

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño y análisis de un sistema modular de dispensación de fluidos a  
base de electrospray”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Carlos Eduardo López Tamayo

Israel André Pereda Ordinola

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

**Año: 2020**

## DEDICATORIA

El presente proyecto que culmina esta etapa que empezó hace 5 años, se lo dedico a mi familia.

A mis padres Eduardo López y Rosa Tamayo, mi vida está marcada con su ejemplo de dedicación y superación.

A mis hermanas Patricia López y Mariuxi López, quienes me han acompañado durante este proceso de aprendizaje y formación.

Mis logros, no son solo míos, también son de ellos.

Carlos López

El presente proyecto lo dedico a mi familia y amigos. A mis padres, Angélica y Germán, cuyo apoyo, incluso en la distancia, siempre ha estado presente.

A mis hermanas, Romina y Alejandra, que siempre me han apoyado y han estado para mí.

A mi compañera, Maylin, que siempre me animó a esforzarme más y superarme a mí mismo.

En este proyecto se refleja todo lo que he recibido de ellos.

Israel Pereda

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a mi tutor, Ph.D. Eduardo Castillo, quien nos confió la tarea de llevar a cabo este proyecto e impulsó con sus conocimientos a alcanzar los resultados.

También a ESPOL, un segundo hogar, me formó a nivel profesional y personal. Donde encontré amistades, amores y muchas anécdotas que siempre guardaré en el corazón.

Carlos López

Mi más sincero agradecimiento a Ph.D. Eduardo Castillo y Ph.D. Ángel Ramírez, por su colaboración y dirección en este proyecto, sin quienes no hubiera sido posible su culminación.

A la Escuela Superior Politécnica del Litoral y a los profesores que a lo largo de los años me instruyeron y compartieron sus conocimientos fomentando mi formación profesional.

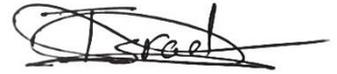
Israel Pereda

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, me(nos) corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Carlos Eduardo López Tamayo* e *Israel André Pereda Ordinola* doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

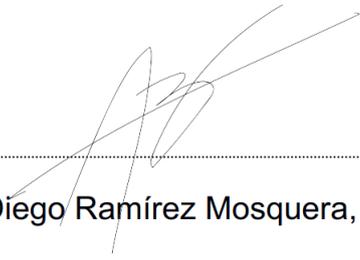


Carlos Eduardo López  
Tamayo



Israel André Pereda  
Ordinola

## EVALUADORES



Ángel Diego Ramírez Mosquera, Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA



Eduardo Adán Castillo Orozco, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

La deposición de fluidos mediante electrospray utiliza un campo eléctrico para extraer un fluido conductor de la tobera, lo que permite modificar las características de un flujo, como el tamaño de gota, y generar flujos mucho más finos que el diámetro de la tobera y superar las limitaciones de los métodos convencionales. La deposición de tintas conductoras tiene aplicaciones en la elaboración de circuitos impresos, que son utilizados en multitud de campos. Por esto, se debe diseñar un sistema de deposición de fluidos basado en electrospray para la elaboración de circuitos impresos, junto con un sistema modular CNC para controlar la trayectoria de la deposición de fluidos.

Para el diseño del sistema CNC y el sistema de electrospray, se utilizaron modelos teóricos de fatiga para los elementos mecánicos, y de campos eléctricos para el electrospray, junto con simulación mediante análisis de elementos finitos para validar los elementos diseñados. Por otro lado, los componentes normalizados se seleccionaron mediante las ecuaciones proveídas por los fabricantes.

Del análisis mecánico se obtuvieron esfuerzos en los elementos críticos mediante análisis de fatiga y por elementos finitos. Del análisis de campo eléctrico se obtuvieron los valores del campo eléctrico para un voltaje dado a diferentes alturas.

Los resultados del análisis mecánico permitieron confirmar la resistencia de los elementos críticos bajo cargas de fatiga con factores de seguridad elevados. Los resultados de campo eléctrico corroboraron que es posible obtener radios de gota de entre 0.2 a 0.6 mm, apropiados para producir líneas finas conductoras.

**Palabras Clave:** Deposición, Electrospray, Control Numérico Computarizado, Análisis de elementos finitos.

## **ABSTRACT**

*Electrospray fluid deposition uses an electrical field to draw a conductive fluid from a nozzle, which allows the characteristics of a flow, such as droplet size, to be modified to generate much finer flows than the nozzle diameter and overcome the limitations of conventional methods. Conductive ink deposition has applications in the production of printed circuit boards, which are used in many fields. For this reason, an electrospray-based fluid deposition system must be designed to produce printed circuit boards, together with a modular CNC system to control the fluid deposition path.*

*For the design of the CNC system and the electrospray system, theoretical fatigue models were used for the mechanical elements, and electrical fields for the electrospray. together with simulation by means of finite element analysis to validate the designed elements. On the other hand, the standardized components were selected using the equations provided by the manufacturers.*

*From the mechanical analysis, stresses were obtained in the critical elements by means of fatigue analysis and by finite element analysis. From the electric field analysis, the electric field values were obtained for a given voltage at different heights.*

*The results of the mechanical analysis allowed to confirm the resistance of the critical elements under fatigue loads with high safety factors. The electric field results corroborated that it is possible to obtain droplet radii of between 0.2 to 0.6mm, suitable for producing fine conductor lines.*

*Keywords: Fluid Deposition, Electrospray, Computerized Numerical Control, Finite Element Analysis.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Definición del Problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico.....	2
1.4.1 Placa de circuitos impresos .....	2
1.4.2 Electro spray .....	5
1.4.3 Sinterizado.....	7
1.4.4 Mesas de trabajo CNC.....	8
CAPÍTULO 2.....	11
2. Metodología .....	11
2.1 Alternativas de solución.....	11
2.1.1 Mesa XY .....	11
2.1.2 Mesa Z.....	12
2.2 Selección de alternativa .....	13
2.3 Diseño de sistema CNC .....	18
2.3.1 Diseño por fatiga.....	19
2.3.2 Diseño de módulo XY .....	21
2.3.3 Diseño de módulo Z.....	29
2.3.4 Diseño de electro spray .....	33
2.4 Parámetros del dispositivo .....	35

2.4.1	Campo eléctrico .....	35
CAPÍTULO 3.....		37
3.	Resultados y analisis .....	37
3.1	Mesa XY .....	37
3.2	Mesa Z .....	39
3.3	Dispensador .....	43
3.4	Dispensador de fluidos CNC .....	46
3.5	Costos .....	47
CAPÍTULO 4.....		1
4.	Conclusiones Y Recomendaciones .....	1
4.1	Conclusiones.....	1
4.2	Recomendaciones.....	1
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PCB	Printed Circuit Board
CN	Control Numérico
CNC	Control Numérico por Computadora
CAD	Computer-aided Design
MCU	Machine Control Unit
AHP	Analytic Hierarchy Process
AISI	American Iron and Steel Institute
PLC	Programmable Logic Controller
RPM	Revoluciones por minuto

## SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
kV	Kilovoltio
$\mu\text{l/hr}$	Microlitro por hora
$S_{ut}$	Esfuerzo último de tensión
MPa	Megapascal
$S_{e'}$	Límite de resistencia sin corregir
$S_e$	Límite de resistencia corregido
$\sigma_a$	Esfuerzo de flexión alternante
$\tau_a$	Esfuerzo cortante alternante
$T$	Torque
$J$	Momento polar de inercia
$\omega$	Velocidad angular
$\alpha$	Aceleración angular
p	Paso lineal del tornillo
$\theta$	Paso angular
N	Newton
Nm	Newton por metro
kg	Kilogramo
P	Pulsos del PLC
$f$	Velocidad del tren de pulsos
$E_1$	Campo eléctrico entre la tobera y el electrodo extractor
$E_2$	Campo eléctrico entre la tobera y el sustrato
$E$	Campo eléctrico total
V	Voltio
V/m	Voltio por metro
mm/s	Milímetro por segundo

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vista de corte de placa de circuitos monocapa (Khandpur, 2006) .....	3
Figura 2 Vista de corte de placa de circuitos bicapa (Khandpur, 2006).....	3
Figura 3 Vista de corte de placa de circuitos multicapa (Khandpur, 2006) .....	4
Figura 4 Esquema de un sistema electrospray. (a) Equilibrio de fuerzas aplicado al desprendimiento de gota. (b) Menisco cónico en microdripping. (c) Patrón de microgotas usando las gotas emitidas por microdripping en un sustrato moviéndose a velocidad constante. (Castillo-Orozco et al., 2020). .....	5
Figura 5 Regímenes de flujo en función del voltaje y el caudal. (Bo Cui, 2011) .....	6
Figura 6 Modos de flujo electrohidrodinámico capturados mediante cámara de alta velocidad. (a) Goteo (b) Microgoteo (c) Husillo (d) Chorro de cono intermitente (e) Chorro de cono (f) Multichorro. (Bo Cui, 2011).....	7
Figura 7. Diseño de forma 1 de la mesa xy. Fuente: Elaboración propia .....	11
Figura 8. Diseño de forma 2 de la mesa xy. Fuente: Elaboración propia .....	11
Figura 9. Diseño de forma 1 del eje z. Fuente: Elaboración propia .....	12
Figura 10. Diseño de forma 2 del eje z. Fuente: Elaboración propia .....	13
Figura 11 Alternativa seleccionada para mesa xy. Fuente: Elaboración propia .....	18
Figura 12 Alternativa seleccionada para mesa z. Fuente: Elaboración propia .....	18
Figura 13 Mesa XYZ. Fuente: Elaboración propia.....	18
Figura 14 Ensamble Mesa y bomba. Fuente: Elaboración propia .....	18
Figura 15 Diagrama de componentes principales. Fuente: (AutomationDirect, 2007)...	21
Figura 16 Perfil de velocidades y torque para periodos de aceleración, velocidad constante y desaceleración (AutomationDirect, 2007) .....	21
Figura 17 Aproximación para bajas velocidades. (AutomationDirect, 2007) .....	24
Figura 18 Perfil trapezoidal para tiempos iguales en aceleración y desaceleración (AutomationDirect, 2007).....	25
Figura 19 Curva Torque vs Velocidad (AutomationDirect, 2007).....	26
Figura 20 Modelo frontal de la mesa X. Fuente: Elaboración propia .....	27
Figura 21 DCL frontal de la mesa X. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 22. Rango de movimiento de la carga sobre los ejes. Fuente: Elaboración propia .....	28
Figura 23 Lazo vectorial - Mesa z. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 24 Diagrama del cuerpo libre - Mesa z. Fuente: Elaboración propia.....	30

Figura 25 Diagramas de cuerpo libre A) Eslabón BD B) Eslabón AE. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 26 Elementos críticos de modulo z a) Tuerca b) Eje transversal acoplado en tuerca. Fuente: Elaboración propia.....	31
Figura 27 Corte transversal de tuerca. Fuente: Elaboración propia .....	32
Figura 28 DLC de tuerca. Modelo matemático de viga empotrada. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 29 DLC de eje transversal. Modelo de viga simplemente apoyada. Fuente: Elaboración propia.....	32
Figura 30 Modo goteo a) Formación de gota menor q b) Fuerzas que actúan sobre la gota menor: Fg: Fuerza de gravedad, Fd: Fuerza eléctrica debido a la gota Q, Fc: Fuerza: eléctrica debido al campo entre electrodos, Fe: Fuerza eléctrica resultante (Jaworek & Krupa, 1999) .....	33
Figura 31 Diagrama de electrospray. Fuente: Elaboración propia.....	34
Figura 32 Radio de gotas emitidas vs. voltaje aplicado en modos de goteo y microgoteo para una altura de 74 mm y caudal de 1.67 mm <sup>3</sup> /s (0.006 ul/hr) Fuente: (Castillo-Orozco et al., 2020) .....	35
Figura 33 Análisis de elementos finitos de eje en modulo XY. Fuente: Elaboración propia .....	38
Figura 34 Relación entre la elevación de la mesa (eje y) y el desplazamiento de la corredera (eje x). Fuente: Elaboración propia .....	39
Figura 35 Velocidad en corredera .....	40
Figura 36 Relación entre velocidad en corredera y velocidad de elevación .....	40
Figura 37 Magnitud de fuerza axial en corredera Fb (véase Figura 24) vs el ángulo del eslabón (Theta). Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 38 Análisis de elementos finitos de eje transversal en modulo z. Fuente: Elaboración propia.....	41
Figura 39 Análisis de elementos finitos de tuerca de modulo z. Fuente: Elaboración propia .....	42
Figura 40 Campo eléctrico E1. Fuente: Elaboración propia .....	43
Figura 41 Campo eléctrico E2. Fuente: Elaboración propia .....	44
Figura 42 Campo eléctrico total vs Altura H2 (Modelo teórico). Fuente: Elaboración propia .....	45

Figura 43 Campo eléctrico total vs Altura H2 (Análisis de elementos finitos). Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 44 Mesa xyz Fuente: Elaboración propia .....	46
Figura 45 Mesa xyz vista frontal superior Fuente: Elaboración propia .....	46
Figura 46 Mesa xyz y sistema dispensador. Fuente: Elaboración propia.....	46
Figura 47 Dispensador de fluidos cnc. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 48 Dispensador de fluidos cnc con puerta abierta. Fuente: Elaboración propia.....	47
Figura 49. Acoplamiento MST para motores paso a paso. Fuente: (NBK, 2017) .....	57
Figura 50. Dimensiones de acoplamientos MST. Fuente: (NBK, 2017) .....	57
Figura 51. Especificaciones de acoplamientos MST. Fuente: (NBK, 2017) .....	57
Figura 52. Rodamiento lineal de bolas. Fuente: (NTN-SNR, 2014).....	58
Figura 53. Dimensiones de rodamientos lineales. Fuente: (NTN-SNR, 2014).....	58
Figura 54. Especificaciones de rodamiento lineal BBES8A. Fuente: (NTN-SNR, 2014) .....	58
Figura 55. Husillo de bolas. Fuente: (SKF, 2013).....	59
Figura 56. Dimensiones del husillo de bolas SDBD 8X2.5R. Fuente: (SKF, 2013) .....	59
Figura 57. Especificaciones del cojinete de bolas 628/5-2Z. Fuente: (SKF, 2018).....	60
Figura 58. Motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	60
Figura 59. Especificaciones de motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	61
Figura 60. Curvas de funcionamiento de motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	61
Figura 61. Dimensiones de motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	62
Figura 62. Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	62
Figura 63. Especificaciones de la Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007) .....	63
Figura 64. Vista superior Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007) .....	64
Figura 65. Base para Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007) .....	64
Figura 66. Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007) .....	65

Figura 67. Esquema de Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007) .....	65
Figura 68. Especificaciones de Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	66
Figura 69. Dimensiones del Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (Automation-Direct, 2007) .....	67
Figura 70. Esquema de conexiones del sistema del motor paso a paso STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	67
Figura 71. Especificaciones de PLC. Fuente: (AutomationDirect, 2007) .....	68
Figura 72. Esquema de conexiones del sistema del motor paso a paso STP-MTR-23055. Fuente: (AutomationDirect, 2007).....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tipos de actuadores lineales. Fuente: Elaboración propia. ....	10
Tabla 2. Calificaciones de AHP para la comparación por pares de criterios de selección. Fuente: Elaboración propia.....	13
Tabla 3. Esquema de evaluación para alternativas u objetivos de diseño. Fuente: Elaboración propia.....	14
Tabla 4 Clasificación de atributos. Fuente: Elaboración propia.....	15
Tabla 5 Ponderación entre categorías. Fuente: Elaboración propia.....	15
Tabla 6 Ponderación entre atributos de rendimiento. Fuente: Elaboración propia .....	16
Tabla 7 Ponderación de atributos de seguridad. Fuente: Elaboración propia .....	16
Tabla 8 Ponderación entre atributos de costo. Fuente: Elaboración propia .....	16
Tabla 9 Ponderación entre atributos de apariencia. Fuente: Elaboración propia .....	16
Tabla 10 Selección entre alternativas de mesa XY. Fuente: Elaboración propia .....	17
Tabla 11 Selección de mesa Z. Fuente: Elaboración propia .....	17
Tabla 12 Propiedades mecánicas de materiales utilizados. Fuente: (Dipac Manta, s. f.; Norton, 2011).....	19
Tabla 13 Factor de corrección de límite de resistencia a la fatiga teórica de diferentes materiales. Fuente: (Norton, 2011).....	20
Tabla 14 Coeficientes de corrección para diferentes condiciones de trabajo. Fuente: (Norton, 2011) .....	20
Tabla 15 Coeficiente de fricción de diferentes materiales validados mediante diferentes métodos. Fuente: (Ordoñez & Carmenza, 2015).....	33
Tabla 16 Parámetros para goteo. Fuente: (Castillo-Orozco et al., 2020) .....	35
Tabla 17 Campo eléctrico generado a partir de las condiciones de Figura 31. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 18. Especificaciones de mesa XY. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 19. Masa de los elementos diseñados. Fuente: Elaboración propia.....	37
Tabla 20. Reacciones sobre los elementos críticos de la mesa XY. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 21. Comparación de resultados teóricos y elementos finitos de eje transversal en modulo XY. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 22 Comparación de resultados teóricos y elementos finitos de eje transversal en modulo z. Fuente: Elaboración propia.....	42

Tabla 23 Comparación de resultados teóricos y elementos finitos de tuerca en modulo z. Fuente: Elaboración propia .....	42
Tabla 24 Especificaciones de mesa z. Fuente: Elaboración propia.....	43
Tabla 25 Campo eléctrico E1 entre tubo capilar y electrodo extractor. Fuente: Elaboración propia.....	35

## ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Vista general de la caja y lista de componentes
PLANO 2	Marco de la caja
PLANO 3	Base de la caja
PLANO 4	Unión superior de la caja
PLANO 5	Felpa de la caja
PLANO 6	Pared de la caja
PLANO 7	Tapa de la caja
PLANO 8	Puerta de la caja
PLANO 9	Visor de la caja
PLANO 10	Transversal de la caja
PLANO 11	Transversal portaherramientas de la caja
PLANO 12	Pared posterior de la caja
PLANO 13	Vista general de la mesa XY y lista de componentes
PLANO 14	Base inferior de la mesa XY
PLANO 15	Soporte para tornillo y ejes de la mesa XY
PLANO 16	Soporte para ejes y motor de la mesa XY
PLANO 17	Eje de 8 mm de la mesa XY
PLANO 18	Bloque para husillo de la mesa XY
PLANO 19	Bloque para rodamientos lineales de la mesa XY
PLANO 20	Base superior de la mesa XY
PLANO 21	Soporte superior para ejes y motor de la mesa XY
PLANO 22	Soporte superior para ejes y tornillo de la mesa XY
PLANO 23	Bloque para rodamientos lineales y husillo de la mesa XY
PLANO 24	Vista general de la mesa Z y lista de componentes
PLANO 25	Soporte para motor y eje de la mesa Z
PLANO 26	Unión entre soportes de la mesa Z
PLANO 27	Soporte para rodamiento y eje de la mesa Z
PLANO 28	Pared lateral de la mesa Z
PLANO 29	Eslabón 100x20 de la mesa Z
PLANO 30	Dado de la mesa Z
PLANO 31	Eje transversal superior de la mesa Z
PLANO 32	Camisa de la mesa Z

- PLANO 33 Pared lateral superior de la mesa Z
- PLANO 34 Junta superior de la mesa Z
- PLANO 35 Junta de eslabones de la mesa Z
- PLANO 36 Junta inferior de la mesa Z
- PLANO 37 Base 200x200 de la mesa Z
- PLANO 38 Pared superior de la mesa Z
- PLANO 39 Pared de rodamiento y eje posterior de la mesa Z
- PLANO 40 Mesa 200x200 de la mesa Z

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Definición del Problema

La fabricación de placas de circuitos impresos o Printed Circuit Boards (PCBs) es un proceso automatizado que se realiza a gran escala. Esto implica que las empresas que ofrecen este servicio no aceptan pedidos por debajo de un número inferior al millar de unidades. Sin embargo, para el diseño de PCBs, no es necesario fabricar miles de unidades de cada prototipo en las diferentes iteraciones que requiere su diseño. Por esto, la empresa Castillo Labs sugiere el diseño de un equipo de prototipado rápido de PCBs, el cual necesita un sistema de dispensación de fluidos. El equipo requiere el diseño de un sistema CNC modular, junto con un sistema de dispensación de tinta conductora para la impresión de PCBs. Para obtener la precisión requerida en la producción de líneas conductoras y recubrimiento de capas finas, la dispensación de la tinta debe de ser realizada mediante un electrospray. El movimiento automático sobre diferentes sustratos debe de utilizar un sistema CNC de posicionamiento.

### 1.2 Justificación del proyecto

La dispensación de fluidos con alta precisión tiene aplicaciones en las áreas de impresión de circuitos impresos (PCBs), incorporación final de componentes electrónicos, energía solar, medicina, militar, aeroespacial, etc. Durante el proceso de diseño, el prototipado rápido es una herramienta fundamental que permite fabricar y comparar diferentes alternativas de diseño desde un punto de vista práctico, más allá del análisis teórico. Los equipos de impresión de PCBs presentes en el mercado son de alto costo, desde miles a decenas de miles de dólares, lo que representa una gran barrera de entrada para empresas pequeñas. La empresa emergente Castillo Labs requiere el diseño de detalle y la construcción de un sistema dispensador de soluciones acuosas (tintas) que funcione a base de un electrospray y que permita la deposición automática del líquido mediante el movimiento de una mesa de control numérico CNC de 200 mm x 200 mm. El objetivo final del equipo es la producción de líneas conductoras y de revestimiento de películas o capas finas sobre diferentes tipos de sustratos.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un sistema CNC modular de dispensación de fluidos a base de electropray para la elaboración de circuitos impresos.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Desarrollar un sistema dispensador de fluidos a base de electropray.
2. Diseñar una mesa de control numérico computarizado de tres ejes X, Y, Z (200 mm x 200 mm x 50 mm).
3. Elaborar los modelos CAD y los planos de construcción del sistema de dispensación de fluidos utilizando un software de modelación 3D.
4. Simular numéricamente el potencial electrostático del sistema mediante análisis de elementos finitos.

### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Placa de circuitos impresos**

Las placas de circuitos impresos (PCBs, de sus iniciales en inglés, Printed Circuit Boards) son el componente de interconexión de componentes productos electrónicos más utilizado. Una placa de circuitos consiste principalmente en dos componentes: (Khandpur, 2006)

- La base, que es una placa fina de material aislante, rígido o flexible, sobre la que se apoyan todos los componentes.
- Los conductores, normalmente conformados por finas tiras de material conductor de la forma apropiada fijadas firmemente a la base.

La base provee el soporte mecánico para los conductores y todos los componentes acoplados a los mismos. Las propiedades eléctricas del circuito completo dependen de las propiedades dieléctricas del material base y es importante conocerlas. (Khandpur, 2006). Los conductores no solo son las conexiones eléctricas entre los componentes, sino que además sirven de puntos de soldadura en los que fijar los mismos. (Khandpur, 2006)

### 1.4.1.1 Placas de circuitos impresos monocapa

En una PCB monocapa (Figura 1), los conductores se encuentran en un solo lado de la base aislante. El lado que contiene el patrón de circuito se denomina lado de soldadura, mientras que el otro lado se denomina lado de componentes. (Khandpur, 2006)

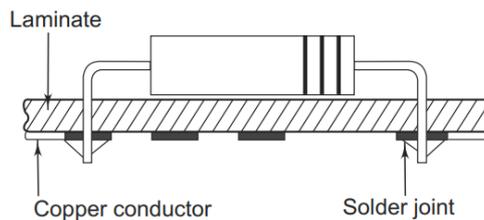


Figura 1 Vista de corte de placa de circuitos monocapa (Khandpur, 2006)

Este tipo de circuito se usa para circuitos sencillos y cuando se requiere mantener los costos de manufactura al mínimo. Con todo, representan gran parte del volumen de circuitos impresos producidos a nivel profesional y no profesional. (Khandpur, 2006)

### 1.4.1.2 Placas de circuitos impresos bicapa

Las placas de circuitos bicapa tienen material conductor a ambos lados del material aislante, es decir, el patrón de circuito está disponible en el lado de componentes y en el lado de soldadura. La densidad de componentes y el número de líneas conductoras es mayor que en los circuitos monocapa. (Khandpur, 2006)

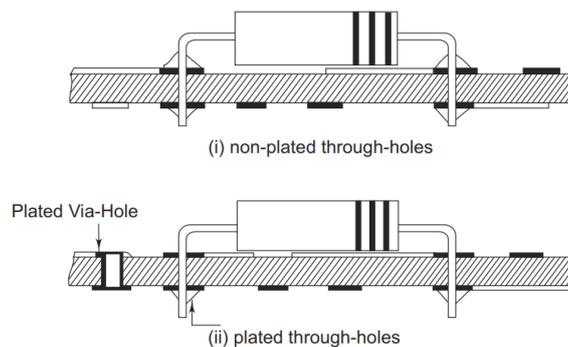
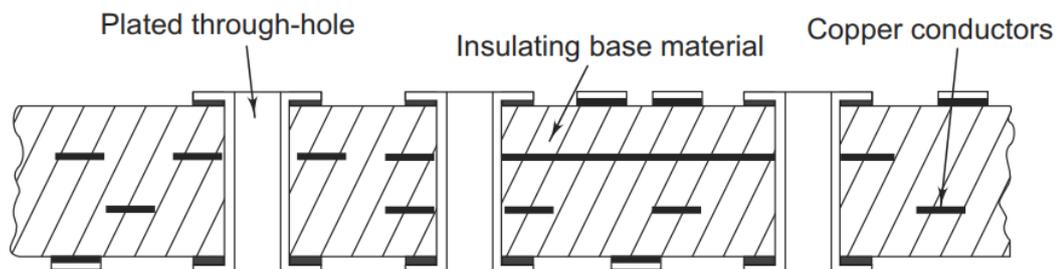


Figura 2 Vista de corte de placa de circuitos bicapa (Khandpur, 2006)

Las PCBs bicapa se pueden dividir entre los que tienen agujeros metalizados pasantes (Figura 2.ii) y los que no (Figura 2.i). Los agujeros metalizados facilitan la conexión entre los circuitos en las dos capas y permiten aumentar la densidad de componentes, pero elevan el costo de manufactura.

#### **1.4.1.3 Placas de circuitos impresos multicapa**

Cuando se requiere una densidad de componentes muy elevada, se utilizan circuitos multicapa. Las placas multicapa (Figura 3) utilizan más de dos placas circuitos impresos, con una fina capa de un denominado material pre impregnado entre cada placa de circuitos, lo que da lugar a una especie de “sándwich”, como se muestra en la figura 3. (Khandpur, 2006)



**Figura 3 Vista de corte de placa de circuitos multicapa (Khandpur, 2006)**

Para cerrar el circuito, se utilizan agujeros pasantes que interconectan las diferentes capas entre sí en los lugares apropiados. Las placas de circuitos multicapa poseen tres o más capas de circuitos, mientras que algunas pueden llegar a tener hasta cincuenta capas. (Khandpur, 2006)

#### **1.4.1.4 Manufactura de placas de circuitos impresos**

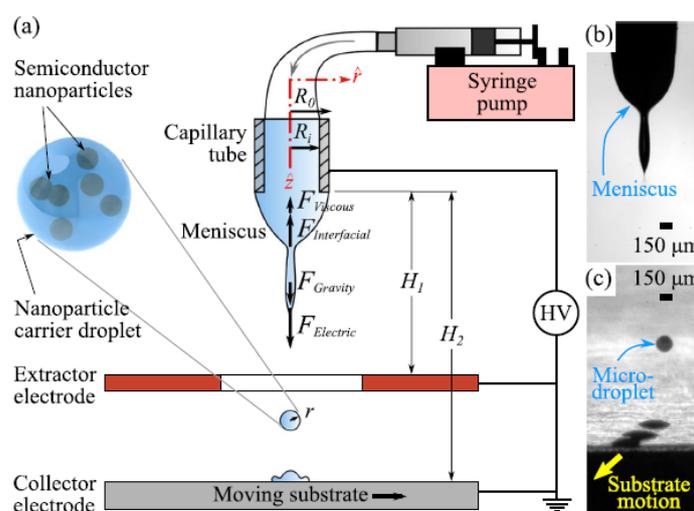
La litografía ha sido el método más comúnmente usado para la impresión de patrones conductores. Sin embargo, los procesos litográficos requieren equipos complejos, llevan mucho tiempo y el rendimiento de área es limitado. Para reducir el uso de material, el tiempo de procesamiento y la gran área de manufactura, se requieren diferentes métodos de fabricación. (Bo Cui, 2011)

Uno de los métodos de manufactura directa no litográficos es la impresión por inyección (inkjet). Algunas de las aplicaciones más prominentes de la tecnología inkjet es en manufactura de circuitos impresos, fotovoltaicos, transistores de película delgada, biosensores, etc. La impresión por inyección ofrece las ventajas de bajo costo, rendimiento de área elevado y procesado de alta velocidad. (Bo Cui, 2011)

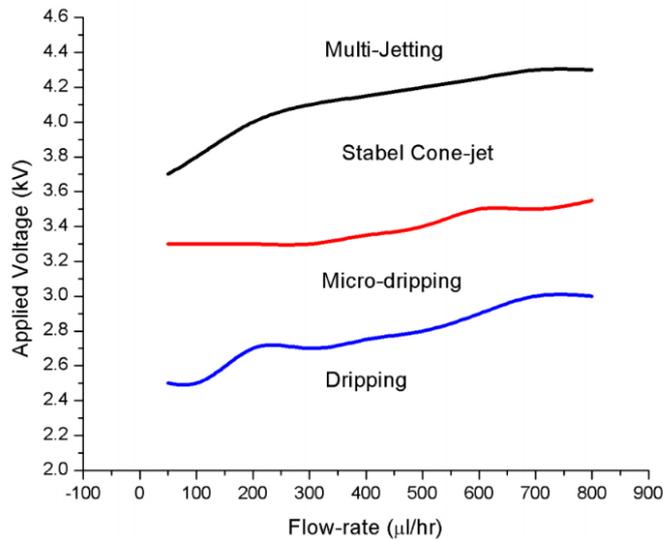
Sin embargo, existen restricciones en la tecnología de inyección debido a limitaciones de la viscosidad de la tinta, taponamiento de boquillas pequeñas, generación de patrones más pequeños que la boquilla y limitaciones de los materiales que se pueden depositar. Para remediar estos problemas, se está comenzando a utilizar sistemas de impresión por inyección electrohidrodinámicos. (Bo Cui, 2011)

### 1.4.2 Electropray

Los sistemas de impresión electrohidrodinámicos utilizan un campo eléctrico para expulsar la tinta de una boquilla (Figura 4). Al aplicar un campo eléctrico entre la boquilla y el sustrato, el fluido es succionado hacia fuera de la boquilla, y no empujado desde esta. Dependiendo de las características del campo eléctrico aplicado, se pueden obtener diferentes tipos de flujo y formas de gota (Figura 5), lo que se puede utilizar para diferentes aplicaciones. (Bo Cui, 2011)



**Figura 4** Esquema de un sistema electropray. (a) Equilibrio de fuerzas aplicado al desprendimiento de gota. (b) Menisco cónico en microdripping. (c) Patrón de microgotas usando las gotas emitidas por microdripping en un sustrato moviéndose a velocidad constante. (Castillo-Orozco et al., 2020).



