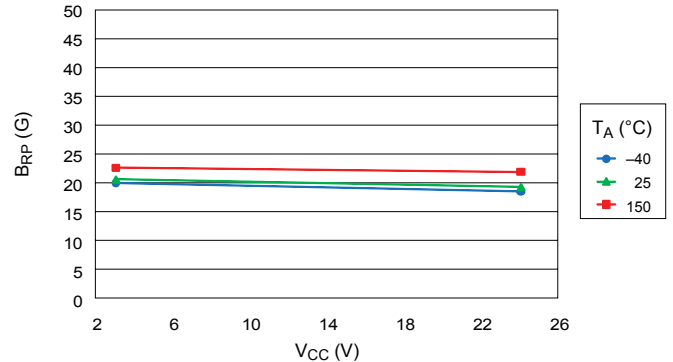
Average Operate Point versus Average Supply Voltage



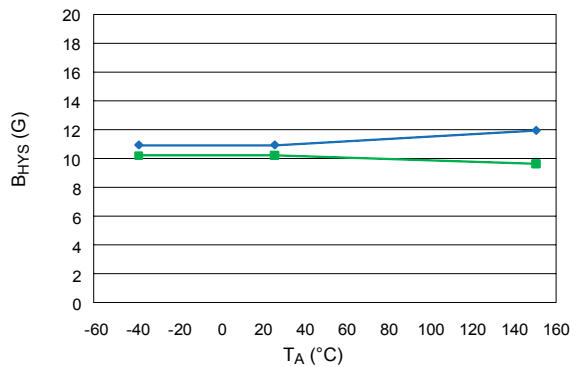
Average Release Point versus Ambient Temperature



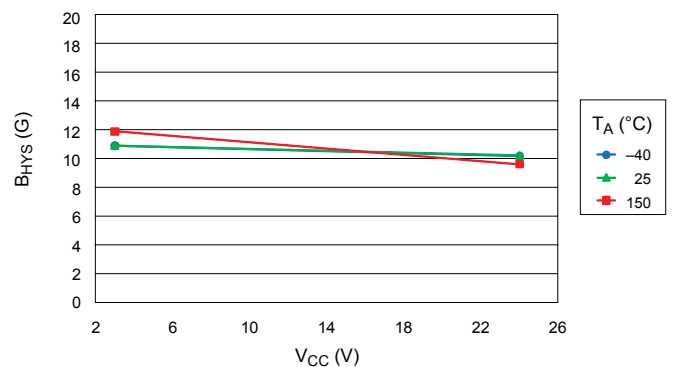
Average Release Point versus Average Supply Voltage



Average Switchpoint Hysteresis versus Ambient Temperature

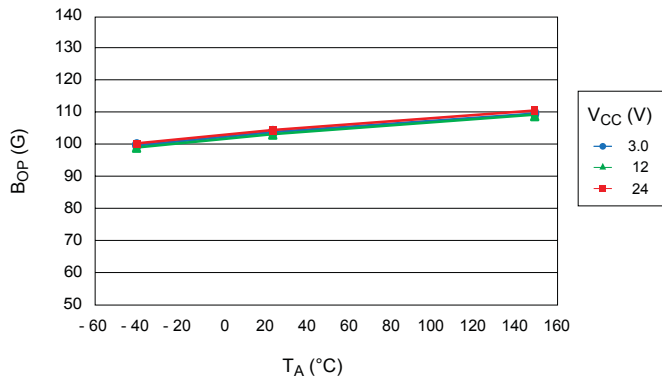


Average Switchpoint Hysteresis versus Supply Voltage

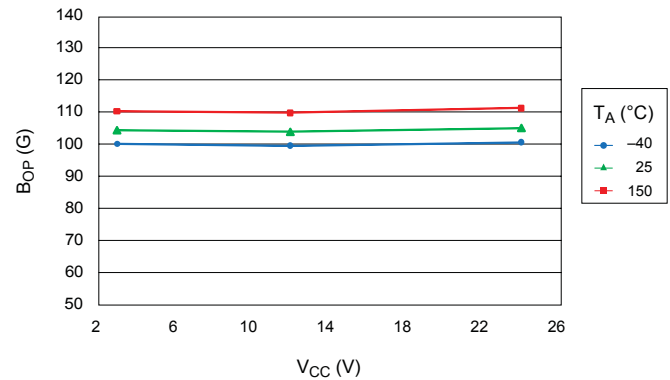


A1121 Magnetic Characteristics

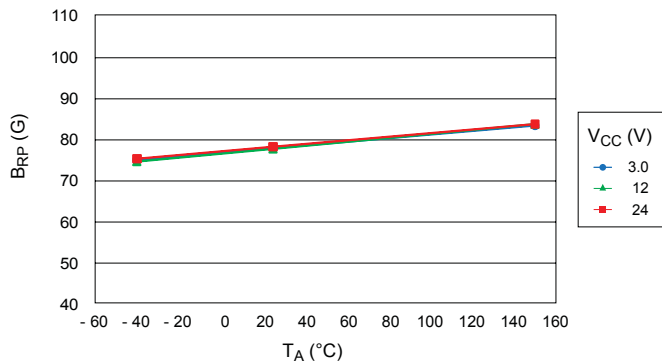
Operate Point versus Ambient Temperature



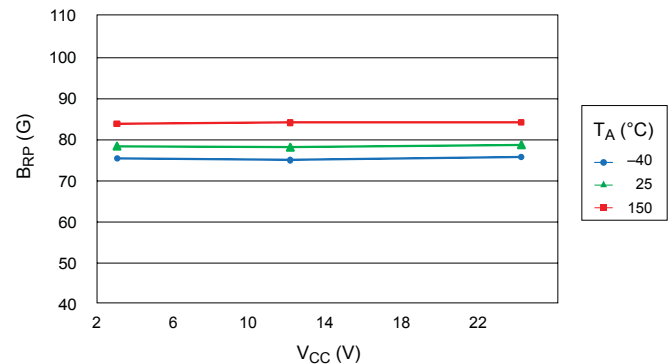
Operate Point versus Average Supply Voltage



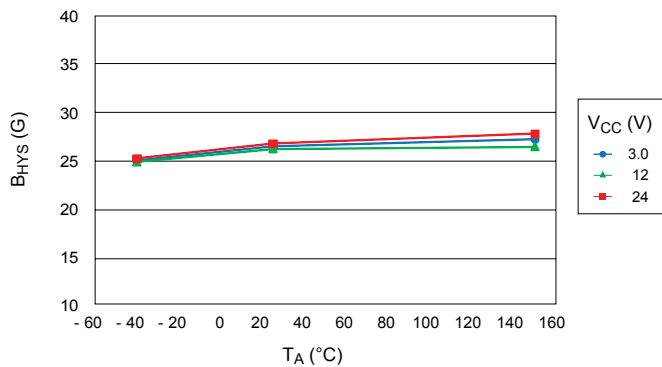
Release Point versus Ambient Temperature



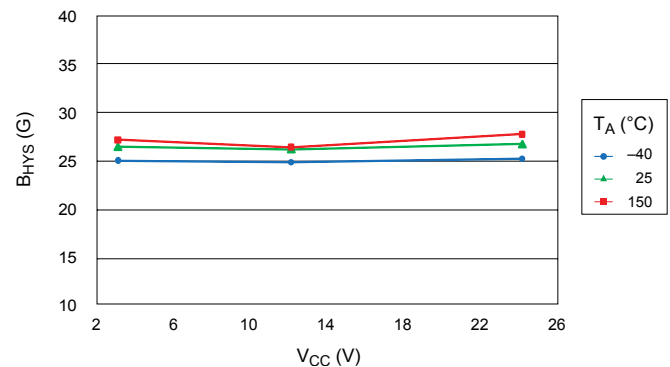
Release Point versus Average Supply Voltage



Switchpoint Hysteresis versus Ambient Temperature



Switchpoint Hysteresis versus Supply Voltage



Functional Description

Operation

The output of the A1120 and A1121 devices switches low (turns on) when a magnetic field perpendicular to the Hall element exceeds the operate point threshold, B_{OP} (see panel A of figure 1). When the magnetic field is reduced below the release point, B_{RP} , the device output goes high (turns off). The output of the A1125 devices switches high (turns off) when a magnetic field perpendicular to the Hall element exceeds the operate point threshold, B_{OP} (see panel B of figure 1). When the magnetic field is reduced below the release point, B_{RP} , the device output goes low (turns on).

After turn-on, the output voltage is $V_{OUT(SAT)}$. The output transistor is capable of sinking current up to the short circuit current limit, I_{OM} , which is a minimum of 30 mA.

The difference in the magnetic operate and release points is the hysteresis, B_{HYS} , of the device. This built-in hysteresis allows clean switching of the output even in the presence of external mechanical vibration and electrical noise. Powering-on the device in the hysteresis range (less than B_{OP} and higher than B_{RP}) will

give an indeterminate output state. The correct state is attained after the first excursion beyond B_{OP} or B_{RP} .

Applications

It is strongly recommended that an external bypass capacitor be connected (in close proximity to the Hall element) between the supply and ground of the device to reduce external noise in the application. As is shown in panel B of figure 1, a 0.1 μ F capacitor is typical.

Extensive applications information for Hall effect devices is available in:

- *Hall-Effect IC Applications Guide*, Application Note 27701
- *Guidelines for Designing Subassemblies Using Hall-Effect Devices*, Application Note 27703.1
- *Soldering Methods for Allegro's Products – SMT and Through-Hole*, Application Note 26009

All are provided in *Allegro Electronic Data Book*, AMS-702, and the Allegro Web site, www.allegromicro.com.

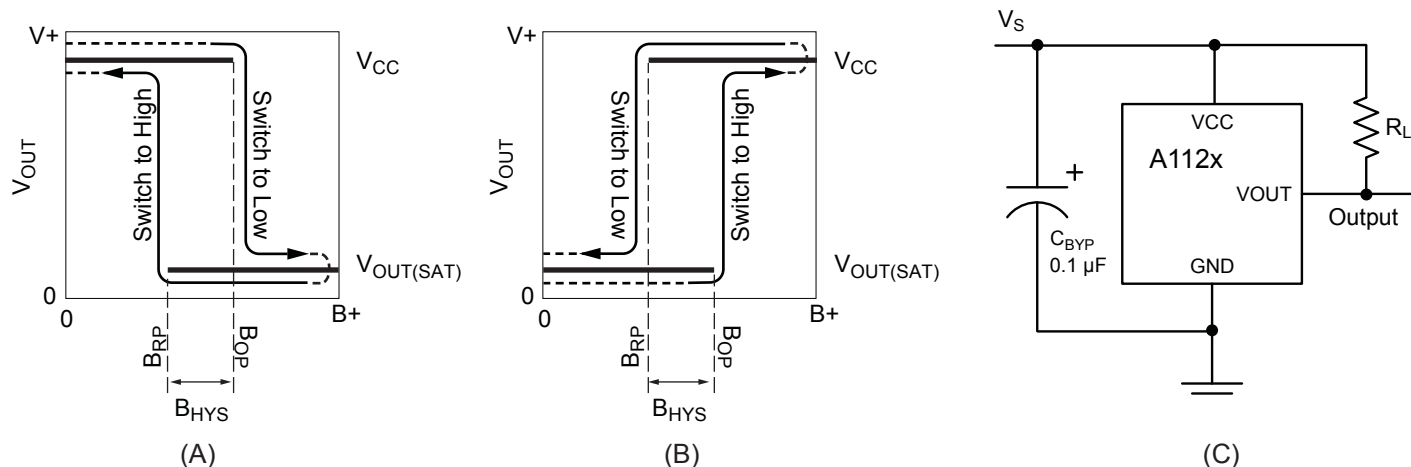


Figure 1. Device switching behavior. In panels A and B, on the horizontal axis, the $B+$ direction indicates increasing south polarity magnetic field strength. This behavior can be exhibited when using an electrical circuit such as that shown in panel C.

Chopper Stabilization Technique

When using Hall effect technology, a limiting factor for switchpoint accuracy is the small signal voltage developed across the Hall element. This voltage is disproportionately small relative to the offset that can be produced at the output of the Hall element. This makes it difficult to process the signal while maintaining an accurate, reliable output over the specified operating temperature and voltage ranges.

Chopper stabilization is a unique approach used to minimize Hall offset on the chip. The patented Allegro technique, namely Dynamic Quadrature Offset Cancellation, removes key sources of the output drift induced by thermal and mechanical stresses. This offset reduction technique is based on a signal modulation-demodulation process. The undesired offset signal is separated from the magnetic field-induced signal in the frequency domain, through modulation. The subsequent demodulation acts as a modulation process for the offset, causing the magnetic field induced signal to recover its original spectrum at baseband, while the dc offset becomes a high-frequency signal. The magnetic sourced signal then can pass through a low-pass filter, while the modulated DC offset is suppressed. This configuration is illustrated in figure 2.

The chopper stabilization technique uses a 400 kHz high frequency clock. For demodulation process, a sample and hold technique is used, where the sampling is performed at twice the chopper frequency (800 kHz). This high-frequency operation allows a greater sampling rate, which results in higher accuracy and faster signal-processing capability. This approach desensitizes the chip to the effects of thermal and mechanical stresses, and produces devices that have extremely stable quiescent Hall output voltages and precise recoverability after temperature cycling. This technique is made possible through the use of a BiCMOS process, which allows the use of low-offset, low-noise amplifiers in combination with high-density logic integration and sample-and-hold circuits.

The repeatability of magnetic field-induced switching is affected slightly by a chopper technique. However, the Allegro high frequency chopping approach minimizes the affect of jitter and makes it imperceptible in most applications. Applications that are more likely to be sensitive to such degradation are those requiring precise sensing of alternating magnetic fields; for example, speed sensing of ring-magnet targets. For such applications, Allegro recommends its digital device families with lower sensitivity to jitter. For more information on those devices, contact your Allegro sales representative.

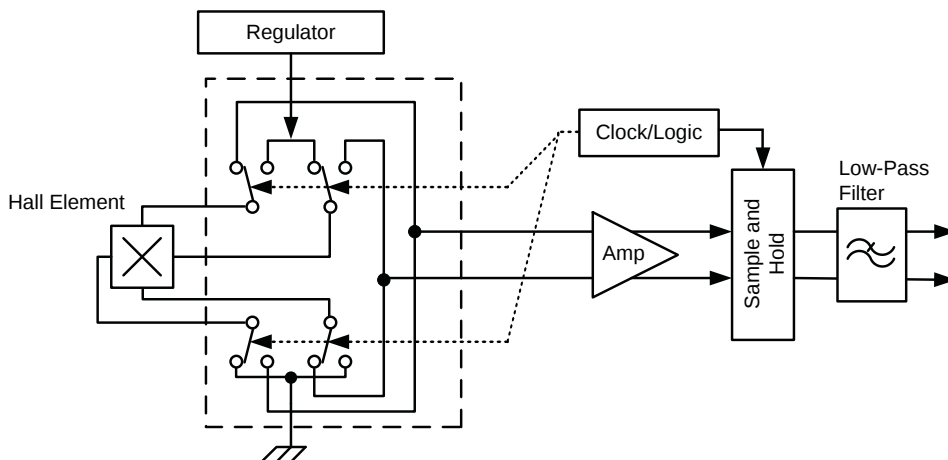


Figure 2. Model of chopper stabilization technique

Power Derating

The device must be operated below the maximum junction temperature of the device, $T_{J(max)}$. Under certain combinations of peak conditions, reliable operation may require derating supplied power or improving the heat dissipation properties of the application. This section presents a procedure for correlating factors affecting operating T_J . (Thermal data is also available on the Allegro MicroSystems website.)

The Package Thermal Resistance, $R_{\theta JA}$, is a figure of merit summarizing the ability of the application and the device to dissipate heat from the junction (die), through all paths to the ambient air. Its primary component is the Effective Thermal Conductivity, K , of the printed circuit board, including adjacent devices and traces. Radiation from the die through the device case, $R_{\theta JC}$, is relatively small component of $R_{\theta JA}$. Ambient air temperature, T_A , and air motion are significant external factors, damped by overmolding.

The effect of varying power levels (Power Dissipation, P_D), can be estimated. The following formulas represent the fundamental relationships used to estimate T_J , at P_D .

$$P_D = V_{IN} \times I_{IN} \quad (1)$$

$$\Delta T = P_D \times R_{\theta JA} \quad (2)$$

$$T_J = T_A + \Delta T \quad (3)$$

For example, given common conditions such as: $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{CC} = 12\text{ V}$, $I_{CC} = 1.6\text{ mA}$, and $R_{\theta JA} = 165^\circ\text{C/W}$, then:

$$P_D = V_{CC} \times I_{CC} = 12\text{ V} \times 1.6\text{ mA} = 19\text{ mW}$$

$$\Delta T = P_D \times R_{\theta JA} = 19\text{ mW} \times 165^\circ\text{C/W} = 3^\circ\text{C}$$

$$T_J = T_A + \Delta T = 25^\circ\text{C} + 3^\circ\text{C} = 28^\circ\text{C}$$

A worst-case estimate, $P_{D(max)}$, represents the maximum allowable power level ($V_{CC(max)}$, $I_{CC(max)}$), without exceeding $T_{J(max)}$, at a selected $R_{\theta JA}$ and T_A .

Example: Reliability for V_{CC} at $T_A = 150^\circ\text{C}$, package LH, using a minimum-K PCB.

Observe the worst-case ratings for the device, specifically: $R_{\theta JA} = 228^\circ\text{C/W}$, $T_{J(max)} = 165^\circ\text{C}$, $V_{CC(max)} = 24\text{ V}$, and $I_{CC(max)} = 4\text{ mA}$.

Calculate the maximum allowable power level, $P_{D(max)}$. First, invert equation 3:

$$\Delta T_{max} = T_{J(max)} - T_A = 165^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C} = 15^\circ\text{C}$$

This provides the allowable increase to T_J resulting from internal power dissipation. Then, invert equation 2:

$$P_{D(max)} = \Delta T_{max} \div R_{\theta JA} = 15^\circ\text{C} \div 228^\circ\text{C/W} = 66\text{ mW}$$

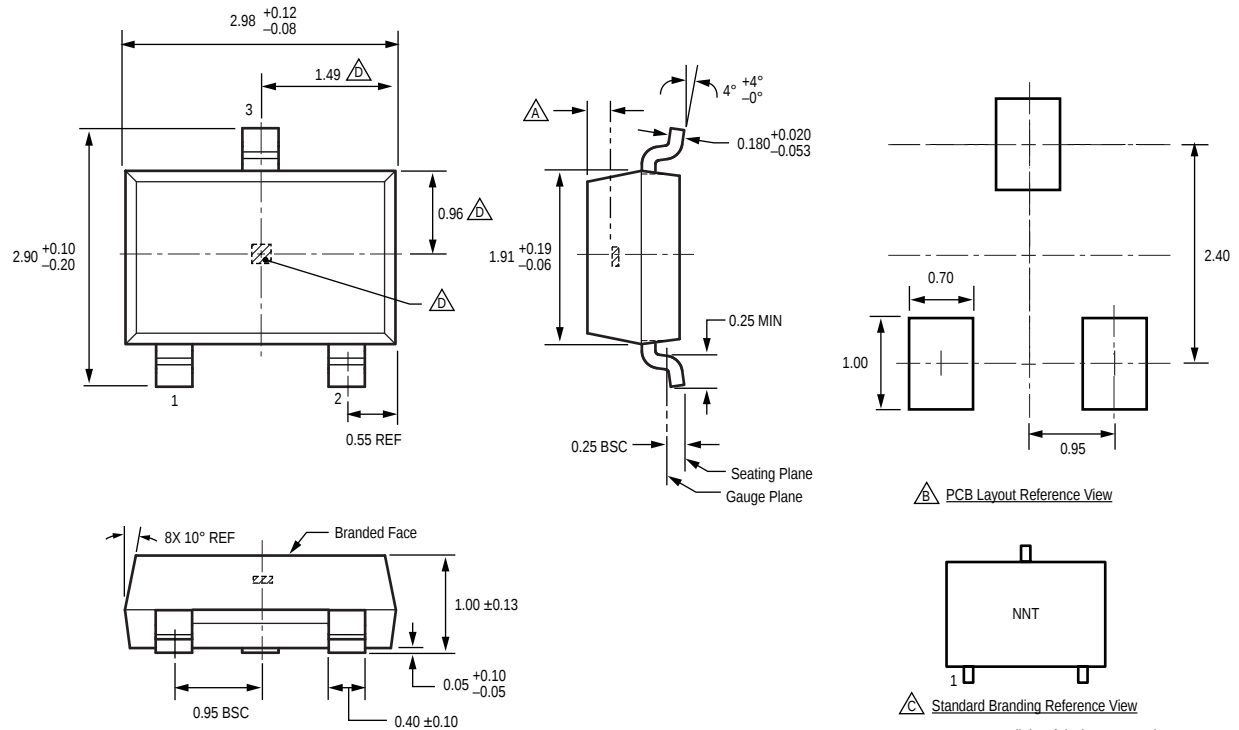
Finally, invert equation 1 with respect to voltage:

$$V_{CC(est)} = P_{D(max)} \div I_{CC(max)} = 66\text{ mW} \div 4\text{ mA} = 16.5\text{ V}$$

The result indicates that, at T_A , the application and device can dissipate adequate amounts of heat at voltages $\leq V_{CC(est)}$.

Compare $V_{CC(est)}$ to $V_{CC(max)}$. If $V_{CC(est)} \leq V_{CC(max)}$, then reliable operation between $V_{CC(est)}$ and $V_{CC(max)}$ requires enhanced $R_{\theta JA}$. If $V_{CC(est)} \geq V_{CC(max)}$, then operation between $V_{CC(est)}$ and $V_{CC(max)}$ is reliable under these conditions.

Package LH, 3-Pin (SOT-23W)

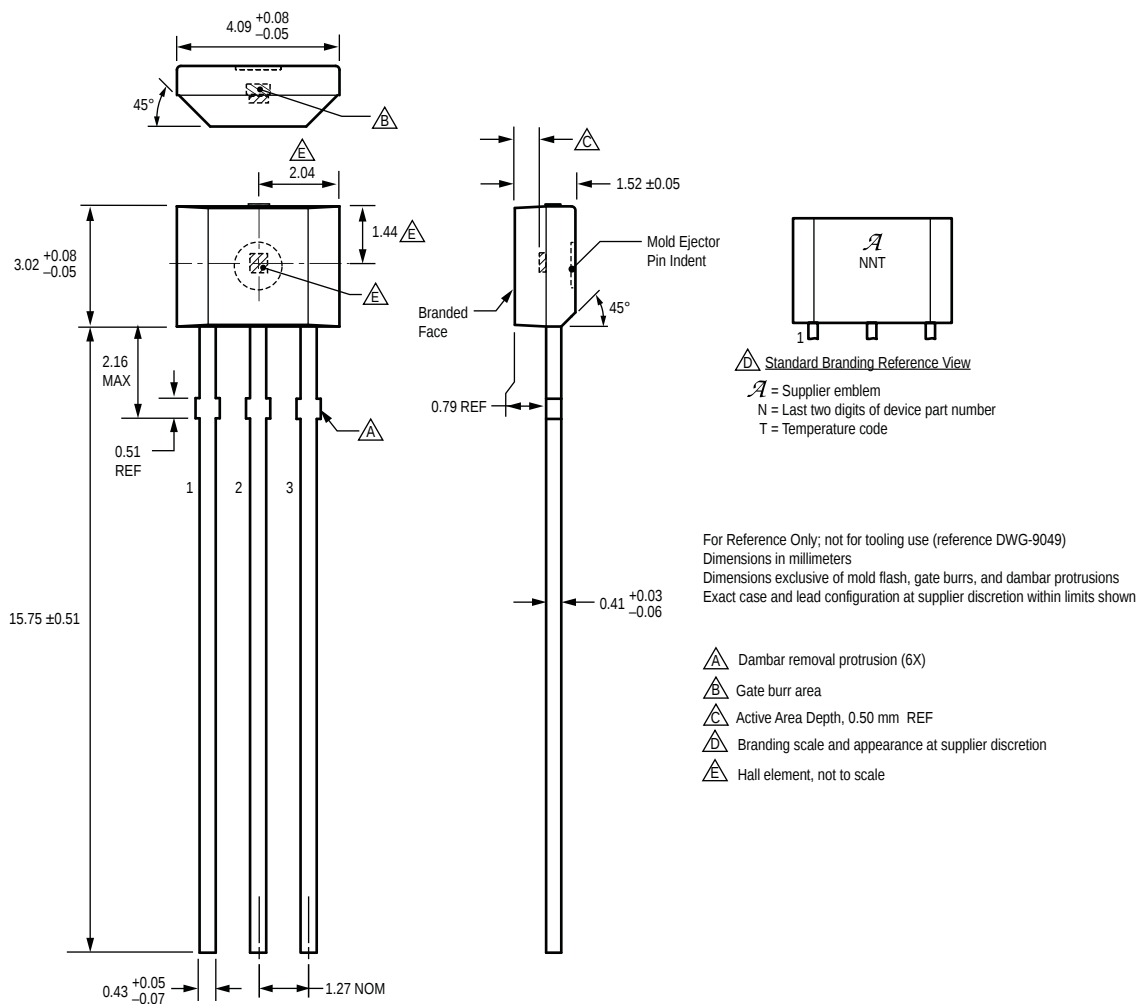


For Reference Only; not for tooling use (reference dwg. 802840)
Dimensions in millimeters
Dimensions exclusive of mold flash, gate burrs, and dambar protrusions
Exact case and lead configuration at supplier discretion within limits shown

- Δ Active Area Depth, 0.28 mm REF
- Δ Reference land pattern layout
All pads a minimum of 0.20 mm from all adjacent pads; adjust as necessary to meet application process requirements and PCB layout tolerances
- Δ Branding scale and appearance at supplier discretion
- Δ Hall element, not to scale

N = Last two digits of device part number
T = Temperature code

Package UA, 3-Pin SIP



Copyright ©2009-2010, Allegro MicroSystems, Inc.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in life support devices or systems, if a failure of an Allegro product can reasonably be expected to cause the failure of that life support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

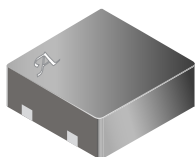
For the latest version of this document, visit our website:
www.allegromicro.com

A3212

Data Sheet
27622.61G

MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

2 x 2 mm MLPD
Package A3212EELLT-T



Approximate actual size

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage, V_{DD}	5 V
Magnetic Flux Density, B	Unlimited
Output Off Voltage, V_{OUT}	5 V
Output Current, I_{OUT}	1 mA
Junction Temperature, T_J	+170°C
Operating Temperature, T_A	
Range 'E-'	-40°C to +85°C
Range 'L-'	-40°C to +150°C
Storage Temperature Range, T_S	-65°C to +170°C

Caution: These CMOS devices have input static protection (Class 3) but are still susceptible to damage if exposed to extremely high static electrical charges.