**Figura 5 Regímenes de flujo en función del voltaje y el caudal. (Bo Cui, 2011)**

#### **1.4.2.1 Goteo**

Cuando el fluido se bombea hacia la boquilla aplicando un campo eléctrico relativamente bajo, gotas de mayor tamaño que el orificio de la boquilla se forman al salir de esta. (Bo Cui, 2011)

#### **1.4.2.2 Microgoteo**

Al aumentar el campo eléctrico, aumenta la frecuencia de las gotas y su tamaño se reduce. A caudales relativamente bajos, el fluido se desintegra en gotas mucho más pequeñas que el orificio de la boquilla. Este modo se denomina microgoteo, y es útil para generar películas finas, como en las placas de circuitos integrados. (Bo Cui, 2011)

#### **1.4.2.3 Husillo**

Si se sigue aumentando el campo eléctrico, dependiendo de las propiedades del fluido, es posible observar el modo husillo. En este modo, el chorro se extiende desde el menisco y se divide en gotas más grandes, así como gotas satélites. (Bo Cui, 2011)

#### **1.4.2.4 Modo de chorro de cono (cone-jet) intermitente**

Aumentar más el voltaje aplicado junto con un caudal relativamente alto da lugar al modo de chorro de cono intermitente. La elevada carga espacial de la forma de chorro

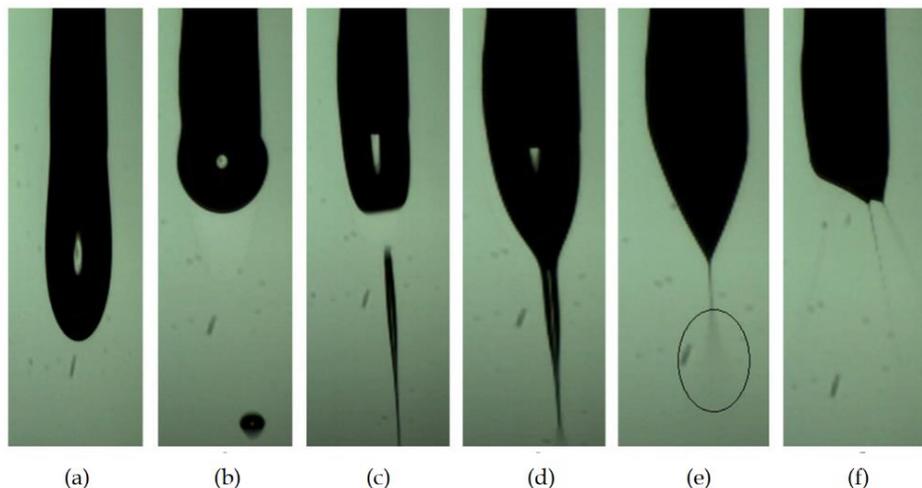
de cono provoca una reducción del potencial eléctrico en el fluido, que se deforma intermitentemente volviendo a la forma de menisco. (Bo Cui, 2011)

#### **1.4.2.5 Modo de chorro de cono (cone-jet)**

Si se sigue incrementando el voltaje, el menisco se deforma en un cono estable y un chorro fino se desprende de la punta de este. Este modo se llama chorro de cono, y se puede utilizar para elaborar patrones si se requieren impresiones muy finas, dado que el diámetro del chorro formado es cerca de dos órdenes de magnitud más pequeño que el del orificio de la boquilla. (Bo Cui, 2011)

#### **1.4.2.6 Multichorro**

Seguir aumentando el voltaje provoca que el cono se vuelva más pequeño y, eventualmente, un segundo chorro emerge del cono. Se puede seguir incrementando el número de chorros aumentando el voltaje. Este modo se denomina multichorro. (Bo Cui, 2011)



**Figura 6 Modos de flujo electrohidrodinámico capturados mediante cámara de alta velocidad. (a) Goteo (b) Microgoteo (c) Husillo (d) Chorro de cono intermitente (e) Chorro de cono (f) Multichorro. (Bo Cui, 2011)**

#### **1.4.3 Sinterizado**

Tras la deposición de la tinta conductora, para la adherencia del material conductor al sustrato es necesario realizar un tratamiento de sinterizado. El sistema de

sinterizado no forma parte de este trabajo, que se centra en el sistema de dispensación de fluidos, pero se mencionarán algunos métodos de sinterizado.

Esto se puede lograr mediante una cama caliente que mantiene el sustrato a la temperatura deseada para el tratamiento, comúnmente usada por su sencillez, ya que sólo se requiere una resistencia eléctrica para calentar la mesa sobre la que se monta el sustrato de trabajo. Sin embargo, este proceso es lento y costoso, ya que tras la impresión se debe dejar prendida la cama caliente para el tratamiento durante entre 30 minutos a 1 hora. (Bo Cui, 2011; Schiffmacher et al., 2018)

Existen sistemas de sinterizado rápido que buscan remediar esto mediante diferentes métodos, como sinterizado láser (Castillo-Orozco et al., 2019), sinterizado mediante luz pulsada intensa (Kim et al., 2009), sinterizado mediante microondas (Perelaer et al., 2009) o sinterizado eléctrico (Alastalo et al., 2008).

#### **1.4.4 Mesas de trabajo CNC**

El control numérico (CN) es un método programable de automatización en el que se controla las acciones de una parte del equipo mediante la programación de datos alfanuméricos codificados. Dichos datos controlan la posición relativa entre una cabeza de trabajo (la herramienta a utilizar) y una pieza de trabajo (el objeto procesado). (Groover, 2007)

Un sistema de CN está compuesto de tres partes, un programa de piezas, una unidad de control de máquina y el equipo de procesamiento. Los sistemas CNC (control numérico computarizado) utilizan una computadora como unidad de control de máquina, y son la evolución resultado del desarrollo del CN. (Groover, 2007)

##### **1.4.4.1 Programa de piezas**

El programa de piezas está compuesto por todos los comandos que debe seguir el equipo de procesamiento. Un comando indica la posición o el movimiento que debe realizar el equipo, junto con detalles adicionales como la velocidad de avance de la cabeza de trabajo. (Groover, 2007)

#### **1.4.4.2 Unidad de control de máquina**

La unidad de control de máquina o MCU (De sus iniciales en inglés, Machine Control Unit) consiste en una microcomputadora en la que el programa se almacena para ser ejecutado. Mediante la unidad de control de máquina, cada comando del programa de piezas se convierte en una acción del equipo de procesamiento.

Se divide en hardware, los componentes físicos de la unidad, como la microcomputadora y los componentes de interfaz entre la MCU y el equipo de procesamiento, y el software, como los algoritmos de cálculo el software de control del sistema y el software de traducción que permite convertir el programa de piezas en un formato utilizable por la MCU. También es posible modificar el programa de piezas desde la MCU. (Groover, 2007)

#### **1.4.4.3 Equipo de procesamiento**

El equipo de procesamiento transforma la pieza de trabajo inicial en la pieza acabada. Lleva a cabo la secuencia de pasos indicada en el programa de piezas bajo el control de la unidad de control de máquina. (Groover, 2007)

En muchos sistemas CNC, la pieza de trabajo se fija a una mesa móvil, denominada mesa CNC. Controlando los movimientos y posiciones relativos de la mesa CNC respecto a la herramienta estacionaria o semiestacionaria, se obtienen los movimientos y posiciones relativas necesarios para trabajar la pieza. (Groover, 2007)

#### **1.4.4.4 Actuadores lineales**

Una mesa XY es un tipo de mesa CNC en la que los movimientos de la mesa están limitados a lo largo de dos ejes longitudinales perpendiculares, X y Y. Para realizar el movimiento a lo largo de estos ejes, es necesario el uso de actuadores lineales. Existe gran variedad de actuadores lineales, con diferentes características como precisión, potencia, velocidad o eficiencia. (Parker Hannifin Corporation, 2007)

Debido a la precisión necesaria, los tornillos de potencia son la alternativa preferida. Estos tornillos se pueden dividir entre tornillos ACME y tornillos de bolas.

#### **1.4.4.5 Tornillo ACME**

También conocido como tornillo de avance, un tornillo ACME (Denominado así por el tipo de rosca) consiste en un husillo, usualmente de bronce o plástico acoplado a un tornillo fijado a un motor. La mesa es acoplada al husillo, y esto transforma el movimiento rotatorio del tornillo en movimiento lineal. Generan fuerzas mucho mayores que las bandas sincrónicas y poseen un costo similar, pero presentan baja eficiencia debido a la elevada fricción entre el husillo y el tornillo, no permiten velocidades altas y son poco precisos. Además, requieren lubricación frecuente. (Parker Hannifin Corporation, 2007)

#### **1.4.4.6 Tornillo de bolas**

Un tornillo de bolas es casi idéntico a un tornillo de avance. La principal diferencia entre estos es que el husillo en este caso es un denominado “husillo de bolas”, y la rosca del tornillo tiene un perfil redondo. El husillo de bolas cuenta con rodamientos de bolas internos, que se pueden desplazar a lo largo de la rosca del tornillo. Los tornillos de bolas pueden trabajar con cargas tan altas o mayores que los tornillos de avance, pero tienen una elevada precisión y eficiencia debido a la reducción de fricción que producen los rodamientos, sin embargo, su costo es mucho mayor. Al igual que los tornillos de avance, requieren lubricación frecuente. (Parker Hannifin Corporation, 2007). En la Tabla 1 se comparan las características de los tornillos de potencia.

**Tabla 1 Tipos de actuadores lineales. Fuente: Elaboración propia**

	Carga	Costo	Eficiencia	Velocidad	Precisión
Tornillo ACME	Alta	Bajo	Baja	Baja	Alta
Tornillo de bolas	Alta	Alto	Alta	Alta	Alta

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1 Alternativas de solución

#### 2.1.1 Mesa XY

##### 2.1.1.1 Alternativa 1

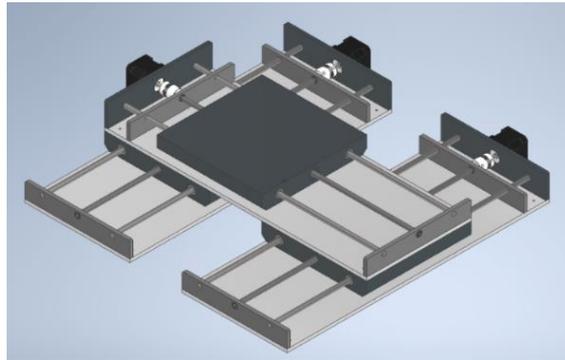


Figura 7. Diseño de forma 1 de la mesa xy. Fuente: Elaboración propia

La característica principal del diseño es el uso de 2 sistemas lineales como base. Esto otorga una mayor robustez y equilibrio al sistema XY, pero requiere una mayor cantidad de componentes debido al uso de dos sistemas en la base, y por tanto una mayor inversión. Además, el sistema requiere mayor calibración para asegurar que las dos etapas lineales de la base estén perfectamente sincronizadas.

##### 2.1.1.2 Alternativa 2

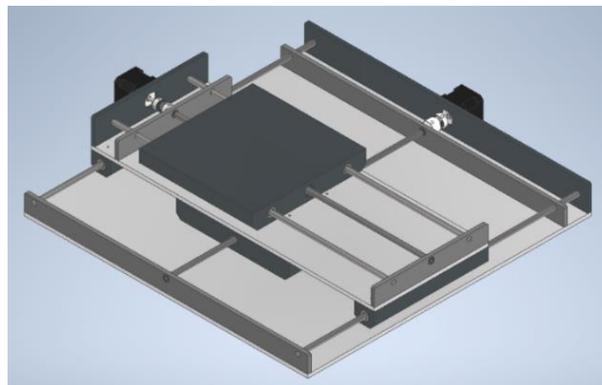
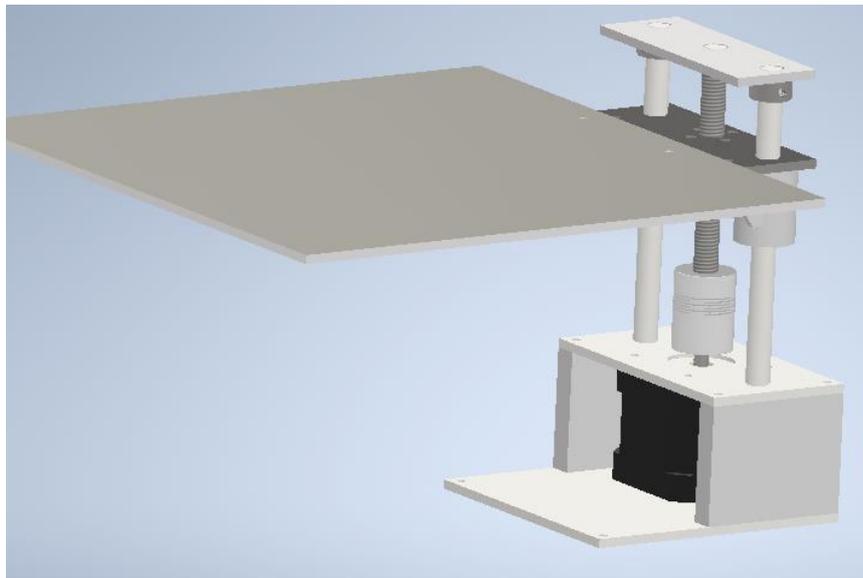


Figura 8. Diseño de forma 2 de la mesa xy. Fuente: Elaboración propia

La segunda alternativa de diseño sacrifica parte de la robustez de la alternativa 1 utilizando una sola etapa como base del sistema, lo que reduce el costo en componentes. Para compensar esta pérdida de robustez, utiliza una placa como base y ejes en los extremos para guiar el movimiento de la mesa superior. Requiere menor calibración dado que se elimina el requerimiento de sincronizar dos motores para desplazarse en un solo eje.

## 2.1.2 Mesa Z

### 2.1.2.1 Alternativa 1



**Figura 9. Diseño de forma 1 del eje z. Fuente: Elaboración propia**

Como principal característica se tiene que el tornillo de potencia está alineado hacia el movimiento que se desea obtener. Como principal ventaja se tiene que el diseño de controlador del controlador es sencillo ya que se tiene una relación directa entre el giro del motor y el movimiento en z. Como desventaja, la estructura debe ser considerada al diseñar otros elementos ya que la torre donde se eleva la plataforma puede interferir en otros movimientos.

### 2.1.2.2 Alternativa 2

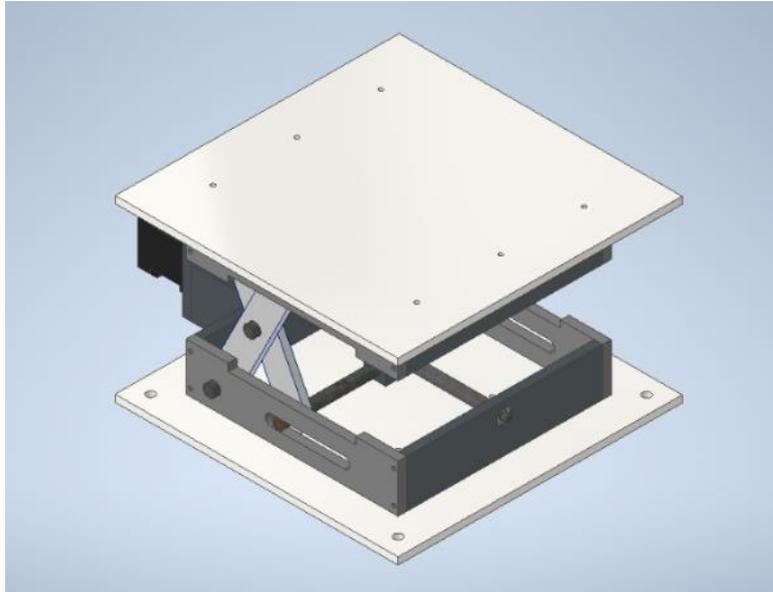


Figura 10. Diseño de forma 2 del eje z. Fuente: Elaboración propia

La principal característica del presente diseño es su forma de tijera, el cual requiere que el tornillo de potencia sea perpendicular al movimiento deseado. El presente diseño es menos invasivo en su plataforma, por lo que permite aprovechar toda la mesa. Requiere de un controlador más complejo ya que existe una relación trigonométrica entre el giro del motor y el movimiento en z.

## 2.2 Selección de alternativa

Para la selección de la mejor alternativa, se utilizó el proceso analítico jerárquico (PAJ, o en inglés, AHP). Mediante este proceso, se determina la importancia de cada característica de las alternativas asignando valores numéricos ponderados a cada atributo.

Tabla 2. Calificaciones de AHP para la comparación por pares de criterios de selección. Fuente: Elaboración propia

Factor de calificación	Valoración relativa de la importancia de dos criterios de selección A y B	Explicación de la calificación
1	A y B tienen la misma importancia.	A y B contribuyen de igual manera para el éxito del producto.

3	Se considera que A es moderadamente más importante que B.	A es ligeramente más importante que B para el éxito del producto.
5	Se considera que A es fuertemente más importante que B.	A es fuertemente más importante que B para el éxito del producto.
7	Se considera que A es mucho más importante que B, o está demostrado que es más importante que B.	El dominio de A sobre B está demostrado.
9	Está demostrado que A es mucho más importante que B.	Existe el mayor grado posible de evidencia que prueba que A es más importante que B para el éxito del producto.

La matriz AHP enfrenta todos los criterios por pares (A y B), y les asigna un valor entre 1 y 10. La

Tabla 2 explica el significado de cada calificación. Mediante este criterio, se obtuvo el valor ponderado de cada atributo de diseño.

A partir de estos valores, se procedió a elaborar matrices de decisión, colocando las alternativas de diseño y asignándoles una puntuación para cada atributo. Se pueden utilizar escalas de 11 puntos (0-10) o de 5 puntos (0-4), explicadas en la Tabla 3.

**Tabla 3. Esquema de evaluación para alternativas u objetivos de diseño. Fuente: Elaboración propia**

Escala de 11 puntos	Descripción	Escala de 5 puntos	Descripción
0	Solución totalmente inútil	0	Inadecuada
1	Solución muy inadecuada		
2	Solución débil	1	Débil
3	Solución pobre		
4	Solución aceptable	2	Satisfactoria
5	Solución satisfactoria		
6	Buena solución con algunos inconvenientes	3	Buena
7	Buena solución		
8	Muy buena solución		
9	Excelente (Excede los requerimientos)	4	Excelente
10	Solución ideal		

En la Tabla 4 se listan los atributos de diseño deseados por el cliente, separados en 4 categorías principales.

**Tabla 4 Clasificación de atributos. Fuente: Elaboración propia**

1. Rendimiento
1.1. Capacidad de soportar diferentes cargas en movimiento
1.2. Posibilidad de adaptar otras herramientas
1.3. Estabilidad
1.4. Precisión de movimiento
2. Seguridad
2.1. Fácil acople
2.2. Acceso protegido a componentes peligrosos
2.3. Rigidez
2.4. Parada fácil
3. Costo
3.1. Componentes económicos
3.2. Costo de mantenimiento bajo
3.3. Costo de reparación bajo
4. Apariencia
4.1. Compacto
4.2. Simétrico
4.3. Ordenado

En la Tabla 5 se asignaron las calificaciones relativas a cada una de las 4 categorías de atributos de diseño, mientras que en las tablas de la 6 a la 9 se asignaron las calificaciones relativas a cada atributo de cada una de las 4 categorías principales.

**Tabla 5 Ponderación entre categorías. Fuente: Elaboración propia**

Categorías	Rendimiento	Seguridad	Costo	Apariencia	Total	Ponderación
<b>Rendimiento</b>	<b>1.00</b>	0.20	0.33	3.00	4.53	0.15
<b>Seguridad</b>	5.00	<b>1.00</b>	3.00	5.00	14.00	0.47
<b>Costo</b>	3.00	0.33	<b>1.00</b>	5.00	9.33	0.32
<b>Apariencia</b>	0.33	0.20	0.20	<b>1.00</b>	1.73	0.06
					<b>29.60</b>	<b>1.00</b>

**Tabla 6 Ponderación entre atributos de rendimiento. Fuente: Elaboración propia**

Rendimiento	1.1	1.2	1.3	1.4	Total	Ponderación	Absoluta
1.1	1.00	3.00	1.00	1.00	6.00	0.30	0.05
1.2	0.33	1.00	0.33	0.33	2.00	0.10	0.02
1.3	1.00	3.00	1.00	1.00	6.00	0.30	0.05
1.4	1.00	3.00	1.00	1.00	6.00	0.30	0.05
					<b>20.00</b>	<b>1.00</b>	<b>0.15</b>

**Tabla 7 Ponderación de atributos de seguridad. Fuente: Elaboración propia**

Seguridad	2.1	2.2	2.3	2.4	Total	Ponderación	Absoluta
2.1	1.00	0.20	0.33	0.20	1.73	0.07	0.03
2.2	5.00	1.00	0.33	1.00	7.33	0.29	0.14
2.3	3.00	3.00	1.00	1.00	8.00	0.32	0.15
2.4	5.00	1.00	1.00	1.00	8.00	0.32	0.15
					<b>25.07</b>	<b>1.00</b>	<b>0.47</b>

**Tabla 8 Ponderación entre atributos de costo. Fuente: Elaboración propia**

Costo	3.1	3.2	3.3	Total	Ponderación	Absoluta
3.1	1.00	3.00	3.00	7.00	0.54	0.17
3.2	0.33	1.00	3.00	4.33	0.33	0.11
3.3	0.33	0.33	1.00	1.67	0.13	0.04
				<b>13.00</b>	<b>1.00</b>	<b>0.32</b>

**Tabla 9 Ponderación entre atributos de apariencia. Fuente: Elaboración propia**

Apariencia	4.1	3.2	3.3	Total	Ponderación	Absoluta
3.1	1.00	3.00	1.00	5.00	0.48	0.03
3.2	0.33	1.00	1.00	2.33	0.23	0.01
3.3	1.00	1.00	1.00	3.00	0.29	0.02
				<b>10.33</b>	<b>1.00</b>	<b>0.06</b>

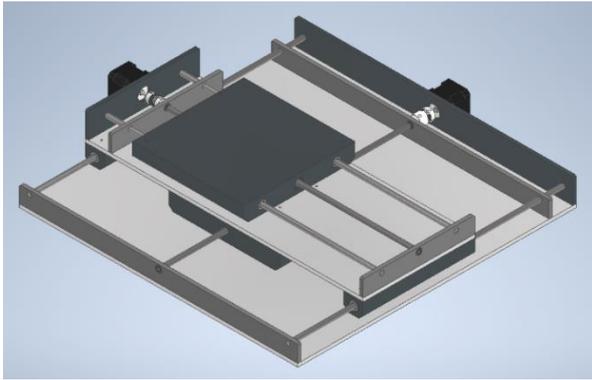
Con estos valores se realizaron las matrices de decisión entre las alternativas propuestas (Tabla 10 y Tabla 11).

**Tabla 10 Selección entre alternativas de mesa XY. Fuente: Elaboración propia**

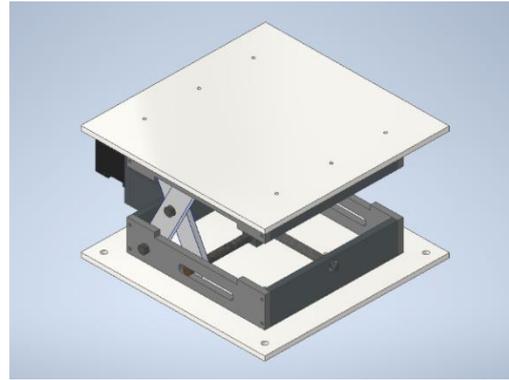
Criterio	Ponderación	Alternativas			
		1		2	
		Puntuación	Ponderada	Puntuación	Ponderada
1.1	0.05	4.00	0.18	3.00	0.14
1.2	0.02	3.00	0.05	3.00	0.05
1.3	0.05	4.00	0.18	3.00	0.14
1.4	0.05	3.00	0.14	4.00	0.18
2.1	0.03	2.00	0.07	4.00	0.13
2.2	0.14	3.00	0.42	3.00	0.42
2.3	0.15	4.00	0.60	3.00	0.45
2.4	0.15	3.00	0.45	3.00	0.45
3.1	0.17	2.00	0.34	3.00	0.51
3.2	0.11	2.00	0.21	3.00	0.32
3.3	0.04	2.00	0.08	3.00	0.12
4.1	0.03	2.00	0.06	2.00	0.06
4.2	0.01	3.00	0.04	2.00	0.03
4.3	0.02	3.00	0.05	4.00	0.07
Total	1.00		2.87		3.05

**Tabla 11 Selección de mesa Z. Fuente: Elaboración propia**

Criterio	Ponderación	Alternativas			
		1		2	
		Puntuación	Ponderada	Puntuación	Ponderada
1.1	0.05	1.00	0.05	4.00	0.18
1.2	0.02	2.00	0.03	4.00	0.06
1.3	0.05	1.00	0.05	4.00	0.18
1.4	0.05	4.00	0.18	3.00	0.14
2.1	0.03	4.00	0.13	4.00	0.13
2.2	0.14	2.00	0.28	3.00	0.42
2.3	0.15	2.00	0.30	4.00	0.60
2.4	0.15	3.00	0.45	4.00	0.60
3.1	0.17	2.00	0.34	4.00	0.68
3.2	0.11	2.00	0.21	2.00	0.21
3.3	0.04	2.00	0.08	2.00	0.08
4.1	0.03	3.00	0.09	4.00	0.11
4.2	0.01	2.00	0.03	4.00	0.05
4.3	0.02	3.00	0.05	3.00	0.05
Total	1.00		2.26		3.51



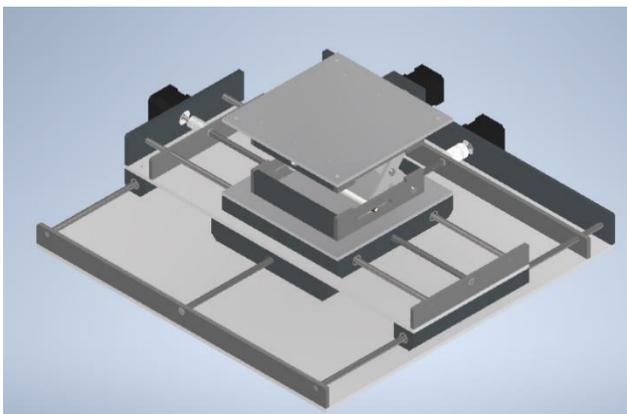
**Figura 11 Alternativa seleccionada para mesa xy. Fuente: Elaboración propia**



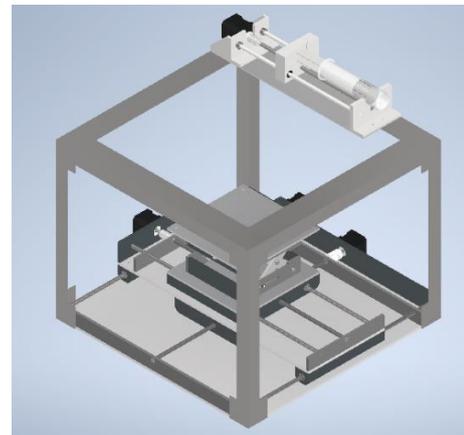
**Figura 12 Alternativa seleccionada para mesa z. Fuente: Elaboración propia**

### Componentes principales

- Motor
- Tornillo de potencia
- Acoples
- Bases
- Ejes
- Rodamientos y rodamientos lineales Eslabones
- Correderas



**Figura 13 Mesa XYZ. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 14 Ensamble Mesa y bomba. Fuente: Elaboración propia**

### 2.3 Diseño de sistema CNC

Debido a la naturaleza del sistema, se separó el diseño en dos módulos: módulo XY y módulo Z. Se procedió a encontrar las relaciones matemáticas que gobiernan el

sistema las cuales me permitieron obtener los parámetros de trabajo asegurando factores de seguridad mayores a uno para el equipo.

### 2.3.1 Diseño por fatiga

Los componentes móviles sufren desgaste debido a esfuerzos variables provocados por el movimiento continuo, por lo que fue necesario diseñarlos aplicando criterios de falla por fatiga.

**Tabla 12 Propiedades mecánicas de materiales utilizados. Fuente: (Dipac Manta, s. f.; Norton, 2011)**

Material	Esfuerzo último de tensión $S_{ut}$ [Mpa]
Acero AISI 2018	410
Aluminio 6061	124
Aluminio 7075	228

Para diseño a fatiga se debe corregir la resistencia mecánica del material. Este se corrige mediante coeficientes que toman en cuenta las condiciones de trabajo de los elementos (Tabla 14). Con estos factores se definió la ecuación (2.1)

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_{e'} \quad (2.1)$$

donde:

- $S_e$  = Límite de resistencia corregido [MPa]
- $C_{carga}$  = Factor de carga
- $C_{tamaño}$  = Factor de tamaño
- $C_{superficie}$  = Factor de superficie
- $C_{temperatura}$  = Factor de temperatura
- $C_{confiabilidad}$  = Factor de confiabilidad
- $S_{e'}$  = Límite de resistencia sin corregir [MPa]

**Tabla 13 Factor de corrección de límite de resistencia a la fatiga teórica de diferentes materiales. Fuente: (Norton, 2011)**

Material	Factor de corrección
Aceros	$Se' = 0.5S_{ut}$ para $S_{ut} < 1400 \text{ Mpa}$ $Se' = 0.5S_{ut}$ para $S_{ut} > 1400 \text{ Mpa}$
Aluminios	$Se' = 0.4S_{ut}$ para $S_{ut} < 280 \text{ Mpa}$ $Se' = 100 \text{ Mpa}$ para $S_{ut} > 280 \text{ Mpa}$

**Tabla 14 Coeficientes de corrección para diferentes condiciones de trabajo. Fuente: (Norton, 2011)**

$C_{carga}$	Flexión: 1 Carga axial: 0.7 Carga cortante: 0.577
$C_{tamaño}$	1 para $d \leq 8 \text{ mm}$ $1.189 * d^{-0.097}$ para $8 \text{ mm} < d \leq 250 \text{ mm}$
$C_{superficie}$	$C_{superficie} = A(S_{ut})^b$ $A = 4.51 ; b = -0.265$ para superficies maquinadas
$C_{temperatura}$	$C_{temperatura} = 1$ para $T \leq 450^\circ\text{C}$
$C_{confiabilidad}$	0.814 para una confianza de 99%

En el caso de la tuerca, debido a su forma rectangular, fue necesario hallar un diámetro equivalente para calcular el coeficiente de tamaño mediante la ecuación (2.2).

$$d_{equiv} = \sqrt{\frac{0.05*b*h}{0.0766}} \quad (2.2)$$

donde:

$d_{equiv}$  = Diámetro equivalente [mm]

$b$  = Base de la tuerca [mm]

$h$  = Altura de la tuerca [mm]

El factor de seguridad por fatiga de los elementos se obtuvo mediante la ecuación (2.3):

$$n = \frac{S_e}{\sigma_a} ; n = \frac{S_e}{\tau_a} \quad (2.3)$$

donde:

$S_e$  = Resistencia a la fatiga corregida [MPa]

$\sigma_a =$  Esfuerzo de flexión a la que se somete el elemento [MPa]

$\tau_a =$  Esfuerzo cortante a la que se somete el elemento [MPa]

### 2.3.2 Diseño de módulo XY

En la Figura 15 se muestran los componentes que usualmente componen un sistema CNC así como las cargas típicas sobre este.

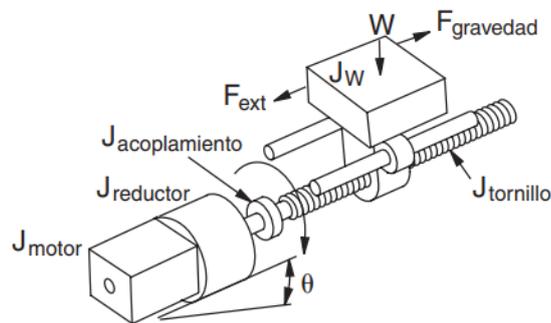


Figura 15 Diagrama de componentes principales. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

A continuación, se muestra el perfil de velocidad y el torque requerido para mover el sistema CNC mediante tornillos de potencia.

#### 2.3.2.1 Selección de componentes del sistema: Motor y PLC

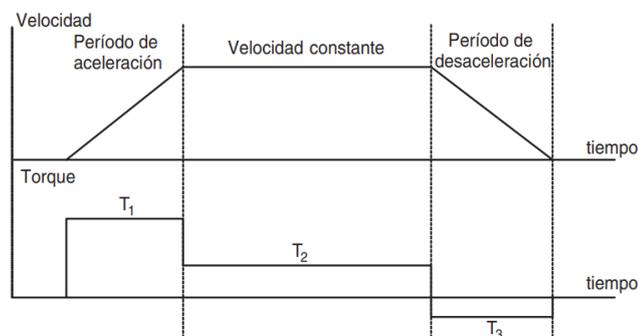


Figura 16 Perfil de velocidades y torque para periodos de aceleración, velocidad constante y desaceleración (AutomationDirect, 2007)

El torque debe ser administrado por el motor para el correcto funcionamiento del sistema se determinó mediante la ecuación (2.4)

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} \quad (2.4)$$

donde:

$T_{acel}$  = Torque que requiere el sistema para la aceleración y desaceleración inercial total del sistema [N-m]

$T_{resist}$  = Torque que requiere el sistema para mover la carga a velocidad constante [N-m]

El torque de aceleración ( $T_{acel}$ ) se determinó a partir la ecuación (2.5)

$$T_{acel} = J_{total} * \alpha = J_{total} * a \frac{2\pi}{p} = J_{total} * \frac{\Delta\omega}{\Delta t} * \frac{2\pi}{60} \quad (2.5)$$

donde:

$J_{total}$  = Suma total de inercias en el sistema como el motor, la carga, tornillo y acople [Kg-m<sup>2</sup>]

$\alpha$  = Aceleración angular [rad/s<sup>2</sup>]

$a$  = Aceleración lineal [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta\omega$  = Cambio de velocidad angular [rpm]

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo [s]

Mientras que el componente de torque resistivo ( $T_{resist}$ ), que depende de la fuerza total sobre el sistema, se calculó con la ecuación (2.6).

$$T_{resist} = \frac{F_{total}}{e} \left( \frac{np}{2\pi} \right) \quad (2.6)$$

donde:

$F_{total}$  = Fuerza total que se ejerce sobre el sistema [N]

$n$  = Numero de dientes del tornillo

$p$  = Paso del tornillo [m]

$e$  = Eficiencia

La fuerza total que actúa sobre una mesa XY se dividió en dos componentes, una carga axial en dirección del movimiento, y una componente de fricción debido a la carga, como se muestra en la ecuación (2.7)

$$F_{total} = F_x + \mu W \quad (2.7)$$

donde:

$F_x$  = Fuerza externa axial que se aplica sobre el sistema [N]

$\mu$  = Coeficiente de fricción

$W$  = Peso de la carga [N]

Debido al tipo de trabajo, una dispensación de fluidos, que no actúa axialmente, en la mesa XY se despreció la fuerza axial. Para el peso, se consideró el caso crítico, la mesa que actúa como base de todo el sistema (mesa X), la cual soportará el peso de la mesa Y, la mesa Z, y la pieza de trabajo. A partir de esto, se modificó la ecuación (2.7), y se obtuvo la ecuación (2.8)

$$F_{total} = \mu(W_Y + W_Z + W) \quad (2.8)$$

donde:

$W_Y$  = Peso de la mesa Y [N]

$W_Z$  = Peso de la mesa Z [N]

El movimiento rotacional del motor y el lineal de la mesa están relacionados mediante la ecuación (2.9):

$$\frac{\theta}{360^\circ} = \frac{x}{np} \quad (2.9)$$

donde:

$\theta$  = Paso angular [Grados]

$x$  = Resolución [m]

$n$  = Número de dientes

$p$  = Paso del tornillo [m]

El control del motor se realiza mediante un PLC, que acciona el motor mediante pulsos. Un pulso equivale al movimiento mínimo del sistema, por lo que, para generar un

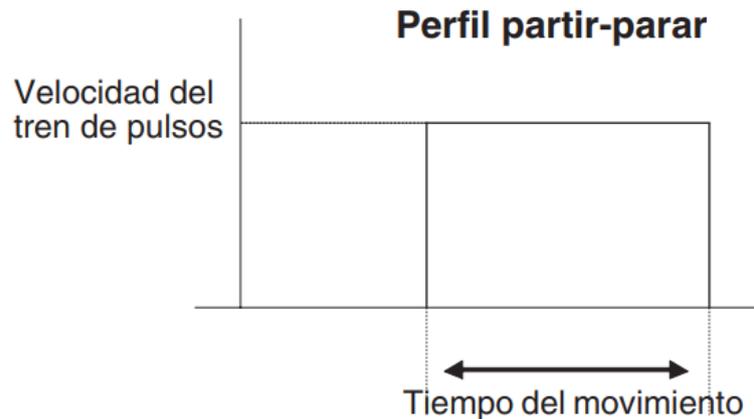
movimiento deseado,  $L$ , se debe mandar un número específico de pulsos, que se determinó mediante la ecuación (2.10)

$$P = \frac{L}{p} * \theta \quad (2.10)$$

donde:

- $P =$  Pulsos totales
- $L =$  Longitud total de movimiento [m]
- $\theta =$  Paso angular [pasos/revolución]

A continuación, se muestra como es un perfil de velocidad de característica partir-parar, típico para bajas velocidades.



**Figura 17 Aproximación para bajas velocidades. (AutomationDirect, 2007)**

Si no se realizan cambios bruscos de velocidad y se utilizan bajas velocidades se puede aproximar el perfil de movimiento como se observa en la figura 17. Esta aproximación, dada por la ecuación (2.11) no toma en cuenta tiempos de aceleración y desaceleración

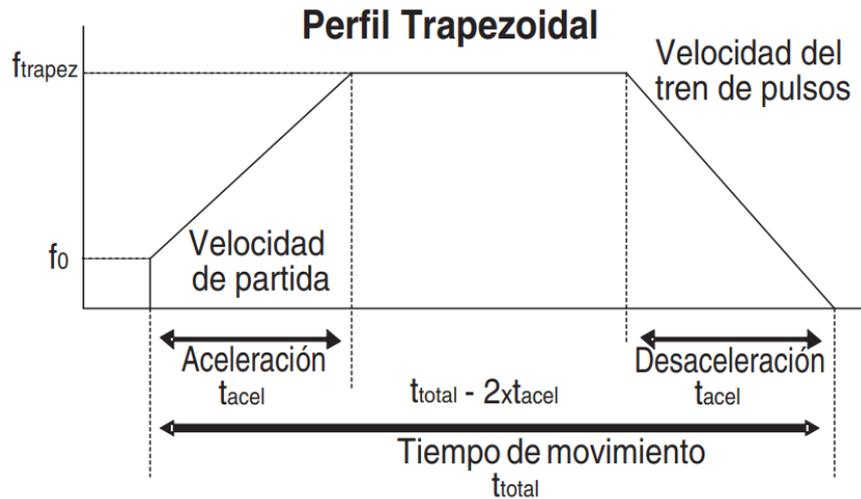
$$f = P/t_{total} \quad (2.11)$$

donde:

- $f =$  Velocidad de tren de pulsos [Hz]
- $P =$  Pulsos totales

$t_{total}$  = Tiempo total de movimiento [s]

A continuación, se muestra el perfil de velocidad (Figura 18) que se forma al momento de realizar un movimiento en el sistema movimiento.



**Figura 18 Perfil trapezoidal para tiempos iguales en aceleración y desaceleración (AutomationDirect, 2007)**

Para movimientos donde se incluyan aceleración y desaceleración controlada en tiempos iguales se puede hallar la velocidad de tren de pulsos mediante la ecuación (2.12).

$$f = \frac{P - (f_0 * t_{acel})}{t_{total} - t_{acel}} \quad (2.12)$$

donde:

$f_0$  = Frecuencia o velocidad de tren de pulsos inicial [Hz]

$t_{acel}$  = Tiempo de aceleración de la carga [s]

Para tiempos diferentes de aceleración y desaceleración se puede utilizar las siguientes relaciones:

$$P_{acel} = (f - f_0) * t_{acel} \quad (2.12 a)$$

$$P_{desacel} = (f - 0) * t_{desacel} \quad (2.12 b)$$

El último parámetro importante para la selección del motor es la velocidad de trabajo, que se obtuvo de la ecuación (2.13)

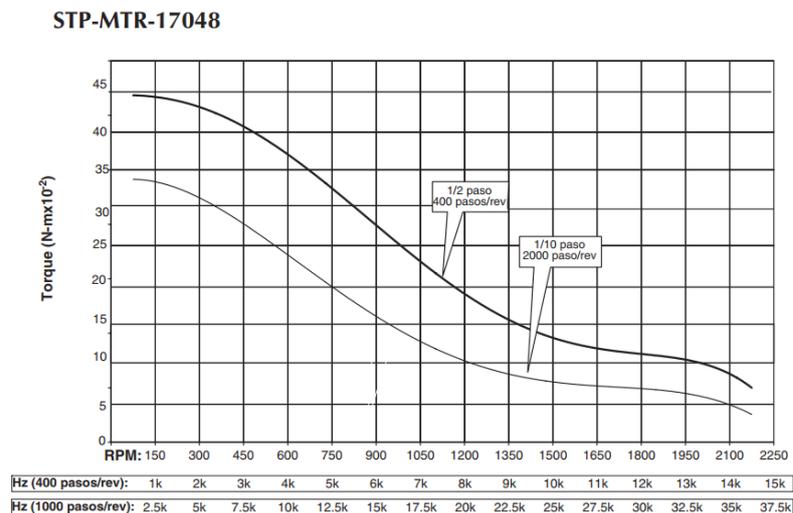
$$\omega = \frac{f}{\theta} * \frac{60 [s]}{1 [min]} \quad (2.13)$$

donde:

- $\omega$  = Velocidad del eje de motor [rpm]
- $f$  = Frecuencia o velocidad de tren de impulsos [Hz]
- $\theta$  = Paso angular [pasos/rev]

Finalmente, con los resultados del torque de motor y velocidad de rotación se logró seleccionar el motor adecuado utilizando las curvas de fabricante. Mientras que el resultado de frecuencia o velocidad de tren de impulsos permitió seleccionar un PLC adecuado que trabaje a la frecuencia requerida.

La figura a continuación (Figura 19) es un ejemplo de curvas de fabricante del motor seleccionado.



**Figura 19 Curva Torque vs Velocidad (AutomationDirect, 2007)**

### **2.3.2.2 Análisis estático del módulo XY**

Para el diseño de la mesa XY se consideró principalmente un análisis de fuerzas estáticas para las posiciones críticas. La carga crítica en el diseño se dio sobre la mesa

X, que soporta las mesas Y y Z junto la carga de trabajo, representada por la ecuación (2.14). La carga sobre esta mesa se dividió entre 2 ejes fijos de soporte y el tornillo de potencia.

$$W_x = W_y + W_z + W \quad (2.14)$$

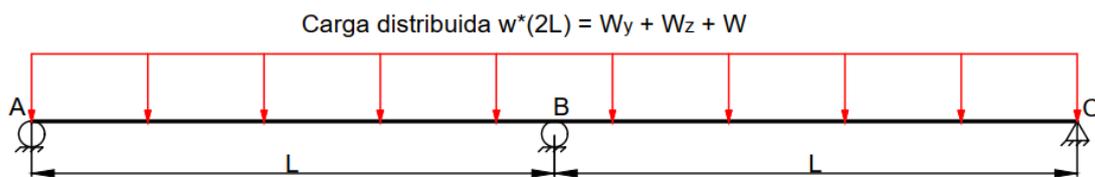
donde:

$W_x$  = Carga total sobre el módulo X [N]

$W_y$  = Peso del módulo Y [N]

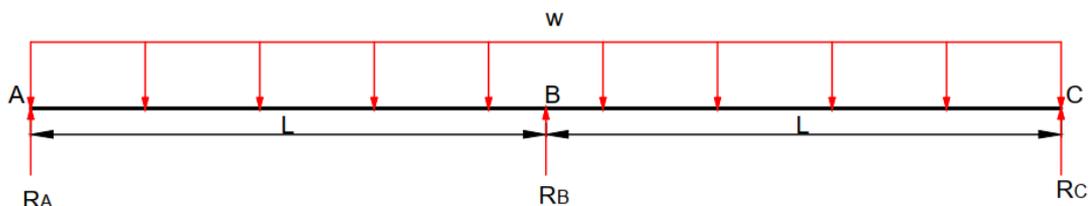
$W_z$  = Peso del módulo Z [N]

$W$  = Peso de la carga de trabajo [N]



**Figura 20 Modelo frontal de la mesa X. Fuente: Elaboración propia**

Se consideró la carga total como una carga distribuida a lo largo de toda la mesa (Figura 20 y Figura 21). Este modelo es una viga continua con 3 apoyos, los dos ejes en A y C, y el tornillo de potencia en B.



**Figura 21 DCL frontal de la mesa X. Fuente: Elaboración propia**

Mediante un análisis estático, se determinó que las cargas se distribuirían de acuerdo con las ecuaciones (2.15) y (2.16) entre los ejes en A, C y el tornillo en B:

$$R_A = R_C = \frac{3W_x}{16} \quad (2.15)$$

$$R_B = \frac{5W_x}{8} \quad (2.16)$$

donde:

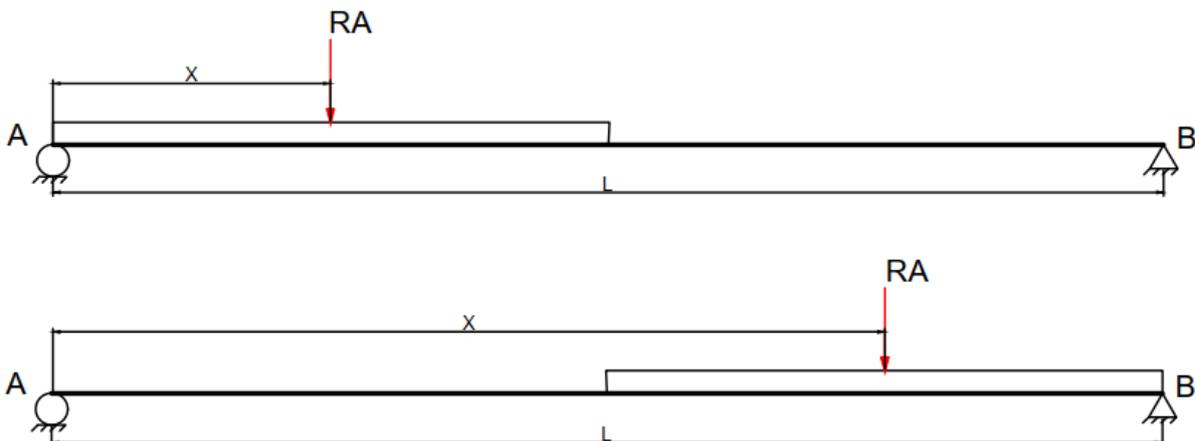
$R_A$  = Carga sobre el eje localizado en A [N]

$R_B$  = Carga sobre el tornillo localizado en B [N]

$R_C$  = Carga sobre el eje localizado en C [N]

De lo que se obtuvo que mayoría de la carga fue soportada por el tornillo de potencia. Esto corrigió la ecuación 2.8, que consideraba que todo el peso era soportado por el tornillo.

Para los ejes, se consideró un modelo con carga puntual sobre los mismos, la cual se puede desplazar 200 mm, el rango de movimiento de la mesa.



**Figura 22. Rango de movimiento de la carga sobre los ejes**

Para un eje en flexión simplemente apoyado, el momento máximo con una carga puntual se da cuando dicha carga está en el centro (Ver Figura 22) y viene dado por la ecuación (2.17) (Norton, 2011):

$$M_{m\acute{a}x} = R_A \frac{L}{4} \quad (2.17)$$

donde:

$M_{m\acute{a}x}$  = Momento flector máximo [Nm]

### 2.3.3 Diseño de módulo Z

#### 2.3.3.1 Análisis cinemático

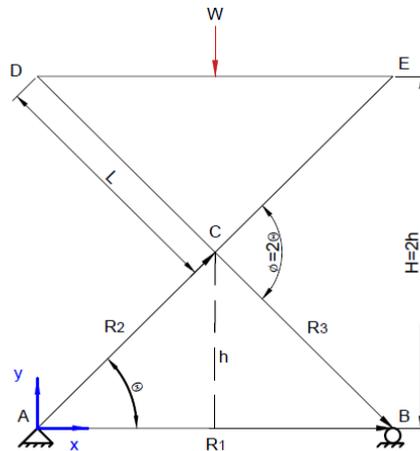


Figura 23 Lazo vectorial - Mesa z. Fuente: Elaboración propia

El movimiento del sistema en eje x se definió mediante las ecuaciones (2.18), (2.19) y (2.20)

$$x = 2L * \cos(\theta) \quad (2.18)$$

$$\dot{x} = -2L * \dot{\theta} \sin(\theta) \quad (2.19)$$

$$\ddot{x} = -2L * \dot{\theta}^2 \cos(\theta) - 2L * \ddot{\theta} \sin(\theta) \quad (2.20)$$

Por otro lado, el movimiento del sistema en eje y fue analizado a partir de las ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23)

$$y = L * \sin(\theta) \quad (2.21)$$

$$\dot{y} = L * \dot{\theta} * \cos(\theta) \quad (2.22)$$

$$\ddot{y} = -L * \dot{\theta}^2 \sin(\theta) + L * \ddot{\theta} \cos(\theta) \quad (2.23)$$

Por último, combinando las relaciones entre los ejes X y Y del sistema, se determinaron las ecuaciones (2.24) y (2.25)

$$\frac{x}{y} = \frac{2}{\tan(\theta)} \quad (2.24)$$

$$\frac{\dot{x}}{\dot{y}} = -\frac{2}{\tan(\theta)} \quad (2.25)$$

### 2.3.3.2 Análisis dinámico

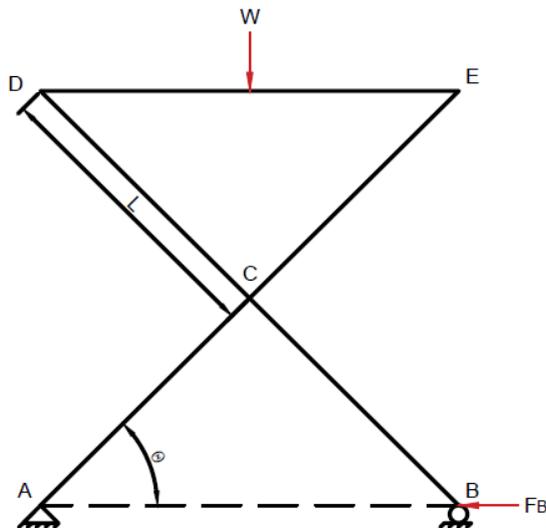


Figura 24 Diagrama del cuerpo libre - Mesa z. Fuente: Elaboración propia

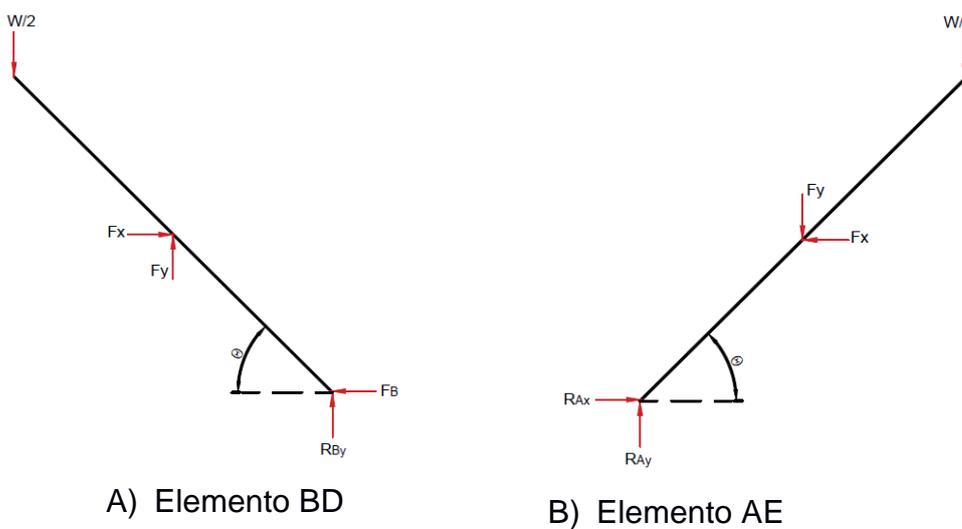


Figura 25 Diagramas de cuerpo libre A) Eslabón BD B) Eslabón AE. Fuente: Elaboración propia

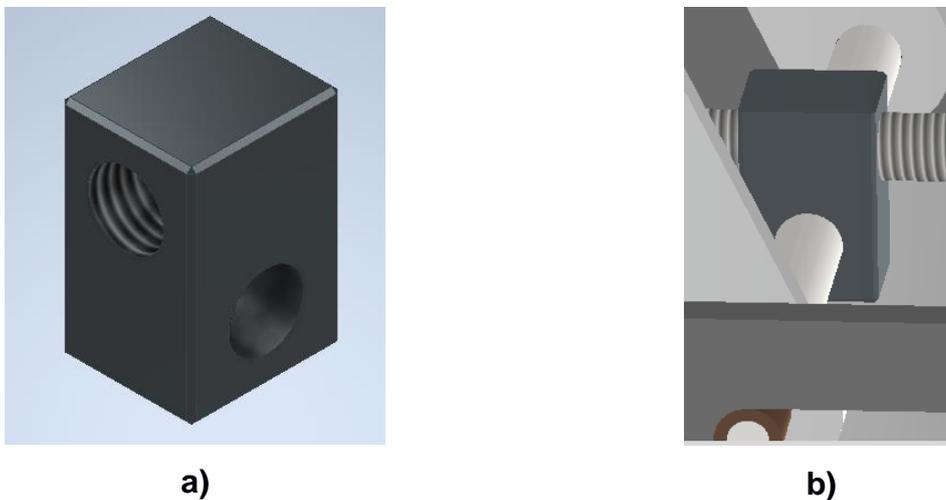
Mediante análisis dinámico, se determinaron las relaciones (2.26), (2.27) y (2.28), que rigen las cargas en el módulo Z

$$F_x = F_B = R_{Ax} = \frac{W}{\tan(\theta)} \quad (2.26)$$

$$F_y = 0 \quad (2.27)$$

$$R_{By} = R_{Ay} = \frac{W}{2} \quad (2.28)$$

### 2.3.3.3 Diseño de elementos críticos en modulo z



**Figura 26 Elementos críticos de modulo z a) Tuerca b) Eje transversal acoplado en tuerca. Fuente: Elaboración propia**

Estos elementos en el módulo z deben soportar cargas fluctuantes, que provocan desgaste por fatiga. Por esto, se debe realizar un análisis de fatiga que permita garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

La fuerza total que los elementos deben soportar será la suma de la fuerza axial  $F_a$  proveniente de la carga en la plataforma y la fuerza de fricción generada en la corredera.

$$F_a = F_B + \mu * R_{By} = F_B + \mu * \frac{W}{2} \quad (2.29)$$

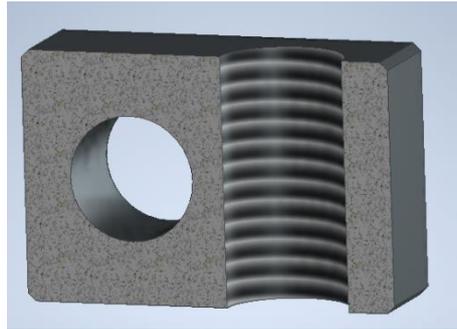


Figura 27 Corte transversal de tuerca. Fuente: Elaboración propia

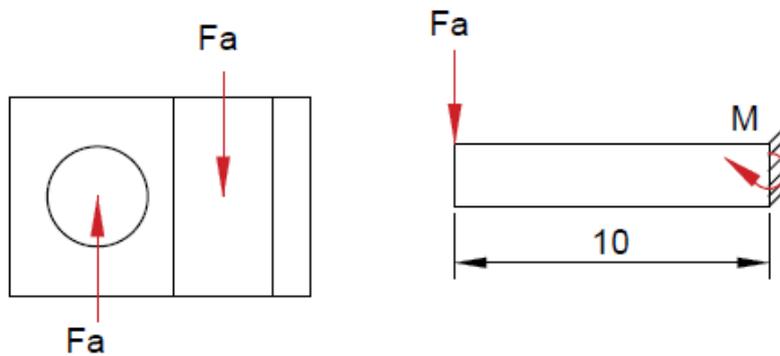


Figura 28 DLC de tuerca. Modelo matemático de viga empotrada. Fuente: Elaboración propia

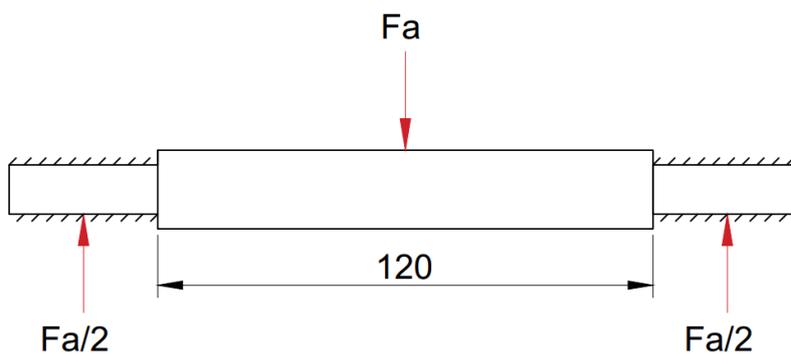


Figura 29 DLC de eje transversal. Modelo de viga simplemente apoyada. Fuente: Elaboración propia

Se tomaron coeficientes de fricción para el cálculo de la fuerza de fricción de la siguiente tabla.

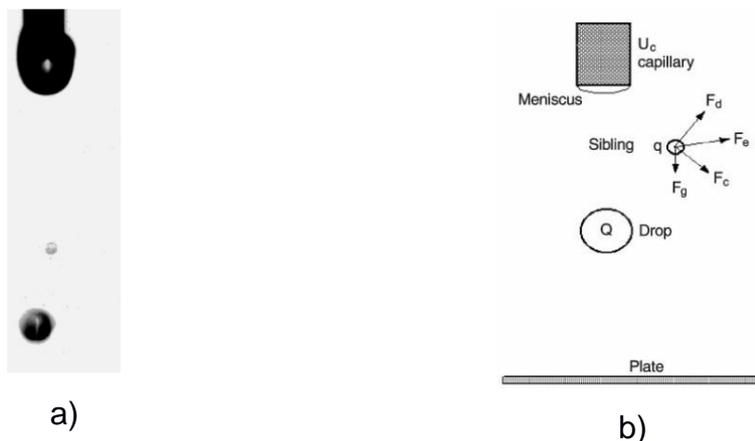
**Tabla 15 Coeficiente de fricción de diferentes materiales validados mediante diferentes métodos. Fuente: (Ordoñez & Carmenza, 2015)**

Metales		Método de fuerza de empuje	Método de plano inclinado
Aluminio	Aluminio	0.334	0.656
Acero	Acero	0.217	0.457
Aluminio	Acero	0.208	0.572
Acero	Bronce	0.175	0.457
Bronce	Aluminio	0.366	0.428

### 2.3.4 Diseño de electro spray

#### 2.3.4.1 Diseño de dispensador

El sistema de dispensador este compuesto por un tubo capilar, un electrodo extractor y un electrodo colector (Figura 31). Existe un campo eléctrico constante,  $E_1$ , entre el tubo capilar y el extractor y uno variable,  $E_2$ , entre el tubo capilar y el colector. El campo  $E_1$  evita que dos gotas de un mismo valor de carga se repelan como se puede observar en la Figura 30, mientras que el campo  $E_2$  permite variar la intensidad de campo total para modificar el radio de gota del fluido. El tubo capilar está conectado a una bomba de jeringa que será seleccionada de acuerdo con el caudal mínimo requerido según las investigaciones consultadas.



**Figura 30 Modo goteo a) Formación de gota menor q b) Fuerzas que actúan sobre la gota menor: F<sub>g</sub>: Fuerza de gravedad, F<sub>d</sub>: Fuerza eléctrica debido a la gota Q, F<sub>c</sub>: Fuerza eléctrica debido al campo entre electrodos, F<sub>e</sub>: Fuerza eléctrica resultante (Jaworek & Krupa, 1999)**

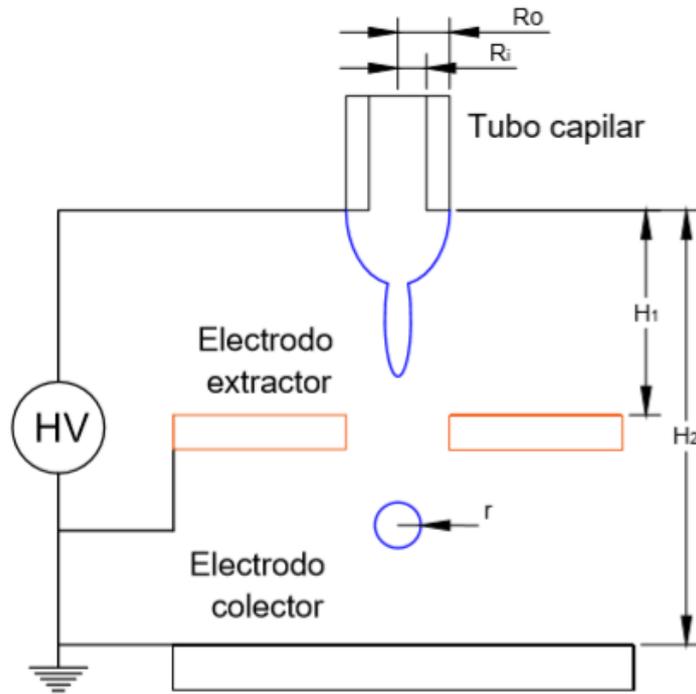


Figura 31 Diagrama de electrospray. Fuente: Elaboración propia

El campo eléctrico aplicado en la configuración se puede calcular mediante las ecuaciones (2.30), (2.31), (2.32), (2.33) y (2.34) (Jones & Thong, 1971)

$$E = E_1 + E_2 \quad (2.30)$$

donde:

$E_1$  = Campo eléctrico entre el tubo capilar y el electrodo extractor

$E_2$  = Campo eléctrico entre el tubo capilar y el electrodo colector

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0 \ln\left(\frac{4H_1}{R_0}\right)} \quad (2.31)$$

$$E_2 = \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0 \ln\left(\frac{4H_2}{R_0}\right)} \quad (2.32)$$

donde:

$\phi$  = Voltaje aplicado [V]

$R_0$  = radio externo del tubo capilar [mm]

$H_1$  = Distancia entre tubo capilar y electrodo extractor [mm]

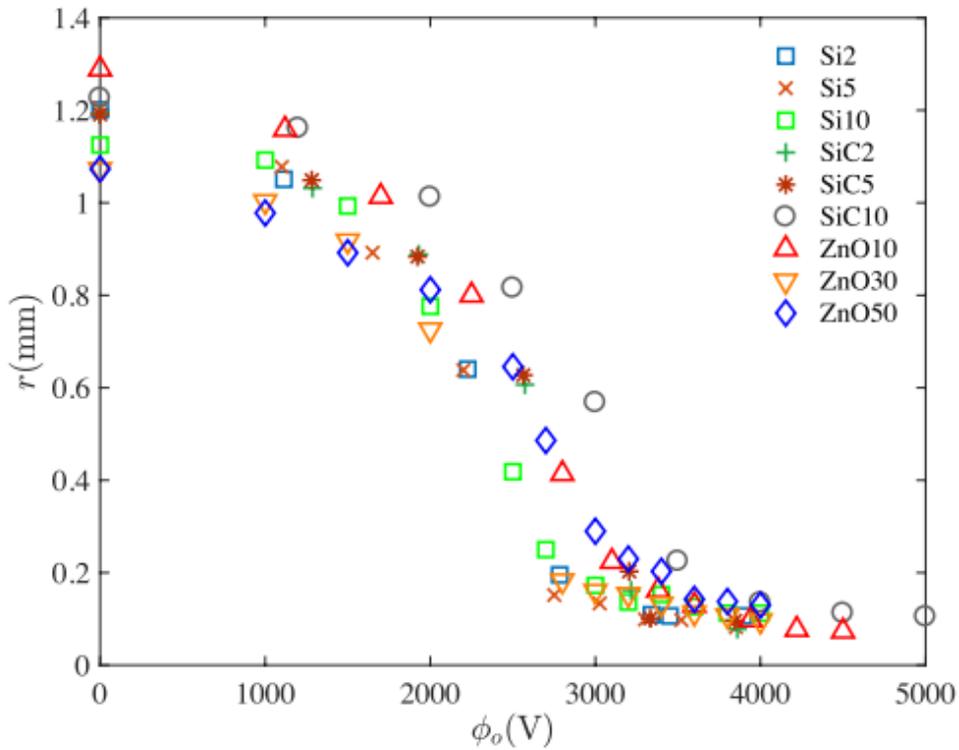
$H_2 =$  Distancia entre tubo capilar y electrodo colector [mm]

Por lo que el campo eléctrico total será:

$$E = \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0 \ln\left(\frac{4H_1}{R_0}\right)} + \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0 \ln\left(\frac{4H_2}{R_0}\right)} = \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0} \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{4H_1}{R_0}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{4H_2}{R_0}\right)} \right) \quad (2.33)$$

## 2.4 Parámetros del dispositivo

### 2.4.1 Campo eléctrico



**Figura 32** Radio de gotas emitidas vs. voltaje aplicado en modos de goteo y microgoteo para una altura de 74 mm y caudal de 1.67 mm<sup>3</sup>/s (0.006 ul/hr) Fuente: (Castillo-Orozco et al., 2020)

**Tabla 16** Parámetros para goteo. Fuente: (Castillo-Orozco et al., 2020)

Modo	Rango de radios	Frecuencia
Goteo	1.3-0.65 [mm]	0.2-1.5 [gota/s]
Microgoteo	74-150 [um]	100-650[gota/s]

**Tabla 17 Campo eléctrico generado a partir de las condiciones de Figura 32. Fuente: Elaboración propia**

$\phi$ [V]	$E = [V/m]$
2000	$2.93 * 10^6$
2500	$3.66 * 10^6$
3000	$4.39 * 10^6$

De acuerdo con la literatura, es posible lograr el modo de goteo con voltajes de hasta 2000 V. A partir de ese valor, se entra en la región de transición entre goteo y micro goteo, que ocupa el rango entre 2000 V ( $2.9 * 10^6$  V/m) y 3000 V ( $4.4 * 10^6$  V/m), donde tienen lugar cualquiera de los dos fenómenos, dependiendo del fluido utilizado. A partir de 3000 V, principalmente se obtiene un flujo de microgoteo. (Cloupeau & Prunet-Foch, 1994; Bo Cui, 2011; Castillo-Orozco et al., 2020). Para determinar los valores de campo eléctrico generados a partir del voltaje se utilizó la ecuación 2.33, obteniendo los los resultados mostrados en la Tabla 17.