The A3212 integrated circuit is an ultra-sensitive, pole independent Hall-effect switch with a latched digital output. This sensor is especially suited for operation in battery-operated, hand-held equipment such as cellular and cordless telephones, pagers, and palmtop computers. A 2.5 volt to 3.5 volt operation and a unique clocking scheme reduce the average operating power requirements to less than 15 μ W with a 2.75 volt supply.

Unlike other Hall-effect switches, either a north or south pole of sufficient strength will turn the output on; in the absence of a magnetic field, the output is off. The polarity independence and minimal power requirement allow these devices to easily replace reed switches for superior reliability and ease of manufacturing, while eliminating the requirement for signal conditioning.

Improved stability is made possible through chopper stabilization (dynamic offset cancellation), which reduces the residual offset voltage normally caused by device overmolding, temperature dependencies, and thermal stress.

This device includes on a single silicon chip a Hall-voltage generator, small-signal amplifier, chopper stabilization, a latch, and a MOSFET output. Advanced BiCMOS processing is used to take advantage of low-voltage and low-power requirements, component matching, very low input-offset errors, and small component geometries.

Four package styles provide magnetically optimized solutions for most applications. Miniature low-profile surface-mount package types *EH* and *EL* (0.75 and 0.50 mm nominal height) are leadless, *LH* is a leaded low-profile SMD, and *UA* is a three-lead SIP for through-hole mounting. Each package is available in a lead (Pb) free version (suffix, -T) with 100% matte tin plated lead-frame. EL package for limited release, engineering samples available.

FEATURES

- Micropower Operation
- Operation with North or South Pole
- 2.5 V to 3.5 V Battery Operation
- Chopper Stabilized
Superior Temperature Stability
Extremely Low Switch-Point Drift
Insensitive to Physical Stress
- ESD Protected to 5 kV
- Solid-State Reliability
- Small Size
- Easily Manufacturable with Magnet Pole Independence



A3212

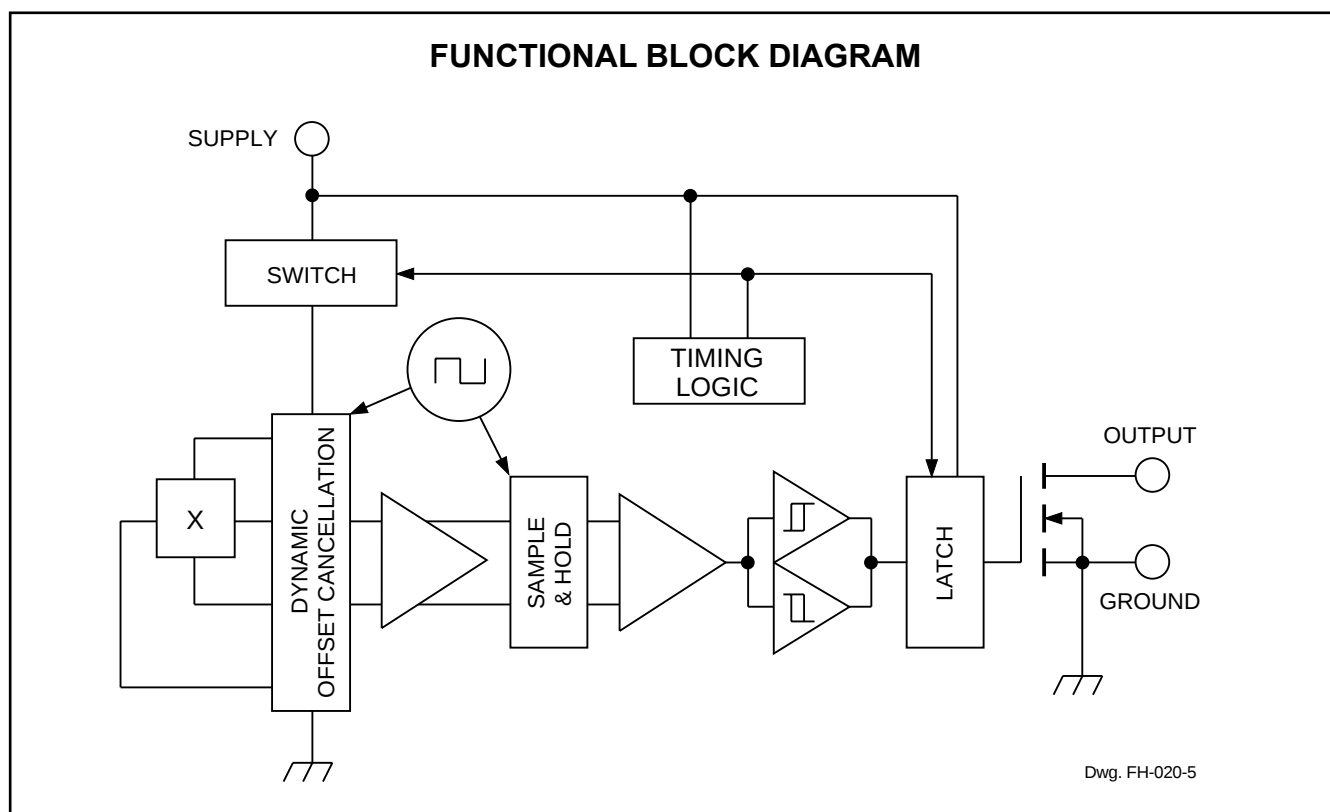
MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

Product Selection Guide

Use complete part numbers when ordering

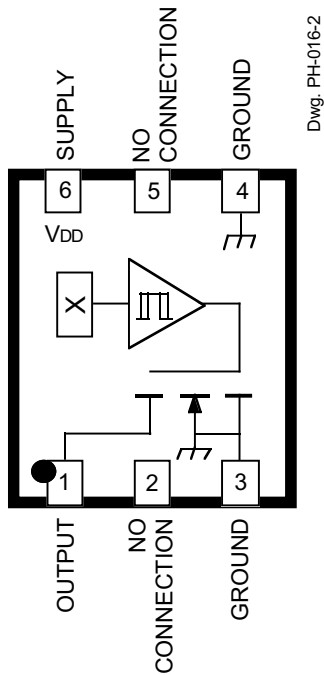
Part Number	Pb-free	Packing* (Units/Pack)	Package	Ambient Temperature T _A (°C)
A3212EEHLT	–	Tape and Reel (3000)	Leadless Surface Mount	–40 to 85
A3212EEHLT–T	Yes	Tape and Reel (3000)		
A3212EELLT–T	Yes	Tape and Reel (2000)		
A3212ELHLT	–	Tape and Reel (3000)	3-Pin Surface Mount	
A3212ELHLT–T	Yes	Tape and Reel (3000)		
A3212EUA	–	Bulk Pack (500)	SIP-3 Through Hole, Straight Lead	
A3212EUA–T	Yes	Bulk Pack (500)		
A3212LLHLT	–	Tape and Reel (3000)	3-Pin Surface Mount	–40 to 150
A3212LLHLT–T	Yes	Tape and Reel (3000)		
A3212LUA	–	Bulk Pack (500)	SIP-3 Through Hole, Straight Lead	
A3212LUA–T	Yes	Bulk Pack (500)		

*Contact Allegro for additional packaging and handling options.

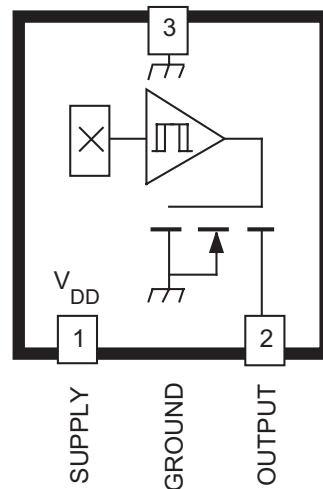


3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

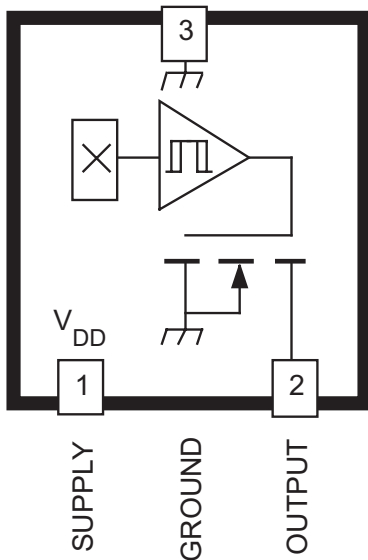
Package Suffix 'EH' Pinning
(Leadless Chip Carrier)



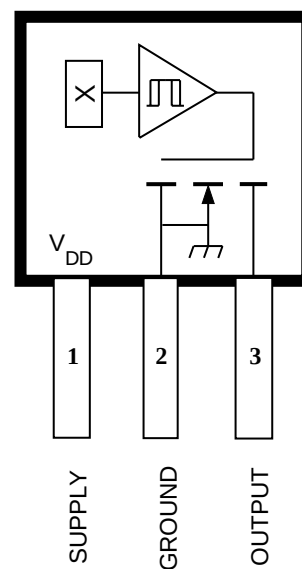
Package Suffix 'EL' Pinning
(Leadless Chip Carrier)



Package Suffix 'LH' Pinning
(SOT23W)



Package Suffix 'UA' Pinning
(SIP)



Pinning is shown viewed from branded side.

A3212

MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

ELECTRICAL CHARACTERISTICS over operating voltage and temperature range (unless otherwise specified).

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage Range	V_{DD}	Operating ¹	2.5	2.75	3.5	V
Output Leakage Current	I_{OFF}	$V_{OUT} = 3.5\text{ V}$, $B_{RPN} < B < B_{RPS}$	–	<1.0	1.0	μA
Output On Voltage	V_{OUT}	$I_{OUT} = 1\text{ mA}$, $V_{DD} = 2.75\text{ V}$	–	100	300	mV
Awake Time	t_{awake}		–	45	90	μs
Period	t_{period}		–	45	90	ms
Duty Cycle	d.c.		–	0.1	–	%
Chopping Frequency	f_C		–	340	–	kHz
Supply Current	$I_{DD(EN)}$	Chip awake (enabled)	–	–	2.0	mA
	$I_{DD(DIS)}$	Chip asleep (disabled)	–	–	8.0	μA
	$I_{DD(AVG)}$	$V_{DD} = 2.75\text{ V}$	–	5.1	10	μA
		$V_{DD} = 3.5\text{ V}$	–	6.7	10	μA

NOTES: 1. Operate and release points will vary with supply voltage.
 2. B_{OPx} = operate point (output turns on); B_{RPx} = release point (output turns off).
 3. Typical Data is at $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_{DD} = 2.75\text{ V}$ and is for design information only.

MAGNETIC CHARACTERISTICS over operating voltage and temperature range (unless otherwise specified).

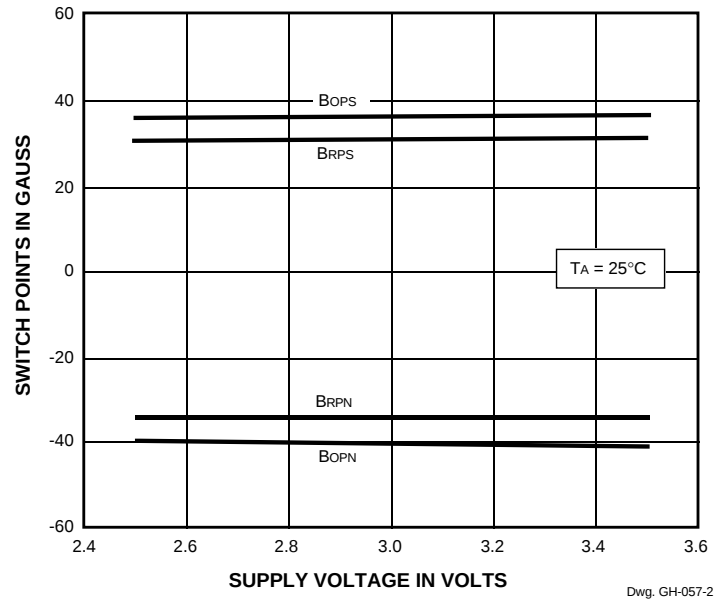
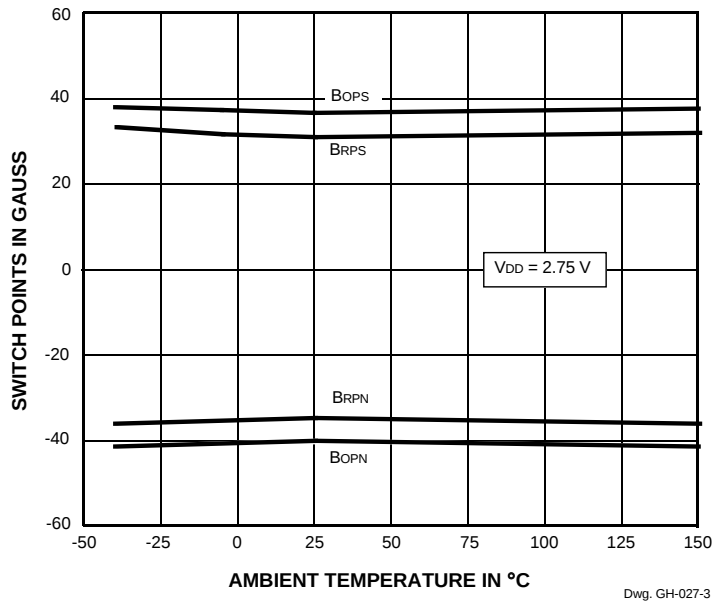
Characteristic	Symbol	Test Conditions	Limits			
			Min.	Typ.	Max.	Units
Operate Points	B_{OPS}	South pole to branded side	–	37	55	G
	B_{OPN}	North pole to branded side	-55	-40	–	G
Release Points	B_{RPS}	South pole to branded side	10	31	–	G
	B_{RPN}	North pole to branded side	–	-34	-10	G
Hysteresis	B_{hys}	$ B_{OPx} - B_{RPx} $	–	5.9	–	G

NOTES: 1. Negative flux densities are defined as less than zero (algebraic convention), i.e., -50 G is less than +10 G.
 2. B_{OPx} = operate point (output turns on); B_{RPx} = release point (output turns off).
 3. Typical Data is at $T_A = +25^\circ\text{C}$ and $V_{DD} = 2.75\text{ V}$ and is for design information only.
 4. 1 gauss (G) is exactly equal to 0.1 millitesla (mT).

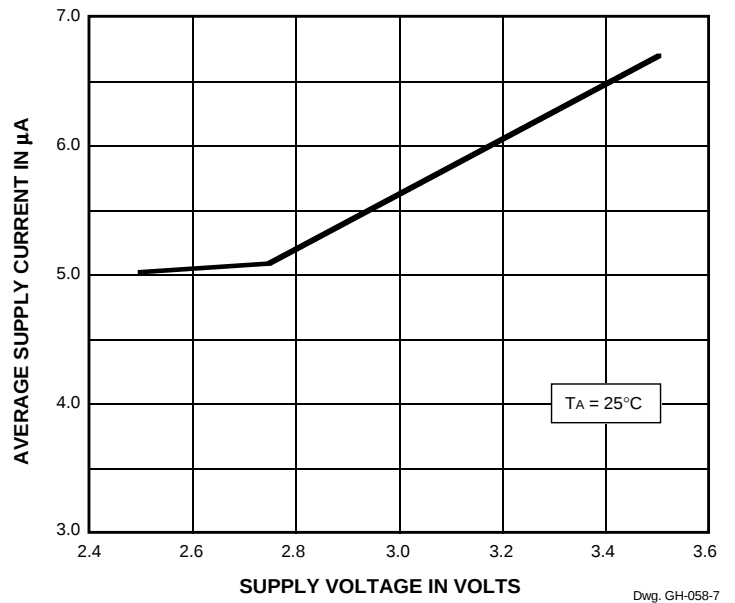
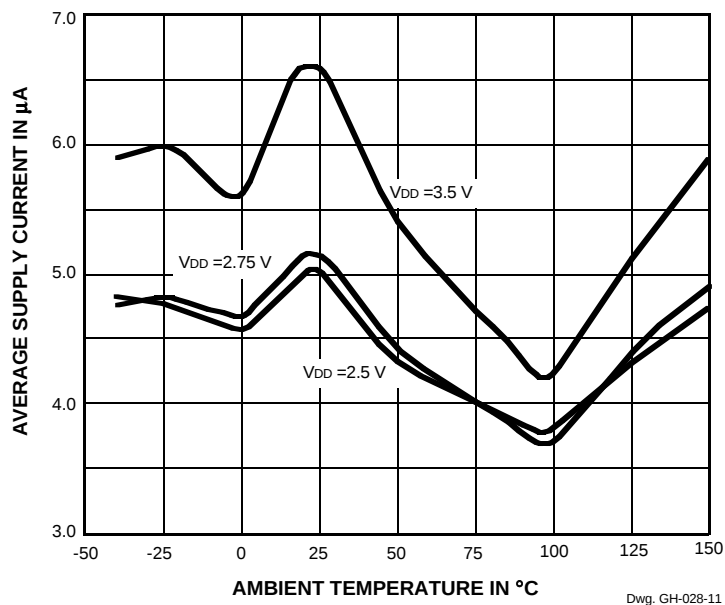
3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

TYPICAL OPERATING CHARACTERISTICS

SWITCH POINTS



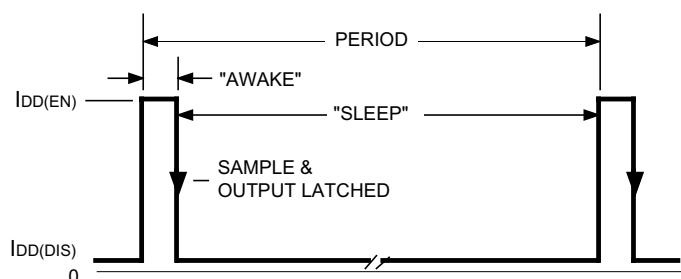
SUPPLY CURRENT



A3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

FUNCTIONAL DESCRIPTION

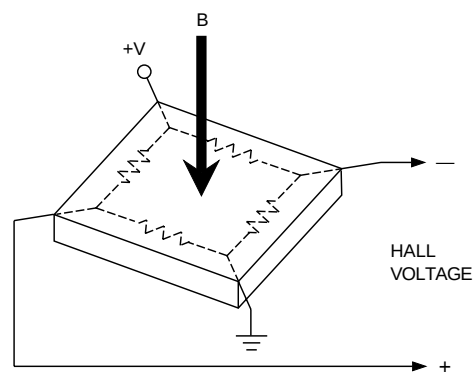
Low Average Power. Internal timing circuitry activates the sensor for 45 μ s and deactivates it for the remainder of the period (45 ms). A short "awake" time allows for stabilization prior to the sensor sampling and data latching on the falling edge of the timing pulse. The output during the "sleep" time is latched in the last sampled state. The supply current is not affected by the output state.



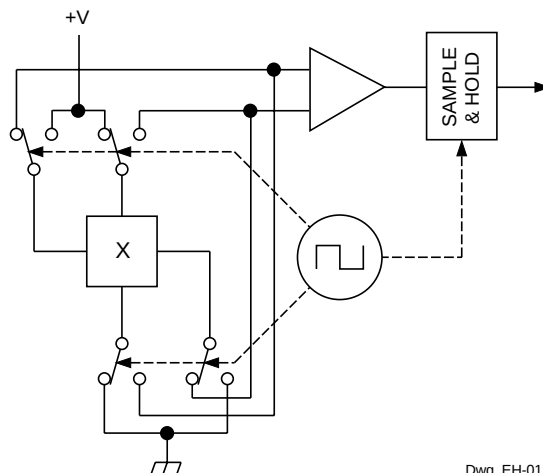
Dwg. WH-017-2

Chopper-Stabilized Technique. The Hall element can be considered as a resistor array similar to a Wheatstone bridge. A large portion of the offset is a result of the mismatching of these resistors. These devices use a proprietary dynamic offset cancellation technique, with an internal high-frequency clock to reduce the residual offset voltage of the Hall element that is normally caused by device overmolding, temperature dependencies, and thermal stress. The chopper-stabilizing technique cancels the mismatching of the resistor circuit by changing the direction of the current flowing through the Hall plate using CMOS switches and Hall voltage measurement taps, while maintaining the Hall-voltage signal that is induced by the external magnetic flux. The signal is then captured by a sample-and-hold circuit and further processed using low-offset bipolar circuitry. This technique produces devices that have an extremely stable quiescent Hall output voltage, are immune to thermal stress, and have precise recoverability after temperature cycling. A relatively high sampling frequency is used for faster signal processing capability can be processed.

More detailed descriptions of the circuit operation can be found in: Technical Paper STP 97-10, *Monolithic Magnetic Hall Sensor Using Dynamic Quadrature Offset Cancellation* and Technical Paper STP 99-1, *Chopper-Stabilized Amplifiers With A Track-and-Hold Signal Demodulator*.



Dwg. AH-011-2



Dwg. EH-012-1

3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

FUNCTIONAL DESCRIPTION (cont'd)

Operation. The output of this device switches low (turns on) when a magnetic field perpendicular to the Hall sensor exceeds the operate point B_{OPS} (or is less than B_{OPN}). After turn-on, the output is capable of sinking up to 1 mA and the output voltage is $V_{OUT(ON)}$. When the magnetic field is reduced below the release point B_{RPS} (or increased above B_{RPN}), the device output switches high (turns off). The difference in the magnetic operate and release points is the hysteresis (B_{hys}) of the device. This built-in hysteresis allows clean switching of the output even in the presence of external mechanical vibration and electrical noise.

As used here, negative flux densities are defined as less than zero (algebraic convention), i.e., -50 G is less than +10 G.

Applications. Allegro's pole-independent sensing technique allows for operation with either a north pole or south pole magnet orientation, enhancing the manufacturability of the device. The state-of-the-art technology provides the same output polarity for either pole face.