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANALISIS

Los resultados presentados a continuación fueron obtenidos mediante un análisis de los componentes principales del sistema de dispensador de fluidos movido mediante CNC. Se compararon resultados teóricos obtenidos mediante la formulación de modelos matemáticos y de simulaciones basadas en elementos finitos.

### 3.1 Mesa XY

Se analizó la mesa X, que soporta los pesos de la mesa Y, la mesa Z y la carga de trabajo. La carga considerada fue determinada mediante la masa de los modelos 3D (Tabla 19) y una carga de prueba de 5 kg.

**Tabla 18. Especificaciones de mesa XY. Fuente: Elaboración propia**

Dimensiones	Plataforma de 2 00 x 200 [mm]
Carga máxima	5 [kg]
Velocidad	25 [mm/s]
Carrera en x	200 [mm]
Carrera en y	200 [mm]

**Tabla 19. Masa de los elementos diseñados. Fuente: Elaboración propia**

Elemento	Mesa Y	Mesa Z	Carga	Total
Masa [kg]	5.96	2.49	5.00	13.45
Peso [N]	58.5	24.4	49.0	131.9

Mediante análisis estático por superposición, se determinaron las reacciones sobre los elementos críticos que soportan la carga, el tornillo de potencia y los ejes guía (Tabla 20). Este desarrollo se encuentra en el apéndice A.

**Tabla 20. Reacciones sobre los elementos críticos de la mesa XY. Fuente: Elaboración propia**

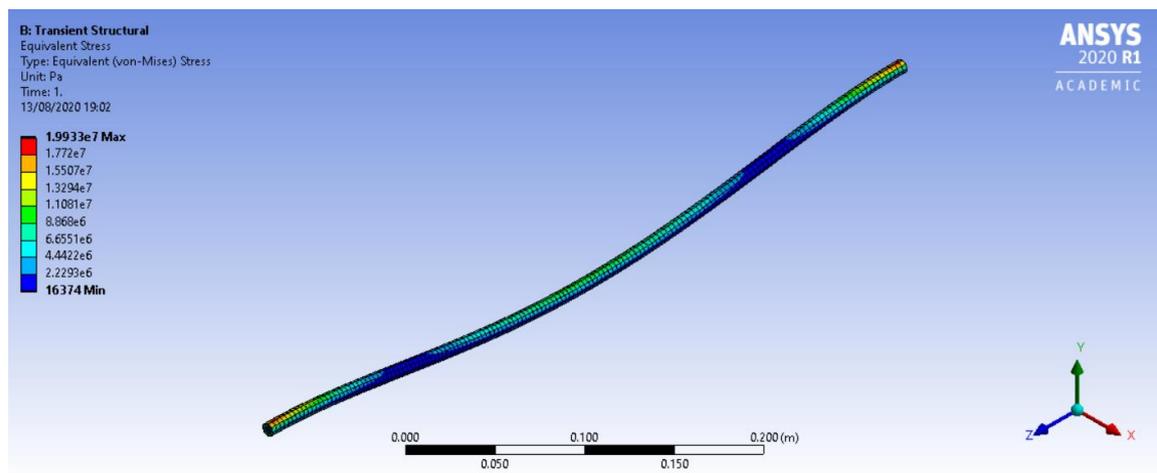
Elemento	Eje (A)	Tornillo (B)	Eje (C)
Reacción [N]	24.7	82.5	24.7

La carga obtenida estuvo muy por debajo de la carga nominal del tornillo de 2.2 kN. Esto no significa que el tornillo no fallará nunca bajo condiciones normales de operación. La carga nominal representa el valor de carga bajo el cual el tornillo tendrá una vida útil de un millón revoluciones con una confiabilidad del 90%, lo que significa que, bajo una carga menor a la nominal, la vida útil será mayor a dicho valor. (SKF, 2013)

Para los ejes, fue necesario un análisis de fatiga. Se realizaron un análisis de fatiga teórico (Apéndice C) y un análisis de elementos finitos (Figura 33). De estos métodos, se obtuvieron los resultados recogidos en la Tabla 21:

**Tabla 21. Comparación de resultados teóricos y elementos finitos de eje transversal en modulo XY. Fuente: Elaboración propia**

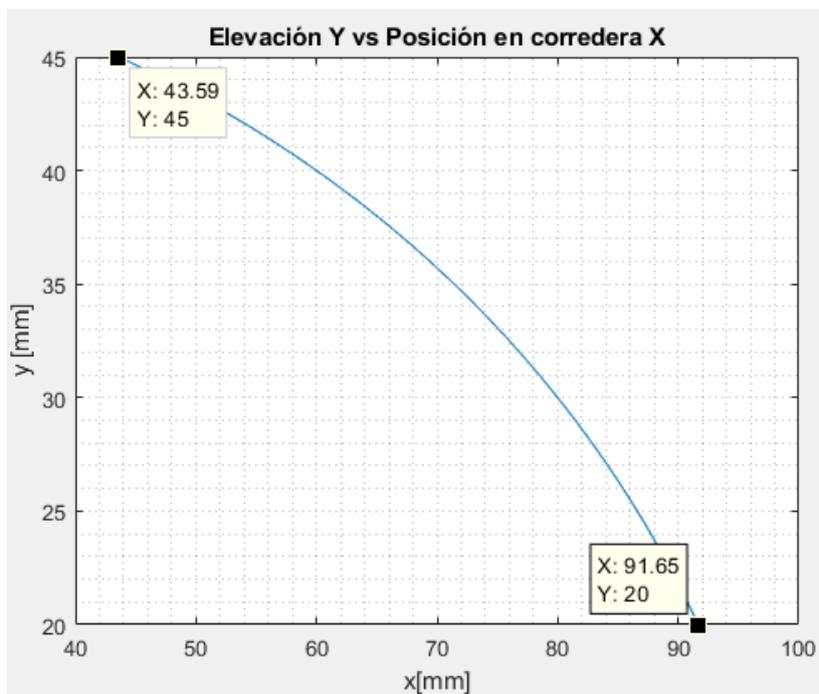
Materiales	Se' [Mpa]	Se [Mpa]	Modelo teórico			Elementos finitos	
			Sa [Mpa]	Sa' [Mpa]	n	Sa [Mpa]	n
Acero AISI 1018	205	150.27	48.54	48.54	3.1	19.93	7.5



**Figura 33 Análisis de elementos finitos de eje en modulo XY. Fuente: Elaboración propia**

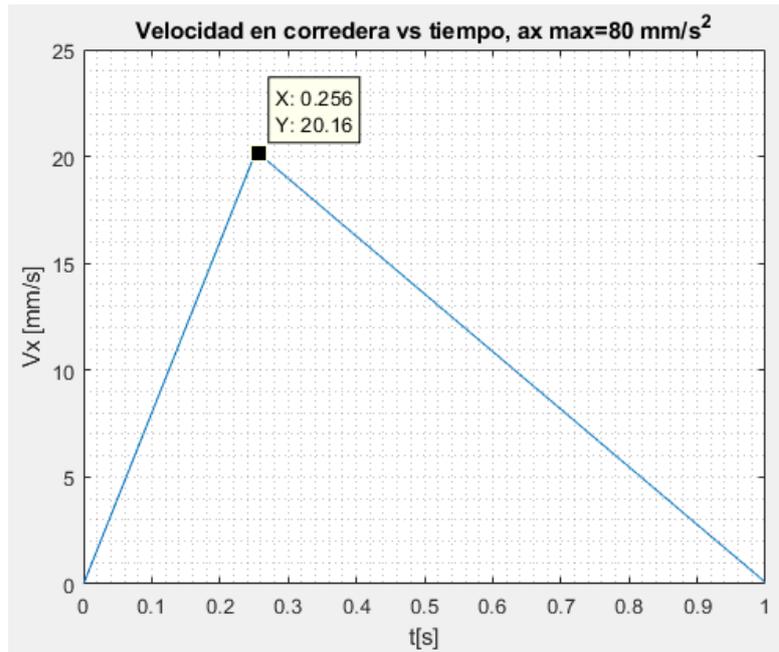
### 3.2 Mesa Z

En el análisis vectorial, se identificó una relación no lineal entre la corredera y la elevación en el módulo Z (Figura 34), que permitió definir el rango de movimiento en la corredera entre 43.5 [mm] y 91.5 [mm], estableciendo como punto de referencia el punto A (Figura 24). El desarrollo de las ecuaciones que permitieron obtener estos resultados se encuentra en anexos (Apéndice E).



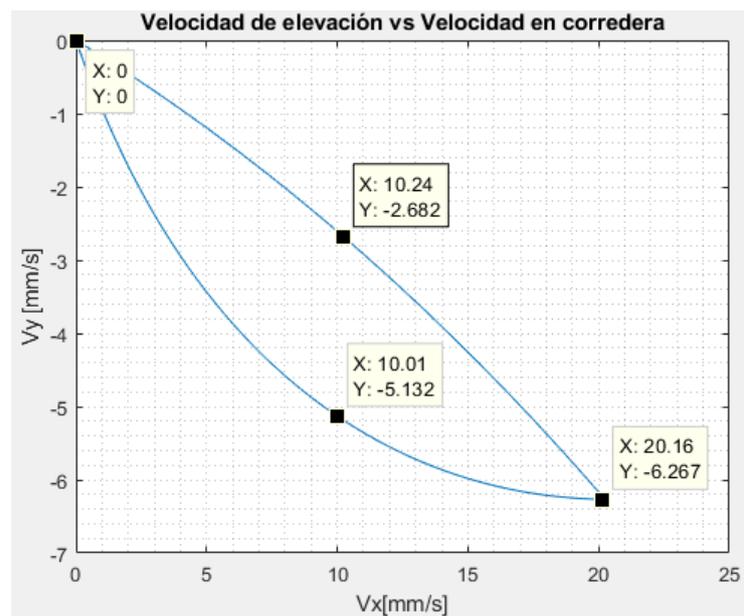
**Figura 34** Relación entre la elevación de la mesa (eje y) y el desplazamiento de la corredera (eje x). Fuente: Elaboración propia

Para el perfil de velocidad de la corredera se seleccionó una velocidad máxima de corredera de aproximadamente 20 mm/s y una aceleración máxima de 80 mm/s<sup>2</sup> (Figura 35). El recorrido en el eje x se realizó en un segundo, teniendo un periodo de aceleración y desaceleración de aproximadamente 0.25 [s] y 0.75 [s] respectivamente.



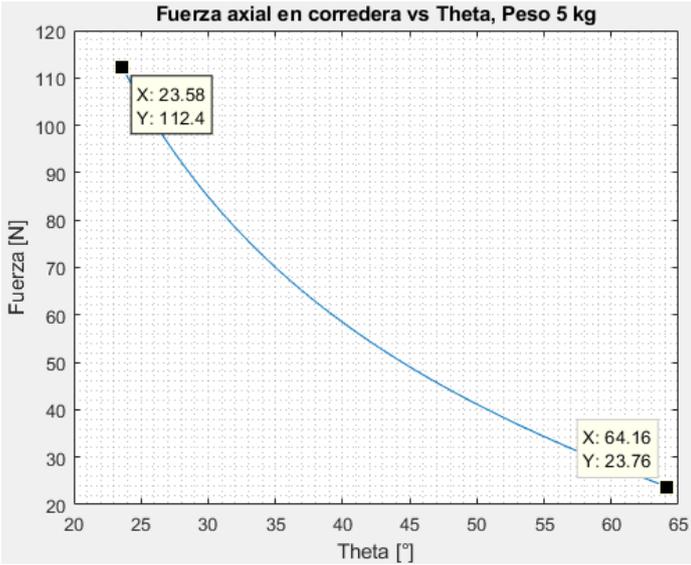
**Figura 35 Velocidad en corredera. Fuente: Elaboración propia**

La relación entre velocidad de corredera y velocidad de elevación del módulo z es no lineal (Figura 36). La velocidad máxima que experimenta la mesa z es de aproximadamente 6 [mm/s].



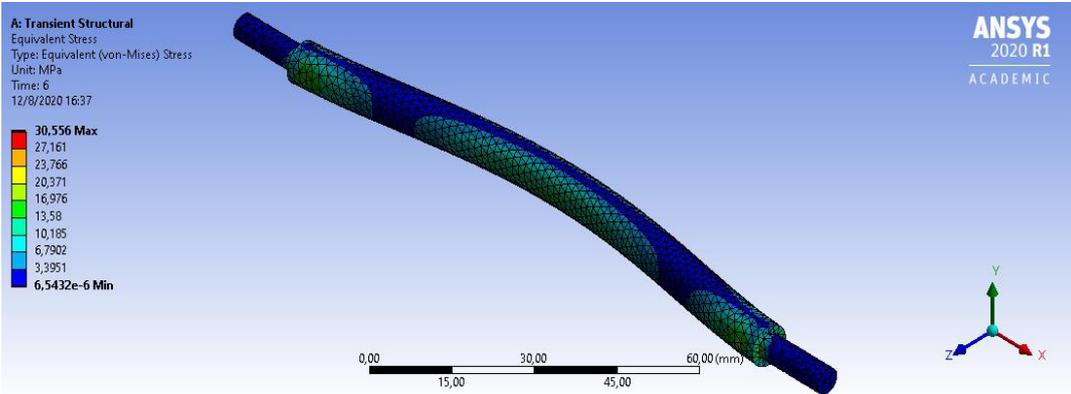
**Figura 36 Relación entre velocidad en corredera y velocidad de elevación. Fuente: Elaboración propia**

En la Figura 37, que corresponde al análisis dinámico, se puede observar que la fuerza máxima se produjo cuando el módulo z estuvo cerrado. Esto se debe a que existió una mayor componente axial ante la presencia del ángulo mínimo aplicado, que se estableció en 23.58°. El desarrollo de las ecuaciones que permitieron obtener estos resultados se encuentra en anexos (Apéndice F)



**Figura 37 Magnitud de fuerza axial en corredera  $F_b$  (véase Figura 24) vs el ángulo del eslabón (Theta). Fuente: Elaboración propia**

El factor de seguridad hallado mediante análisis de fatiga y por elementos finitos (Figura 38) es mayor a uno para ambos casos (Tabla 22).



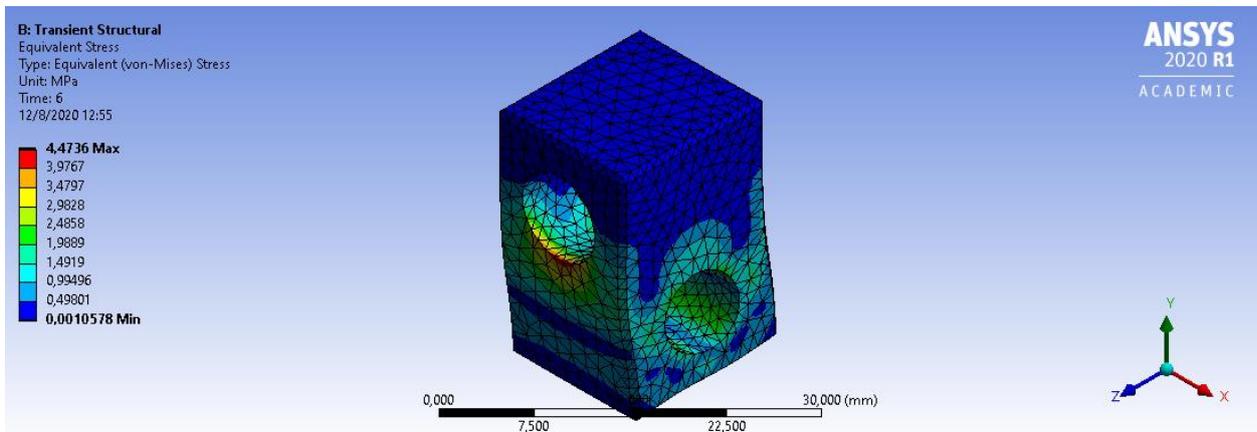
**Figura 38 Análisis de elementos finitos de eje transversal en modulo z. Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 22 Comparación de resultados teóricos y elementos finitos de eje transversal en modulo z. Fuente: Elaboración propia**

Materiales	Se' [Mpa]	Se [Mpa]	Modelo teórico			Elementos finitos	
			Sa [Mpa]	Sa' [Mpa]	n	Sa [Mpa]	n
Acero AISI 1018	205	150.27	73.80	73.80	2.0	30.56	4.9

El análisis de elementos finitos de la tuerca (Figura 39) estableció un esfuerzo máximo de 4.47 MPa, que se ubicó en el punto de unión entre el tornillo de potencia y la tuerca que mueve la corredera y eleva el sistema. Este resultado es mayor al esfuerzo hallado mediante análisis de fatiga, que se estableció en 2.06 MPa. Para ambos casos el factor de seguridad es mayor a 1 (Tabla 23).

El desarrollo del análisis de fatiga se encuentra en el Apéndice H. Las simulaciones realizadas para los elementos críticos se encuentran en el Apéndice J.



**Figura 39 Análisis de elementos finitos de tuerca de modulo z. Fuente: Elaboración propia**

**Tabla 23 Comparación de resultados teóricos y elementos finitos de tuerca en modulo z. Fuente: Elaboración propia**

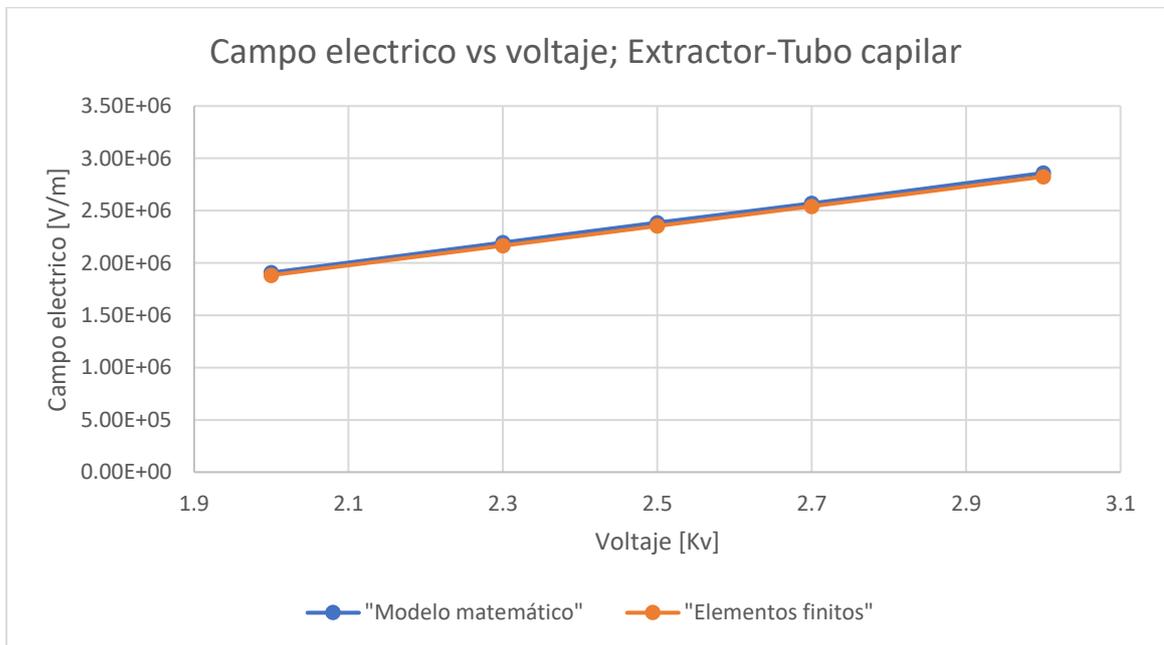
Materiales	Se' [Mpa]	Se [Mpa]	Modelo teórico			Elementos finitos	
			Sa [Mpa]	Sa' [Mpa]	n	Sa	n
Aluminio 6061	49.6	37.70	2.06	2.06	18.3	4.47	8.4
Aluminio 7071	91.2	69.31	2.06	2.06	33.6	4.47	15.5

**Tabla 24 Especificaciones de mesa z. Fuente: Elaboración propia**

Dimensiones	Plataforma de 200 x 200 [mm] Altura en posición cerrada 78 [mm] Altura en posición abierta 128 [mm]
Carga máxima	5 [kg]
Velocidad máxima	6 [mm/s]
Carrera de subida	50 [mm]
Pulsos totales	4000
Frecuencia requerida	4[Hz]
Torque máximo	124 [mNm]
Rpm de tornillo de potencia	1200 [RPM]

### 3.3 Dispensador

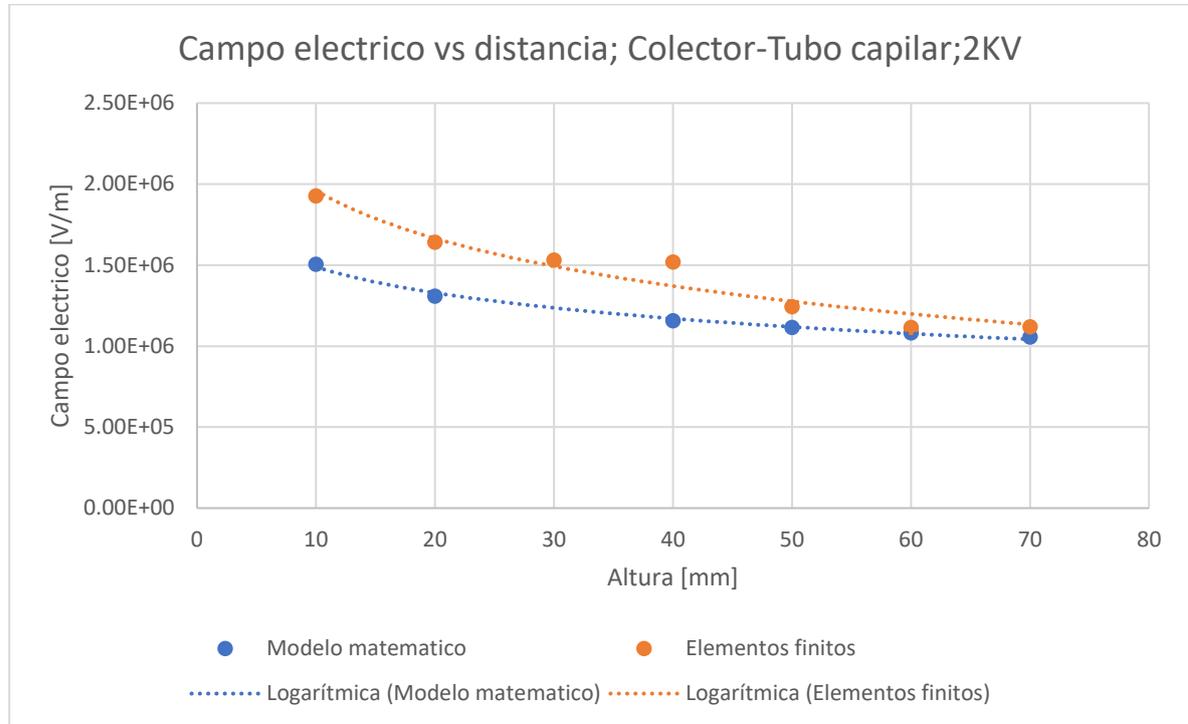
El campo eléctrico E1 entre el tubo capilar y el electrodo extractor, varió únicamente al modificar el voltaje (Figura 40), esto se debe a que el diseño del dispensador requiere que la distancia entre estos dos componentes sea constante.



**Figura 40 Campo eléctrico E1. Fuente: Elaboración propia**

El campo eléctrico E2 entre el tubo capilar y el electrodo colector varió fijando el voltaje y modificando la distancia entre ambos componentes (Figura 41). Esto permitió que el

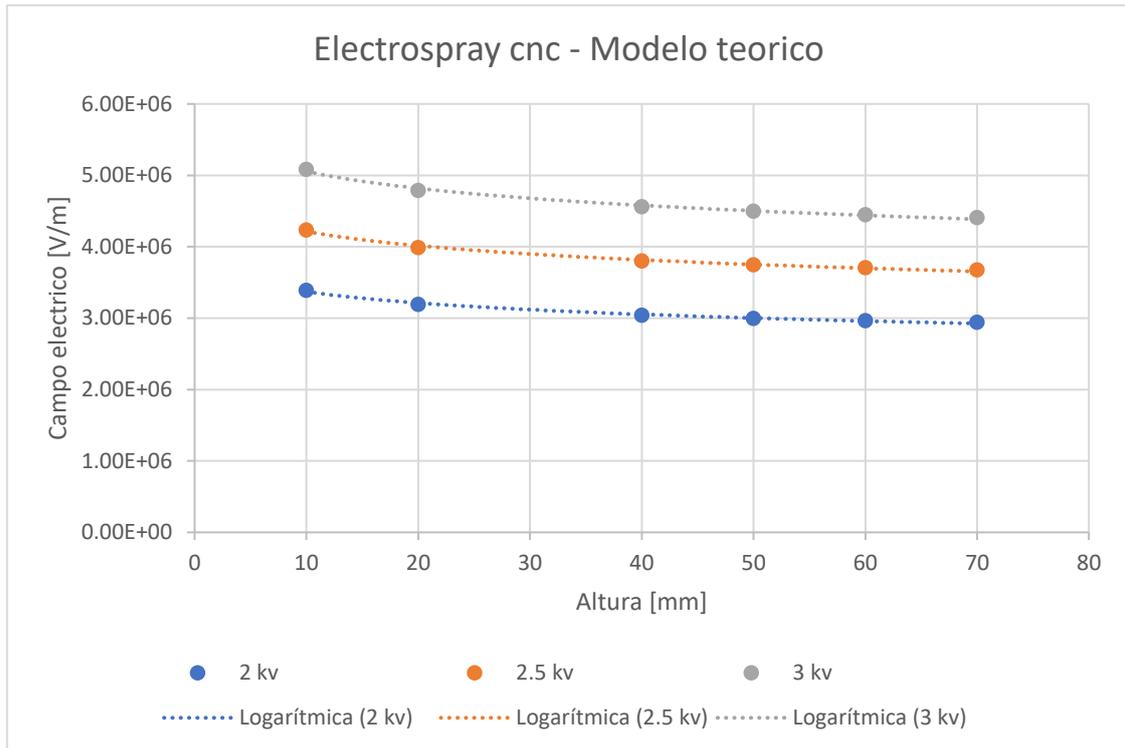
sistema de dispensador modifique el campo total únicamente variando la altura mediante el módulo z



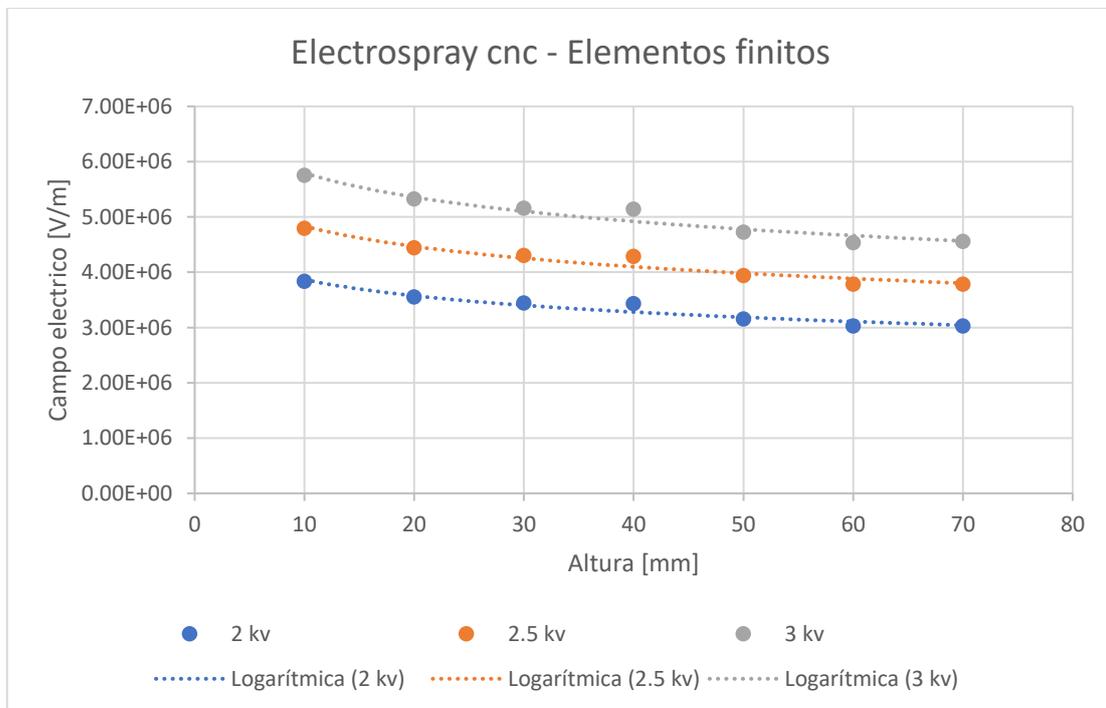
**Figura 41 Campo eléctrico E2. Fuente: Elaboración propia**

La suma del campo eléctrico E1 y E2 dio como resultado el campo eléctrico total del sistema dispensador a base de electro spray. El modelo matemático (Figura 42) y el modelo de elementos finitos (Figura 43) presentaron un comportamiento logarítmico al variar la altura entre el colector y el tubo capilar. La intensidad de campo tiene una relación inversamente proporcional con la distancia entre el módulo z y el tubo capilar. Mientras que la intensidad de campo tiene una relación directamente proporcional con el voltaje que suministro al sistema dispensador.

Un ejemplo de obtención de los presentes resultados mediante el modelo matemático se encuentra en el Apéndice K, las gráficas basadas en el modelo matemático se encuentran en el Apéndice L. Las simulaciones realizadas a diferentes alturas y voltajes se encuentran en el Apéndice M.

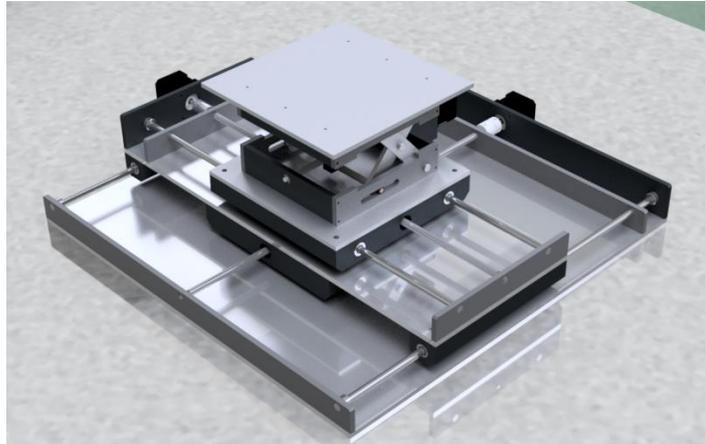


**Figura 42 Campo eléctrico total vs Altura H2 (Modelo teórico).** Fuente: Elaboración propia

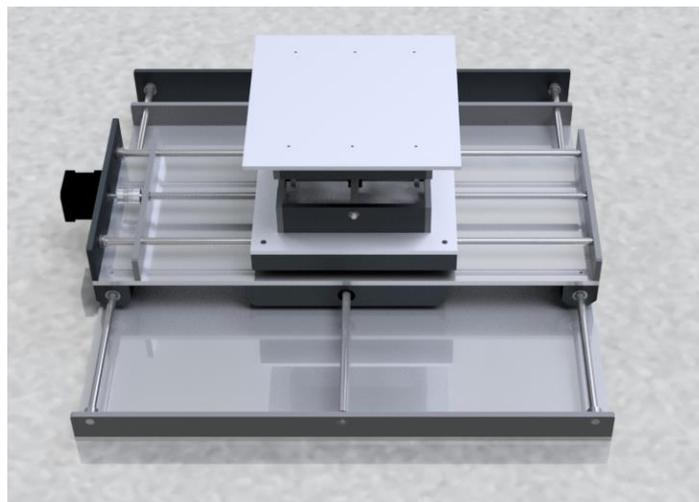


**Figura 43 Campo eléctrico total vs Altura H2 (Análisis de elementos finitos).** Fuente: Elaboración propia

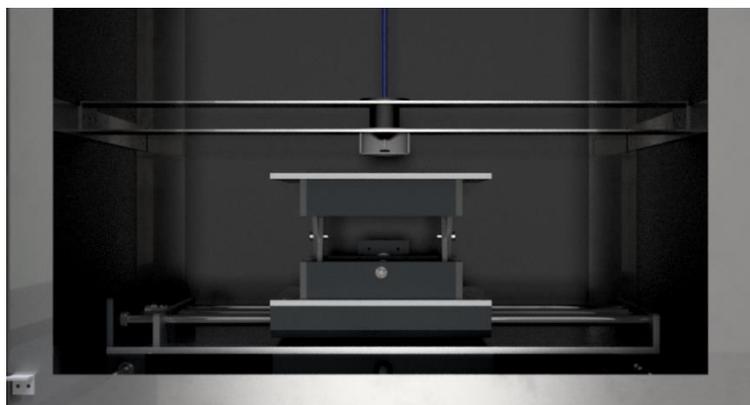
### 3.4 Dispensador de fluidos CNC



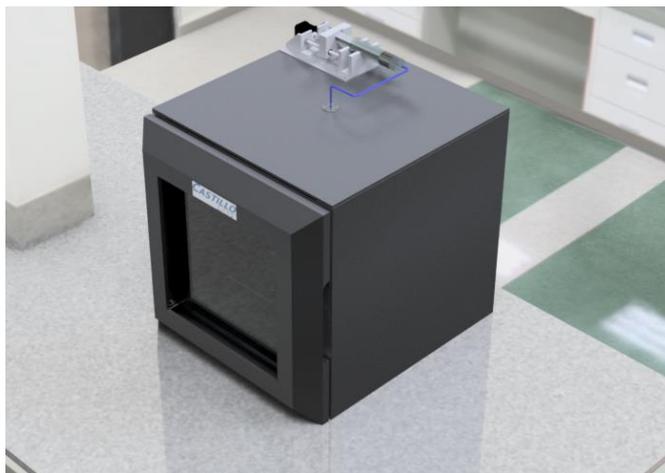
**Figura 44 Mesa xyz Fuente: Elaboración propia**



**Figura 45 Mesa xyz vista frontal superior Fuente: Elaboración propia**



**Figura 46 Mesa xyz y sistema dispensador. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 47 Dispensador de fluidos cnc. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 48 Dispensador de fluidos cnc con puerta abierta. Fuente: Elaboración propia**

### 3.5 Costos

El módulo XY (Tabla 25) obtuvo un mayor costo a diferencia del módulo z (Tabla 26), esto se debe a que posee una mayor robustez y precisión debido a que tiene la función de posicionar la tinta conductora a través del camino deseado en dos ejes. Mientras que el módulo z no requiere un continuo movimiento y una alta precisión.

**Tabla 25 Costos de modulo XY. Fuente: Elaboración propia**

Componentes diseñados	\$275.25
Componentes seleccionados	\$237.40
Manufactura %20	\$55.05
Total, mesa xy	\$567.70

**Tabla 26 Costos de modulo z. Fuente: Elaboración propia**

Componentes diseñados	\$38.79
Componentes seleccionados	\$15.90
Manufactura %20	\$7.76
Total, mesa z	\$62.45

Adicionalmente se analizó los valores para la estructura que soporta el sistema, el sistema de control, el sistema sinterizado, y el sistema de dispensación a base de electro spray (Tabla 27). El sistema electro spray es el más costoso en comparación a los demás sistemas. Esto se debe a que se utiliza una bomba que suministre un caudal muy pequeño a alta precisión y una fuente de alto voltaje que permita general el campo eléctrico requerido para la presente aplicación.

El costo total del dispensador de fluidos es aproximadamente \$2400.00. Este valor es menor a otros equipos que aportan una solución a la problemática planteada.

Un listado de costos más detallado de los diferentes sistemas y componentes del equipo se encuentra en la sección de anexos (Apéndice P).

**Tabla 27 Costo total del equipo. Fuente: Elaboración propia**

Modulo XY	\$567.70
Modulo Z	\$62.45
Caja	\$24.55
Sistema de control	\$179.00
Sistema de sinterizado	\$720.00
Sistema electro spray	\$920.00
Total	\$2 473.70

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Del análisis del tornillo de bolas (Tabla 20) se obtuvo una carga de trabajo muy inferior a la carga de trabajo del tornillo. Esto indica que éste tendrá una vida mucho mayor a 106 ciclos con una confiabilidad del 90%. A partir de los análisis por fatiga y elementos finitos del eje (Tabla 21) se determinó que este funcionará correctamente debido a los factores de seguridad obtenidos. El análisis teórico generó factores de seguridad menores, por lo que es más conservador que el análisis de elementos finitos.
- De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis cinemático (Figura 34) y dinámico (Figura 37) se diseñó el módulo Z del sistema con las dimensiones necesarias para la aplicación de dispensación de fluidos a base de electro spray.
- En el proceso de diseño de elementos críticos del módulo z, realizado mediante análisis de fatiga y elementos finitos, se obtuvieron factores de seguridad (Tabla 23) mayores a 1 lo que garantiza el correcto funcionamiento del sistema.
- El diseño modular del sistema desarrollado permite la adaptación de diferentes herramientas, tales como fresas, taladros, láseres y extrusores de plástico para impresión 3D, entre otras.
- El modelo matemático (Figura 42) y el análisis de elementos finitos (Figura 43) del campo eléctrico que generó la configuración entre el módulo z y el tubo capilar indican que el dispensador de fluidos diseñado permite variar la intensidad del campo, de acuerdo con la variación de la altura y del voltaje.
- A partir del análisis de elementos finitos, se identificó la necesidad de manipular la altura mediante el módulo z y fijar el voltaje en 2 kV para poder alcanzar el radio de gota requerida (entre 0.2 a 0.6 mm), que tiene lugar aproximadamente entre  $3 \times 10^6$  V/m y  $4 \times 10^6$  V/m (Tabla 17).

### 4.2 Recomendaciones

- Se analizó el control de intensidad de campo mediante el cambio de altura y la variación de voltaje. Sin embargo, la construcción de un prototipo para analizar el voltaje óptimo constante del sistema permitirá reducir los costos del equipo, ya que una fuente fija de voltaje tiene un menor costo en comparación a una fuente variable.

- En el presente trabajo se obtuvo un parámetro de frecuencia para seleccionar el PLC adecuado para el sistema. Un posible trabajo a futuro sería el diseño de un sistema de control para el presente equipo.

- Para el sistema de dispensación se seleccionó una bomba de jeringa que suministre el caudal adecuado para el sistema. Un posible trabajo adicional sería el diseño de un sistema de bombeo de fluidos adaptado para el presente equipo.

- El sistema modular de mesas está diseñado para la adaptación de otros sistemas adicionales; sin embargo, se requiere un análisis adicional de esfuerzos ya que las herramientas de mecanización generan fuerzas sobre la pieza a ser mecanizada.

- El presente equipo fue diseñado para adaptar un sistema de sinterizado láser ya desarrollado. Sin embargo, puede realizarse un análisis de otros mecanismos de sinterizado para el equipo.

# BIBLIOGRAFÍA

- Alastalo, A. T., Mattila, T., Allen, M. L., Aronniemi, M. J., Leppäniemi, J. H., Ojanperä, K. A., Suhonen, M. P., & Seppä, H. (2008). Rapid Electrical Sintering of Nanoparticle Structures. *MRS Proceedings*, 1113. <https://doi.org/10.1557/PROC-1113-F02-07>
- AutomationDirect. (2007). *Sistema de motores paso a paso SureStep™* (L. Miranda, Trad.). AutomationDirect. <https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/surestepmanualsp.pdf>
- Bo Cui (Ed.). (2011). *Recent Advances in Nanofabrication Techniques and Applications*. INTECH Open Access Publisher.
- Castillo-Orozco, E., Kar, A., & Kumar, R. (2020). Non-dimensional groups for electrospray modes of highly conductive and viscous nanoparticle suspensions. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61323-5>
- Castillo-Orozco, E., Kumar, R., & Kar, A. (2019). Laser electrospray printing of nanoparticles on flexible and rigid substrates. *Journal of Laser Applications*, 31(2), 022015. <https://doi.org/10.2351/1.5079733>
- Cloupeau, M., & Prunet-Foch, B. (1994). Electrohydrodynamic spraying functioning modes: A critical review. *Journal of Aerosol Science*, 25(6), 1021-1036. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(94\)90199-6](https://doi.org/10.1016/0021-8502(94)90199-6)
- Dipac Manta. (s. f.). *Catálogo de Acero*. Dipac Manta Cia. Ltda.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas*. Prentice-Hall Hispanoamericana.

- Jaworek, A., & Krupa, A. (1999). Jet and drops formation in electrohydrodynamic spraying of liquids. A systematic approach. *Experiments in Fluids*, 27(1), 43-52. <https://doi.org/10.1007/s003480050327>
- Jones, A. R., & Thong, K. C. (1971). The production of charged monodisperse fuel droplets by electrical dispersion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(8), 1159-1166. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/4/8/316>
- Khandpur, R. S. (2006). *Printed circuit boards: Design, fabrication, assembly and testing*. McGraw-Hill. <http://www.books24x7.com/marc.asp?bookid=15162>
- Kim, H.-S., Dhage, S. R., Shim, D.-E., & Hahn, H. T. (2009). Intense pulsed light sintering of copper nanoink for printed electronics. *Applied Physics A*, 97(4), 791-798. <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5360-6>
- NBK. (2017). *Acoplamiento de precisión*. NBK.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas Un enfoque integrado* (4ta ed.). Pearson.
- NTN-SNR. (2014). *NTN-SNR LINEAR MOTION: Rodamientos lineales de bolas*. NTN-SNR.
- Ordoñez, O., & Carmenza, D. (2015). *Validación del coeficiente de fricción dinámica mediante tres procedimientos para materiales de uso común en ingeniería*. <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/5740>
- Parker Hannifin Corporation (Ed.). (2007). *Electromechanical Actuator Products*. <https://www.parker.com/literature/Literature%20Files/emn/Catalogs-Brochures/Catalog%201894-2.pdf>
- Perelaer, J., Klokkenburg, M., Hendriks, C. E., & Schubert, U. S. (2009). Microwave Flash Sintering of Inkjet-Printed Silver Tracks on Polymer Substrates. *Advanced Materials*, 21(47), 4830-4834. <https://doi.org/10.1002/adma.200901081>

Schiffmacher, A., Litzenberger, L., Wilde, J., Polezhaev, V., & Huesgen, T. (2018). Power Electronic Assemblies on Printed Wiring Boards Mounted by Silver Sintering. *2018 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC)*, 1-6.  
<https://doi.org/10.1109/ESTC.2018.8546334>

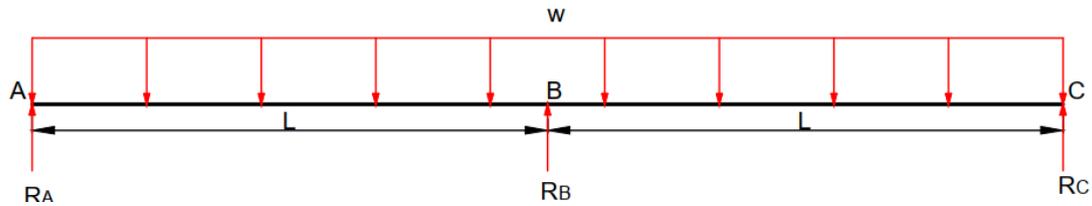
SKF (Ed.). (2013). *Precision rolled ball screws*.

SKF (Ed.). (2018). *Rolling bearings*.

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## ANÁLISIS ESTÁTICO DEL MÓDULO XY



### 1) Análisis estático

$$\begin{aligned}
 \text{CCW}_+ \sum M_B &= 0 \\
 -R_A * L + R_C * L &= 0 \\
 R_A &= R_C \\
 \uparrow_+ \sum F_Y &= 0 \\
 R_A + R_B + R_C - w(2L) &= 0
 \end{aligned}$$

### 2) Superposición

Desplazamiento considerando únicamente la carga distribuida

$$\delta_{b1} = \frac{-5wL^4}{24EI}$$

Desplazamiento considerando únicamente la reacción en B

$$\delta_{b2} = \frac{R_B L^3}{6EI}$$

La suma de desplazamientos en el apoyo debe ser cero

$$\begin{aligned}
 \delta_{b1} + \delta_{b2} &= 0 \\
 \frac{-5wL^4}{24EI} + \frac{R_B L^3}{6EI} &= 0 \\
 R_B &= \frac{5wL}{4}
 \end{aligned}$$

La reacción en B será la carga sobre el tornillo de potencia

Para las cargas sobre los ejes, sustituyendo con la reacción en B:

$$2R_A + \frac{5wL}{4} = w(2L)$$

$$R_A = R_C = \frac{3wL}{8}$$

Estos serán los valores de las reacciones. Reemplazando estas ecuaciones en función del peso total,  $W_x$ :

$$R_A = R_C = \frac{3W_x}{16}$$

$$R_B = \frac{5W_x}{8}$$

La carga crítica se dará sobre el tornillo de potencia

A partir de la ecuación 2.5, se determinó el peso total, tomando los pesos de los componentes de los modelos 3D, y asumiendo una carga de 5 kg.

$$W_x = W_y + W_z + W = 9.81(5.96 + 2.49 + 5)N = 131.9 N$$

Reemplazando este valor en las ecuaciones 2.12 y 2.13

$$R_A = R_C = \frac{3}{16}(131.9) = 24.7 N$$

$$R_B = \frac{5}{8}(131.9) = 82.5 N$$

## APÉNDICE B

### SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL MÓDULO XY

La precisión lineal del módulo viene dada por:

$$\frac{\theta}{2\pi} = \frac{x}{L}$$

Para un tornillo de bolas SKF SDBD 8x2.5R, con diámetro nominal  $d_0 = 8 \text{ mm}$  y  $p = 2.5 \text{ mm}$ :

$$x = 2.5 \text{ mm} \left( \frac{1.8^\circ}{360^\circ} \right) = 0.0125 \text{ mm}$$

La carga dinámica nominal de este tornillo es de 2.2 kN para un millón de revoluciones con un 90% de confiabilidad, mientras que la carga de trabajo calculada anteriormente fue de 78.3 N, por lo que el tornillo no fallará hasta mucho después del millón de revoluciones. Los tornillos de bolas SKF tienen cargas nominales desde 1 kN, por lo que cualquier tornillo seleccionado tendrá una capacidad mucho mayor que la requerida por la carga.

$$N = \frac{2200}{82.5} = 26$$

Se puede calcular la vida útil esperada a partir de la carga, en millones de revoluciones:

$$L_{10} = \left( \frac{C_a}{R_B} \right)^3 = \left( \frac{2200}{82.5} \right)^3 = 18\,963 \text{ millones de revoluciones}$$

La eficiencia de tornillos de bolas SKF según su catálogo viene dada por:

$$e = 0.9 \left[ \frac{1}{1 + 0.006 \left( \frac{\pi d_0}{p} \right)} \right] = 0.9 \left[ \frac{1}{1 + 0.006 \left( \frac{\pi(8)}{2.5} \right)} \right] = 0.85$$

Mientras que un factor de fricción típico en tornillos de bolas es de  $\mu = 0.003$ .

La carga resistiva en el tornillo de bolas, aplicando las ecuaciones 2.5 y 2.11:

$$T_{resist} = \frac{\mu R_B}{e} \left( \frac{p}{2\pi} \right) = \frac{0.003(82.5 \text{ N})}{0.85} \left( \frac{0.0025}{2\pi} \right) = 1.16 * 10^{-4} \text{ Nm}$$

Para el torque de aceleración, se consideran las inercias del tornillo y los componentes:

$$J_{total} = J_{tornillo} + J_{acople} + J_{motor} + J_{bloque}$$

Los datos de inercia del tornillo, el acople y el motor se obtuvieron de sus respectivos catálogos. En caso del bloque movido por el tornillo, se obtuvo del modelo 3D realizado. La inercia del tornillo de bolas con su tuerca se calcularon mediante el catálogo en función de la longitud del tornillo.

$$J_{tornillo} = 1.12 * 10^{-6} + (2.1 * 10^{-6})(0.465) = 2.1 * 10^{-6} \text{ kg m}^2$$

$$J_{total} = 2.1 * 10^{-6} + 0.33 * 10^{-6} + 6.8 * 10^{-6} + 10.7 * 10^{-6} = 19.93 * 10^{-6} \text{ kg m}^2$$

El torque de aceleración, con una aceleración de 0.2 m/s

$$T_{acel} = J_{total} * a \frac{2\pi}{p} = (19.93 * 10^{-6} \text{ kg m}^2) \left( 0.2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \frac{2\pi}{0.0025 \text{ m}} \right) = 1.00 * 10^{-2} \text{ Nm}$$

El torque total en el módulo XY:

$$T_{total} = T_{resist} + T_{acel} = 1.15 * 10^{-4} + 1.00 * 10^{-2} = 1.01 * 10^{-2} \text{ Nm}$$

Este torque permite validar la selección del motor. Para el funcionamiento se consideró una velocidad lineal de 25 mm/s, es decir, un recorrido completo en 16 segundos.

$$P = \frac{L}{p} * \theta = \frac{200 \text{ [mm]}}{2.5 \text{ [mm]}} * 200 \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}} \right] = 16 \text{ 000 [pulsos]}$$

$$P_{acel} + P_{desacel} = (f - f_0) * t_{acel} + (f - 0) * t_{desacel}$$

$$P = f * t_{acel} + f * t_{desacel} = f(t_{total})$$

$$f = \frac{P}{t_{total}} = \frac{16000 \text{ [pulsos]}}{4 \text{ [s]}} = 16 \text{ [KHz]}$$

$$\omega = \frac{f}{\theta} * \frac{60 \text{ [s]}}{1 \text{ [min]}} = \frac{16000 \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{s}} \right]}{200 \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}} \right]} * \frac{60 \text{ [s]}}{1 \text{ min}} = 300 \text{ [RPM]}$$

De las curvas de funcionamiento del motor (Figura 60), se tiene un torque mínimo de 0.25 Nm para una velocidad de 0 RPM, por lo que el factor de seguridad se determina como:

$$\eta = \frac{0.25}{0.0101} = 25$$

Por lo que el motor moverá la carga sin problemas.

## APÉNDICE C

### DISEÑO DE COMPONENTES CRÍTICOS DEL MÓDULO XY

Junto con el tornillo de potencia, los ejes son el otro elemento que debe soportar la carga del equipo. Aunque los ejes no sean rotativos, al moverse la carga a lo largo de estos, están sometidos a esfuerzos variables y por tanto se diseñaron mediante criterios de fatiga.

La resistencia a la fatiga se determina mediante los factores de corrección para fatiga. Para acero, el valor de la resistencia a la fatiga se estableció como:

$$S_{ut} = 410 \text{ MPa} \approx 60 \text{ kpsi}$$

$$Se' = 0.5 S_{ut} = 205 \text{ MPa}$$

El valor de resistencia a la fatiga,  $Se'$ , a su vez debe ser corregido mediante los factores pertinentes.

$$Se = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} Se'$$

$C_{carga} = 1$  debido a que la carga que soporta el eje es de flexión.

$C_{tamaño} = 1$  tal que  $d \leq 8 \text{ mm}$

$C_{superficie} = A(S_{ut})^b$   $A = 4.51$  ;  $b = -0.265$  para superficies maquinadas

$$C_{superficie} = 4.51(410)^{-0.265} = 0.9$$

$C_{temperatura} = 1$  para trabajo a temperatura ambiente

$C_{confiabilidad} = 0.814$  para confiabilidad de 99%

$$Se = 1 * 1 * 0.9 * 1 * 0.814 * Se' = 0.733 * 205 \text{ MPa} = 150.27 \text{ MPa}$$

Para determinar el esfuerzo crítico, se analizó el momento en el eje. Para un elemento simplemente apoyado (Figura 22), el momento máximo es:

$$M_{m\acute{a}x} = R_A \frac{L}{4}$$

Reemplazando el valor de  $R_A$  previamente calculado y una longitud de 400 mm, se tiene que:

$$M_{m\acute{a}x} = 24.4N \left( \frac{0.4m}{4} \right) = 2.44 \text{ Nm}$$

Mediante un análisis de flexión, considerando el diámetro del eje de 8 mm:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}c}{I} = \frac{32M}{\pi d^3} = \frac{32(2.35 \text{ Nm})}{\pi(0.008m)^3} = 48.54 \text{ MPa}$$

Con este esfuerzo, considerando la resistencia corregida se obtuvo un factor de seguridad a la fatiga de:

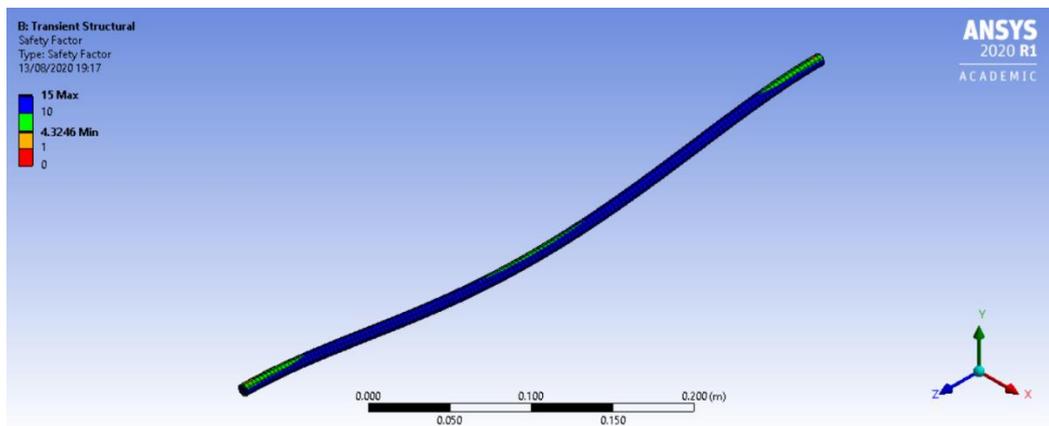
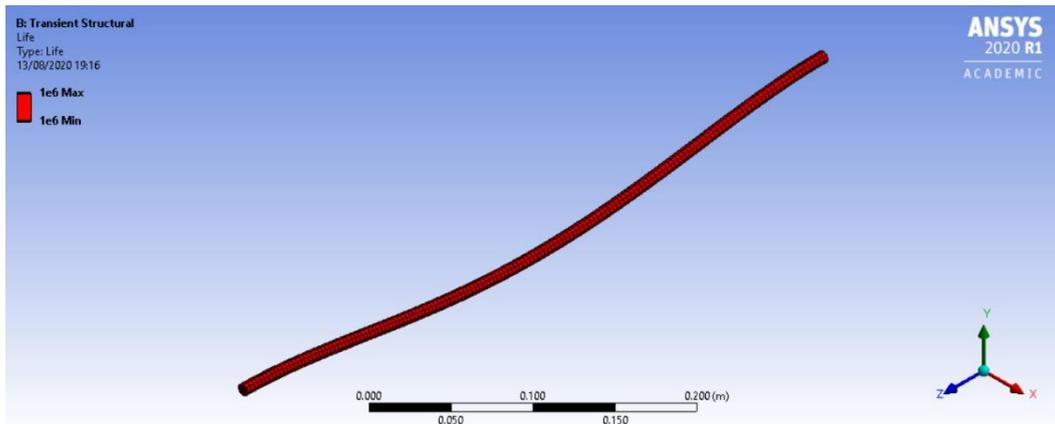
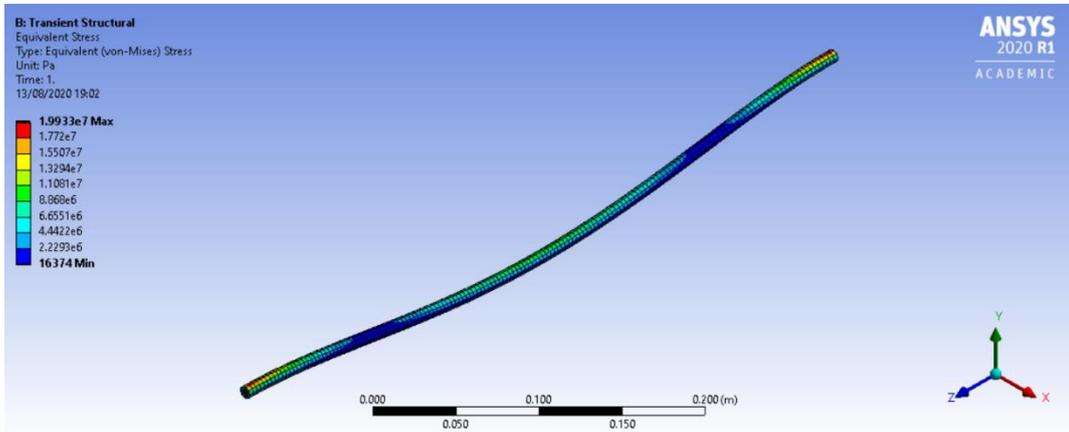
$$N = \frac{150.27}{48.54} = 3.1$$

Además, se calculó el esfuerzo mediante análisis de elementos finitos utilizando el software ANSYS (Figura 33). De esto, se obtuvieron los siguientes resultados.

Materiales	Se' [Mpa]	Se [Mpa]	Modelo teórico			Elementos finitos	
			Sa [Mpa]	Sa' [Mpa]	N	Sa [Mpa]	n
Acero AISI 1018	205	150.27	48.54	48.54	3.1	19.93	7.5

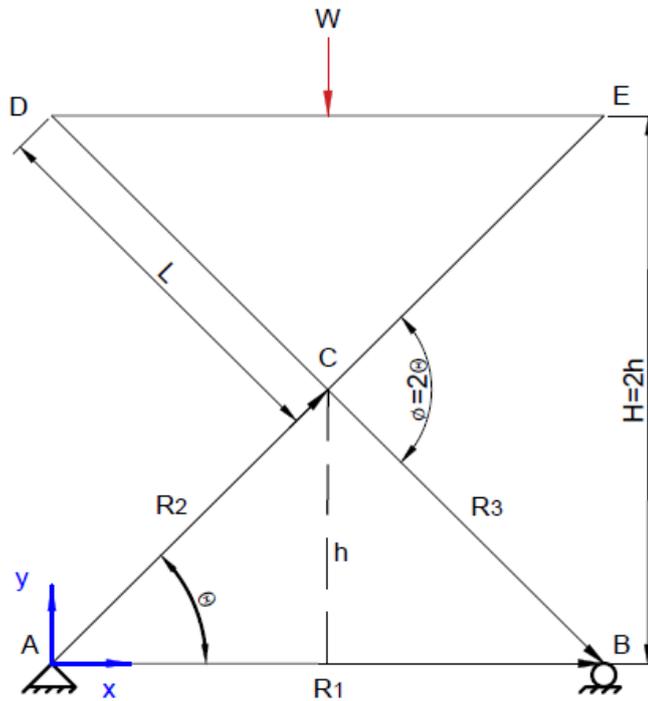
# APÉNDICE D

## ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS EN MODULO XY



## APÉNDICE E

### ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL MÓDULO Z



$$\vec{R}_2 + \vec{R}_3 - \vec{R}_1 = 0$$

$$\vec{R}_1 = \vec{R}_2 + \vec{R}_3$$

$$R_1 e^{j0^\circ} = R_2 e^{j\theta} + R_3 e^{-j\theta}$$

$$R_1 = R_2 [\cos(\theta) + j * \sin(\theta)] + R_3 [\cos(\theta) - j * \sin(\theta)]$$

**Parte real**

$$R_1 = R_2 \cos(\theta) + R_3 \cos(\theta) = [R_2 + R_3] * \cos(\theta)$$

Derivo y hallo la velocidad

$$\dot{R}_1 = -[R_2 + R_3] * \dot{\theta} \sin(\theta)$$

Derivo nuevamente y hallo la aceleración

$$\ddot{R}_1 = -[R_2 + R_3] * [\dot{\theta}^2 \cos(\theta) + \ddot{\theta} \sin(\theta)]$$

Si  $R_2 = R_3 = L$  obtengo finalmente **comportamiento del sistema en el eje x:**

$$x = 2L * \cos(\theta)$$

$$\dot{x} = -2L * \dot{\theta} \text{sen}(\theta)$$

$$\ddot{x} = -2L * \dot{\theta}^2 \text{cos}(\theta) - 2L * \ddot{\theta} \text{sen}(\theta)$$

**Análisis de movimiento en y**

$$y = R_2 * \text{sen}(\theta)$$

Derivo y hallo la velocidad

$$\dot{y} = R_2 * \dot{\theta} \text{cos}(\theta)$$

Derivo nuevamente y hallo la aceleración

$$\ddot{y} = -R_2 * \dot{\theta}^2 \text{sen}(\theta) + R_2 * \ddot{\theta} \text{cos}(\theta)$$

Si  $R_2 = L$  obtengo finalmente **comportamiento del sistema en el eje y:**

$$y = L * \text{sen}(\theta)$$

$$\dot{y} = L * \dot{\theta} * \text{cos}(\theta)$$

$$\ddot{y} = -L * \dot{\theta}^2 \text{sen}(\theta) + L * \ddot{\theta} \text{cos}(\theta)$$

Finalmente

$$\theta = \arcsen\left(\frac{y}{L}\right); 20 \leq y \leq 45$$

De la ecuación 2.14 y 2.18

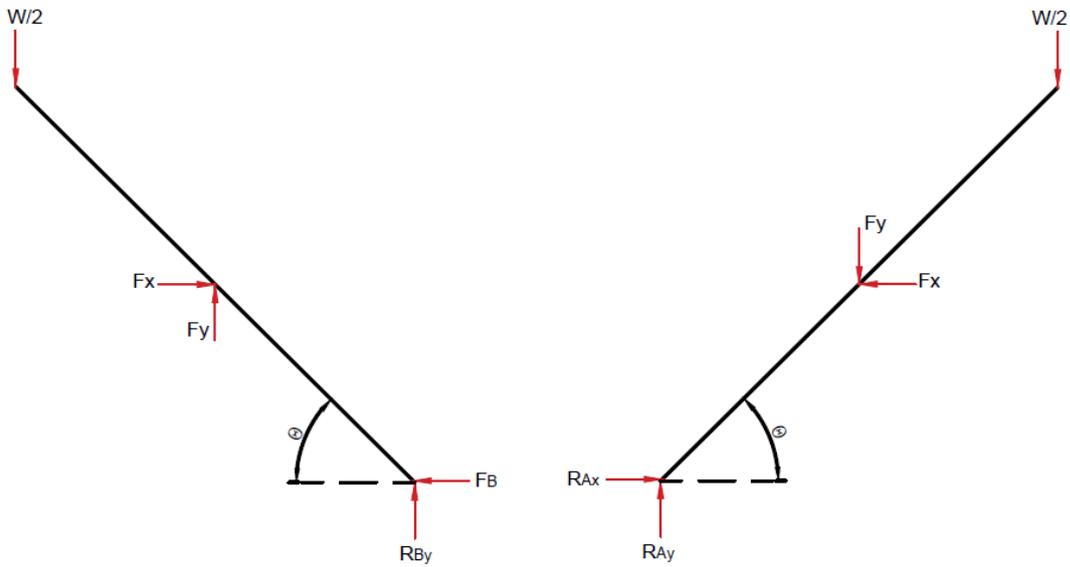
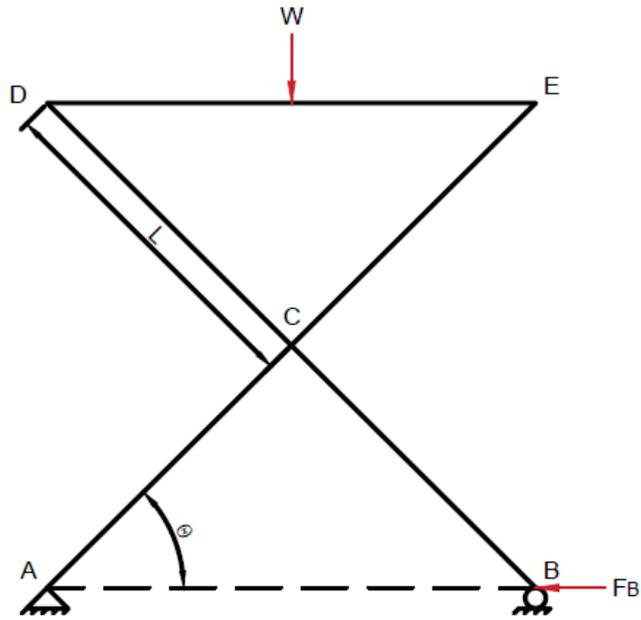
$$\frac{x}{y} = \frac{2L * \text{cos}(\theta)}{L * \text{sen}(\theta)}; x = \frac{2y}{\tan(\theta)}$$

De la ecuación 2.15 y 2.19

$$\frac{\dot{x}}{\dot{y}} = \frac{-2L * \dot{\theta} \text{sen}(\theta)}{L * \dot{\theta} * \text{cos}(\theta)}; \dot{x} = -\frac{2\dot{y}}{\tan(\theta)}$$