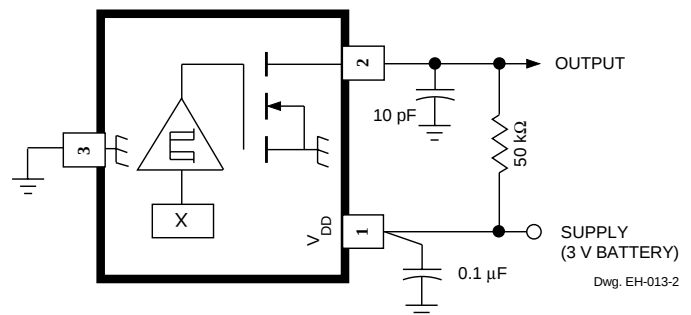
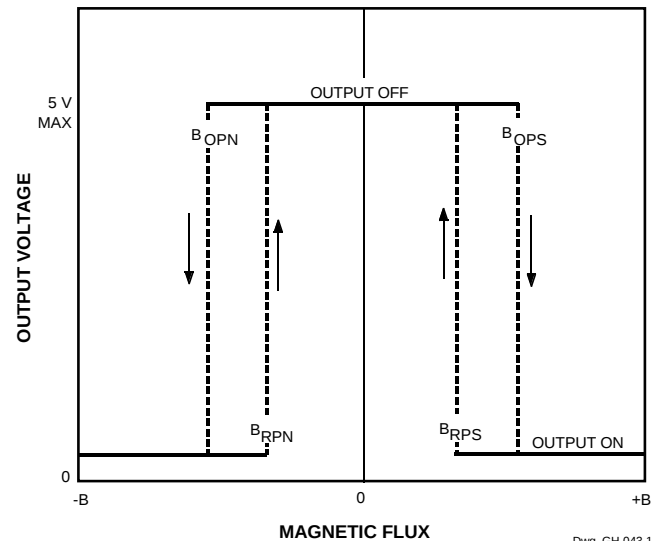
It is strongly recommended that an external bypass capacitor be connected (in close proximity to the Hall sensor) between the supply and ground of the device to reduce both external noise and noise generated by the chopper-stabilization technique. This is especially true due to the relatively high impedance of battery supplies.

The simplest form of magnet that will operate these devices is a bar magnet with either pole near the branded surface of the device. Many other methods of operation are possible. Extensive applications information for Hall-effect sensors is available in:

- *Hall-Effect IC Applications Guide*, Application Note 27701;
- *Hall-Effect Devices: Soldering, Gluing, Potting, Encapsulating, and Lead Forming*, Application Note 27703.1;
- *Soldering of Through-Hole Hall-Sensor Devices*, Application Note 27703; and
- *Soldering of Surface-Mount Hall-Sensor Devices*, Application Note 27703.2.

All are provided at

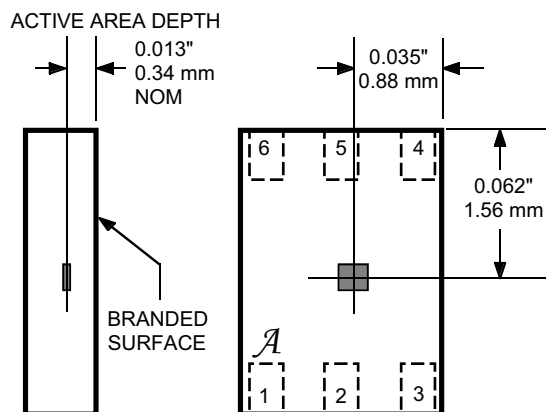
www.allegromicro.com



A3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

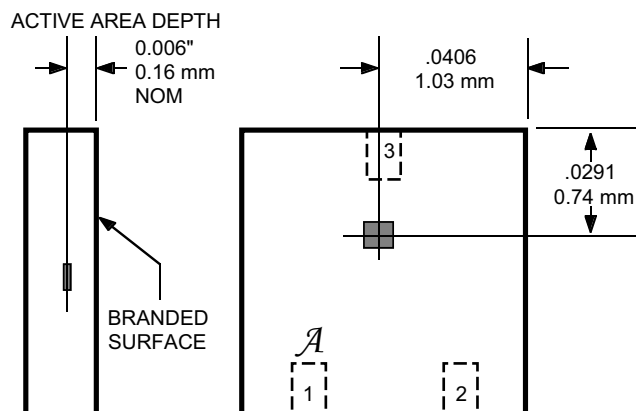
SENSOR LOCATIONS

Package Designator 'EH'

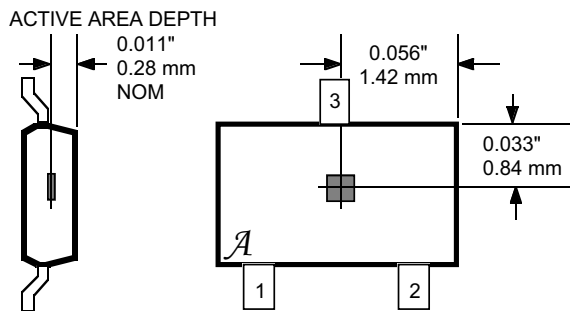


Dwg. MH-030

Package Designator 'EL'

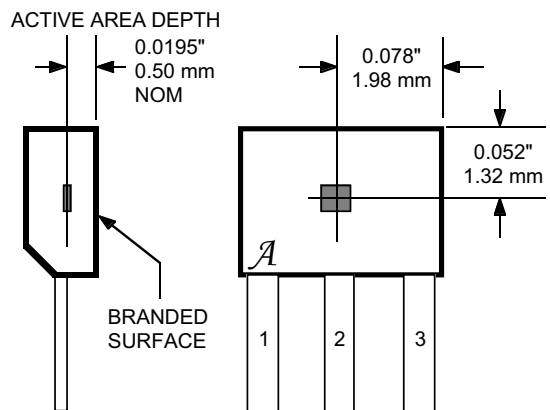


Package Designator 'LH'



Dwg. MH-025-2

Package Designator 'UA'

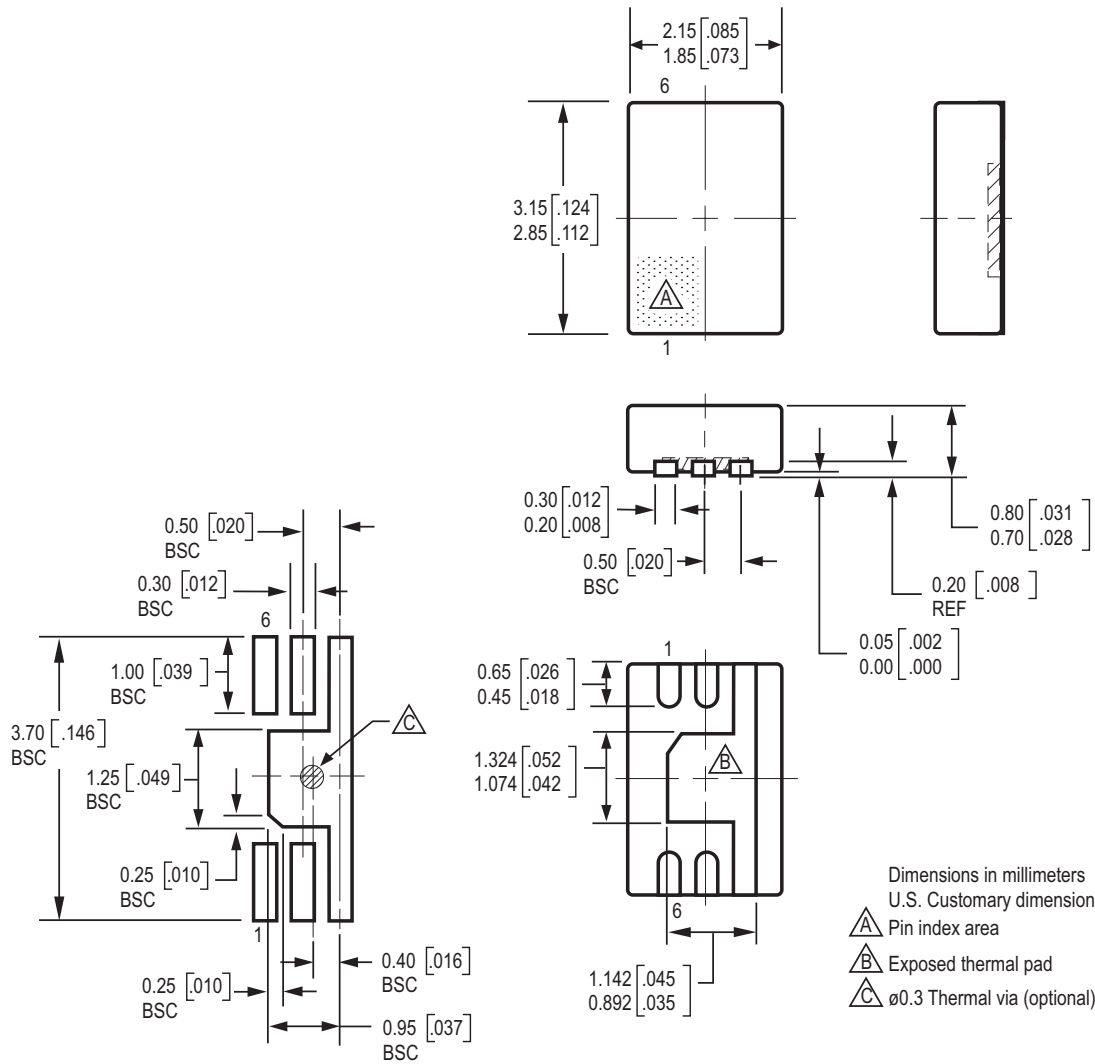


Dwg. MH-011-13

3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

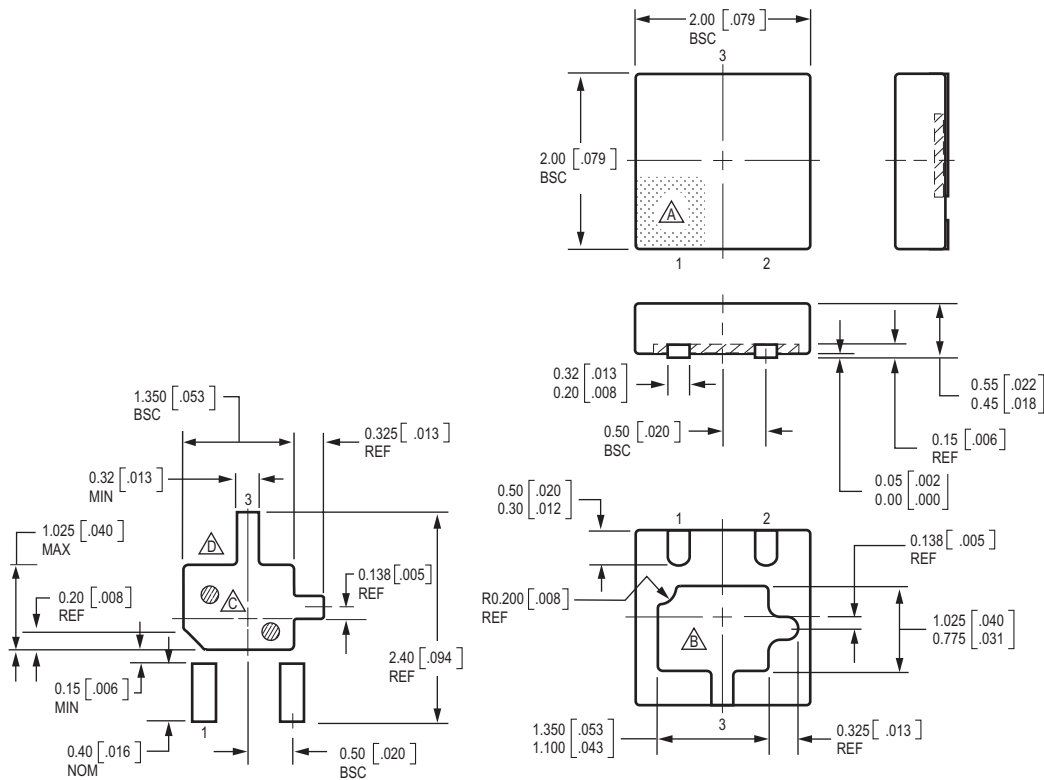
PACKAGE DESIGNATOR 'EH'

(Reference MO-229C WCED-1)



3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

PACKAGE DESIGNATOR 'EL' MLPD 3 Contact



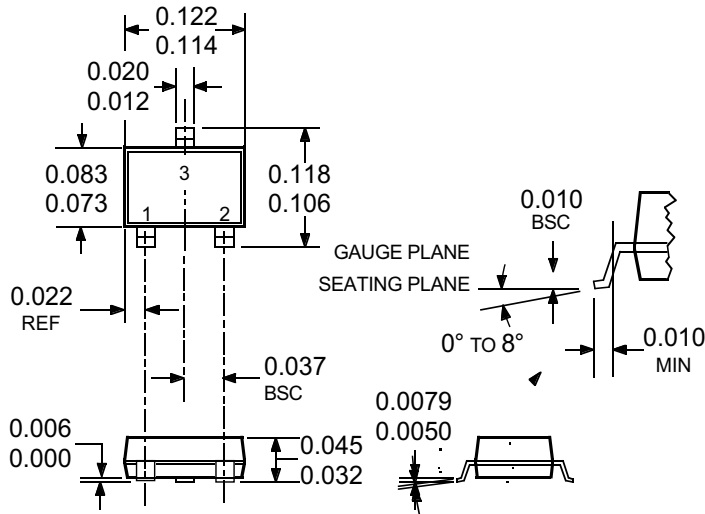
Dimensions in millimeters
U.S. Customary dimensions (in.)
in brackets, for reference only

- △ Pin index area
- △ Exposed thermal pad
- △ Optional thermal vias, $\varnothing 0.30$ [0.012], pitch 1.2 [0.047]
- △ Typical pad layout; adjust as necessary to meet application process requirements

3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

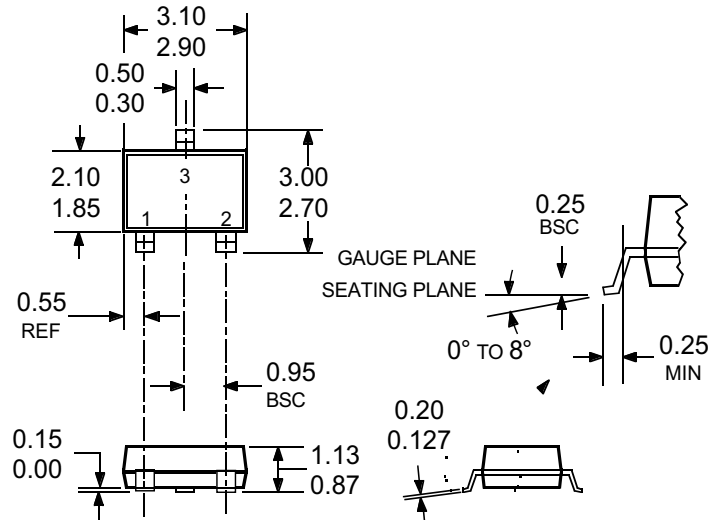
PACKAGE DESIGNATOR 'LH' (SOT23W, fits SC-59A solder-pad layout)

Dimensions in Inches
(for reference only)

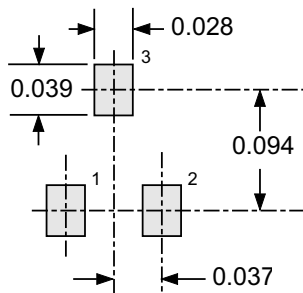


Dwg. MA-010-3D in

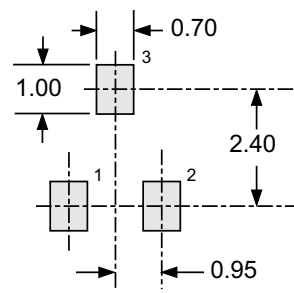
Dimensions in Millimeters
(controlling dimensions)



Dwg. MA-010-3D mm



Dwg. MA-011-3 in



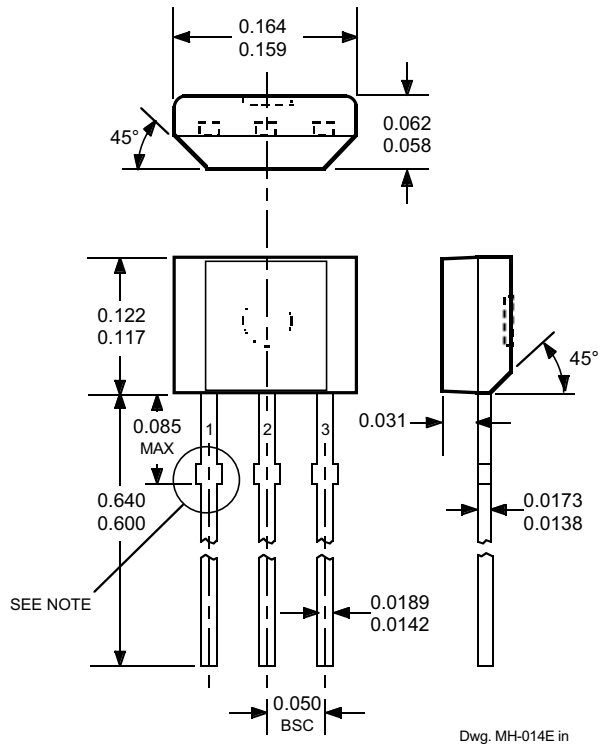
Dwg. MA-011-3 mm

- NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
3. Height does not include mold gate flash.
4. Where no tolerance is specified, dimension is nominal.

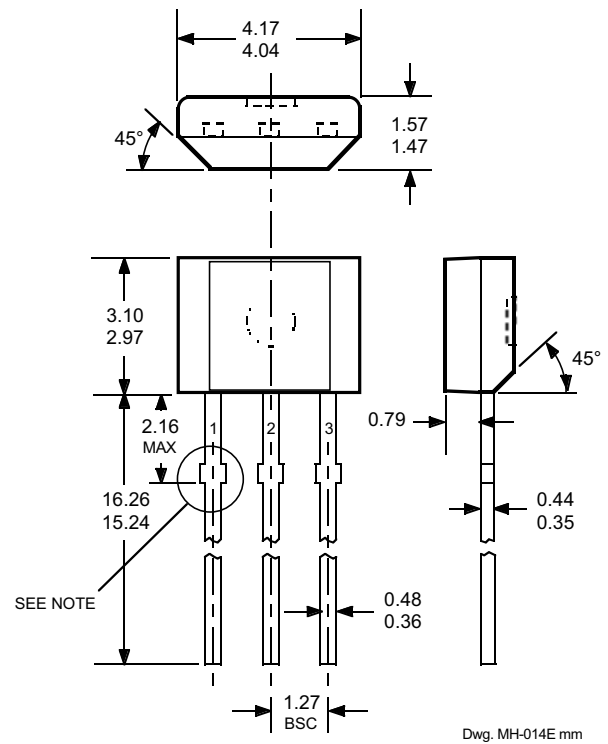
A3212 MICROPOWER, ULTRA-SENSITIVE HALL-EFFECT SWITCH

PACKAGE DESIGNATOR 'UA'

Dimensions in Inches
(controlling dimensions)



Dimensions in Millimeters
(for reference only)



- NOTES: 1. Tolerances on package height and width represent allowable mold offsets. Dimensions given are measured at the widest point (parting line).
2. Exact body and lead configuration at vendor's option within limits shown.
3. Height does not include mold gate flash.
4. Recommended minimum PWB hole diameter to clear transition area is 0.035" (0.89 mm).
5. Where no tolerance is specified, dimension is nominal.

3212
MICROPOWER,
ULTRA-SENSITIVE
HALL-EFFECT SWITCH

The products described herein are manufactured under one or more of the following U.S. patents: 5,045,920; 5,264,783; 5,442,283; 5,389,889; 5,581,179; 5,517,112; 5,619,137; 5,621,319; 5,650,719; 5,686,894; 5,694,038; 5,729,130; 5,917,320; and other patents pending.

Allegro MicroSystems, Inc. reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

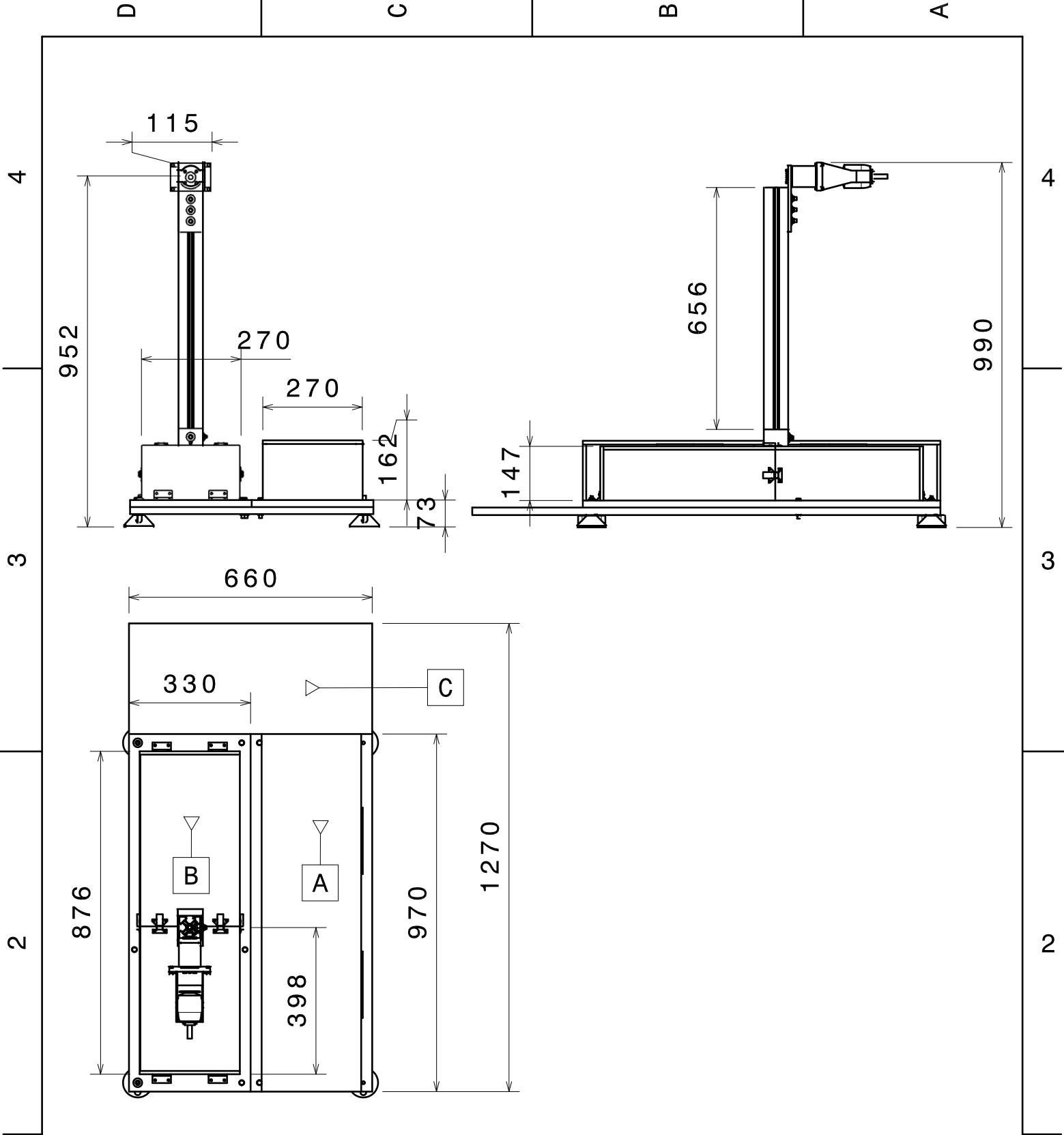
Allegro products are not authorized for use as critical components in life-support appliances, devices, or systems without express written approval.

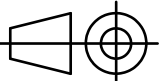
The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, Inc. assumes no responsibility for its use; nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use.

APÉNDICE B

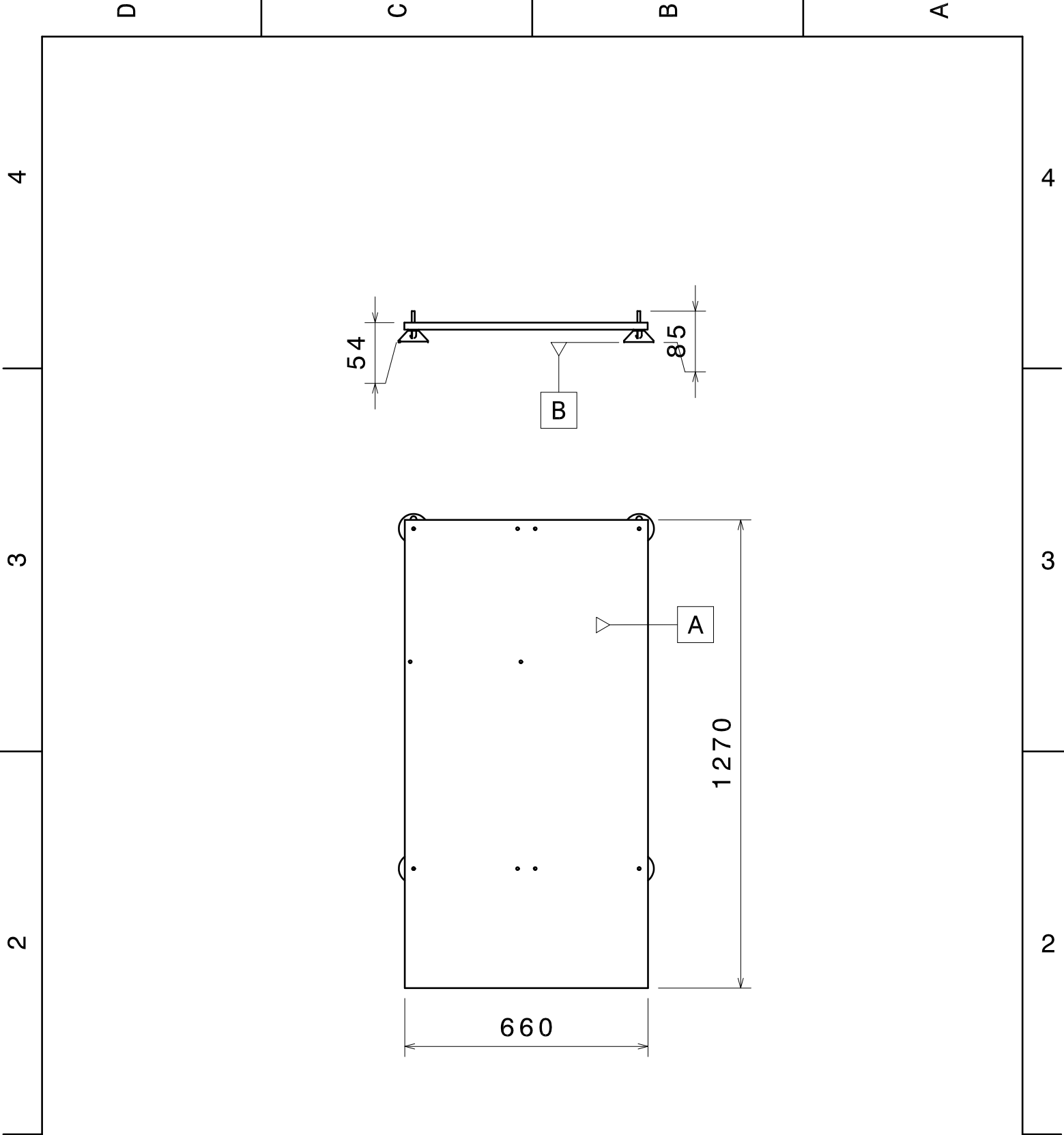
ÍNDICE DE PLANOS

BANCADA UNIVERSAL.....	1
BASE FIJA	2
BANCADA TÚNEL	3
CAJA ELECTRÓNICA.....	4
BASE	5
APOYO	6
BASE DE BANCADA TÚNEL	7
CARCASA MENOR C	8
CARCASA MENOR P	9
CARCASA MAYOR C	10
CARCASA MAYOR P	11
ESCUADRA LEROY MERLIN	12
PLACA 2.....	13
ESCUADRA ALU-STOCK	14
PLACA 1.....	15
BISAGRA.....	16
BASE MÓVIL	17
ANCLAJE.....	18
TUBO	19
GALLETA	20
PLACA A	21
BASE DE CAJA ELECTRÓNICA	22
PLACAS DE CAJA ELECTRÓNICA	23
BISAGRAS 2	24
TABLONES Y VELCRO.....	25



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	BANCADA UNIVERSAL	I	—
FECHA 05/06/2012		MATERIAL	VARIADO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	-	E	—
		PIEZA	-	D	—
ESCALA 1:14	Nº PLANO 1	ESPESOR	-	C	B. FIJA
				B	B. TÚNEL
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	C. ELECT.

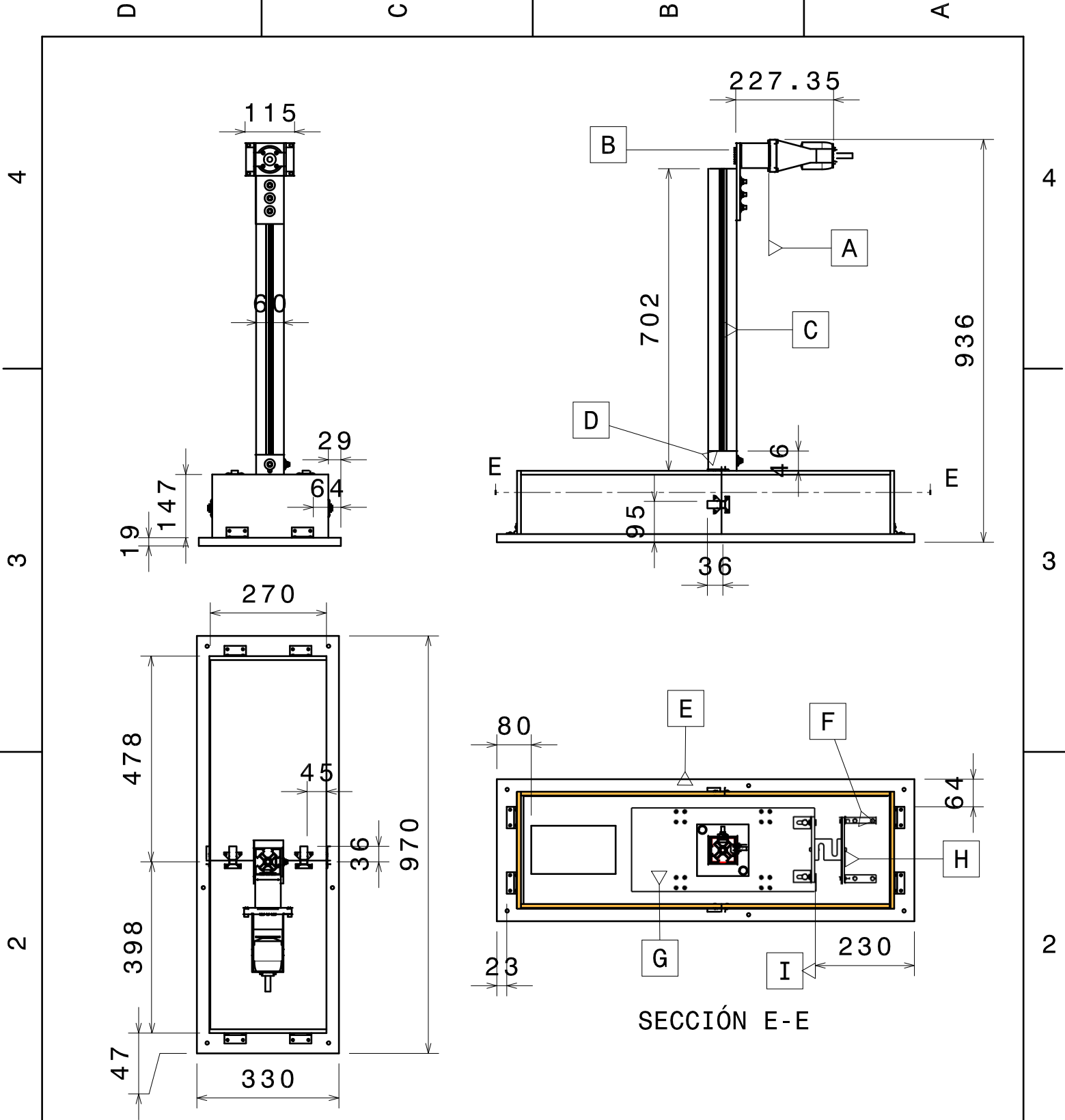
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

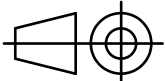


DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	BASE FIJA	I	—
		MATERIAL	VARIADO	H	—
FECHA: 05/06/2012		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	BASE FIJA	E	—
		PIEZA	-	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	-	C	—
				B	APOYO
TAMANO A4				A	BASE
ESCALA 1:14		This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.			
N° PLANO 2					

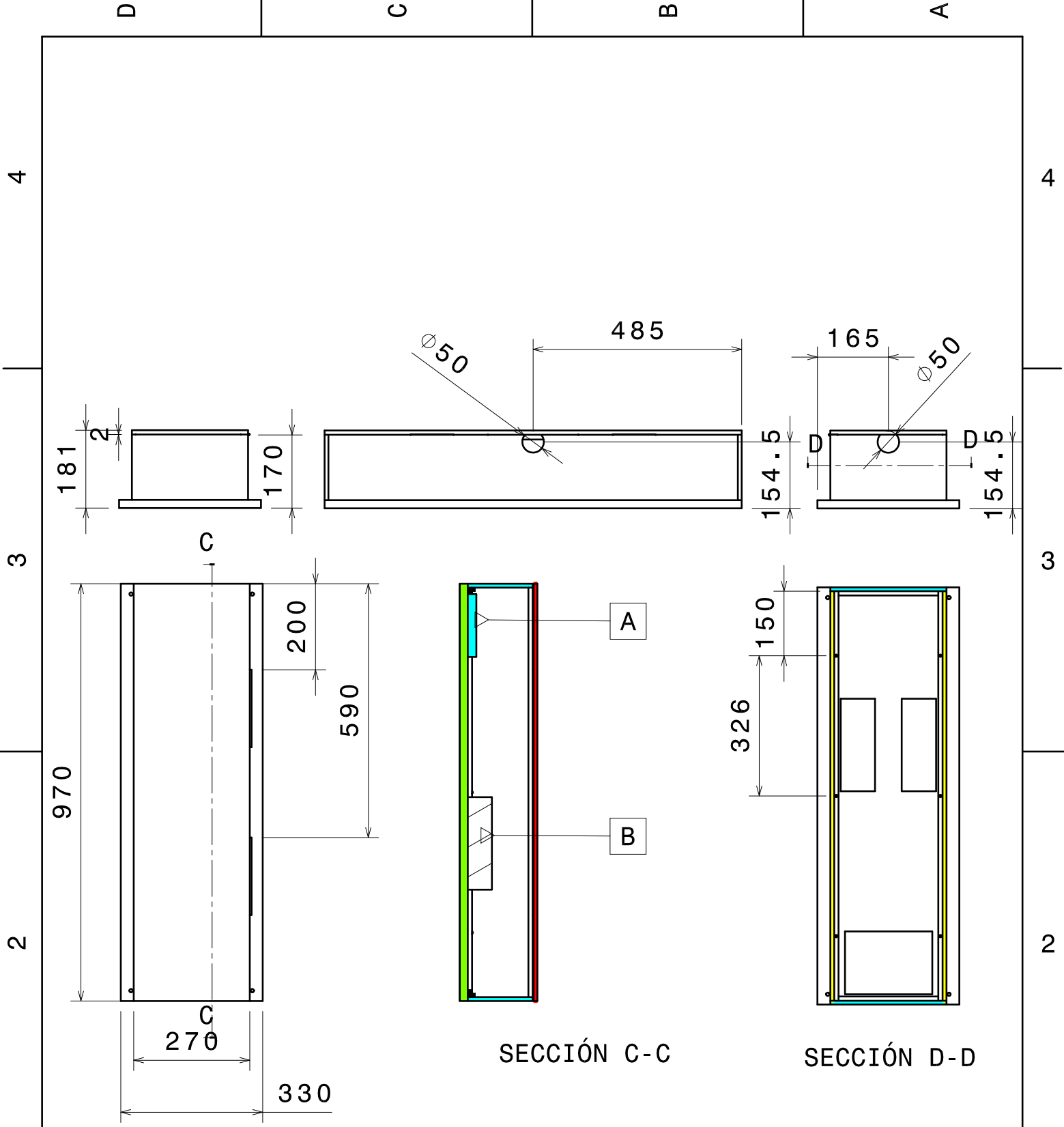
D

A



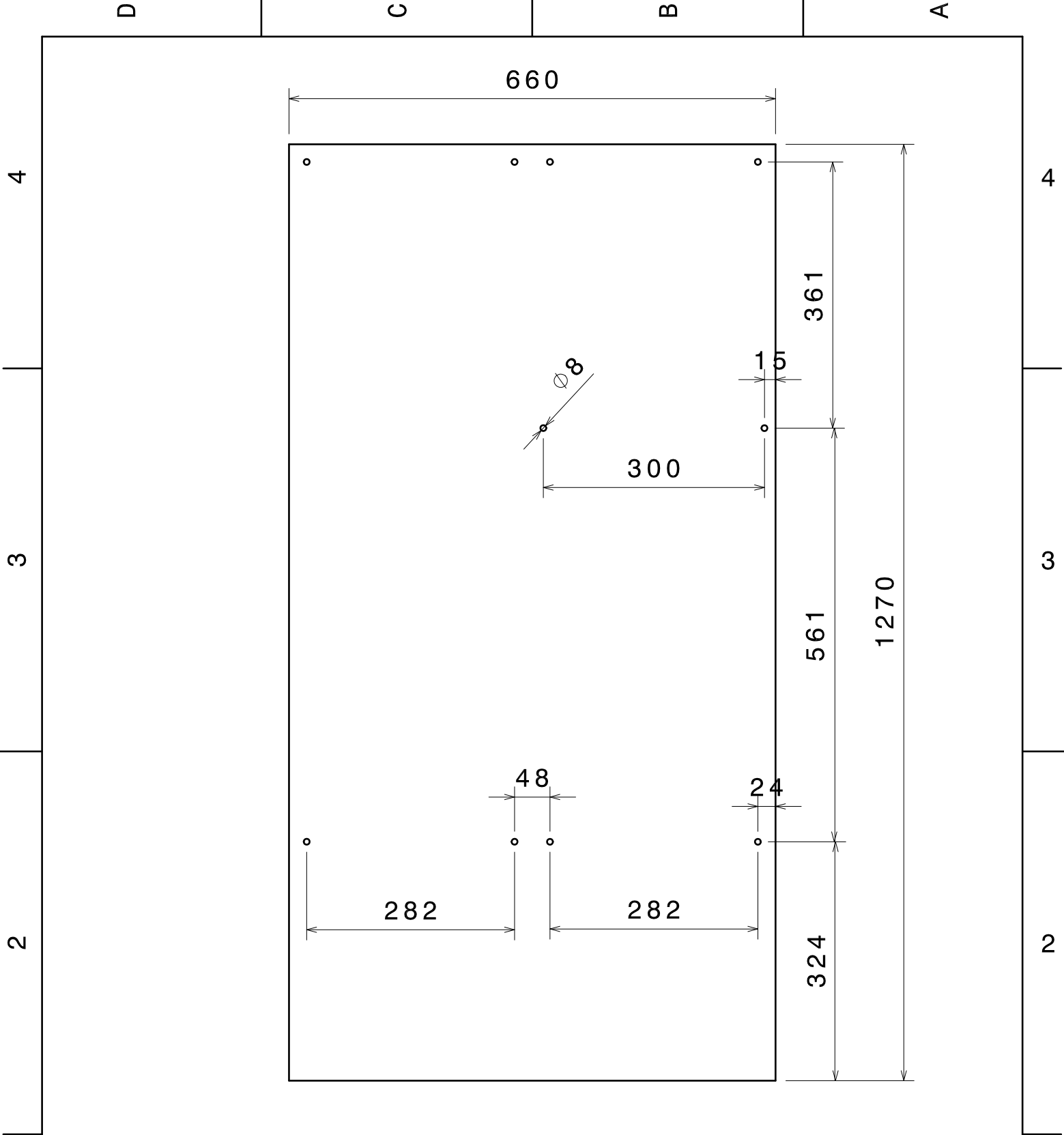
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ FECHA: 05/06/2012		NOMBRE	BANCADA TÚNEL	I	PLACA 1
		MATERIAL	VARIADO	H	PLACA 2
CLASE: PROYECTO F.C. MEDIDAS: MILÍMETROS		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	B. MÓVIL
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	ESCUADRA
TAMANO A4		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	BASE
		PIEZA	-	D	ANCLAJE
ESCALA 1:12	Nº PLANO 3	ESPESOR	-	C	TUBO
				B	PLACA A
				A	GALLETA
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.					

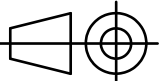
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

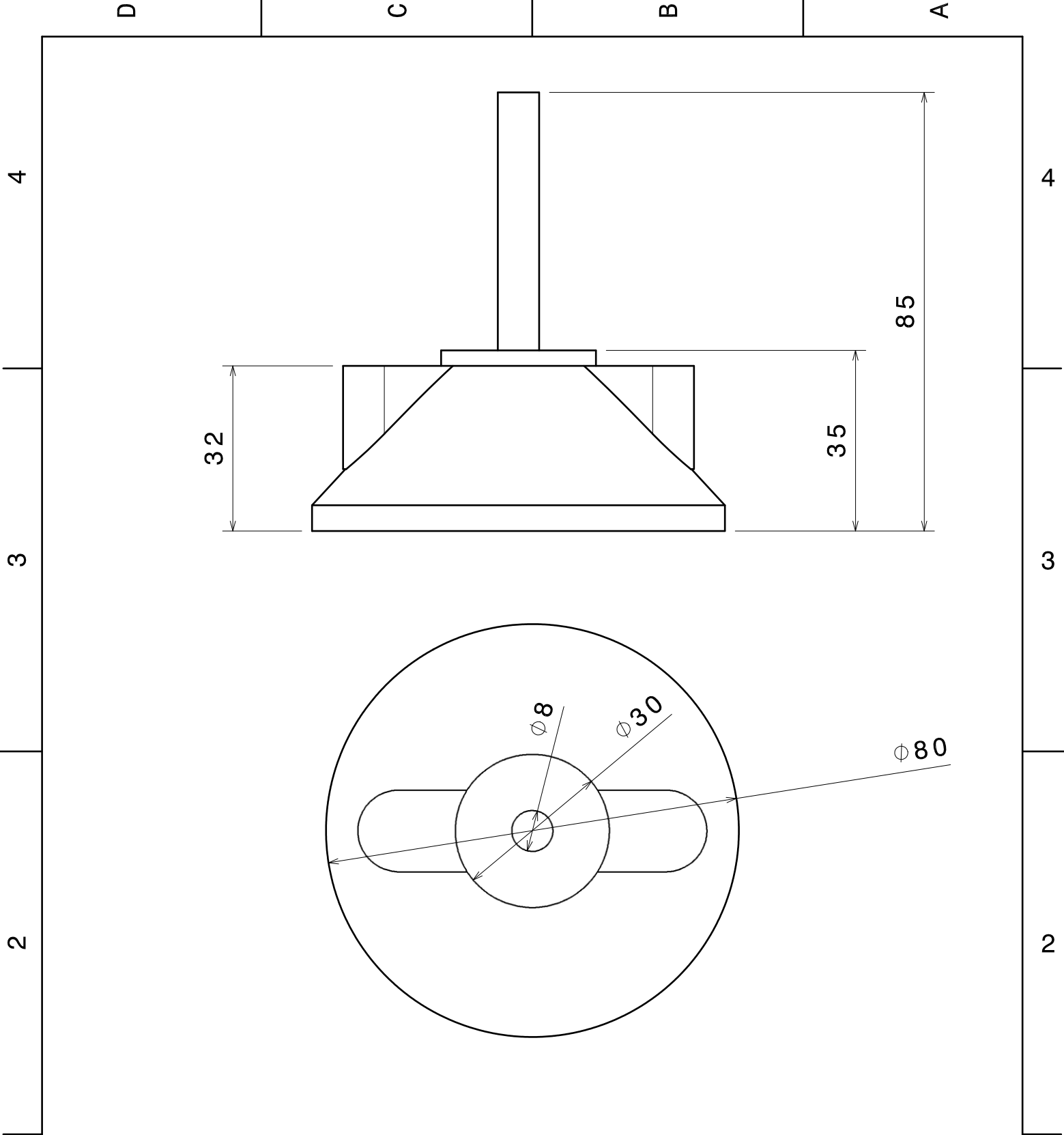


DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	CAJA ELECTRONICA	I	—
		MATERIAL	VARIADO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	—
CLASE: PROYECTO F.C.		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		SUBGRUPO	CAJA ELECTRÓNICA	E	—
TAMANO A4		PIEZA	-	D	—
		ESPESOR	-	C	—
ESCALA 1:12	Nº PLANO 4			B	ACOND
				A	P. HERC.

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	BASE	I	—
FECHA: 05/06/2012		MATERIAL	MADERA DM	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO		SUBGRUPO	BASE FIJA	E	—
A4		PIEZA	TABLA	D	—
ESCALA	Nº PLANO			C	—
1:7	5	ESPESOR	19	B	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—



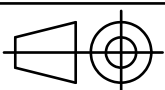
DISEÑADO POR:
HUGO LÓPEZ PÉREZ

FECHA
05/06/2012

CLASE:
PROYECTO F.C.