# APÉNDICE F

## ANÁLISIS DINÁMICO DEL MÓDULO Z



C) Elemento BD

D) Elemento AE

### Análisis de elemento BD

$$\text{counterclockwise}_+ \sum M_B = 0$$

$$1) \frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) - F_y * L * \cos(\theta) - F_x * L * \sin(\theta) = 0$$

$$\rightarrow_+ \sum F_x = 0$$

$$2) F_x - F_B = 0 \quad (23)$$

$$\wedge_+ \sum F_y = 0$$

$$3) -\frac{W}{2} + F_y + R_{By} = 0 \quad (3)$$

### Análisis de elemento AE

$$\text{counterclockwise}_+ \sum M_A = 0$$

$$4) -\frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) - F_y * L * \cos(\theta) + F_x * L * \sin(\theta) = 0 \quad (4)$$

$$\rightarrow_+ \sum F_x = 0$$

$$5) -F_x + R_{Ax} = 0 \quad (5)$$

$$\wedge_+ \sum F_y = 0$$

$$6) -\frac{W}{2} - F_y + R_{Ay} = 0 \quad (6)$$

6 ecuaciones con 6 incógnitas

De la ecuación 3

$$\frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) - F_y * L * \cos(\theta) - F_x * L * \sin(\theta) = 0$$

$$F_y = \frac{[WL * \cos(\theta) - F_x * L * \sin(\theta)]}{L * \cos(\theta)}$$

$$F_y = W - F_x * \tan(\theta) \quad (7)$$

De la ecuación 4

$$-\frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) - F_y * L * \cos(\theta) + F_x * L * \sin(\theta) = 0$$

$$F_x = \frac{\left[ \frac{W}{2} * 2L * \cos(\theta) + F_y * L * \cos(\theta) \right]}{L * \sin(\theta)} =$$

$$F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} + \frac{F_y}{\tan(\theta)} \quad (8)$$

Sustituyo la ecuación 7 en la ecuación 8

$$F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} + \frac{1}{\tan(\theta)} [W - F_x * \tan(\theta)] = \frac{2W}{\tan(\theta)} - F_x$$

$$F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} \quad (9)$$

Sustituyo este resultado en la ecuación 2 y 5

$$F_B = R_{Ax} = \frac{W}{\tan(\theta)}$$

$$F_y = W - \frac{W}{\tan(\theta)} * \tan(\theta) = 0$$

De la ecuación 3 y 6

$$-\frac{W}{2} + F_y + R_{By} = 0$$

$$R_{By} = \frac{W}{2}$$

$$-\frac{W}{2} - F_y + R_{Ay} = 0$$

$$R_{Ay} = \frac{W}{2}$$

Resultados

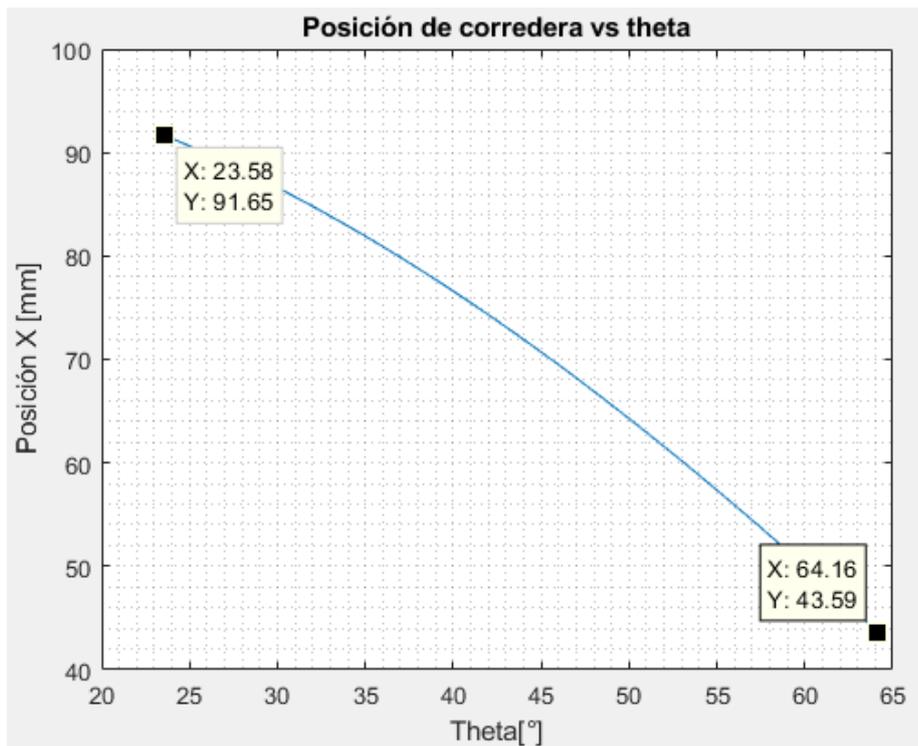
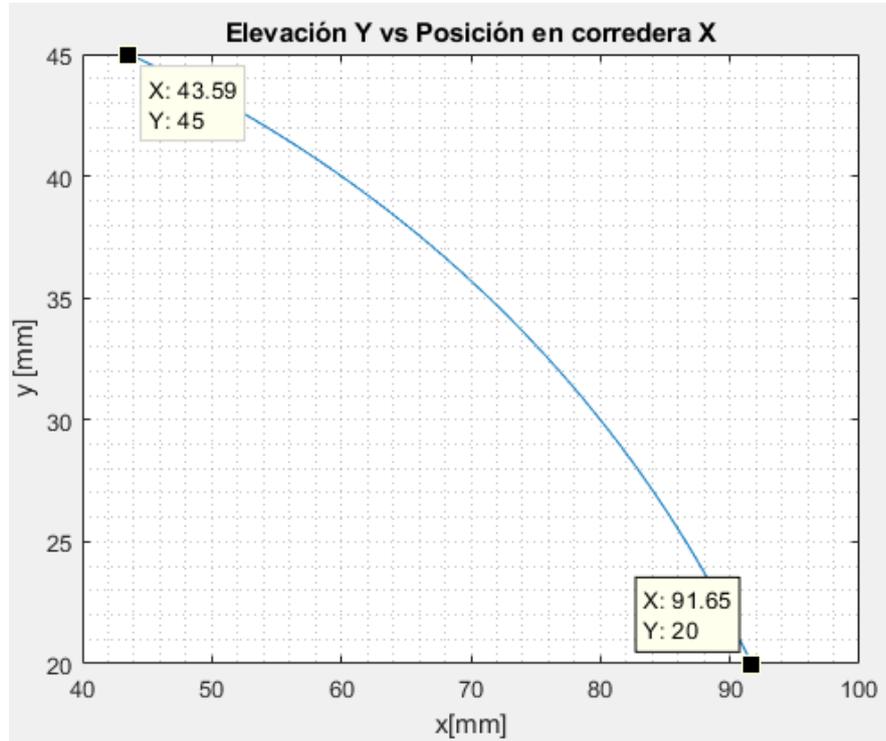
$$F_x = F_B = R_{Ax} = \frac{W}{\tan(\theta)}$$

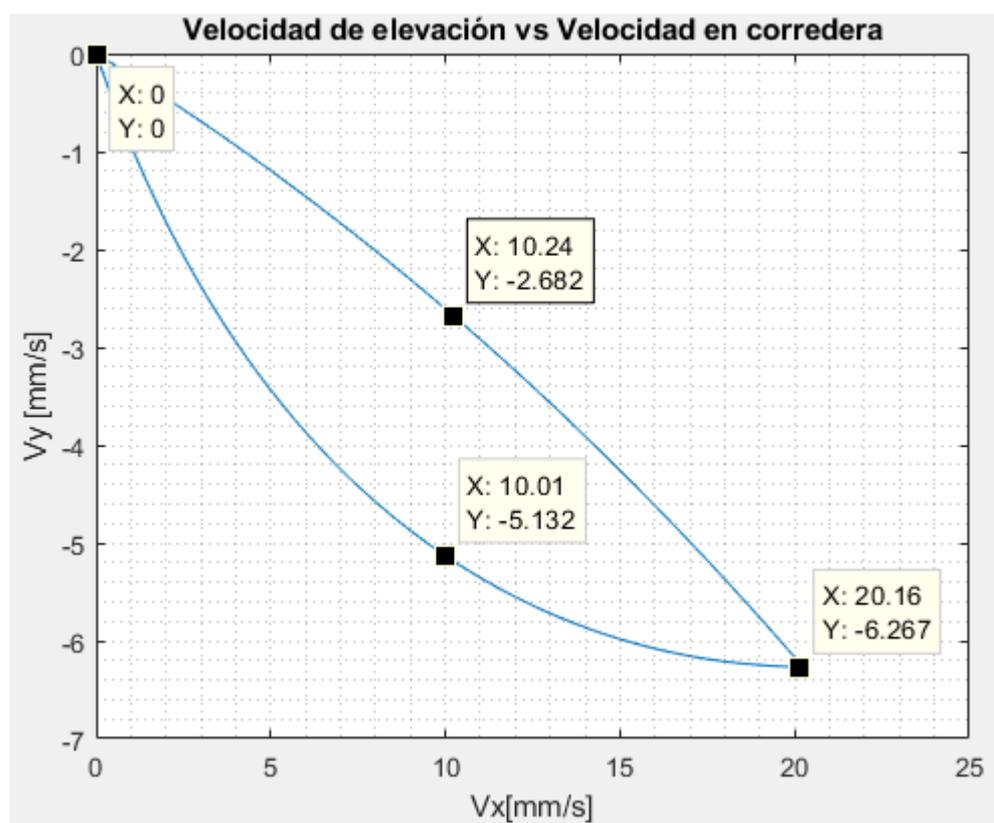
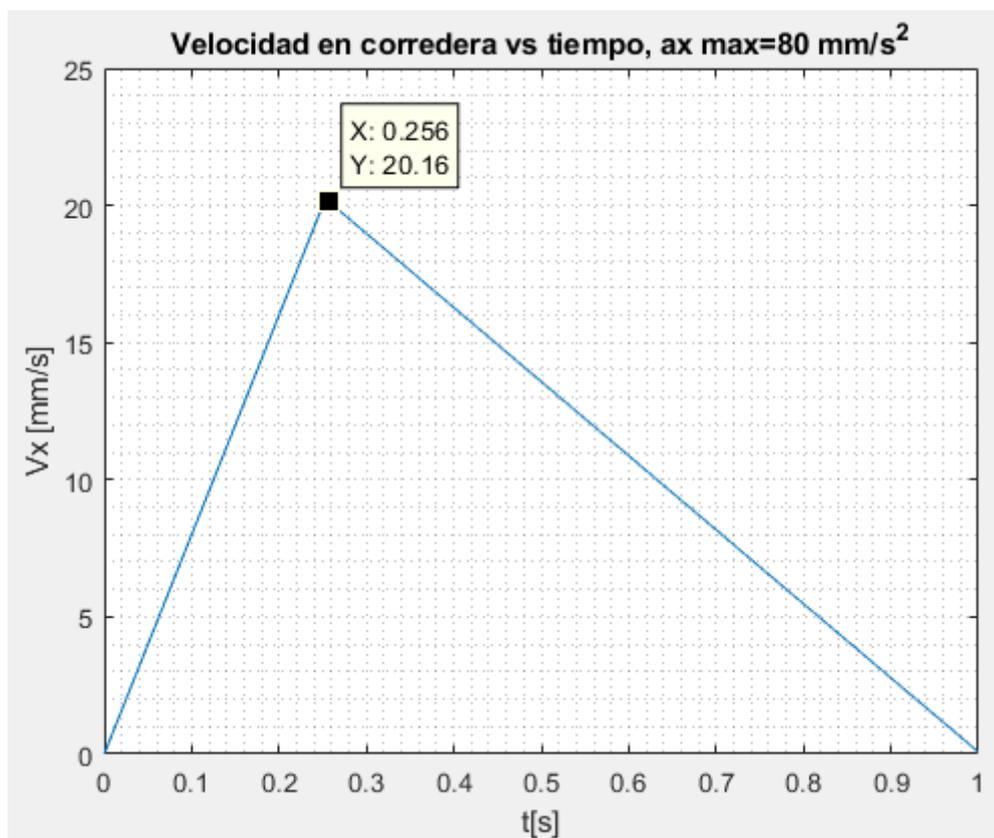
$$F_y = 0$$

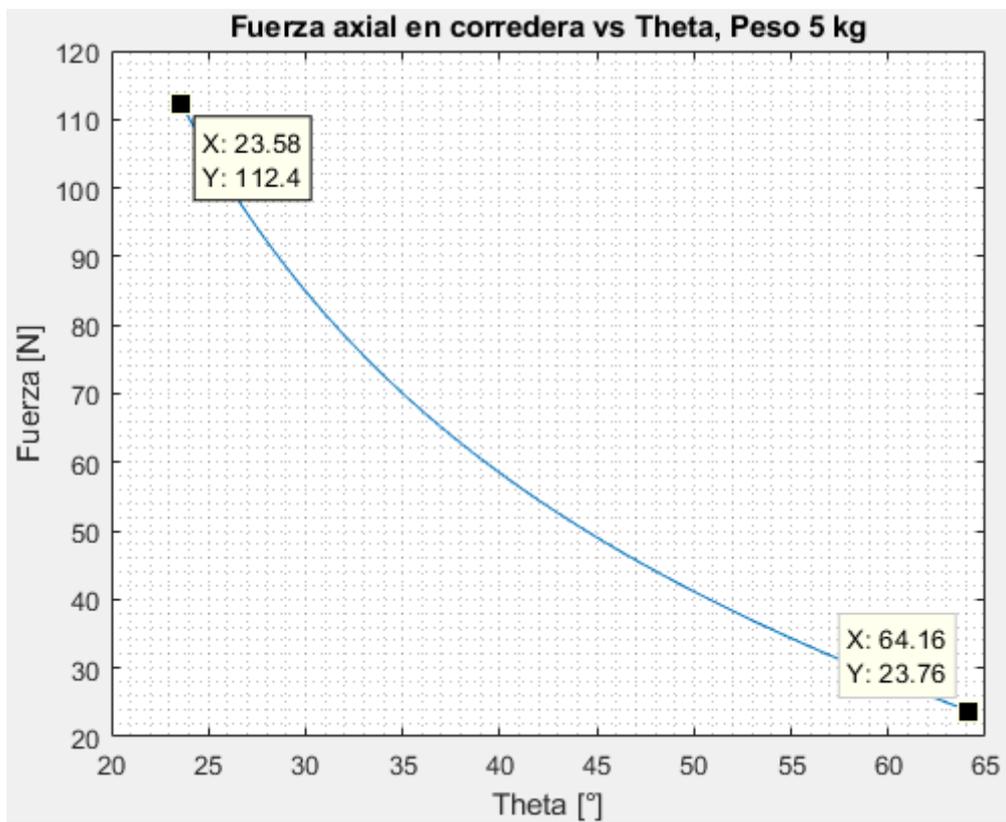
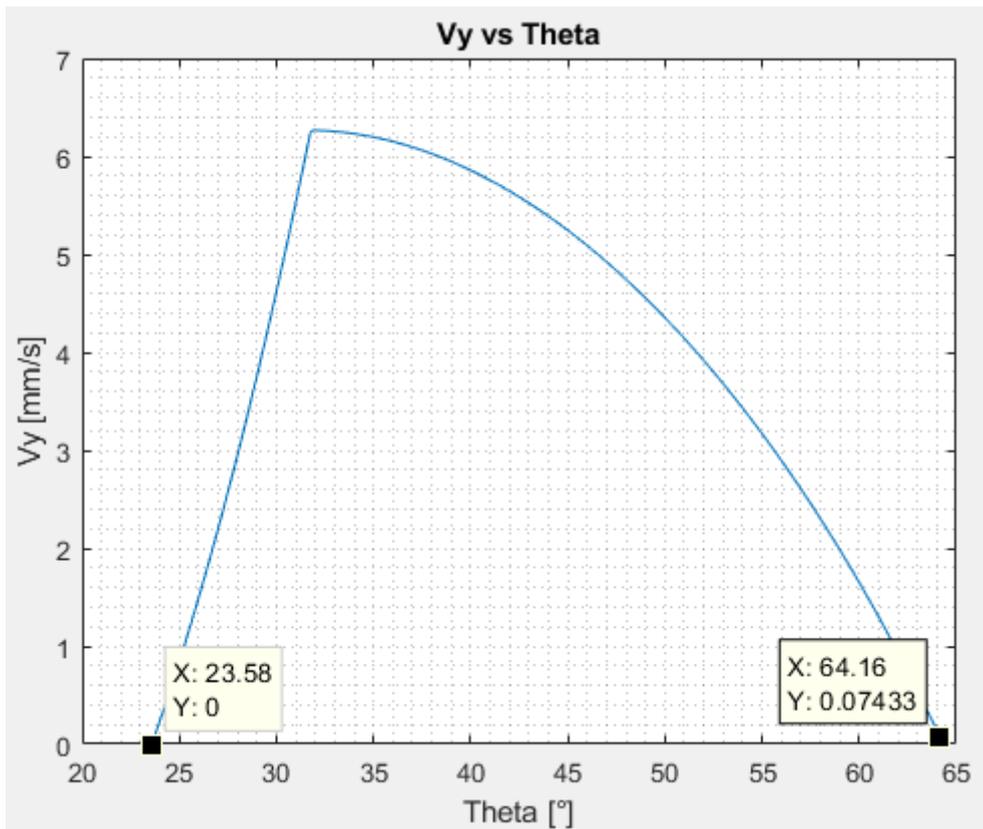
$$R_{By} = R_{Ay} = \frac{W}{2}$$

## APÉNDICE G

### GRÁFICAS DE POSICIÓN, VELOCIDAD, ACELERACIÓN Y FUERZA EN MÓDULO Z







## APÉNDICE H

### DISEÑO DE ELEMENTOS CRÍTICOS DEL MÓDULO Z

Si la carga sobre la plataforma z es igual a 5 kg y el ángulo crítico es 23.58° (véase Figura 37)

$$F_x = \frac{W}{\tan(\theta)} = \frac{5 * 9.81}{\tan(23.58^\circ)} = 112.4 [N]$$

$$R_{By} = \frac{W}{2} = \frac{5 * 9.81}{2} = 24.5$$

#### Elementos críticos en modulo z

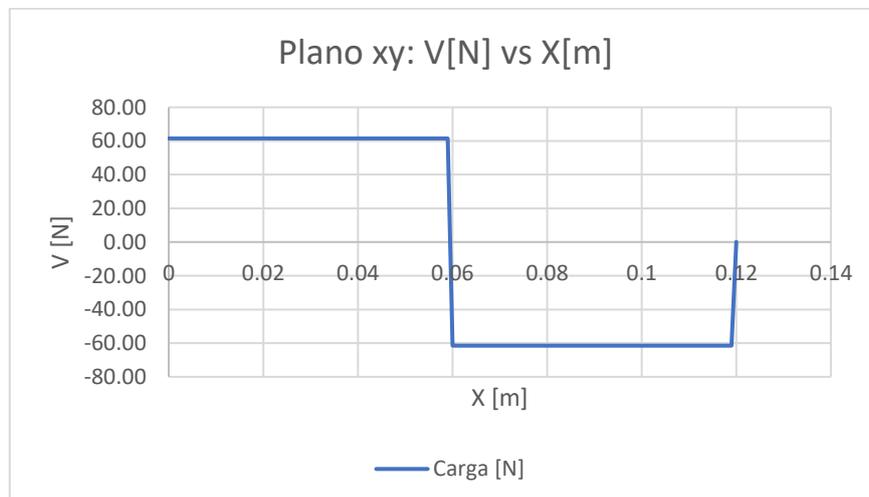
$$F_{total,z} = F_x + \mu * R_{By} = F_x + \mu * \frac{W}{2}$$

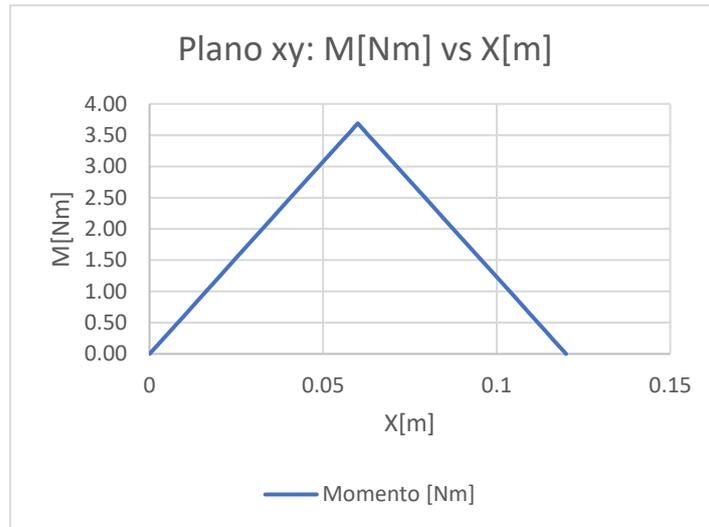
De la Tabla 15:  $\mu = 0.43$

$$F_{total,z} = 112.4[N] + 0.43 * 25.4[N] = 123[N]$$

#### Análisis de eje transversal – Esfuerzo flector invertido

x[m]	V[N]	M[Nm]
0	61.50	0.00
0.06	61.50	3.69
0.12	0.00	0.00





$$S_{ut} = 410 \text{ MPa} \approx 60 \text{ kpsi}$$

$$S_e' = 0.5 S_{ut} = 205 \text{ MPa}$$

$$S_e = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} S_e'$$

$C_{carga} = 1$  debido a que la carga que soporta el eje es cortante

$C_{tamaño} = 1$  tal que  $d \leq 8 \text{ mm}$

$C_{superficie} = A(S_{ut})^b$   $A = 4.51$  ;  $b = -0.265$  para superficies maquinadas

$$C_{superficie} = 4.51(410)^{-0.265} = 0.9$$

$C_{temperatura} = 1$  para trabajo a temperatura ambiente

$C_{confiabilidad} = 0.814$  para confiabilidad de 99%

$$S_e = 1 * 1 * 0.9 * 1 * 0.814 * S_e' = 0.733 * 205 \text{ MPa} = 150.27 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{Mc}{I}$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4} = \frac{\pi * (4 * 10^{-3})^4}{4} = 2 * 10^{-10} \text{ m}^4$$

$$\sigma_a = \frac{3.69 * 4 * 10^{-3}}{2 * 10^{-10}} = 73.8 \text{ Mpa}$$

$$n = \frac{S_e}{\sigma_a} = \frac{150.3}{73.8} = 2$$

Materiales	Modelo teórico					Elementos finitos	
	Se' [Mpa]	Se [Mpa]	Sa [Mpa]	Sa' [Mpa]	n	Sa [Mpa]	n
Acero AISI 1018	205	150.27	73.80	73.80	2.0	30.56	4.9

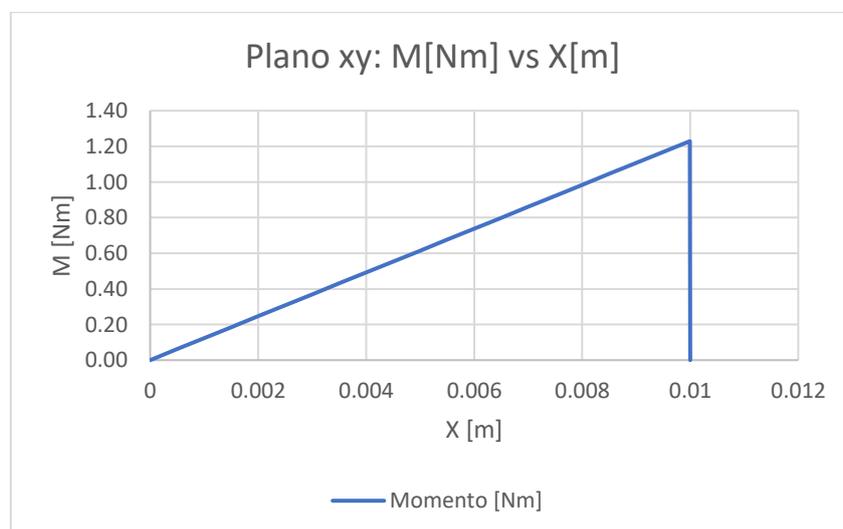
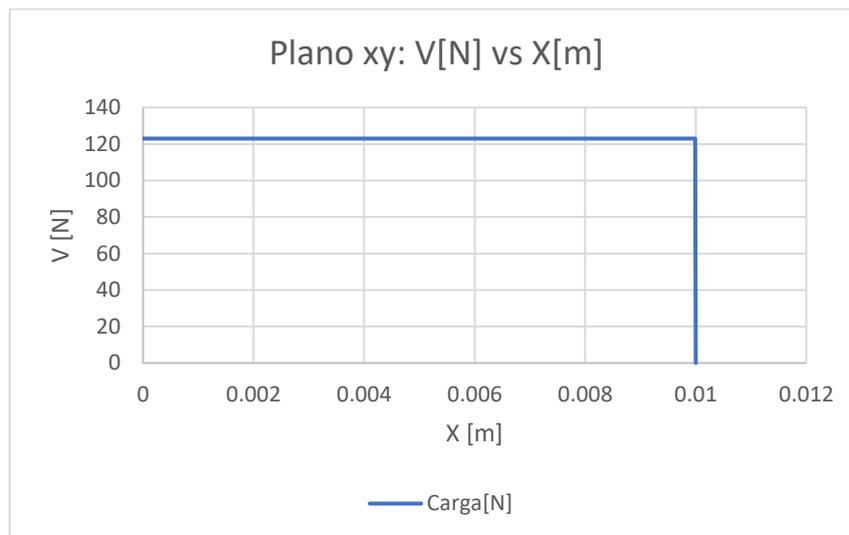
## Análisis de tuerca - Esfuerzo flector invertido

$$\sum M = 0$$

$$M - F_a * l = 0$$

$$M_{\max} = F_a * l_{\max} = 123 * 0.01 = 1.23 \text{ Nm}$$

x[m]	V[N]	M[Nm]
0	123.00	0
0.0025	123.00	0.31
0.005	123.00	0.62
0.0075	123.00	0.92
0.01	123.00	1.23



$$\sigma_a = \frac{Mc}{I}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{14 * 16^3}{12} = 4.78 * 10^{-9} m^4$$

$$\sigma_a = \frac{1.23 * 8 * 10^{-3}}{4.78 * 10^{-9}} = 2.06 \text{ Mpa}$$

$C_{carga} = 1$  debido a que la carga es de flexión

$$A_{95} = 0.05 * 16 * 14 * 10^{-6} [m^2] = 1.12 * 10^{-5} [m^2]$$

$$d_{equiv} = \sqrt{\frac{1.12 * 10^{-5}}{0.0766}} = 0.012 \text{ m} = 12 \text{ mm}$$

$$C_{tamaño} = 1.189 * d^{-0.097} = 1.189(12)^{-0.097} = 0.934$$

$C_{superficie} = A(S_{ut})^b$   $A = 4.51$  ;  $b = -0.265$  para superficies maquinadas

$$C_{superficie} = 4.51(124)^{-0.265} = 1.3, \text{ se usa } C_{superficie} = 1 \text{ para 6061}$$

$$C_{superficie} = 4.51(228)^{-0.265} = 1 \text{ para 7071}$$

$C_{temperatura} = 1$  para trabajo a temperatura ambiente

$C_{confiabilidad} = 0.814$  para confiabilidad de 99%

$$Se = C_{carga} C_{tamaño} C_{superficie} C_{temperatura} C_{confiabilidad} Se'$$

$$Se' = 0.4 * S_{ut} \text{ para aluminio}$$

$$Se = 1 * 0.934 * 1 * 1 * 0.814 * Se' = 0.76 * Se'$$

Materiales	Se' [Mpa]	Se [Mpa]	Modelo teorico			Elementos finitos	
			Sa [Mpa]	Sa' [Mpa]	n	Sa [Mpa]	n
Aluminio 6061	49.6	37.70	2.06	2.06	18.3	4.47	8.4
Aluminio 7071	91.2	69.31	2.06	2.06	33.6	4.47	15.5

## APÉNDICE I

### SELECCIÓN DE COMPONENTES DEL MÓDULO Z

Paso angular de 1.8°, paso de tornillo 2.5 mm, Referencia: Catalogo de motor y catalogo SKF

$$\frac{\theta}{360^\circ} = \frac{x}{np}$$
$$x = \frac{np * \theta}{360^\circ} = \frac{2.5 * 1.8}{360} = 0.0125 \text{ mm}$$

Eficiencia e entre tuerca metálica y tornillo de potencia: 0.4, referencia: Catalogo de motor

$$T_{resist} = \frac{F_{total}}{e} \left( \frac{np}{2\pi} \right) = \frac{123}{0.4} * \frac{2.5 * 10^{-3}}{2\pi} = 0.122 [Nm]$$

Las inercias del acople y el motor se encuentran en sus respectivos catálogos, la inercia del tornillo puede hallarse conociendo sus dimensiones y masa con la siguiente relación:

$$J_{tornillo} = \frac{1}{2} mr^2 = \frac{1}{2} * 0.058 (8 * 10^{-3})^2 = 1.856 * 10^{-6} kg * m^2$$

$$J_{total} = J_{tornillo} + J_{acople} + J_{motor} + J_{tuerca}$$

$$J_{total} = 1.856 * 10^{-6} k + 3.3 * 10^{-7} + 68 * 10^{-7} + 1,039 * 10^{-6}$$

$$J_{total} = 10.03 * 10^{-6} kg * m^2$$

$$T_{acel} = J_{total} * a \frac{2\pi}{p} = 10.03 * 10^{-6} [kgm^2] * 0.08 \left[ \frac{m}{s^2} \right] * \left( \frac{2\pi}{2.5 * 10^{-3} [m]} \right) = 2 * 10^{-3} [Nm]$$

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} = 0.122 + 0.002 [Nm] = 124 * 10^{-3} [Nm] = 124 mNm$$

Un paso angular de 1.8° equivale a 200 pulsos/rev

$$P = \frac{L}{p} * \theta = \frac{50 [mm]}{2.5 [mm]} * 200 \left[ \frac{pulsos}{rev} \right] = 4000 [pulsos]$$

$$P_{acel} + P_{desacel} = (f - f_0) * t_{acel} + (f - 0) * t_{desacel}$$

$$P = f * t_{acel} + f * t_{desacel} = f(t_{total})$$

$$f = \frac{P}{t_{total}} = \frac{4000[\text{pulsos}]}{1 [\text{s}]} = 4 [\text{KHz}]$$

$$\omega = \frac{f}{\theta} * \frac{60 [\text{s}]}{1 [\text{min}]} = \frac{4000 \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{s}} \right]}{200 \left[ \frac{\text{pulsos}}{\text{rev}} \right]} * \frac{60 [\text{s}]}{1 \text{ min}} = 1200 [\text{RPM}]$$

El punto de operación sería (1200 RPM, 124 mNm). De acuerdo con las curvas de fabricante (Figura 60), el motor Nema 17 está en capacidad de suministrar el torque requerido. Con un factor de seguridad aproximado de:

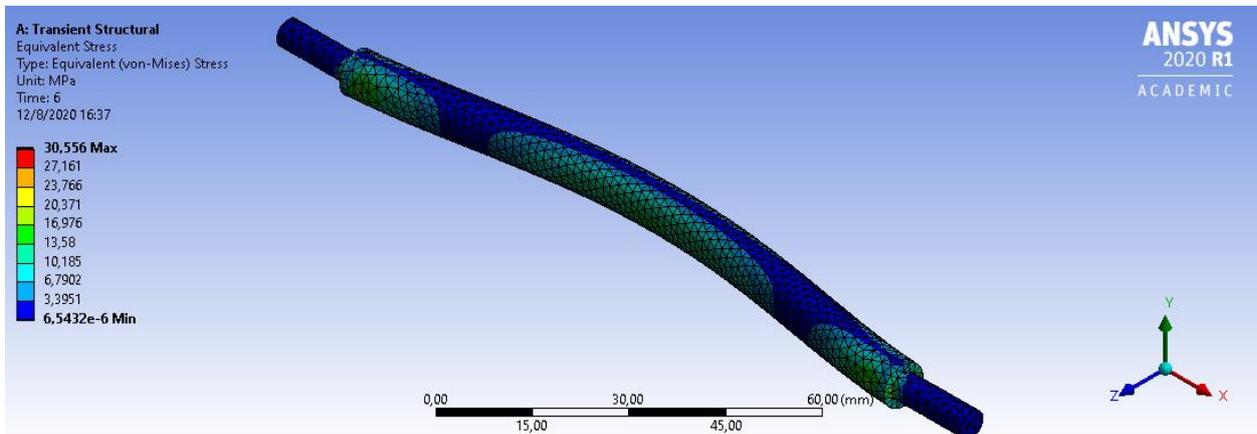
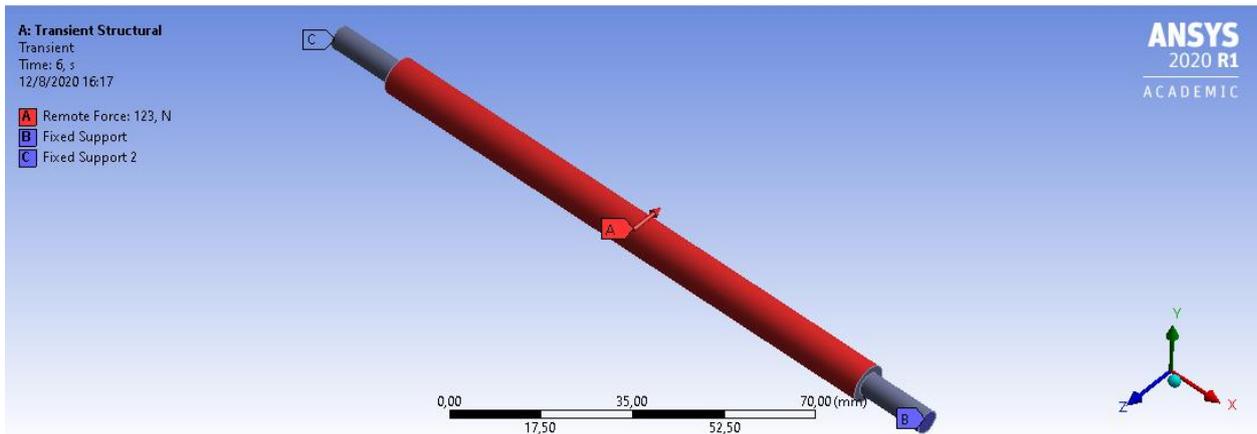
$$n = \frac{190\text{mNm}}{124\text{mNm}} = 1.5$$

# APÉNDICE J

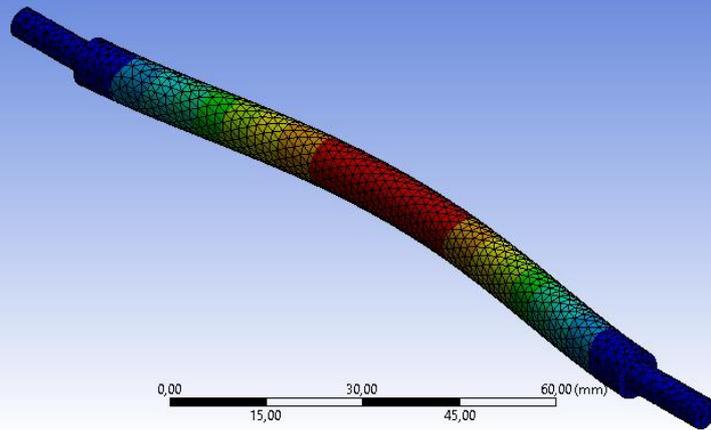
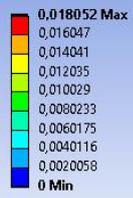
## ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS EN MÓDULO Z

\*\*\*\*\* ROUTINE COMPLETED \*\*\*\*\* CP = 0.438

--- Number of total nodes = 14089  
--- Number of contact elements = 2702  
--- Number of spring elements = 0  
--- Number of bearing elements = 0  
--- Number of solid elements = 8012  
--- Number of condensed parts = 0  
--- Number of total elements = 10715

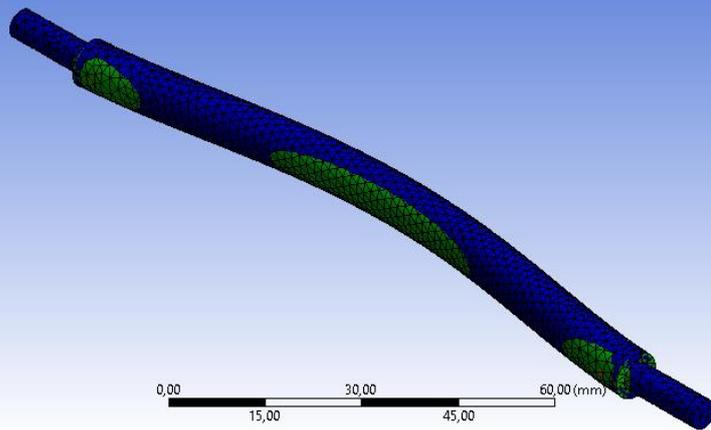


A: Transient Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 6  
12/8/2020 16:37



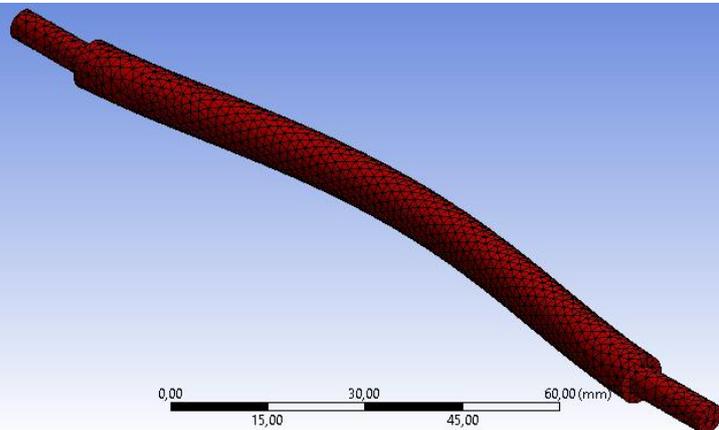
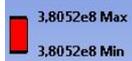
ANSYS  
2020 R1  
ACADEMIC

A: Transient Structural  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
12/8/2020 16:33



ANSYS  
2020 R1  
ACADEMIC

A: Transient Structural  
Life  
Type: Life  
12/8/2020 16:34

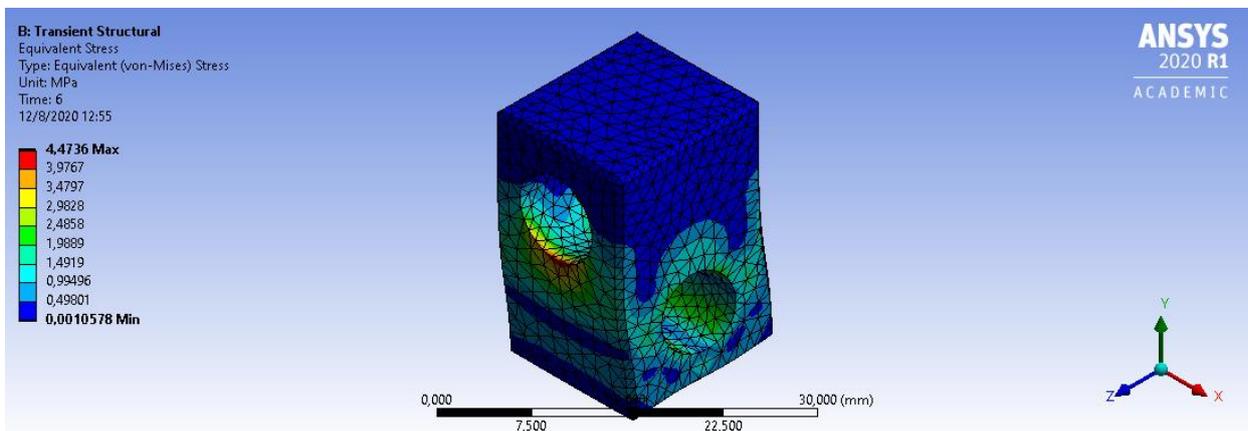
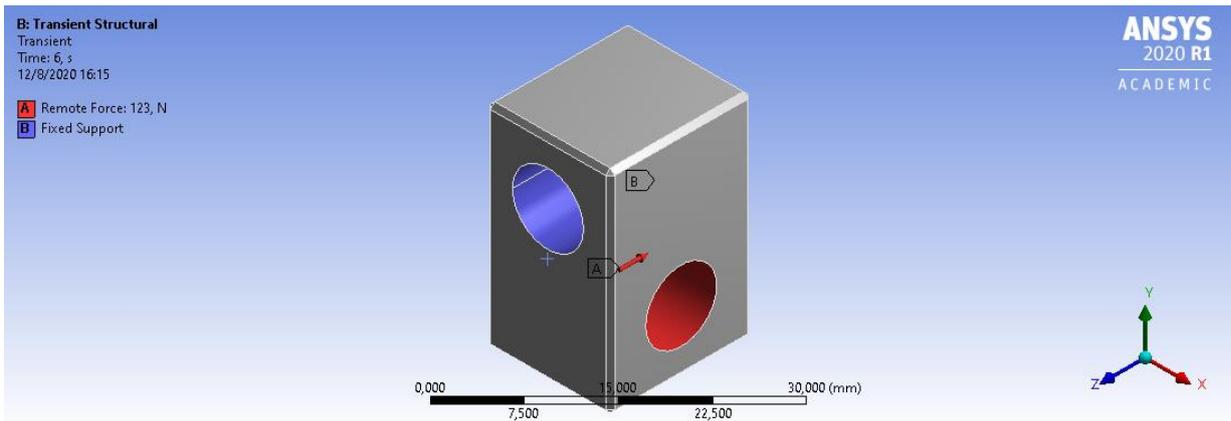


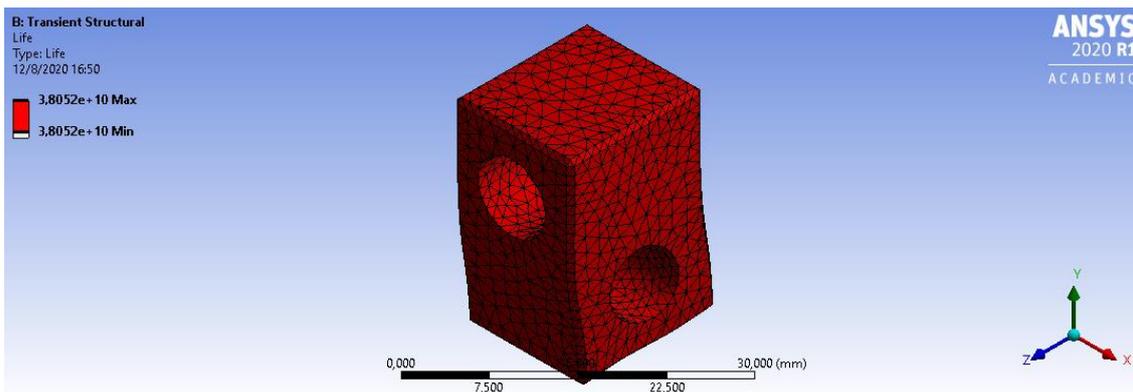
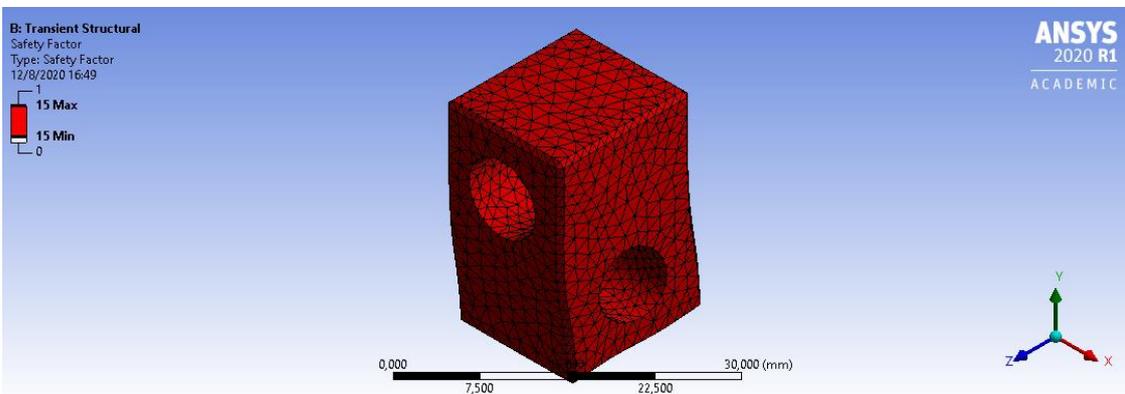
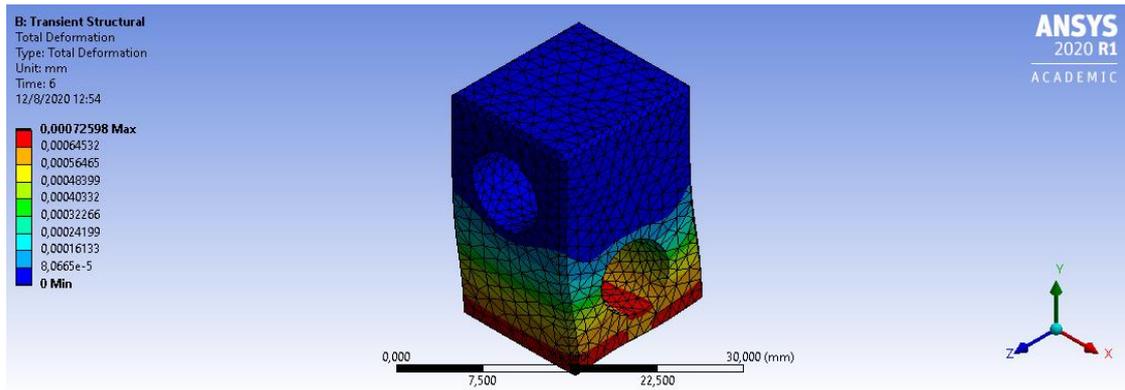
ANSYS  
2020 R1  
ACADEMIC

Materiales	Esfuerzo Von misses [Mpa]	Deformación total [mm]	Factor de seguridad
Acero AISI 1018	30.56	0.018052	2.8

\*\*\*\*\* ROUTINE COMPLETED \*\*\*\*\* CP = 0.438

--- Number of total nodes = 17235  
 --- Number of contact elements = 680  
 --- Number of spring elements = 0  
 --- Number of bearing elements = 0  
 --- Number of solid elements = 10213  
 --- Number of condensed parts = 0  
 --- Number of total elements = 10894





Materiales	Esfuerzo Von misses [Mpa]	Deformación total [mm]	Factor de seguridad
Aleación de aluminio	4.47	0.00072598	15

## APÉNDICE K

### DISEÑO DE DISPENSADOR

#### Campo eléctrico

Parámetro	Dimensión [mm]
$R_i$	0.255 mm
$R_0$	0.41 mm
$H_1$	4 mm
$H_2$	74 mm

#### Extractor electrode - Cooper disk

Diametro interior [mm]	4.5
Diametro exterior [mm]	38
Grosor [mm]	0.5

Para un voltaje de 2000[V]

$$E = E_1 + E_2$$

$$E = \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0 \ln\left(\frac{4H_1}{R_0}\right)} + \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0 \ln\left(\frac{4H_2}{R_0}\right)} = \frac{\sqrt{2}\phi}{R_0} \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{4H_1}{R_0}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{4H_2}{R_0}\right)} \right)$$

$$E = \frac{\sqrt{2} * 2000V}{0.41 * 10^{-3}} \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{4 * 4}{0.41}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{4 * 74}{0.41}\right)} \right) = 2.93 * 10^6 [V/m]$$

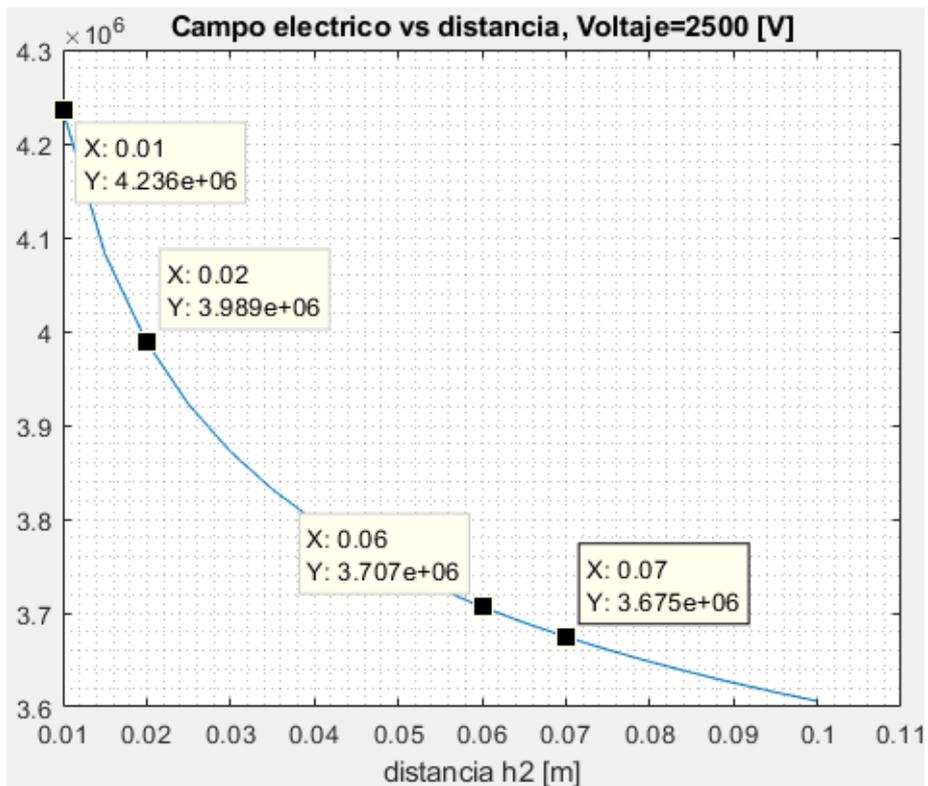
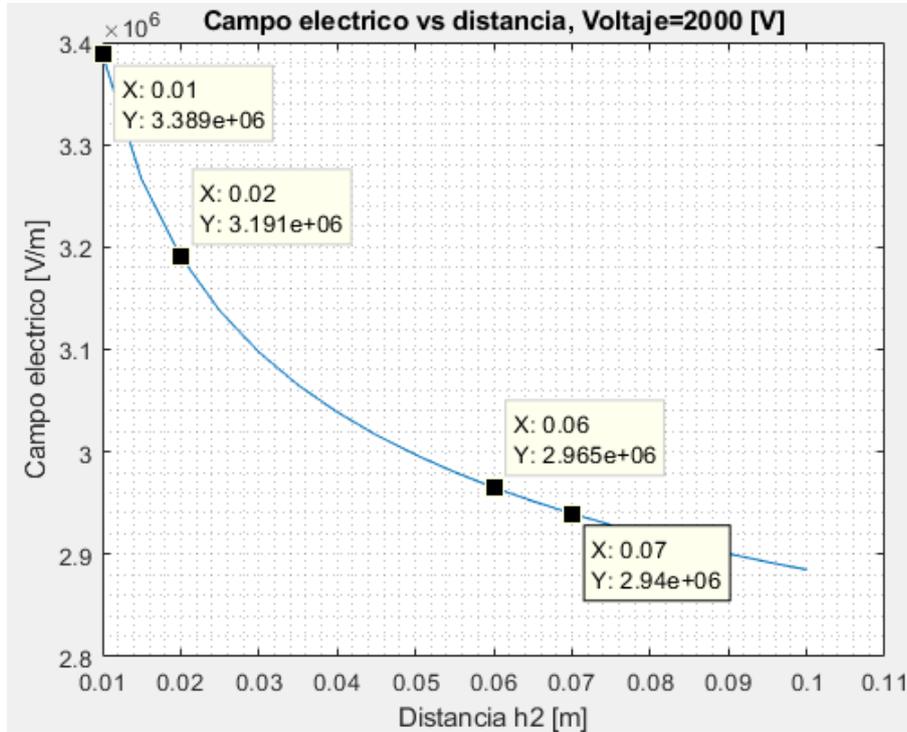
Tal que

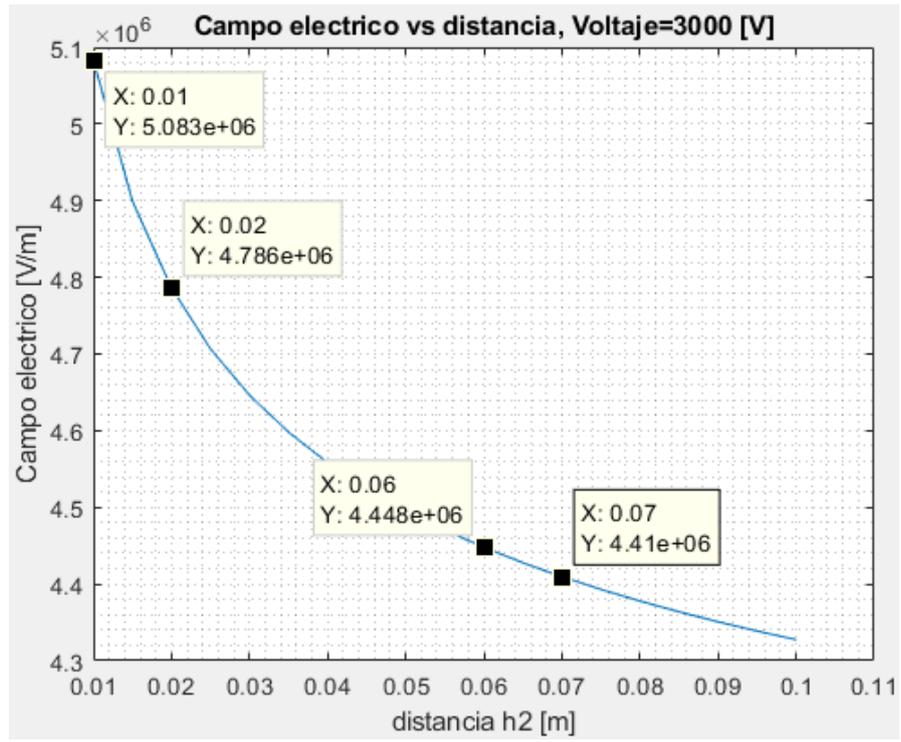
$$E_1 = 1.88 * 10^6 \left[ \frac{V}{m} \right]$$

$$E_2 = 1.05 * 10^6 \left[ \frac{V}{m} \right]$$

## APÉNDICE L

### GRÁFICAS DE CAMPO ELÉCTRICO – MODELO TEÓRICO

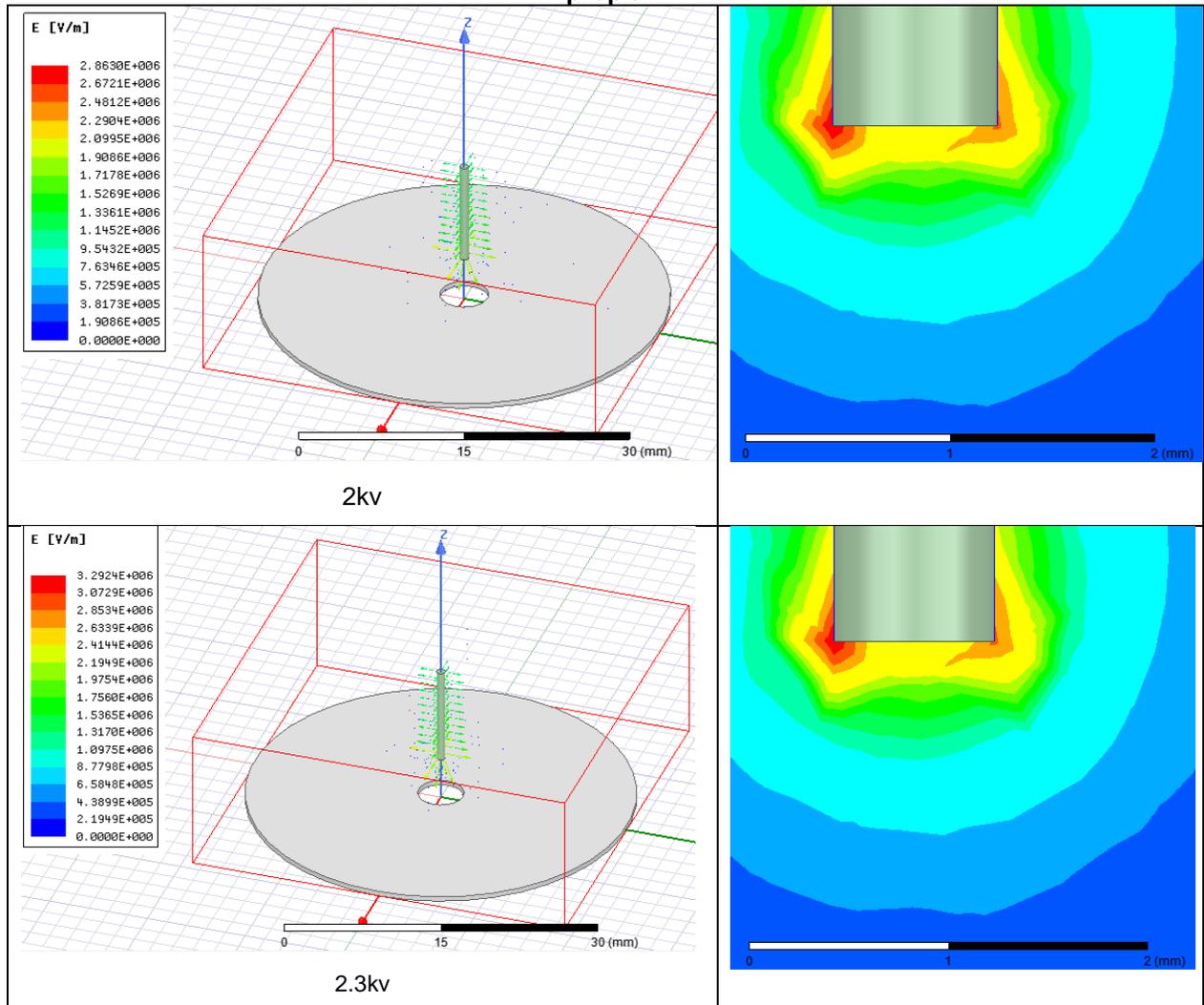


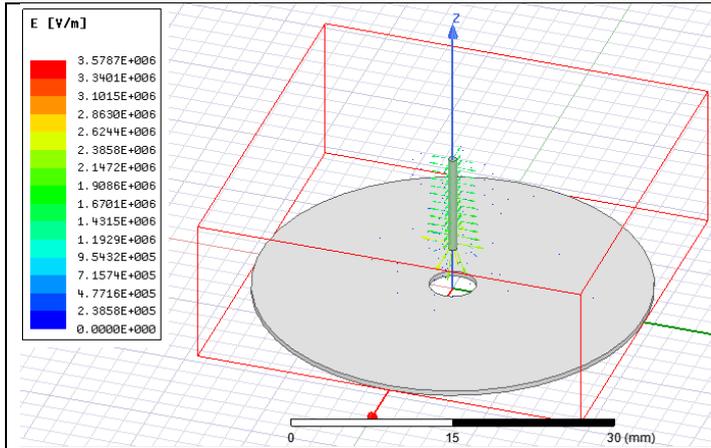


# APÉNDICE M

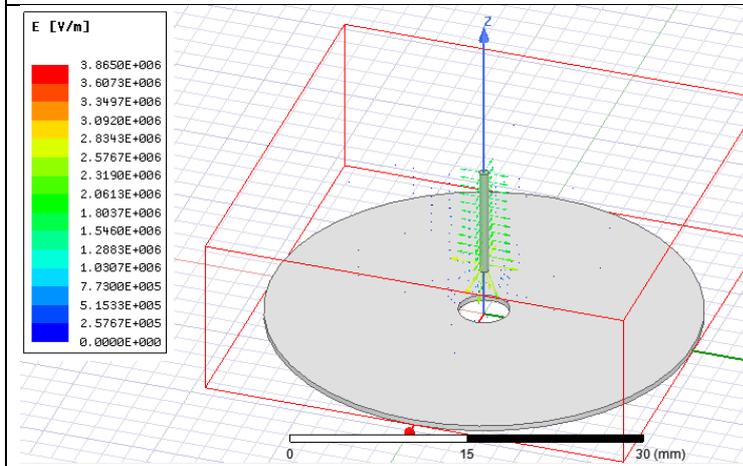
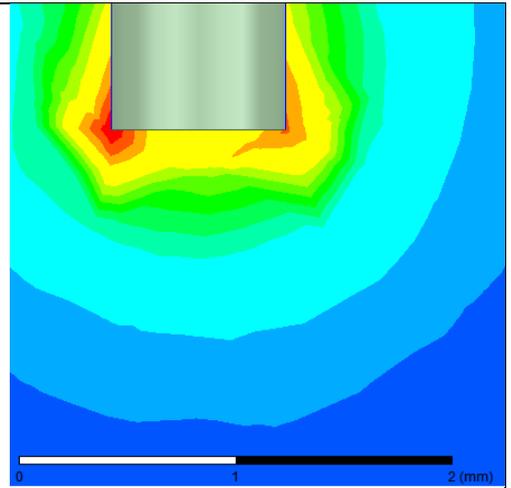
## ANÁLISIS DE CAMPO ELÉCTRICO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Tabla 28 Campo eléctrico E1 entre tubo capilar y electrodo extractor. Fuente: Elaboración propia

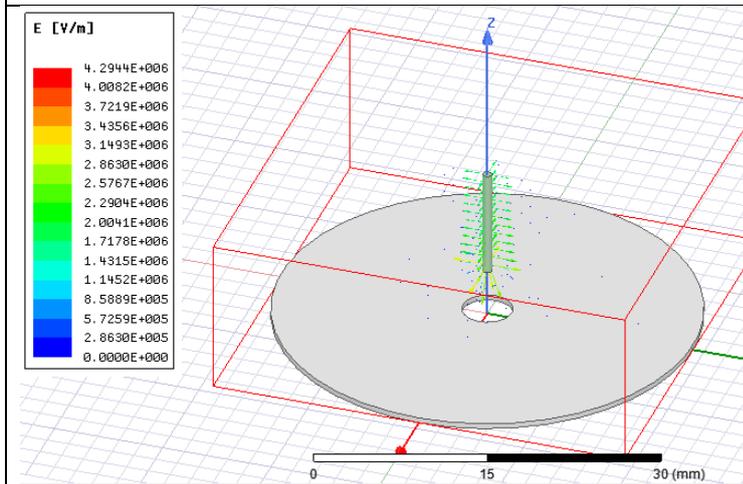
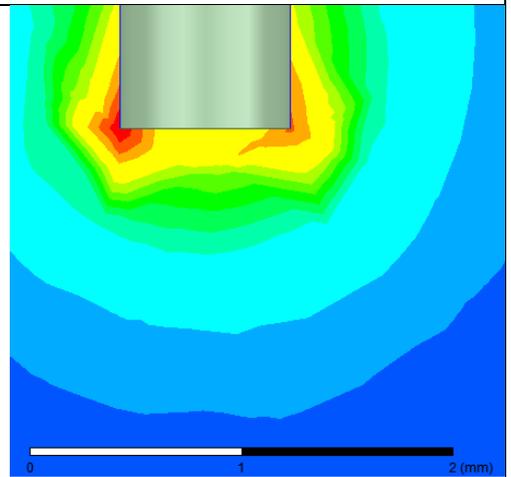