MEDIDAS:
MILÍMETROS

TAMANO
A4



ESCALA
1:1

Nº PLANO
6

NOMBRE

MATERIAL

TIPO

GRUPO

SUBGRUPO

PIEZA

ESPESOR

APOYO

PLÁSTICO Y ACERO

PLANO DE PIEZA

BANCADA UNIVERSAL

BASE FIJA

APOYO

-

I

H

G

F

E

D

C

B

A

—

—

—

—

—

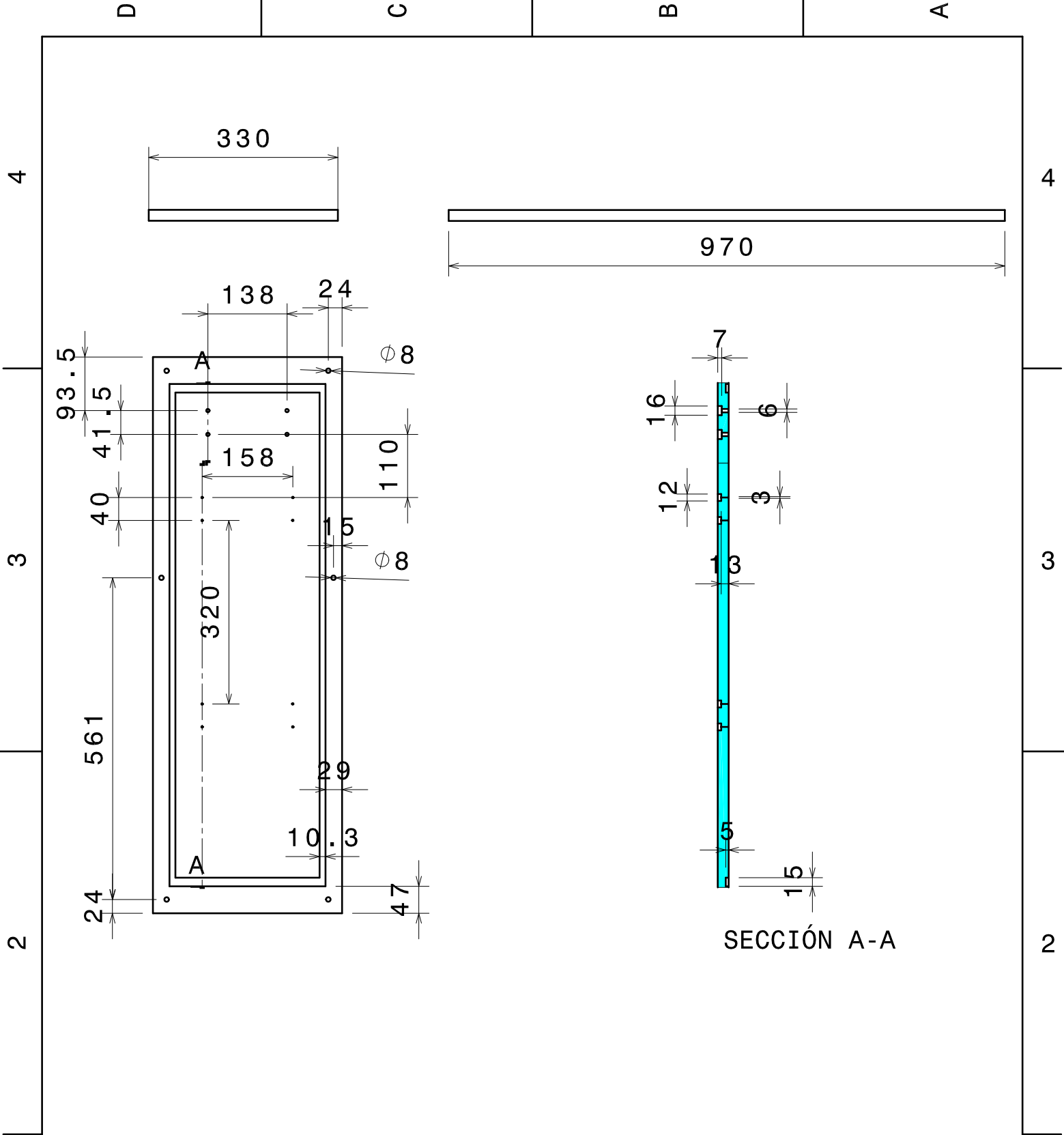
—

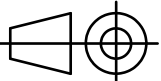
—

—

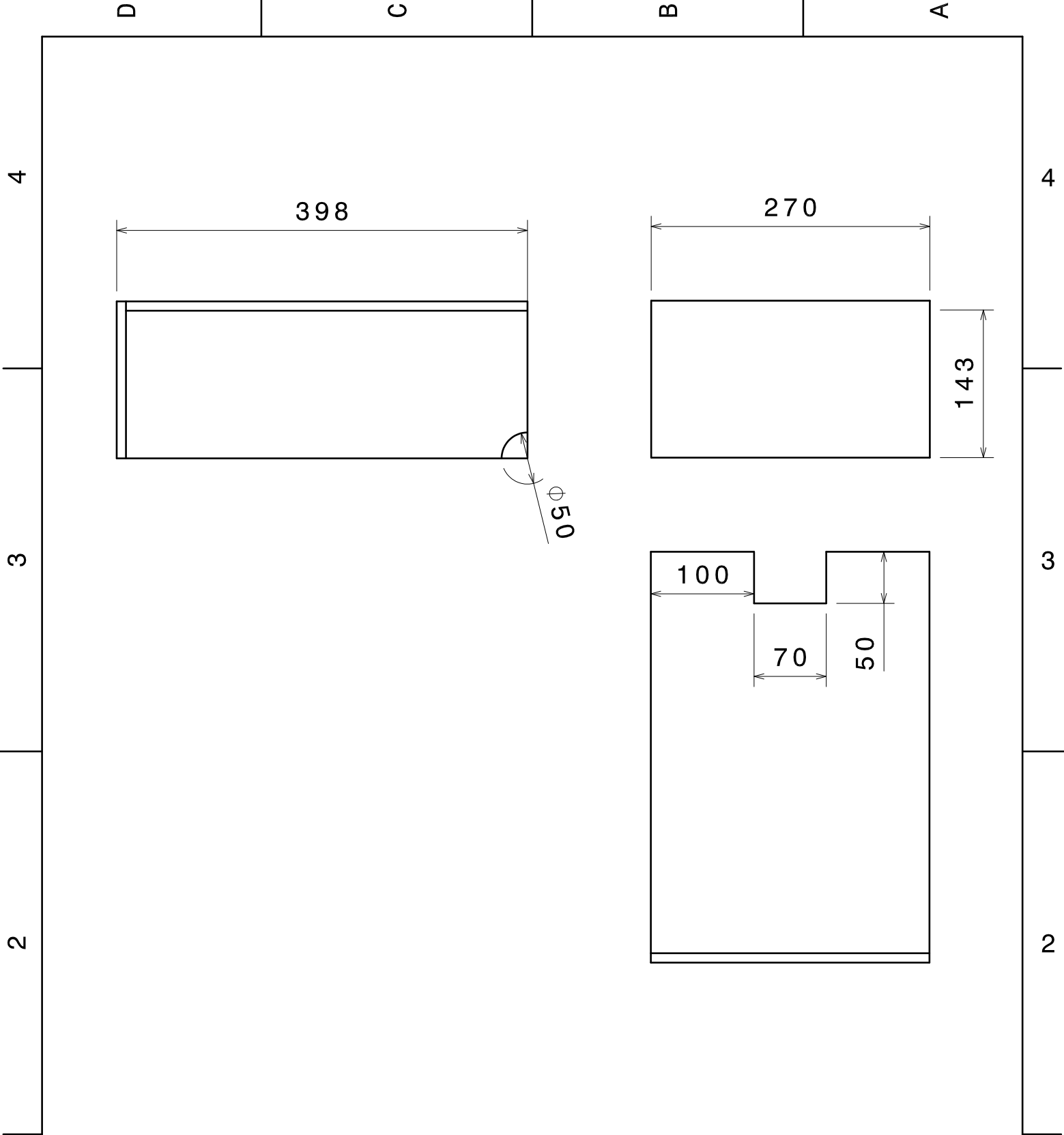
—

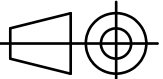
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.



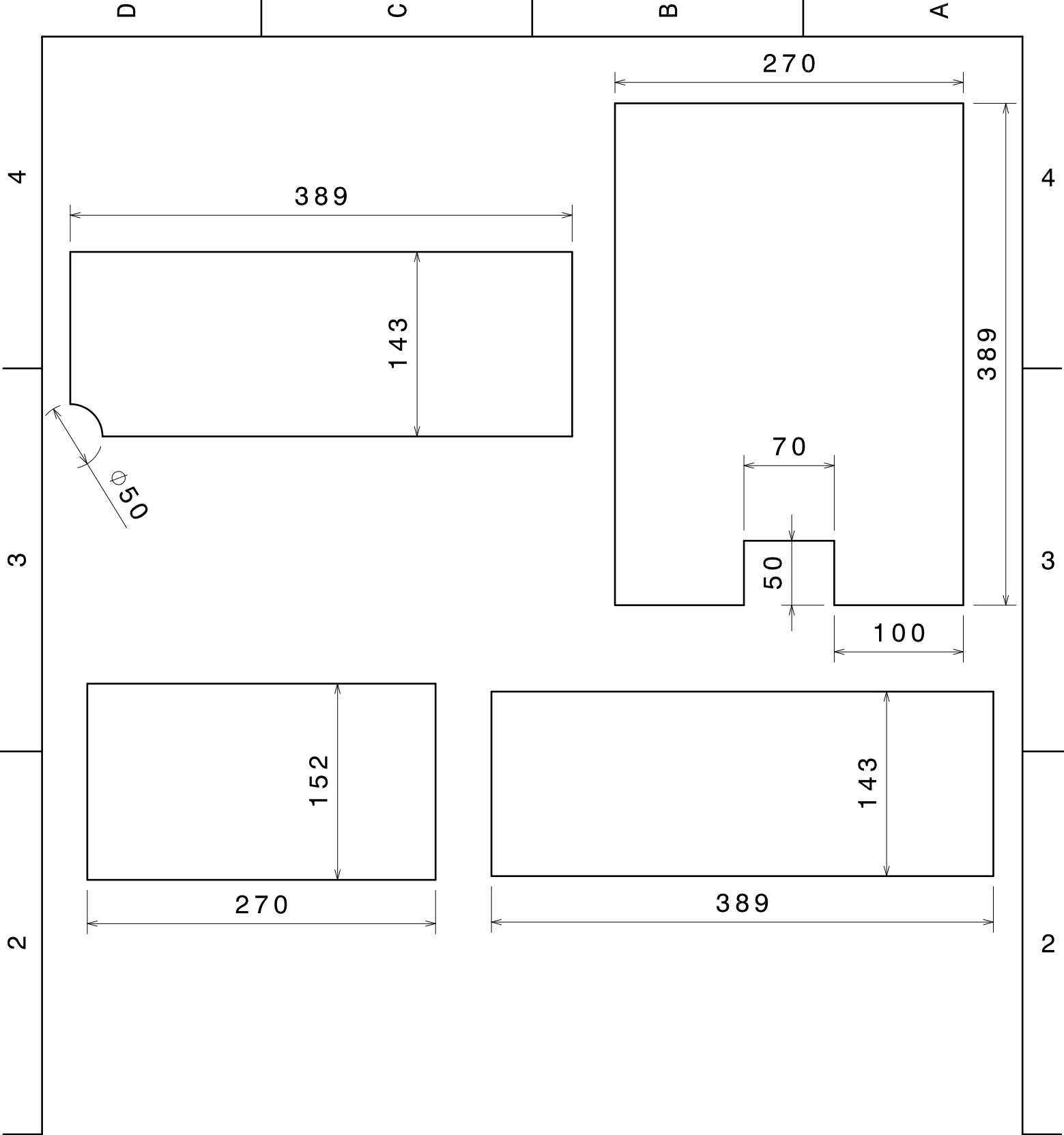
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ FECHA 05/06/2012		NOMBRE	BASE DE BANCADA TÚNEL	I	—
		MATERIAL	MADERA DM	H	—
CLASE: PROYECTO F.C. MEDIDAS: MILÍMETROS		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	TABLA	D	—
ESCALA 1:9	Nº PLANO 7	ESPESOR	19	C	—
				B	—
				A	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.					

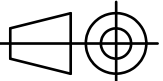
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.



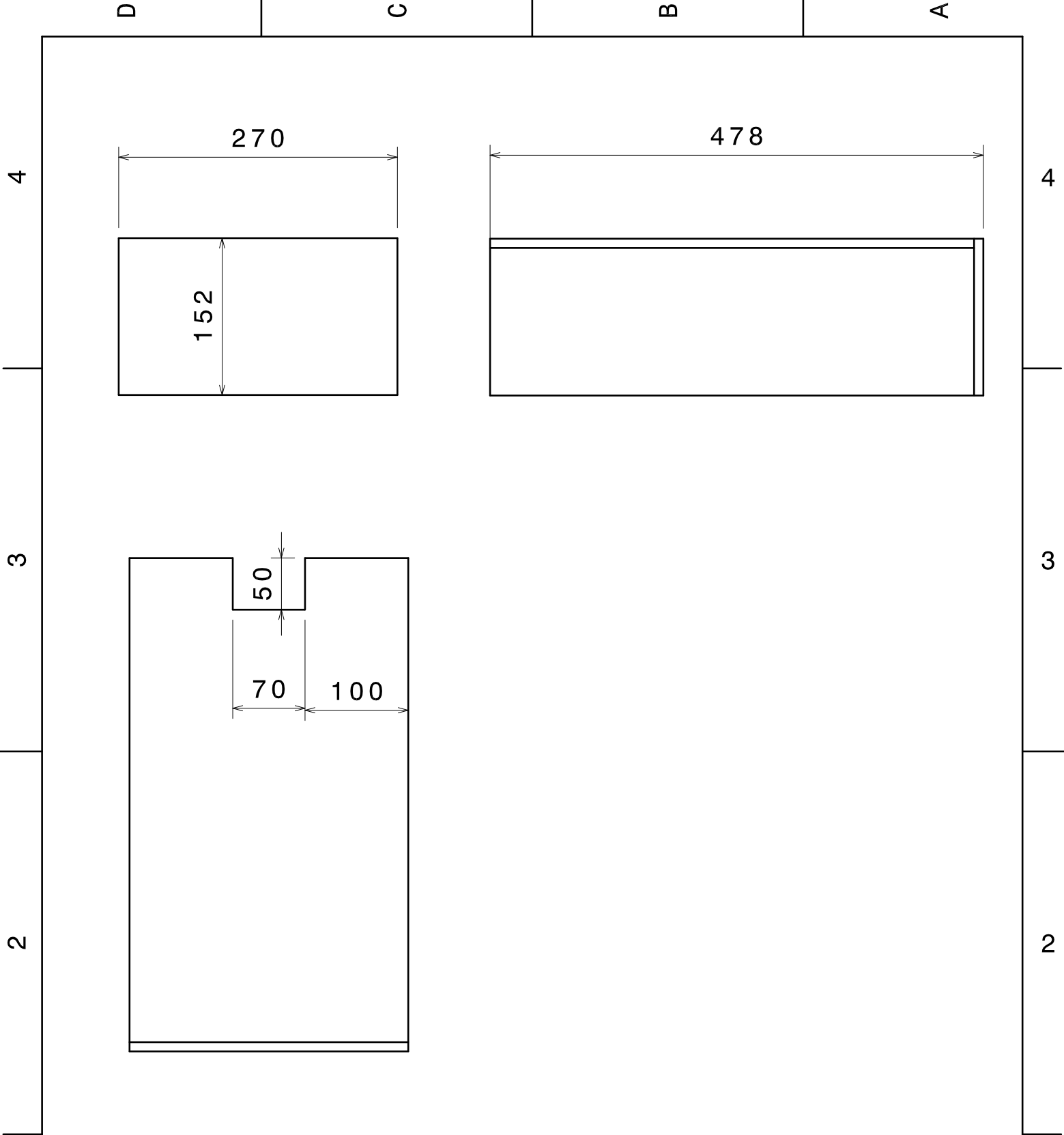
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ FECHA 05/06/2012		NOMBRE	CARCASA MENOR C	I	—
		MATERIAL	CONTRACHAPADO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C. MEDIDAS: MILÍMETROS		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	-	D	—
ESCALA 1:5	Nº PLANO 8	ESPESOR	-	C	—
				B	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

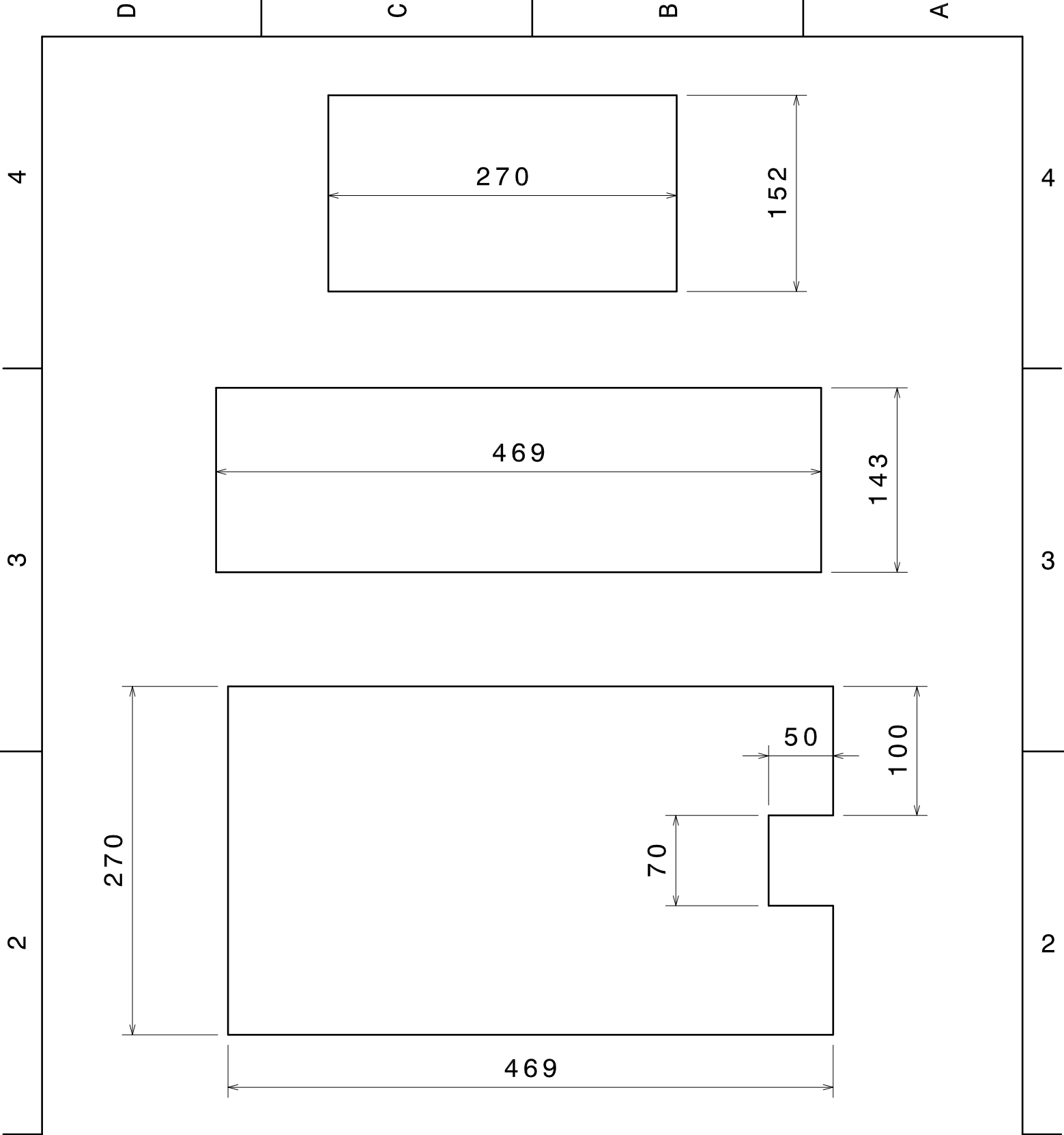


DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	CARCASA MENOR P	I	—
FECHA 05/06/2012		MATERIAL	CONTRACHAPADO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
A4		PIEZA	PLACAS	D	—
ESCALA	Nº PLANO			C	—
1:4	9	ESPESOR	9	B	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

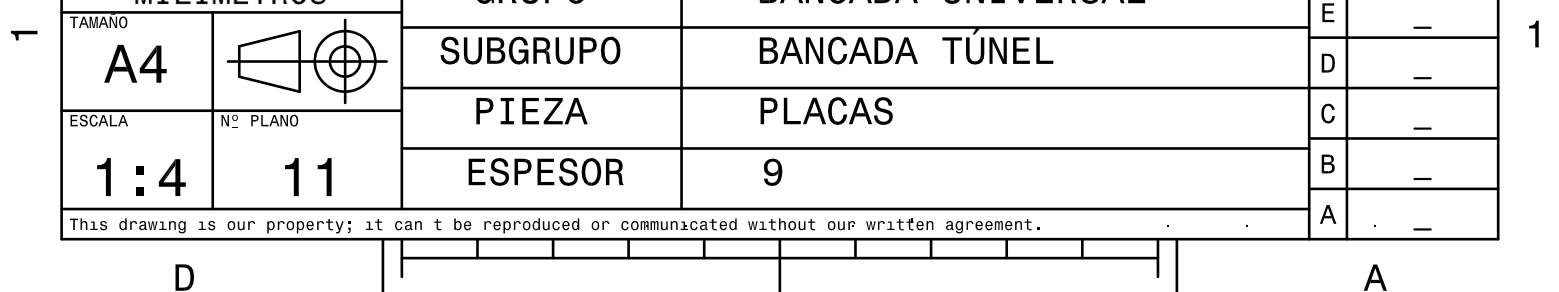


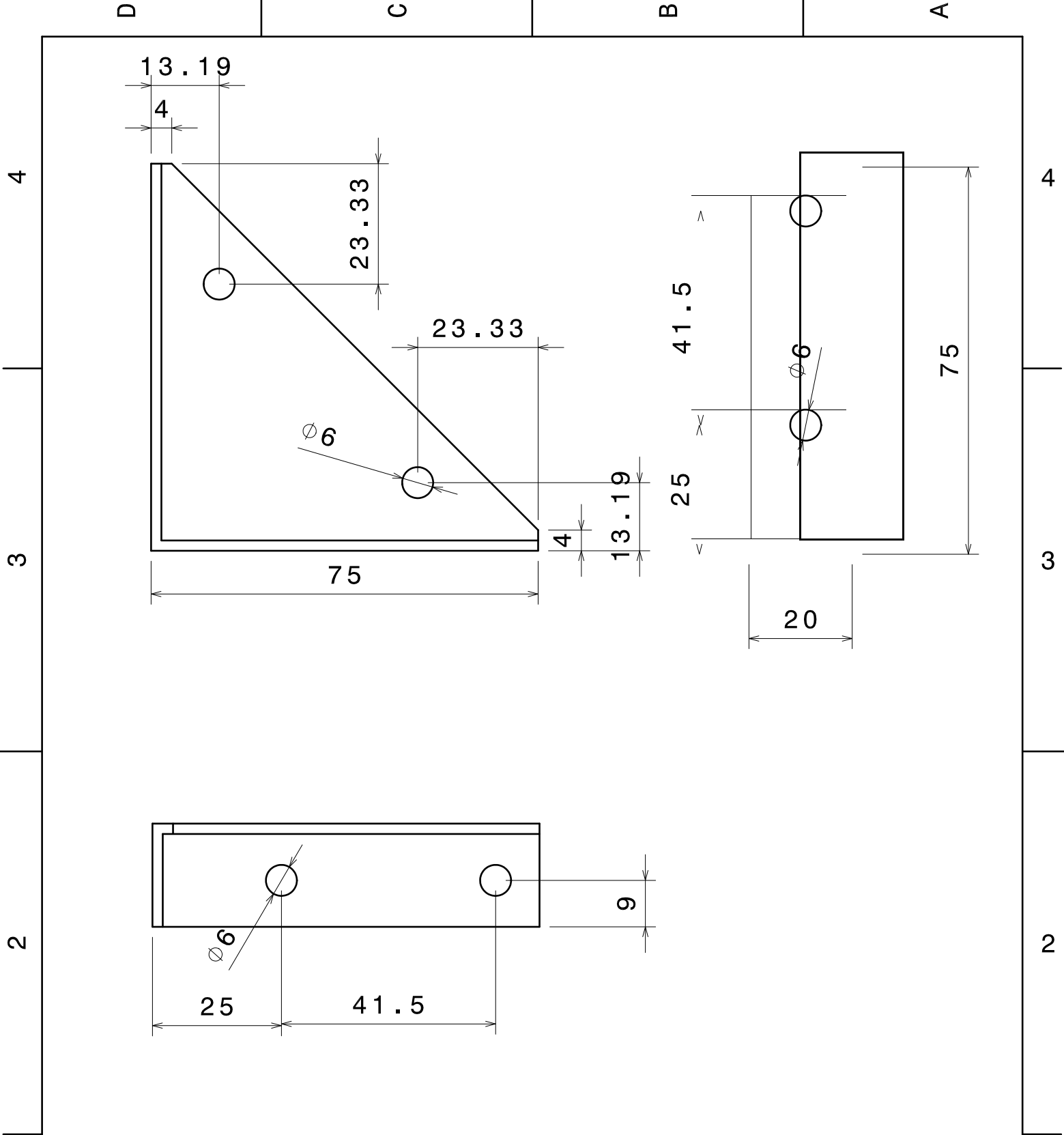
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	CARCASA MAYOR C	I	—
		MATERIAL	CONTRACHAPADO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE CONJUNTO	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	-	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	-	C	—
				B	—
TAMANO A4				A	—
ESCALA 1:4					
Nº PLANO 10					
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.					



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	BANCADA UNIVERSAL	I	—
		MATERIAL	CONTRACHAPADO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
CLASE: PROYECTO F.C.		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		PIEZA	PLACAS	D	—
TAMANO A4		ESPESOR	9	C	—
				B	—
ESCALA 1:4	Nº PLANO 11			A	—

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.





DISEÑADO POR:
HUGO LÓPEZ PÉREZ

FECHA

05/06/2012

CLASE:

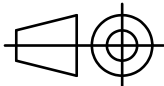
PROYECTO F.C.

MEDIDAS:

MILÍMETROS

TAMANO

A4



ESCALA

1:1

Nº PLANO

12

NOMBRE

ESCUADRA LEROY MERLIN

MATERIAL

ACERO

TIPO

PLANO DE PIEZA

GRUPO

BANCADA UNIVERSAL

SUBGRUPO

BANCADA TÚNEL

PIEZA

ESCUADRA

ESPESOR

3

I

—

H

—

G

—

F

—

E

—

D

—

C

—

B

—

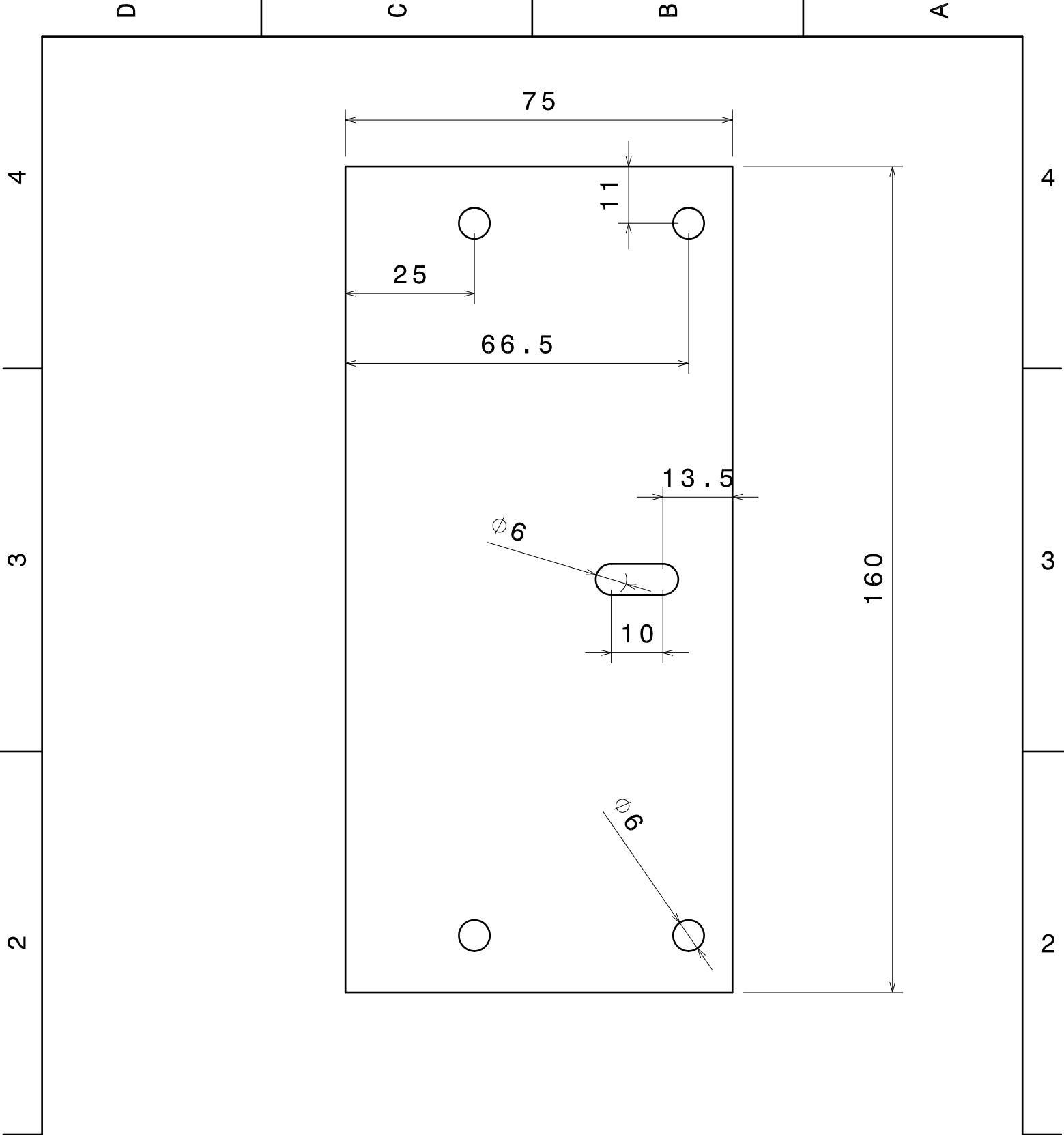
A

—

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	PLACA 2	I	—
		MATERIAL	ALUMINIO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	PLACA	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	6.5	C	—
				B	—
TAMANO A4				A	—
ESCALA 1:1					
Nº PLANO 13					

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

4

3

2

1

D

C

B

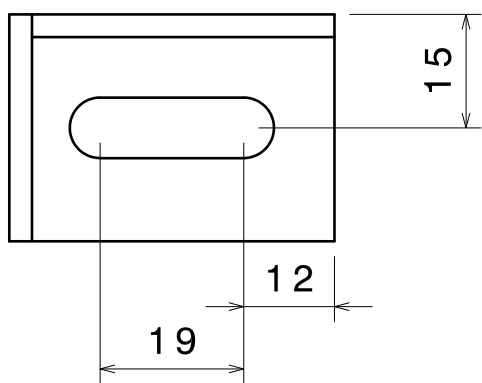
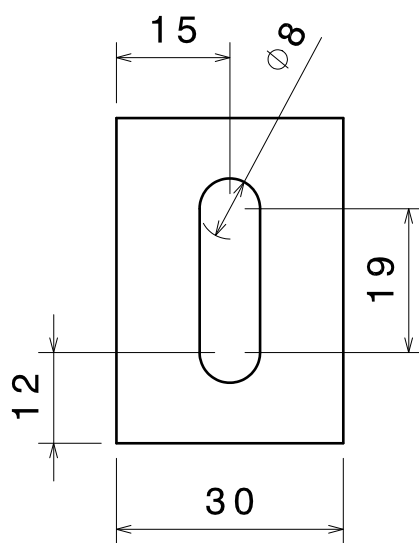
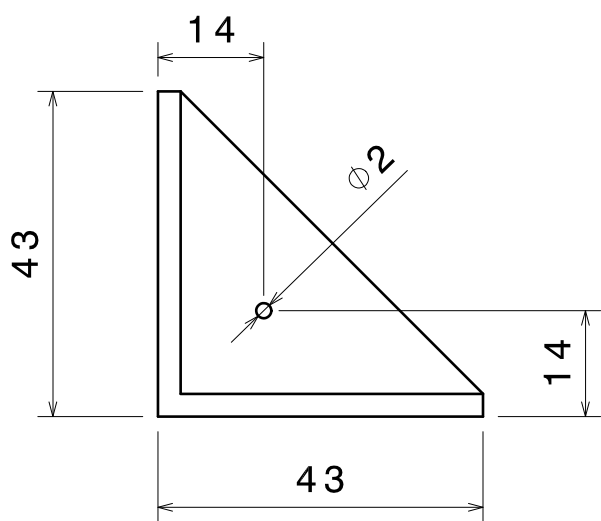
A

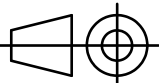
4

3

2

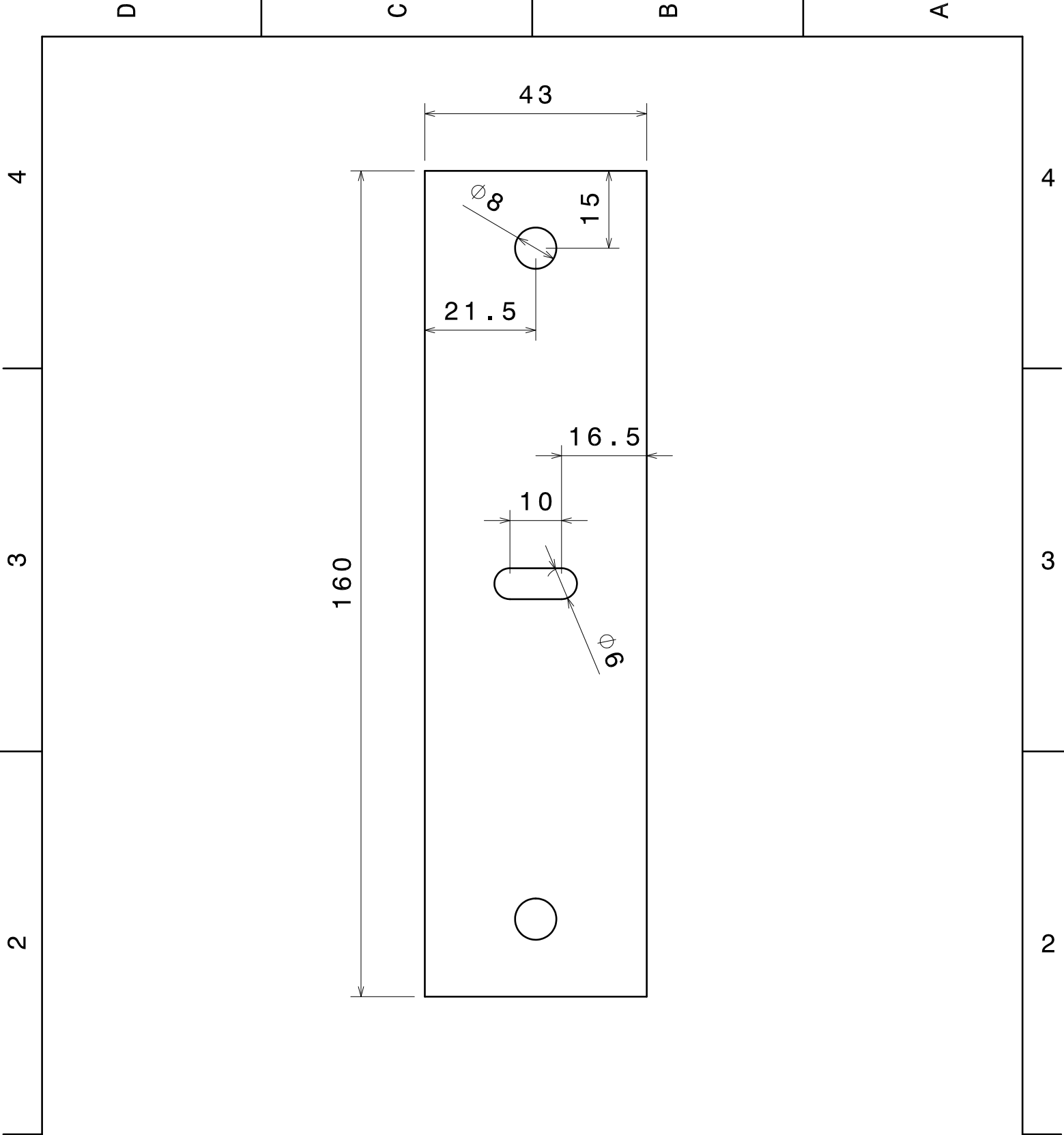
1



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	ESCUADRA ALU-STOCK	I	—
FECHA 05/06/2012		MATERIAL	ALUMINIO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	ESCUADRA	D	—
ESCALA 1 : 1	Nº PLANO 14	ESPESOR	3	C	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				B	—
				A	—

D

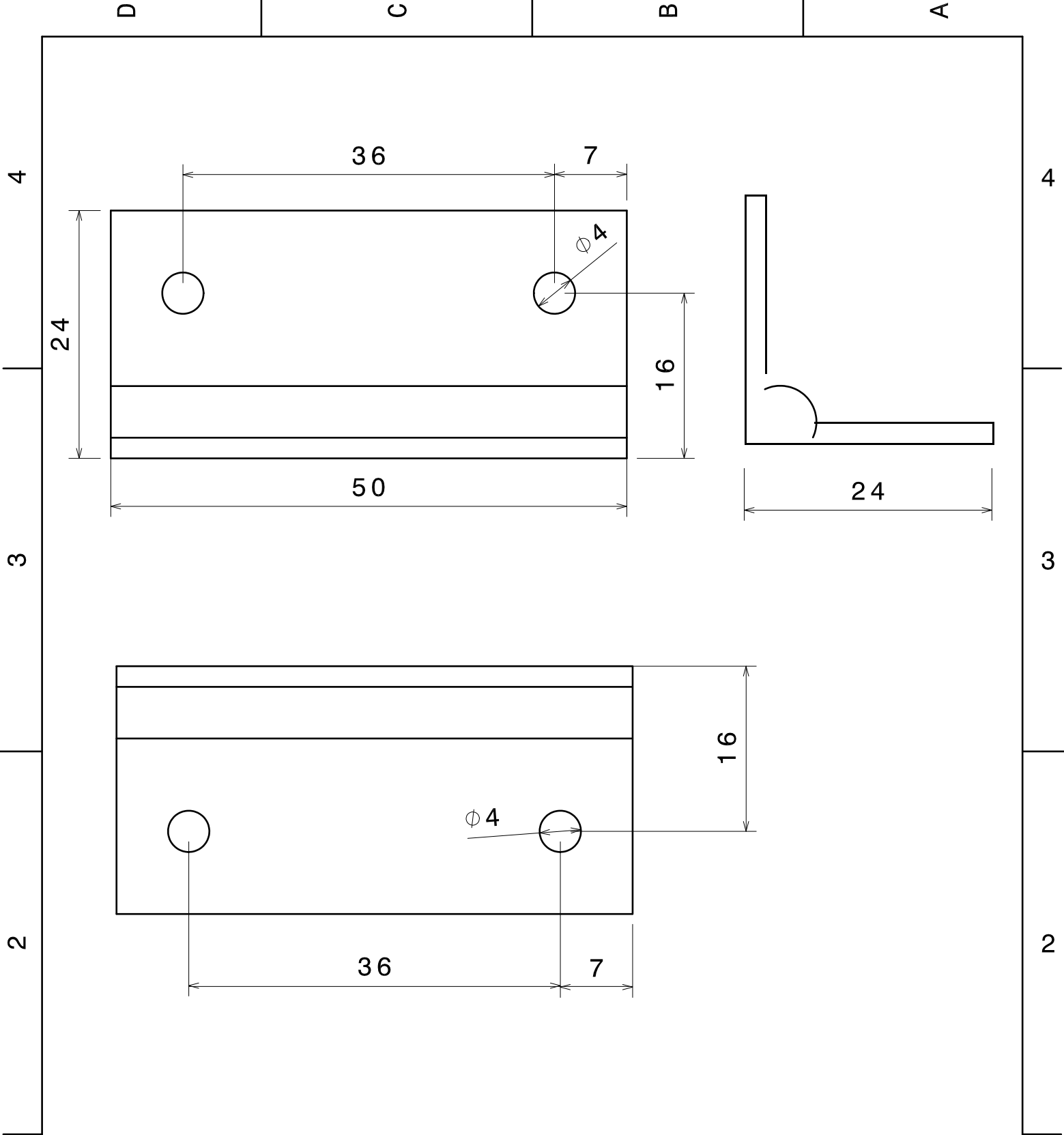
A

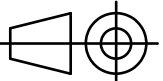


DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	PLACA 1	I	—
		MATERIAL	ALUMINIO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	PLACA	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	6.5	C	—
				B	—
TAMANO A4				A	—
ESCALA 1:1					
Nº PLANO 15					
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.					

D

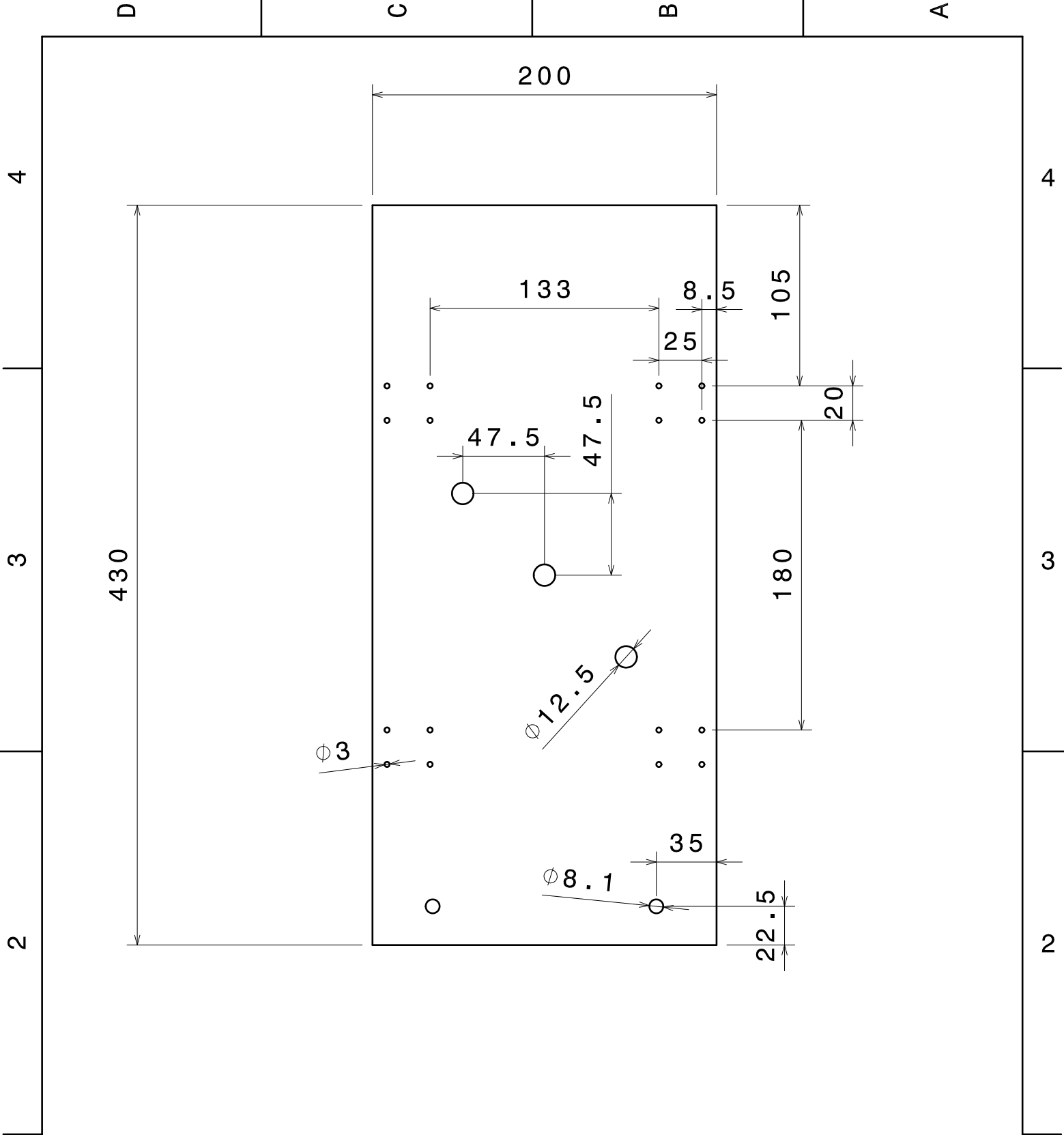
A



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	BISAGRA	I	—
FECHA 05/06/2012		MATERIAL	ACERO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	BISAGRA	D	—
ESCALA 2:1	Nº PLANO 16	ESPESOR	2	C	—
				B	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—

D

A



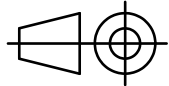
DISEÑADO POR:
HUGO LÓPEZ PÉREZ

FECHA
05/06/2012

CLASE:
PROYECTO F.C.

MEDIDAS:
MILÍMETROS

TAMANO
A4



ESCALA
1:3

Nº PLANO
17

NOMBRE

BASE MÓVIL

I

—

MATERIAL

MADERA DM

H

—

TIPO

PLANO DE PIEZA

G

—

GRUPO

BANCADA UNIVERSAL

F

—

SUBGRUPO

BANCADA TÚNEL

E

—

PIEZA

TABLÓN

D

—

ESPESOR

19

C

—

B

—

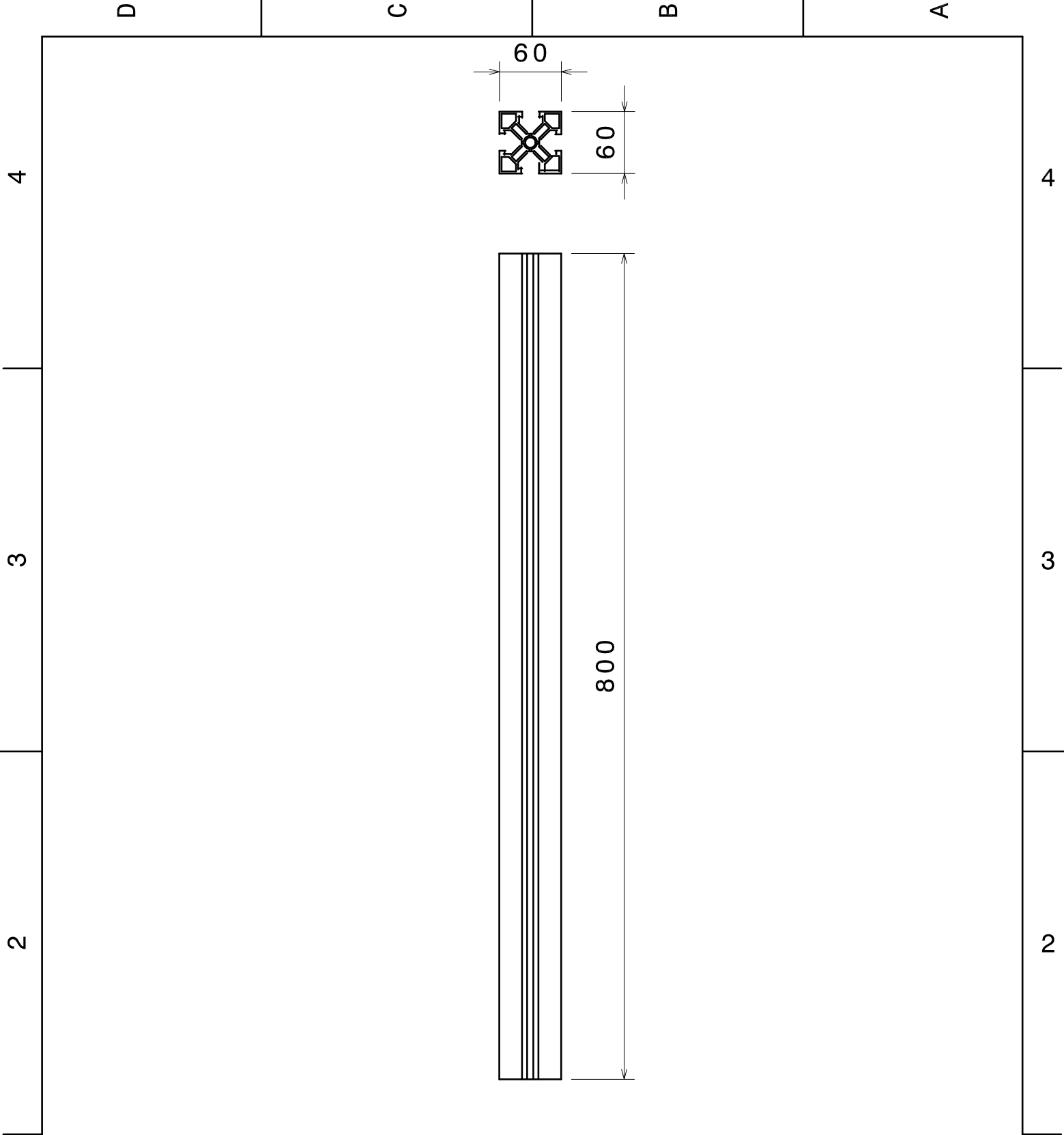
A

—

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

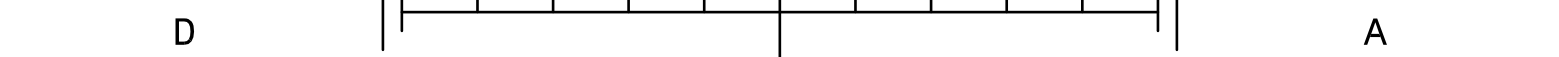
D

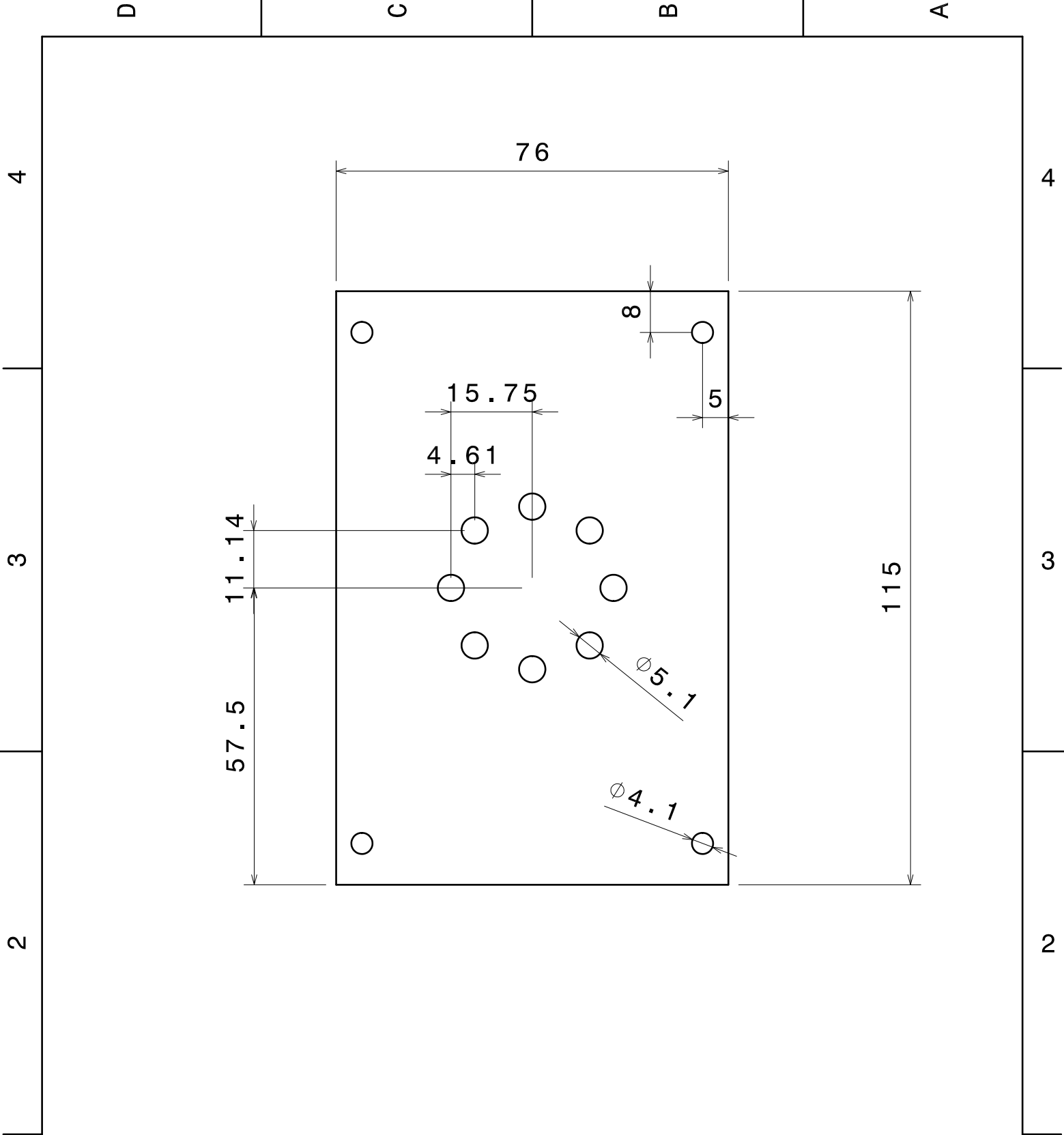
A



DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	VIGA-SOPORTE	I	—
		MATERIAL	ALUMINIO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	TUBO	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	-	C	—
				B	—
TAMANO A4				A	—
ESCALA 1:5					
Nº PLANO 19					

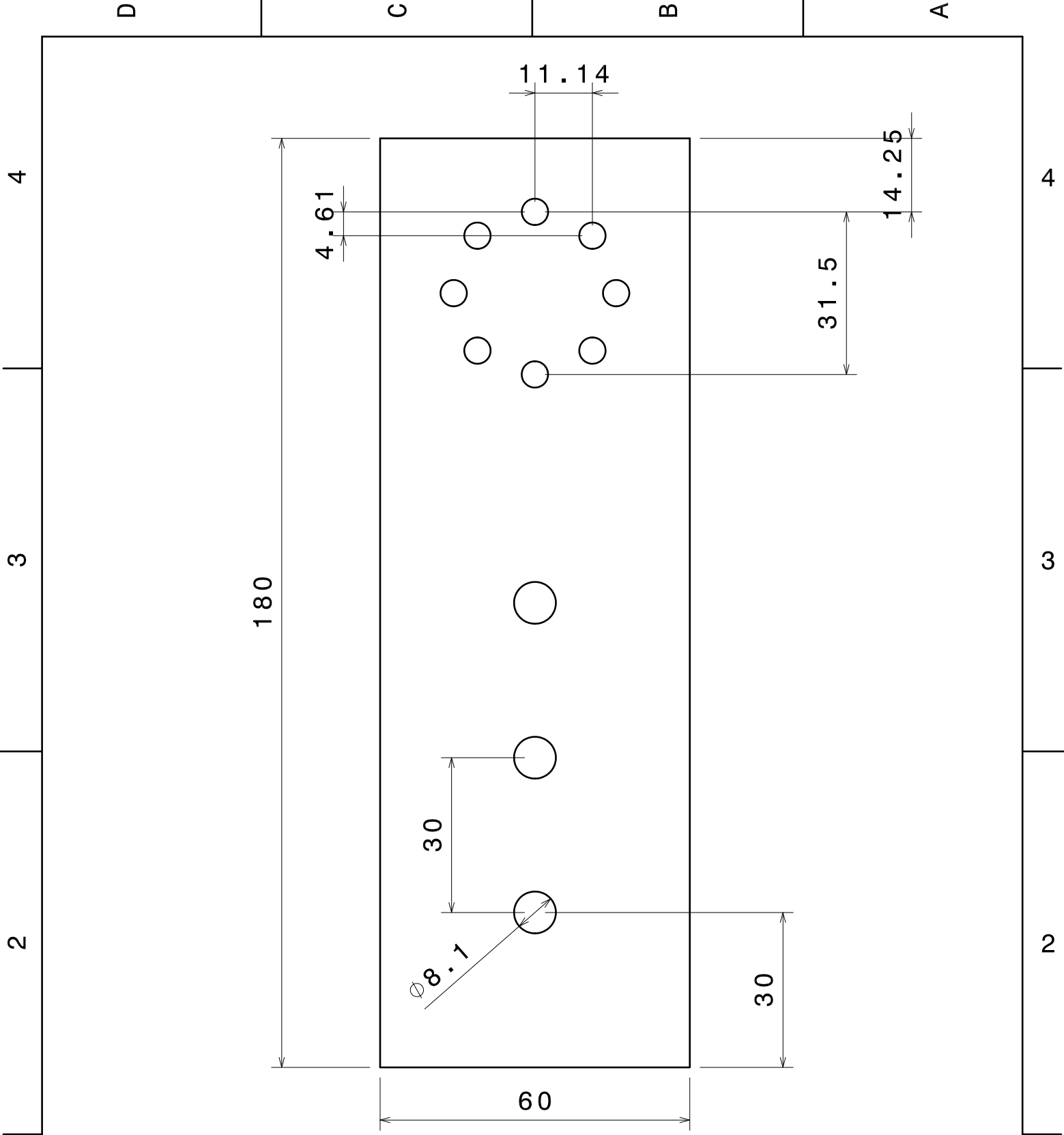
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

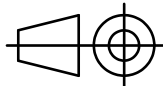




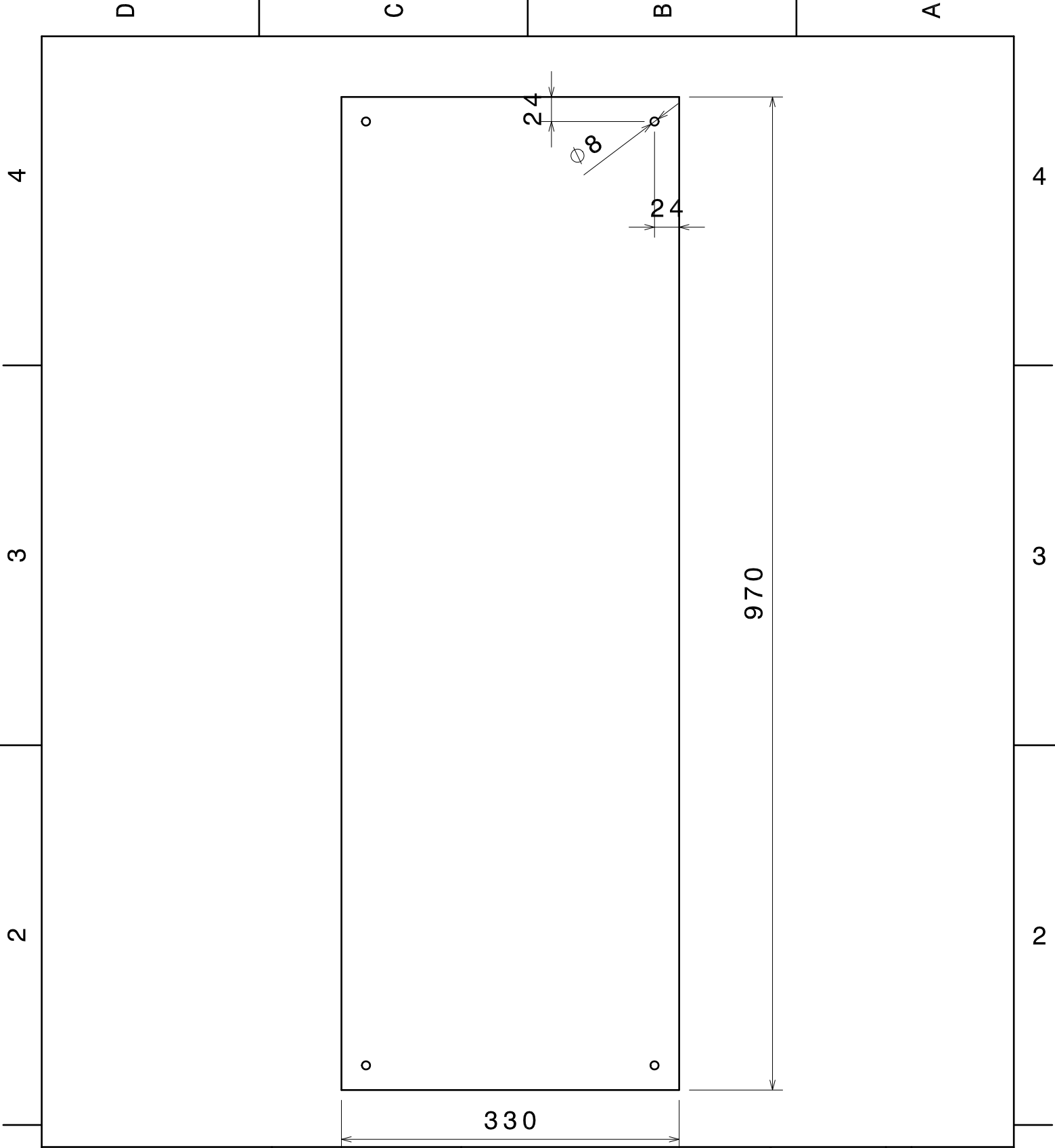
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	GALLETA	I	—
		MATERIAL	ALUMINIO	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
		PIEZA	PLACA	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	10	C	—
				B	—
TAMANO A4				A	—
ESCALA 1:1					
Nº PLANO 20					

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

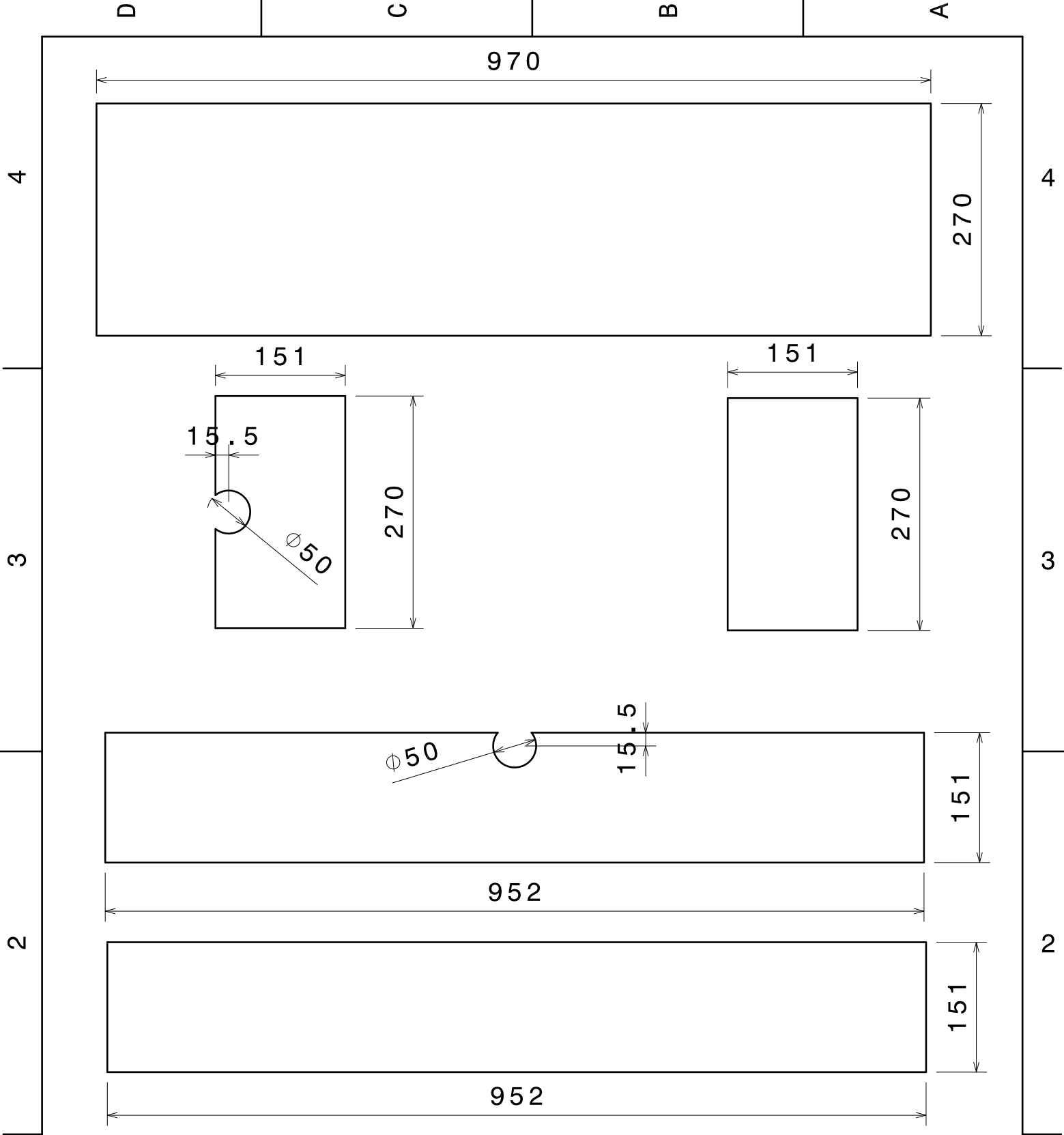


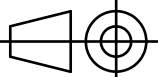
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	PLACA A	I	—
FECHA 05/06/2012		MATERIAL	ALUMINIO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO		SUBGRUPO	BANCADA TÚNEL	E	—
A4		PIEZA	PLACA	D	—
ESCALA	Nº PLANO	ESPESOR	10	C	—
1:1	21			B	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.



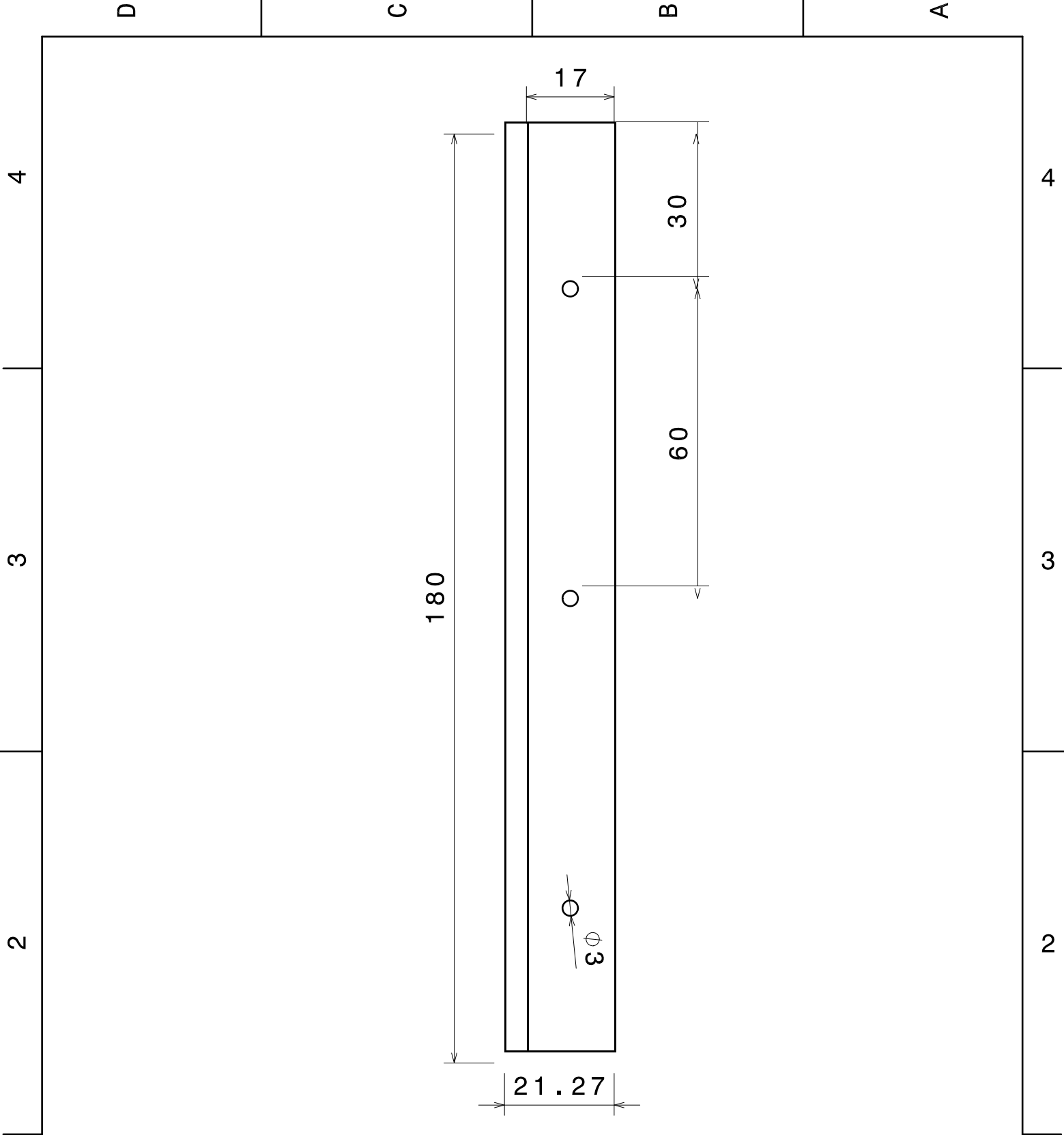
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	BASE CAJA ELECTRÓNICA	I	—
		MATERIAL	MADERA DM	H	—
FECHA 05/06/2012		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
CLASE: PROYECTO F.C.		SUBGRUPO	CAJA ELECTRÓNICA	E	—
		PIEZA	TABLA	D	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		ESPESOR	19	C	—
				B	—
TAMANO A4				A	—
ESCALA 1:5					
Nº PLANO 22					
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.					



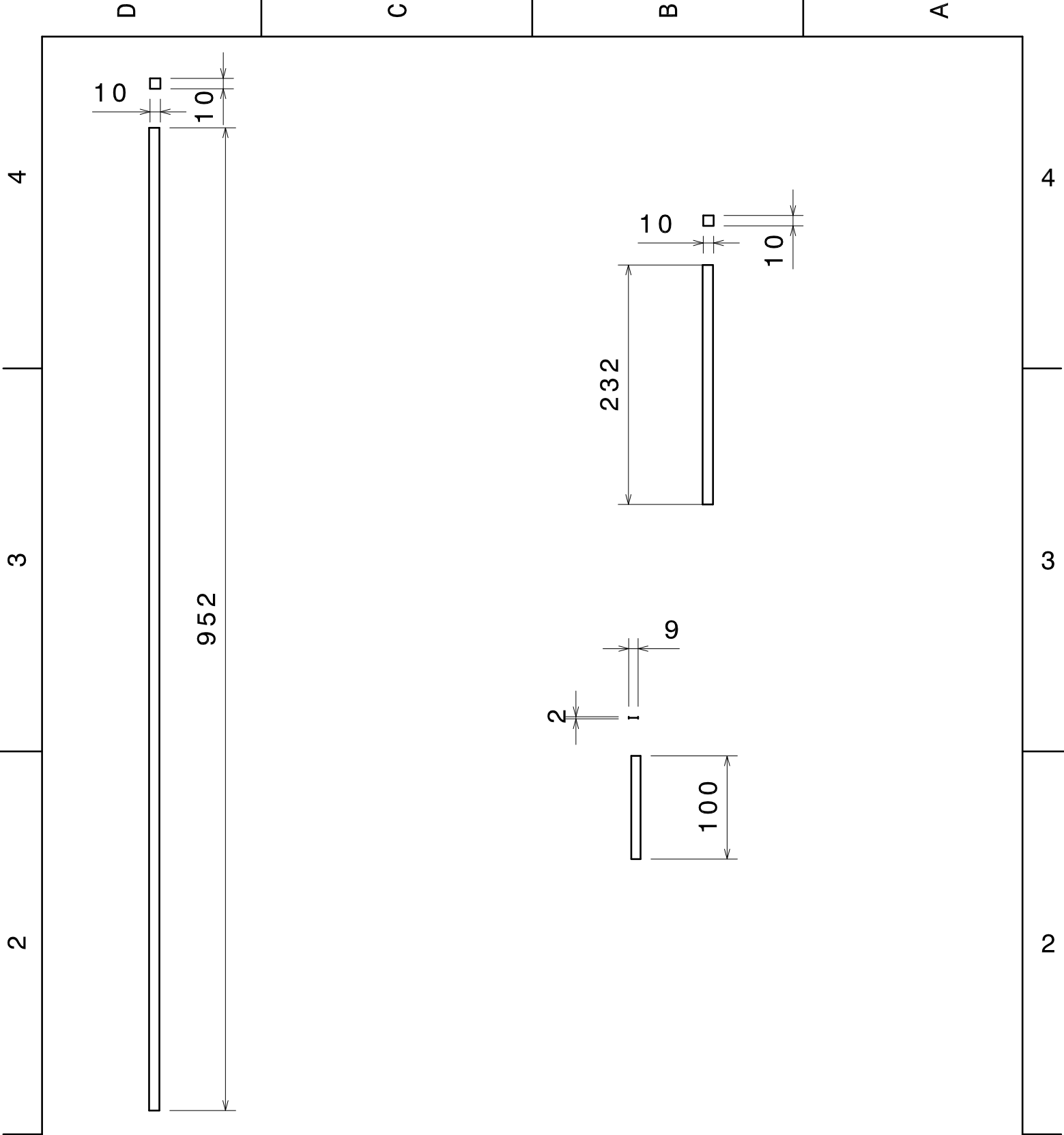
DISEÑADO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ		NOMBRE	PLACAS DE CAJA ELECTRÓNICA	I	—
FECHA 05/06/2012		MATERIAL	CONTRACHAPADO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C.		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
MEDIDAS: MILÍMETROS		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	CAJA ELECTRÓNICA	E	—
		PIEZA	PLACA	D	—
ESCALA 1:6	Nº PLANO 23	ESPESOR	9	C	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				B	—
				A	—

D

A



DISEÑO POR: HUGO LÓPEZ PÉREZ FECHA 05/06/2012		NOMBRE	BISAGRAS 2	I	—
		MATERIAL	ACERO	H	—
CLASE: PROYECTO F.C. MEDIDAS: MILÍMETROS		TIPO	PLANO DE PIEZA	G	—
		GRUPO	BANCADA UNIVERSAL	F	—
TAMANO A4		SUBGRUPO	CAJA ELECTRÓNICA	E	—
		PIEZA	BISAGRA	D	—
ESCALA 1:1	Nº PLANO 24	ESPESOR	2	C	—
				B	—
This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.				A	—



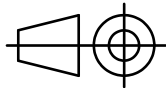
DISEÑADO POR:
HUGO LÓPEZ PÉREZ

FECHA
05/06/2012

CLASE:
PROYECTO F.C.

MEDIDAS:
MILÍMETROS

TAMANO
A4



ESCALA
1:5

Nº PLANO
25

NOMBRE

TABLONES Y VELCRO

I —

MATERIAL

MADERA Y VELCRO

H —

TIPO

PLANO DE PIEZA

G —

GRUPO

BANCADA UNIVERSAL

F —

SUBGRUPO

CAJA ELECTRÓNICA

E —

PIEZA

VARIADAS

D —

ESPESOR

-

C —

B —

A —

This drawing is our property; it can t be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

APÉNDICE C

PROPUESTA PARA ENSAYOS EN VUELO PARA CARACTERIZACIÓN DE WINGLETS.

Resumen

Propuesta para campaña de ensayos en vuelo para caracterización de winglets, así como todas las pruebas previas necesarias, incluyendo la caracterización de la propulsión de Céfiro.

1. Objetivos

El fin del proyecto es llevar a cabo una serie de ensayos que aporten información sobre el efecto de unos winglets sobre la resistencia inducida. Los objetivos a superar para este fin son varios:

1. Implementar en Céfiro un sistema de winglets intercambiables, a fin de poder ensayar en ellas varios diseños.
2. Establecer unos medios o pautas para medir la resistencia aerodinámica en vuelo. Esto incluye la adecuación de Céfiro para tal fin.
3. Desarrollar un controlador que permita el uso de Céfiro de forma eficiente para este tipo de ensayos.

2. Propuesta de campaña de ensayos

El objetivo es observar los efectos sobre las actuaciones del avión que tienen unos winglets determinadas. Si se tienen dos configuraciones con masas y superficies alares iguales pero winglets diferentes, el efecto en las actuaciones vendrá dado tan sólo por la variación en la resistencia inducida.

2.1. Fundamentos teóricos

El fin es entonces disponer los medios para medir la resistencia aerodinámica del avión en las dos configuraciones.

Supongamos el avión en vuelo horizontal, rectilíneo y uniforme (esto es, a altitud constante y velocidad constante), entonces:

$$T(h, V, \pi) - D(h, V, L) = 0 \quad (1)$$

$$L - W = 0 \quad (2)$$

Si el peso es constante, la sustentación lo es también. Y para una determinada tracción, existe una determinada resistencia. La resistencia se adimensionaliza como:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D(\alpha, M, Re) = \frac{1}{2} \rho V^2 S (C_{D_0}(M, Re) + k(M, Re) C_L^2) \quad (3)$$

Donde el primer sumando es el término de resistencia a sustentación nula y el segundo es el de resistencia inducida por la sustentación, C_{D_i} . La variación de los términos de resistencia a

sustentación nula y de resistencia inducida es tal que el primero es proporcional al cuadrado de la velocidad y el segundo es proporcional a la inversa del cuadrado de la velocidad.

$$D_o = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_{D_o} \quad (4)$$

$$D_i = \frac{2kL^2}{\rho V^2 S} \quad (5)$$

La ecuación (1) junto con las (4), (5), establecen por tanto que para una tracción dada, y fijada una altitud de vuelo, un determinado avión podrá volar a dos velocidades, llamadas V_1 y V_2 . La primera puede ser que no sea factible, por encontrarse muy cerca de la pérdida o directamente en zona de pérdida.

Aun conociendo la velocidad de vuelo, todavía es necesario un modelo propulsivo.

Si se tiene un sistema de propulsión por hélice, el empuje o tracción de dicha hélice puede expresarse como:

$$T = C_T \rho (nD^2) D^2 = C_T(\text{geom}, J, Re, M) \rho (nD^2) D^2 \quad (6)$$

Siendo J el parámetro de avance, $J = V/nD$. Si se juzgan despreciables los efectos del número de Reynolds, y ya que $M = M(V, h)$, se tiene que:

$$T = T(V, n, h) \quad (7)$$

Si se tiene este modelo propulsivo, y se conoce la altitud de vuelo, forzando la velocidad de giro de la hélice (n), el avión alcanzará en vuelo rectilíneo y uniforme a altitud constante una velocidad determinada, V_2 . Si se conoce esa velocidad, automáticamente se conoce la tracción, y ya que $\dot{V} = 0$, la resistencia, por (1).

A fin de recoger los efectos de la altitud de vuelo, conviene trabajar con el coeficiente de tracción (C_T). El coeficiente de tracción es independiente de la densidad y para un motor dado y efectos del número de Reynolds despreciables puede considerarse función de (J, M).

3. Modificaciones a Céfiro

Se plantean varias. La más importante es la conversión a propulsión eléctrica con alimentación por baterías.

3.1. Conversión a propulsión eléctrica

Las siguientes razones motivan dicha conversión:

1. Hace real la hipótesis de masa constante, lo que facilita los ensayos en vuelo.
2. Es más limpio. Permite el ensayo del motor en túnel de viento.
3. Las vibraciones se reducen frente a las que provocaría un motor alternativo de potencia equivalente.
4. Además, aunque no es relevante para este proyecto, la propulsión eléctrica permite nuevas posibilidades como es la posibilidad de la medición de la potencia consumida. Esto haría posible estudiar con gran precisión problemas de actuaciones integrales.

Motores sin escobillas Los motores sin escobillas de corriente continua, conocidos por sus siglas en inglés BLDC (*BrushLess DC*) han sustituido casi por completo a los motores tradicionales con escobillas. En los BLDC, se eliminan los elementos rozantes de los motores tradicionales, consiguiendo una mayor eficiencia, menores niveles de ruido, y mayor fiabilidad. Estas ventajas se obtienen a cambio de la complicación necesaria en la electrónica de control. La electrónica de control está contenida en los variadores, también llamados ESC (*Electronic Speed Controllers*). Un motor sin escobillas consta de un rotor con imanes permanentes y un estátor con un juego de inductores. El motor más sencillo es el formado por un sólo circuito eléctrico.

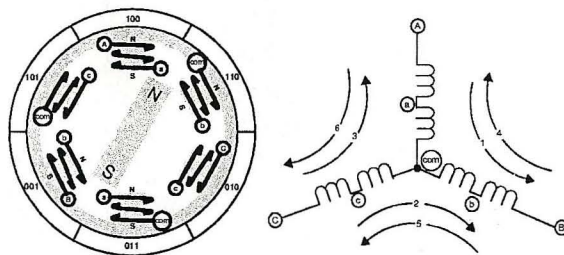


Figura 1: Esquema de motor BLDC de un solo circuito eléctrico. Fuente Microchip Technologies ²

El circuito de la figura (1) tiene tres bobinas, cada una de las cuales está dividida de forma que el rotor gira en su centro³ El motor va alternando la excitación de un circuito a otro para conseguir el movimiento. La clave para la conmutación es disponer de un medio que permita conocer la posición del rotor respecto del estátor, de manera que se vayan energizando las bobinas que den más par. Como se deduce, estos motores son síncronos (sin resbalamiento): la excitación lleva la misma frecuencia que el movimiento.

En este motor, de un solo circuito, una revolución del eje equivale a un ciclo del circuito eléctrico. Usualmente los motores tienen más de un circuito. Para un motor de dos circuitos, en una vuelta del eje se completarían dos ciclos eléctricos.

El problema de medición de la posición del rotor se suele abordar mediante un juego de tres sensores de efecto Hall, o mediante el análisis de la intensidad y la tensión que circulan por los cables de alimentación del motor⁴

El circuito equivalente de un motor BLDC de un solo circuito es el de la figura (2).

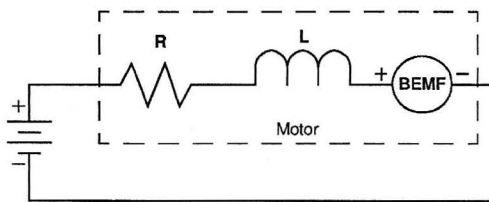


Figura 2: Circuito equivalente de un motor BLDC. Fuente Microchip Technologies

Cuando el rotor está parado, la corriente puede llegar a ser muy alta ya que la única impedancia al paso de la corriente es la de las bobinas. Esta es muy baja por diseño. Cuando el rotor comienza a girar, los imanes del rotor girando frente a las bobinas inducen en estas un potencial, la fuerza contraelectromotriz (FCEM). Esta fuerza es directamente proporcional a la velocidad de giro del motor, siguiendo una constante propia del motor llamada la constante de velocidad, K_V . En un motor ideal, las R y L del circuito equivalente serán 0, con lo que la FCEM sería idéntica al voltaje de alimentación.

$$RPM = K_V \cdot V_{alim} \quad (8)$$

La corriente que consume un motor es directamente proporcional al par en el eje. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de constante de par del motor, K_T . Para un motor dado, se cumple que $K_T \cdot K_V = 1$.

El control de la velocidad del motor no se lleva a cabo ajustando la frecuencia de excitación, que viene dada por los sensores del motor, sino por el voltaje medio recibido por el motor. Se habla de voltaje medio porque lo común es llevar a cabo una modulación PWM de la señal de alimentación del motor. De esta manera, una cadena PWM con pulsos más largos equivaldrá a un voltaje medio más cercano al máximo, mientras que una cadena con pulsos cortos será equivalente

³El motor de la figura (1) es de los llamados *inrunner*, en los que el rotor queda dentro del estátor. En los *outrunner*, más comunes, el rotor es un anillo exterior al estátor.

⁴Los motores BLDC comerciales suelen tener tres cables, correspondientes a cada uno de los pares de bobinas. Estos motores no están sensorizados.

a un voltaje menor. De esta forma podemos decir que son motores de alimentación por corriente continua, aunque el variador del motor envíe al motor en sí tres señales separadas y alternas. La modulación PWM es fácil de llevar a cabo mediante MOSFETs.

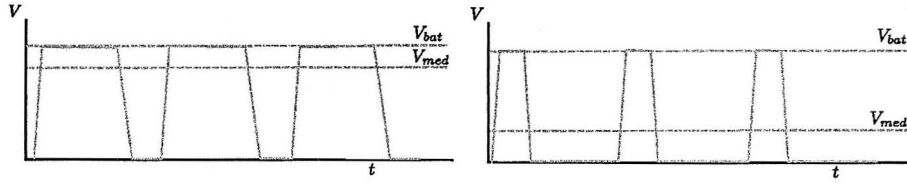


Figura 3: Control de alimentación de un motor BLDC en PWM. A la izquierda, mayor voltaje medio (V_{med}), a la derecha, menor voltaje medio. La cota superior es la tensión máxima de alimentación del sistema (V_{bat}), fijada por la batería.

Controlando el ancho de los pulsos se puede llevar a cabo un arranque suave, que no dañe el motor. La frecuencia de la señal PWM tiene diversas implicaciones. Una frecuencia baja permite disminuir las pérdidas en la conmutación de los MOSFETs, pero si se hace demasiado baja, hará que el motor tenga un funcionamiento muy brusco a bajas vueltas, ya que recibirá impulsos fuertes muy separados. Una frecuencia alta es deseable si los MOSFETs son eficientes. Si se tiene una inductancia parásita del bobinado del motor relativamente alta, la señal PWM de alimentación se suavizará de manera que se parecerá más a un voltaje continuo. Pero una inductancia alta es indeseable por las pérdidas que conlleva. Al final, es necesario llegar a un compromiso. Si nos centramos en el control desde el punto de vista operacional, es decir, del comportamiento del motor frente al control de motor, existen dos opciones:

1. Modo 1: el control se lleva a cabo mediante la anchura de la señal de control PWM. El motor alcanzará un número de vueltas que vendrá dado por la tensión de alimentación, la intensidad que se le permita absorber, y la carga en el eje.
2. Modo 2: las señales de conmutación de la electrónica del variador se usan para implementar un control de velocidad de giro constante. Para cada posición de palanca, el variador enviará al circuito de conmutación el ancho de pulso de la señal PWM tal que el motor quede girando a una velocidad determinada. Este modo de control no lo tienen todos los variadores, aunque es cada vez más común encontrarlo.

Elección del motor Para elegir el motor se puede fijar una relación potencia/masa⁵, P_{kg} en torno a $120w/kg$. Este valor deja un margen suficiente de potencia disponible para el ascenso (ver [1]). Si consideramos una masa típica de Céfiro de $25kg$, tenemos que:

$$P_{kg} = \frac{P_{instalada}}{m_{avion}} \quad (9)$$

$$P_{instalada} = P_{kg} \cdot m_{avion} = 120 \cdot 25 = 3000W \quad (10)$$

El motor elegido es un AXI 5345/16. Este motor tiene las características de la tabla (3.1).

⁵La potencia considerada es la potencia instalada máxima disponible

Especificaciones de AXI 5345/16	
Constante de velocidad	195 rpm/V
Voltaje de alimentación	26,4 – 44,4V
Eficiencia máxima, η_{max}	94 %
Intensidad máxima	90A durante 20s
Intervalo de intensidades con eficiencia superior a 84 %	30 – 75A
Resistencia interna	34m Ω
Peso	895g
Diámetro del eje	8mm
Corriente sin carga	2,1A

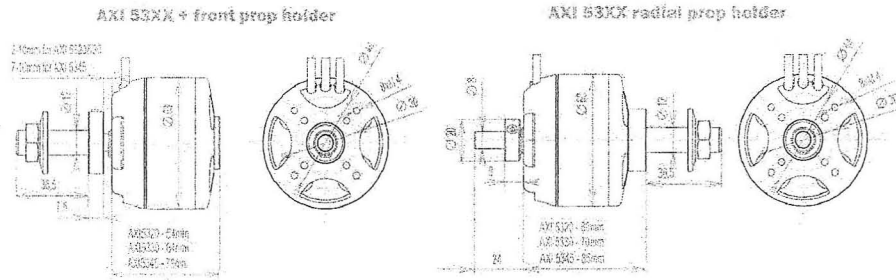


Figura 4: Dimensiones relevantes del motor AXI 5345/16. Se muestran las dos configuraciones posibles para fijar el eje de la hélice. Fuente AXI⁷.

Si se alimenta este motor con una batería de polímero de litio (LiPo) de 12 elementos, consideramos un voltaje medio por elemento de 3,3V, y una eficiencia del motor $\eta = 84\%$ este motor nos da la potencia instalada siguiente:

$$P_{instalada} = U \cdot I_{max} \cdot \eta = 12 \cdot 3,3 \cdot 90 \cdot 0,84 = 2993,76W \simeq 3000W \quad (11)$$

El motor está diseñado para mover una hélice 22x10, 22 pulgadas de diámetro y paso tal que se tienen 10 pulgadas de avance por revolución. Pese a que los motores BLDC pueden girar indistintamente en un sentido y otro, no es cuestión simplemente de poner la hélice con una cara hacia delante o hacia atrás. Esto sería posible si el eje del motor fuera lo suficientemente largo como para acoger hélices estándar como las usadas en Céfiro hasta el día de hoy. No es así, el eje de este motor es corto. Se necesitan hélices especiales para motores eléctricos, que tienen la zona cercana al eje rebajada. El problema está en que este rebaje hace que sobresalgan las palas, sobre todo en la cara del borde de ataque. Ya que pueden darse problemas de interferencia entre el motor y la hélice si se pone una hélice convencional (tractora) montada en el sentido contrario al previsto por el fabricante, es mejor intentar conseguir hélices especiales para motores impulsores. La casa XOAR⁸ fabrica este tipo de hélices, en las medidas adecuadas para este proyecto.

Elegir un buen motor no tiene sentido si el variador (ESC) no acompaña. La casa JETI⁹ fabrica variadores de excelente calidad. El modelo adecuado para el motor AXI 5345 es el Jeti Spin 99 Opto. Este variador permite controlar el motor en los dos modos que se comentaron antes. Además, es totalmente programable con una caja de programación, la JetiBox.

⁸www.xoarintl.com

⁹www.jetimodel.com

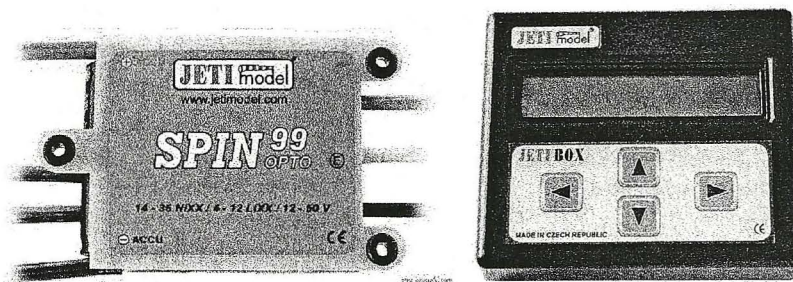


Figura 5: Variador Spin99 y caja de programación JetiBox.

3.2. Modificación de las alas

Otra modificación necesaria es la adaptación del diseño de las alas a uno nuevo que permita el cambio entre varios diseños de winglets. Se sugiere como opción más razonable colocar una costilla reforzada, donde se anclen los distintos winglets. La ubicación deseable para esta costilla es la actualmente ocupada por la costilla que delimita los vanos segundo y tercero desde la punta del ala.

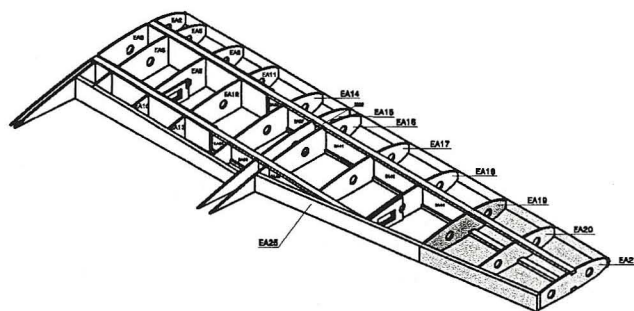


Figura 6: Propuesta de zona a modificar del ala.

3.3. Control automático

La última modificación entra dentro de lo que estaba previsto en el desarrollo de Céfiro, que es desarrollar un piloto automático. El piloto automático es necesario, ya que la condición de vuelo a altitud constante es prácticamente imposible de conseguir mediante vuelo radiocontrolado. No es necesario un piloto automático completo. Con que exista un control de altitud sería suficiente, aunque sería deseable un control de nivelación de ala. El control de altitud debería usar como variable de control sólo la posición del timón de profundidad. La velocidad de giro del motor estará fijada para cada ensayo.

4. Caracterización de la planta propulsiva

El principal obstáculo que aparece en principio es la caracterización de la planta propulsiva a fin de obtener la ecuación (2.1). Si se quiere hacer de forma correcta, no basta con medir el empuje del motor en banco, sino que es necesario ensayarlo en el fuselaje de Céfiro, ya que el comportamiento de la vena fluida alrededor del fuselaje afectará a las actuaciones del motor. Se propone la solución siguiente (si se tiene la posibilidad de realizar ensayos en túnel de viento¹⁰): Se anclaría el fuselaje del Céfiro a una plataforma dotada de una célula de carga. Un esquema de la plataforma se muestra en la figura (7). Entonces, con el fuselaje en la plataforma y en el interior

¹⁰El túnel de viento elegido es el del Laboratorio del Departamento de Mecánica de Fluidos

del túnel, se haría un ensayo para medir la resistencia aerodinámica del fuselaje (D_{oi_f})¹¹ para una serie de valores de velocidad de la corriente. Estos valores se tomarían con la hélice desmontada, a fin de anular los efectos de su resistencia.

Obtenidos estos valores, se montaría la hélice, y para cada una de las velocidades que se tomaron en la primera etapa, se hacen una serie de ensayos a diferentes velocidades de giro del motor, (n_j). Para cada ensayo se obtendrá la diferencia entre la $T_{i,j}$ ¹² y D_{oi_f} . Ya que la resistencia se conoce de los primeros ensayos, se conoce $T_{i,j}$, de donde se puede sacar el modelo propulsivo de la ecuación (2.1). Es más, la velocidad se obtendría como una medición del anemómetro de hilo caliente propio del túnel, muy preciso, que serviría para calibrar el sistema anemométrico de Céfiro, a fin de obtener la mayor precisión de las medidas en los vuelos de ensayo. Adimensionalizando este modelo propulsivo se obtiene un modelo del coeficiente de tracción, C_T , en función de J, M .

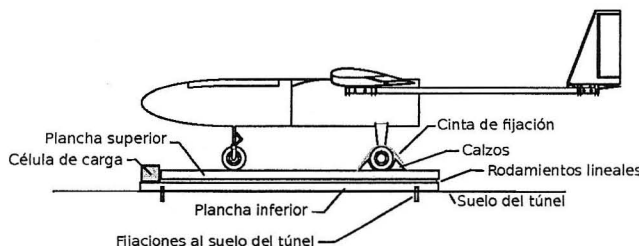


Figura 7: Propuesta de montaje de Céfiro en túnel de viento.

La configuración para el ensayo sería de avión completo a excepción de alas, ya que no cabe en la cámara de ensayos con ellas. Se considera que las alas no tienen efecto en la corriente de aire que afecta al motor.

4.1. Diseño de la plataforma de ensayos

La plataforma de ensayos constará de un carro dotado de guías lineales, al que se anclará al avión. Este carro deslizará sobre unas guías lineales que estarán fijadas a una base. A la base se fijará también una célula de carga de flexión, que dará la medida de la fuerza horizontal que ejerza el avión.

Se propone usar las guías lineales **L1U 15 0430** de **NSK**. Los carros que deslizarán sobre estas guías serán la referencia **LAU15AL85**, también de **NSK**.

La célula de carga que se propone es el modelo **1022** de **Tedea Huntley**, junto con el acondicionador de señal y visor **Z1K-30** de **Gram Precisión s.l.**

5. Ensayos en vuelo

La propuesta de ensayo en vuelo es la siguiente:

1. Despegue y subida hasta la altitud de ensayo bajo control manual del piloto. Se lleva el avión a una distancia prudencial, en un punto preferiblemente alineado con el eje de la pista. ($\approx 1\text{km}$)¹³.
2. Se equilibra manualmente el avión para una velocidad de giro del motor determinada con anterioridad.
3. Se orienta el avión hacia la pista, y se activa el control de mantenimiento de altitud, y el de nivelación de alas. Tan pronto se estabilice la velocidad, se puede comenzar la toma de datos válidos para el ensayo. Los datos a registrar en la pasada son:

¹¹ Esto es, la resistencia producida por el fuselaje (f) en la plataforma, para cada una de las velocidades de ensayo V_i

¹² El empuje obtenido para la velocidad aerodinámica V_i y la velocidad de giro (n_j)

¹³ Se espera tener el sistema FPV operativo, para asistir al piloto

- a) Velocidad de vuelo, obtenida a partir del sistema de anemometría.
 - b) Altitud, obtenida a partir del sistema de anemometría o por GPS, dependiendo de la precisión que se alcance con este.
 - c) Vueltas del motor, impuestas.
4. Cuando el avión llegue a una distancia que se juzgue suficiente, se desactivará el control de nivelación de alas y se pasará a control manual para efectuar un giro suave de 180 grados. El control de mantenimiento de altitud seguirá activo en todo momento.
 5. Se vuelve a ejecutar el ciclo desde el paso (3), para cada velocidad de giro del motor n_j .
 6. Una vez tomados todos los datos, se recupera el control manual total y se hace aterrizar el avión.

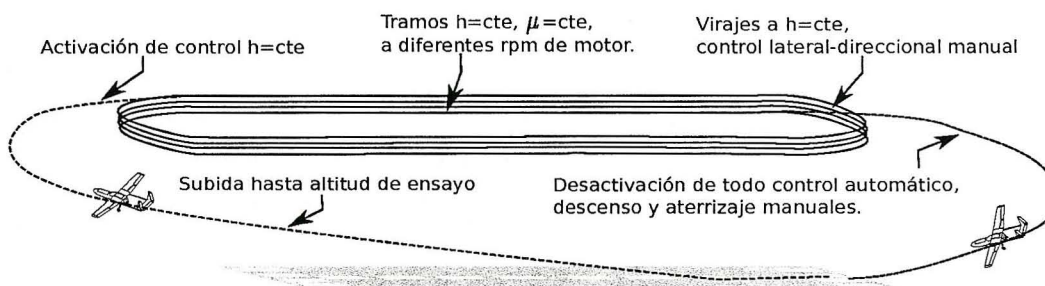


Figura 8: Plan de vuelo previsto.

Sería suficiente realizar una batería de ensayos de diez velocidades de giro del motor. Conveniría realizar múltiples (en torno a cuatro) pasadas para cada velocidad de giro, a fin de reducir la incertidumbre de las medidas.

Una vez obtenidas estas medidas, podrían sacarse fácilmente los datos de la resistencia aerodinámica del avión. Se cambiaría la configuración de las alas y se volvería a repetir la misma batería de ensayos, a la misma altitud y para las mismas velocidades de giro. La diferencia entre ambas baterías ilustraría el efecto de los diferentes winglets.

6. Disposiciones adicionales: campo de vuelo

Para realizar los ensayos es fundamental disponer de una base de operaciones con las características adecuadas de seguridad y comodidad. Los vuelos de Céfiro han sido realizados desde el aeródromo de la Escuela de Vuelo Aerohispalis, situado en Mairena del Alcor (Sevilla). Este aeródromo es privado, por lo que queda a disposición del propietario el permiso de vuelo. Hasta el día de hoy, el propietario ha tenido un comportamiento muy altruista, dejando volar a Céfiro sin ningún coste. Sin embargo, hasta hoy no había asociado ningún proyecto concreto que diera beneficio económico a nadie. Dado que estas circunstancias cambian con este proyecto, sería deseable ofrecer al propietario una compensación económica por la utilización de su aeródromo.

Referencias

- [1] Francisco Ventura Samblás Carrasco, Proyecto de Fin de Carrera: Análisis de actuaciones y planta propulsora de un avión no tripulado: El proyecto Céfiro. Grupo de Ingeniería Aeroespacial.