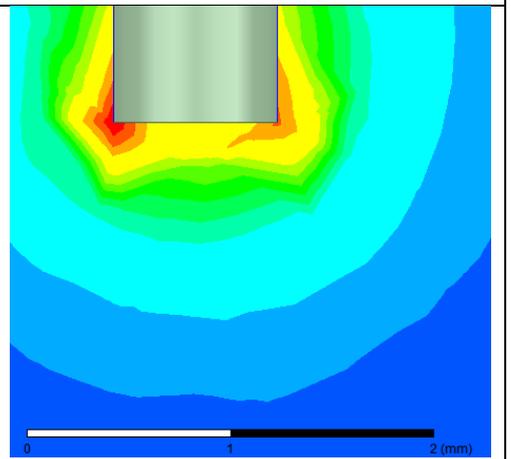
2.5KV

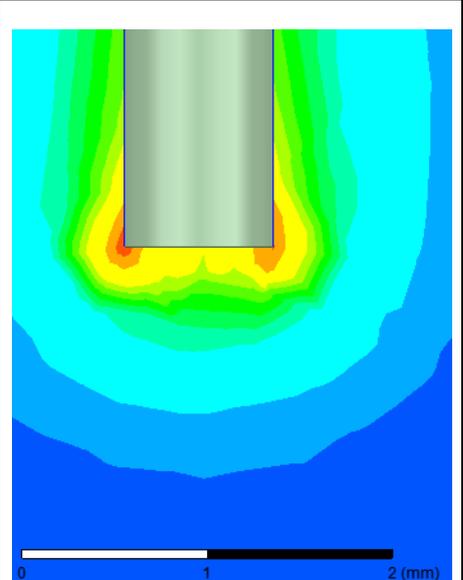
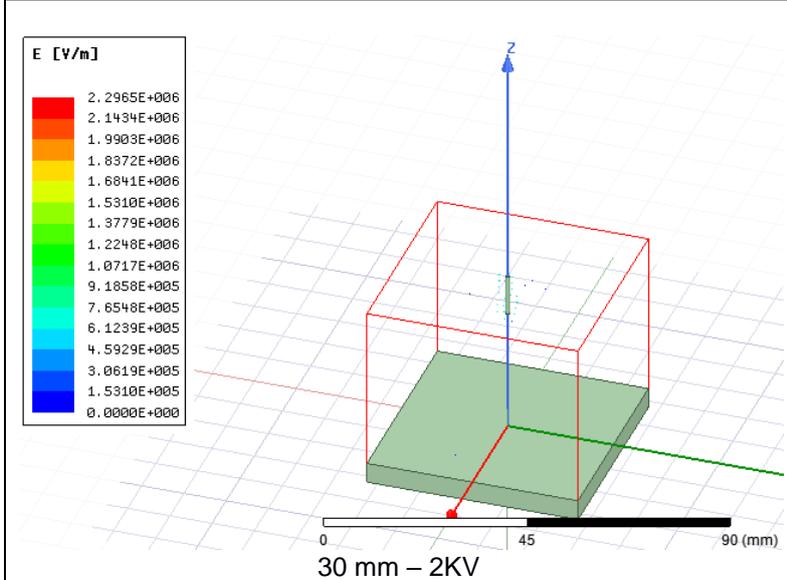
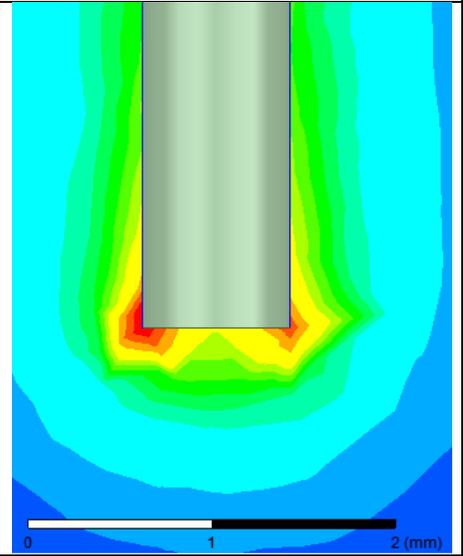
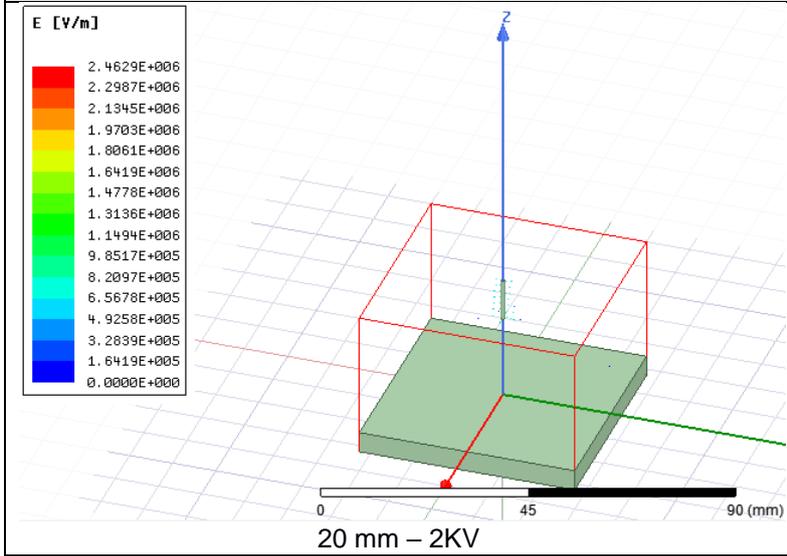
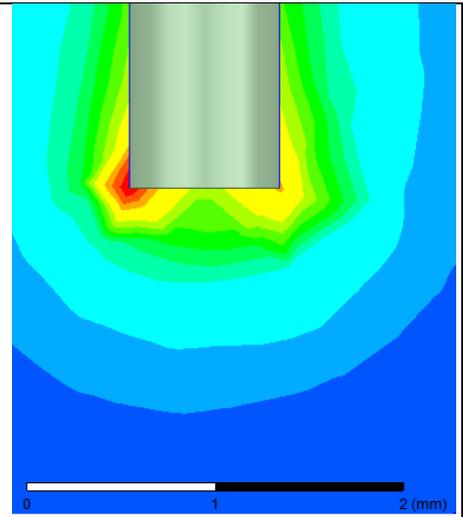
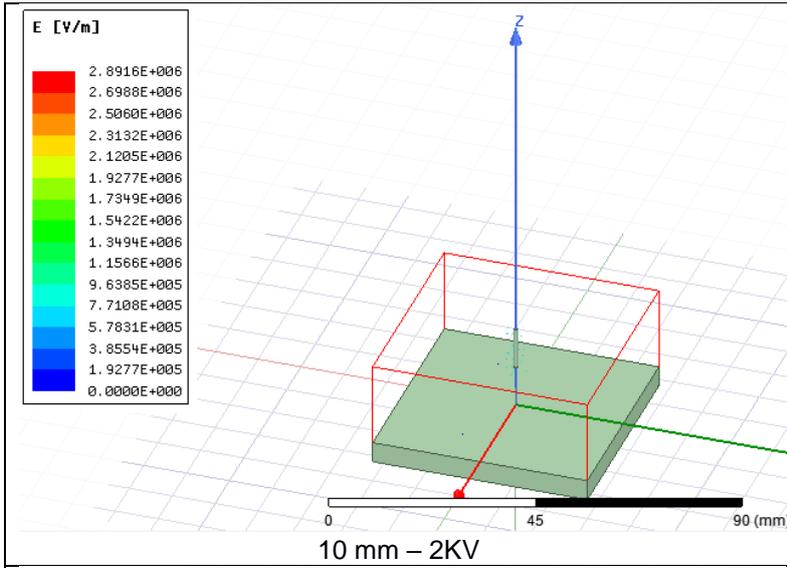


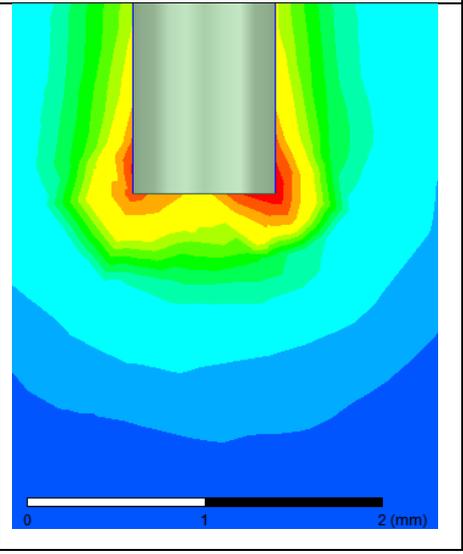
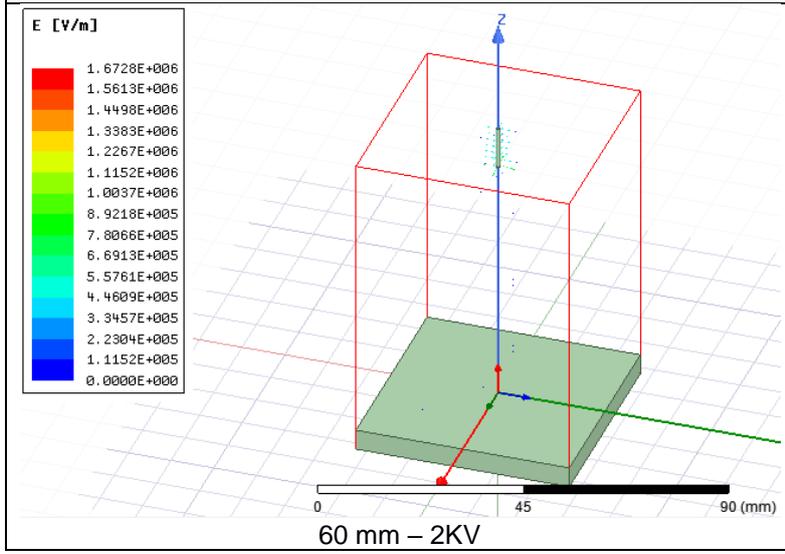
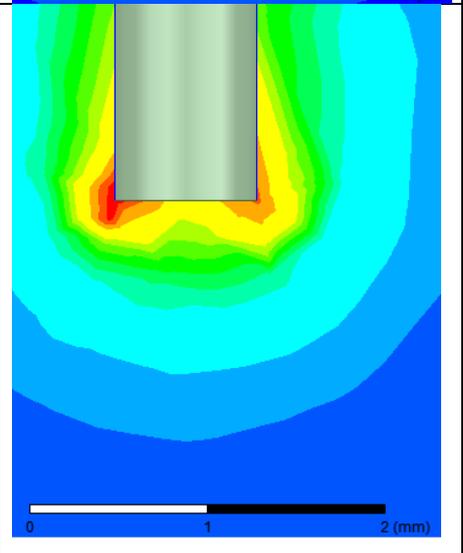
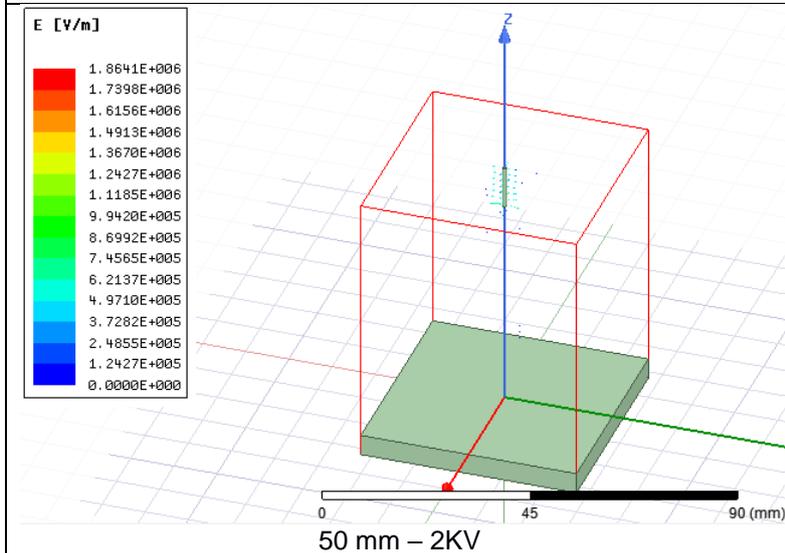
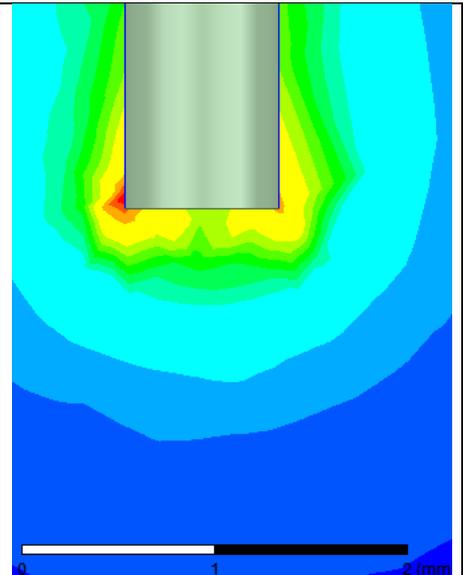
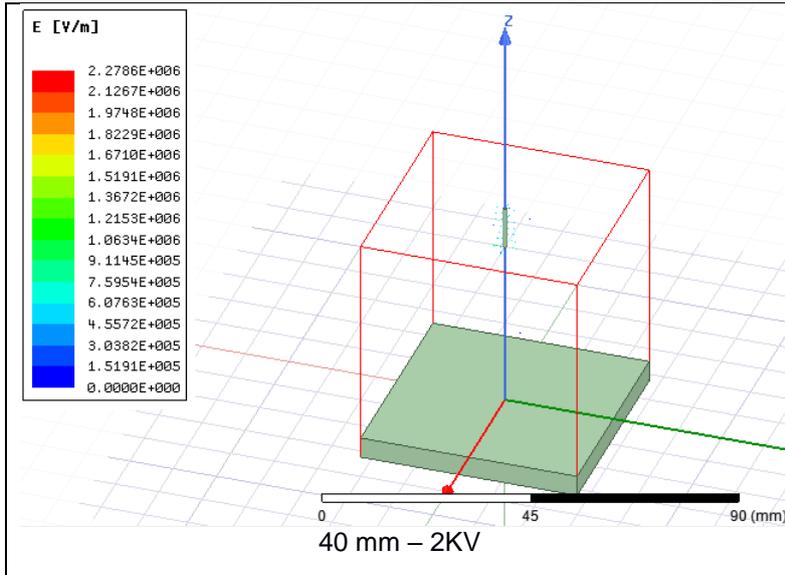
2.7KV

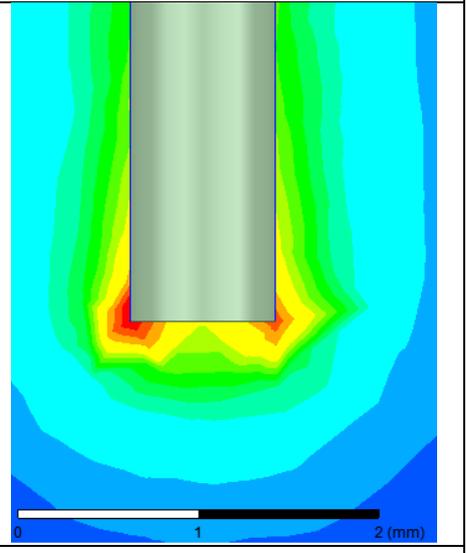
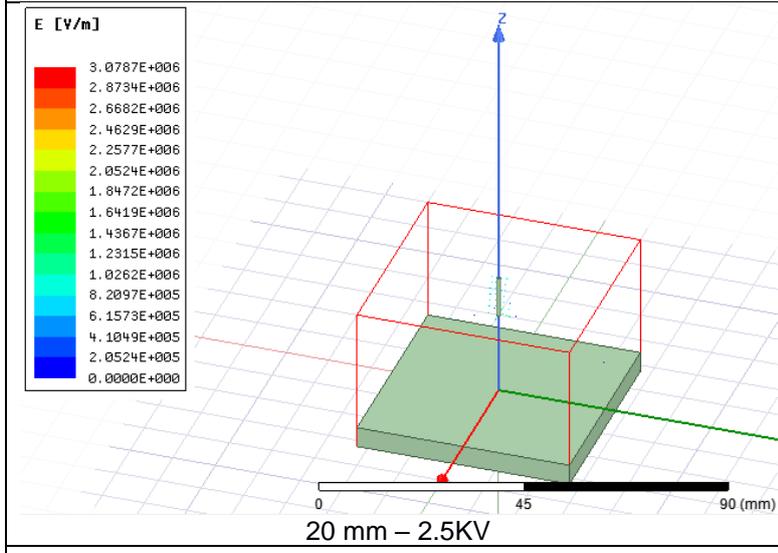
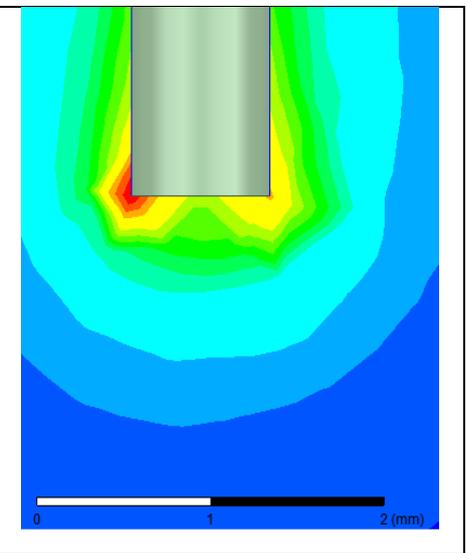
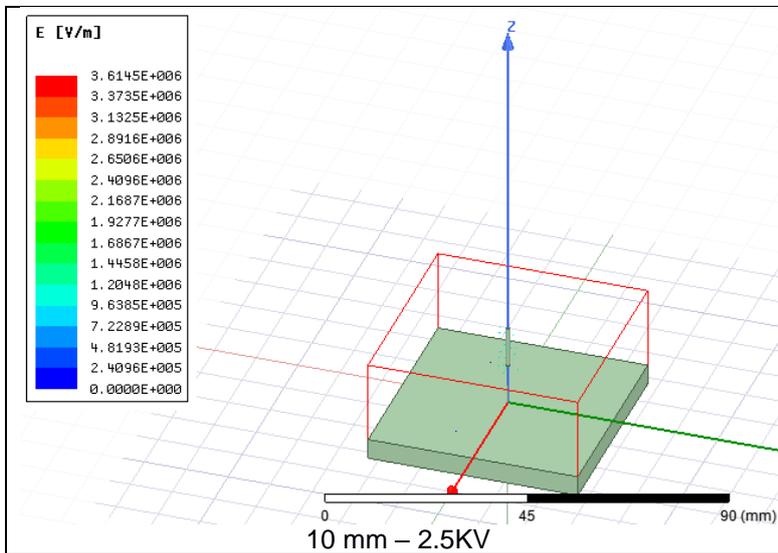
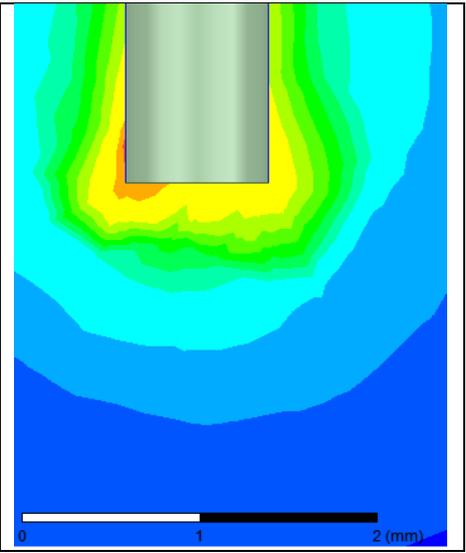
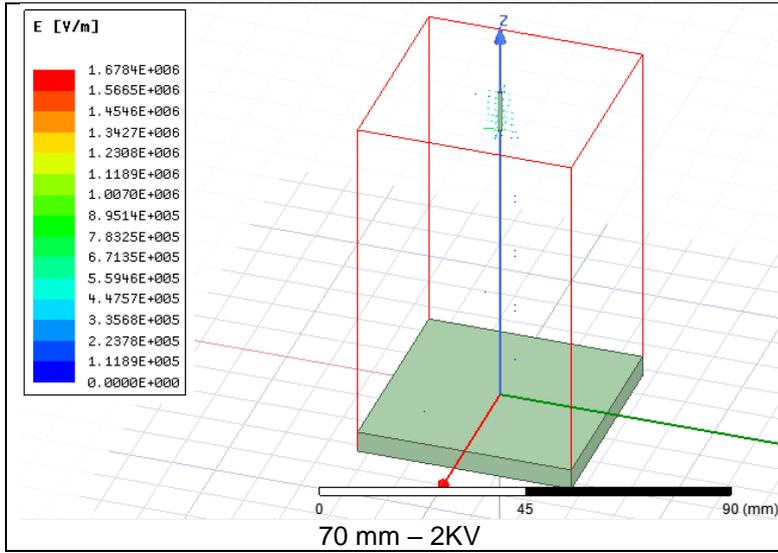


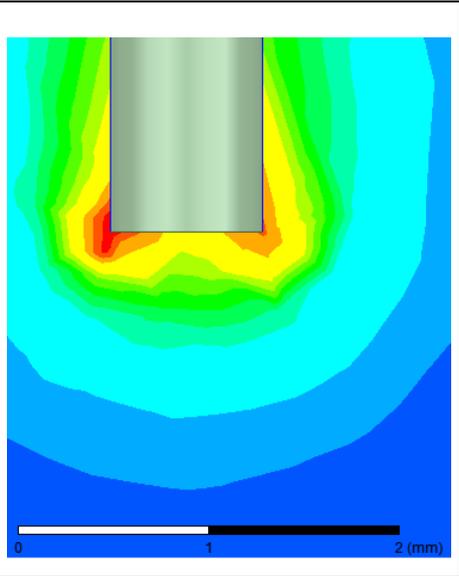
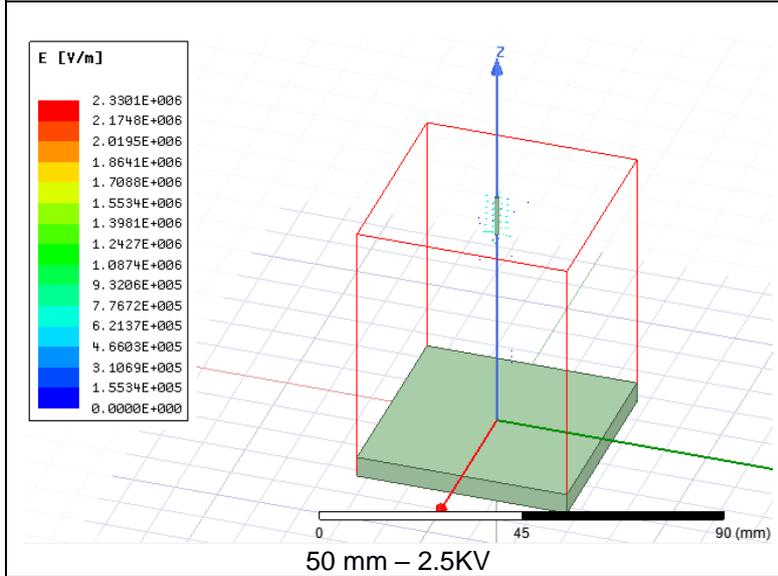
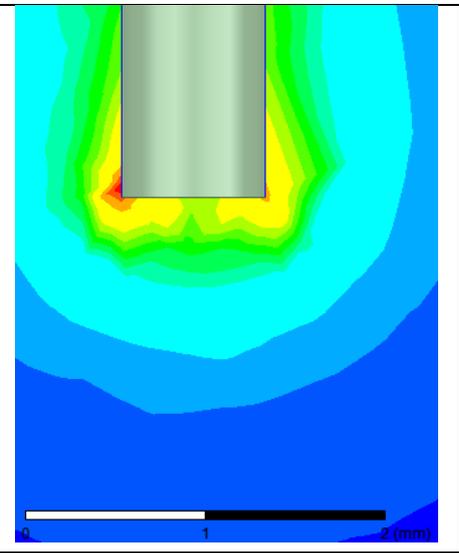
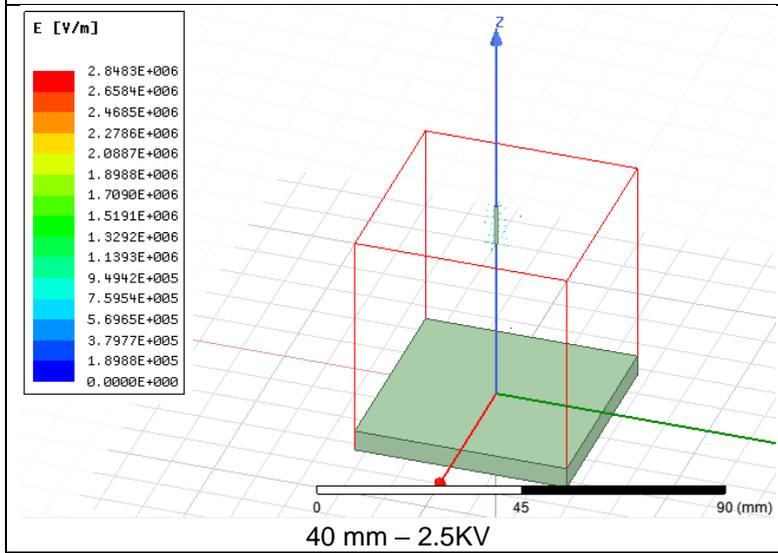
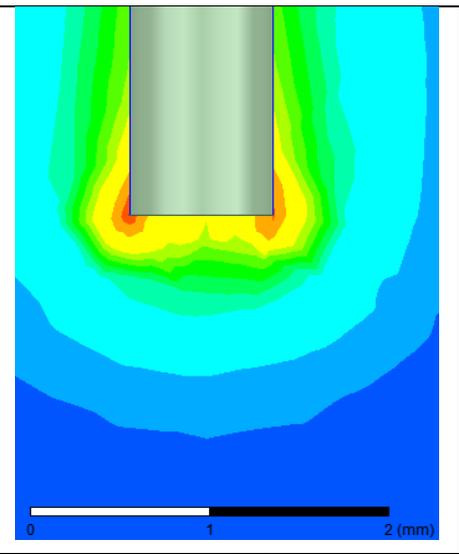
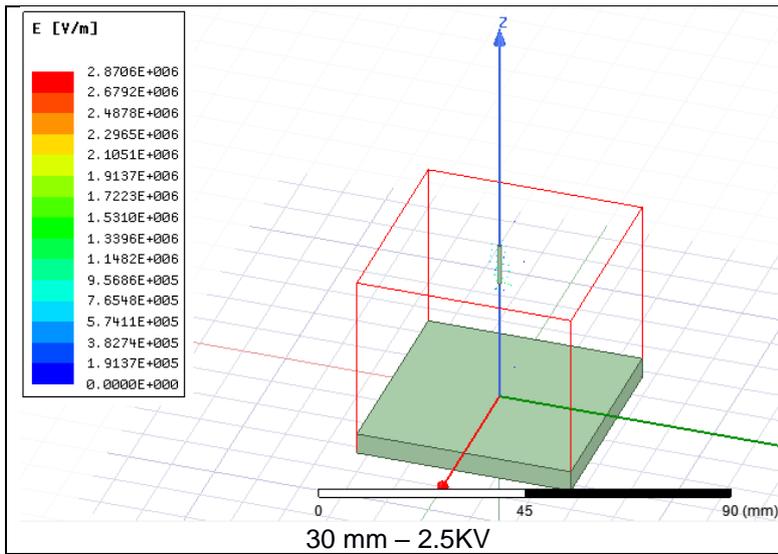
3KV

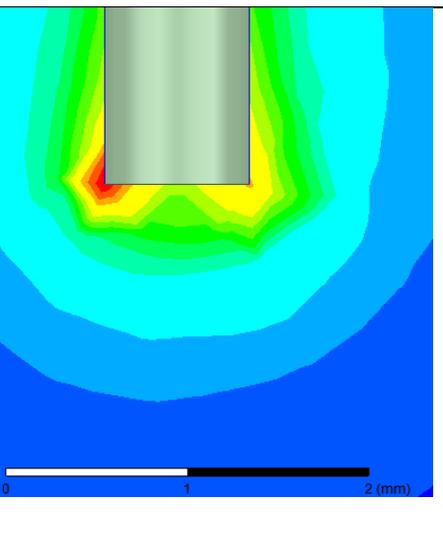
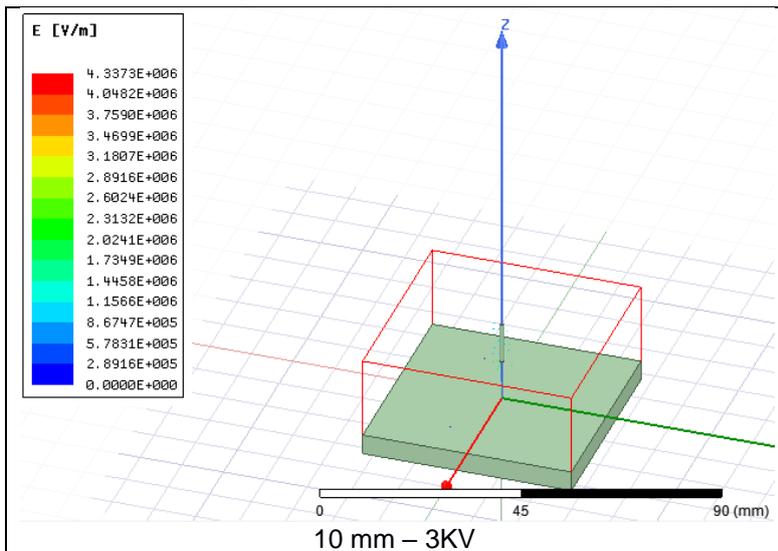
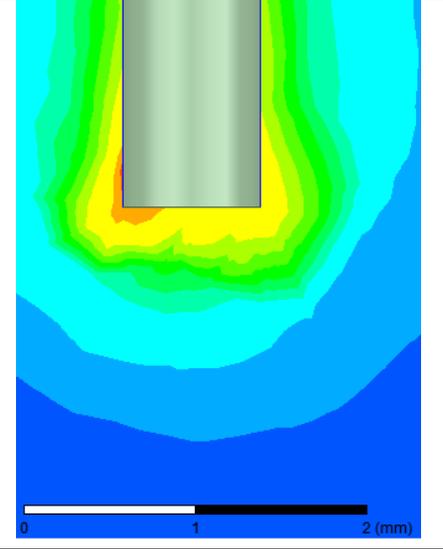
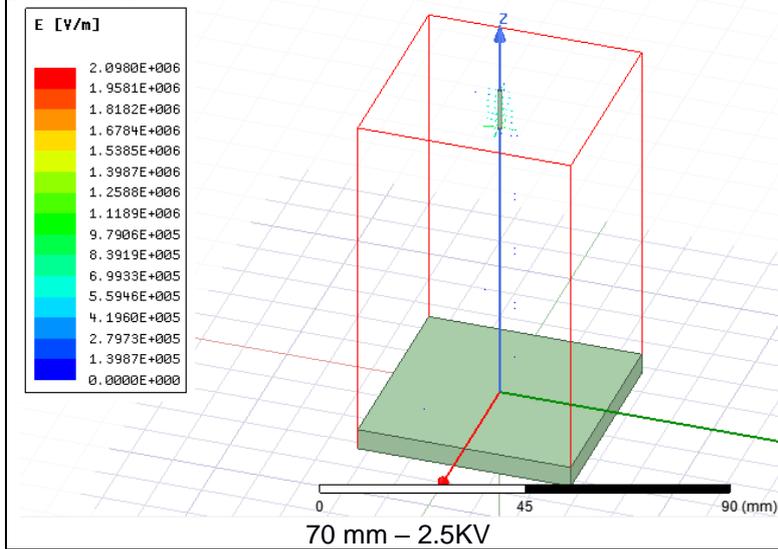
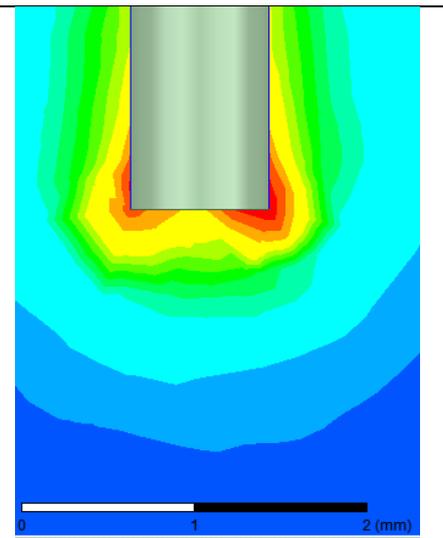
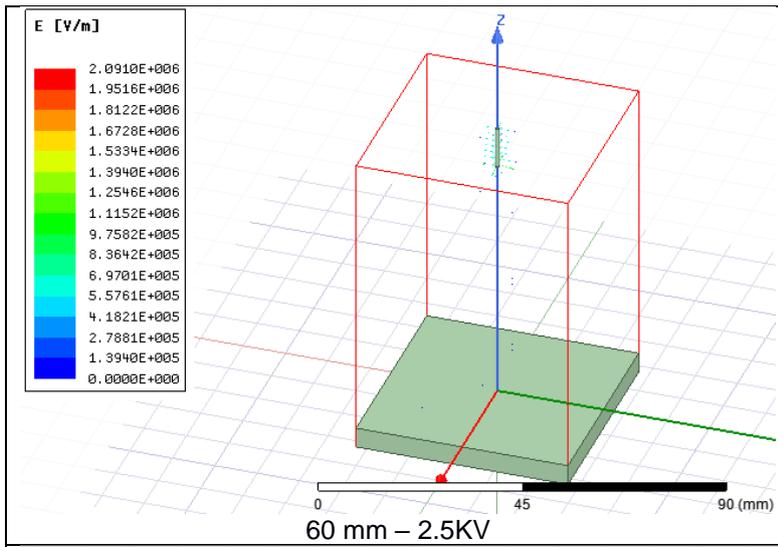


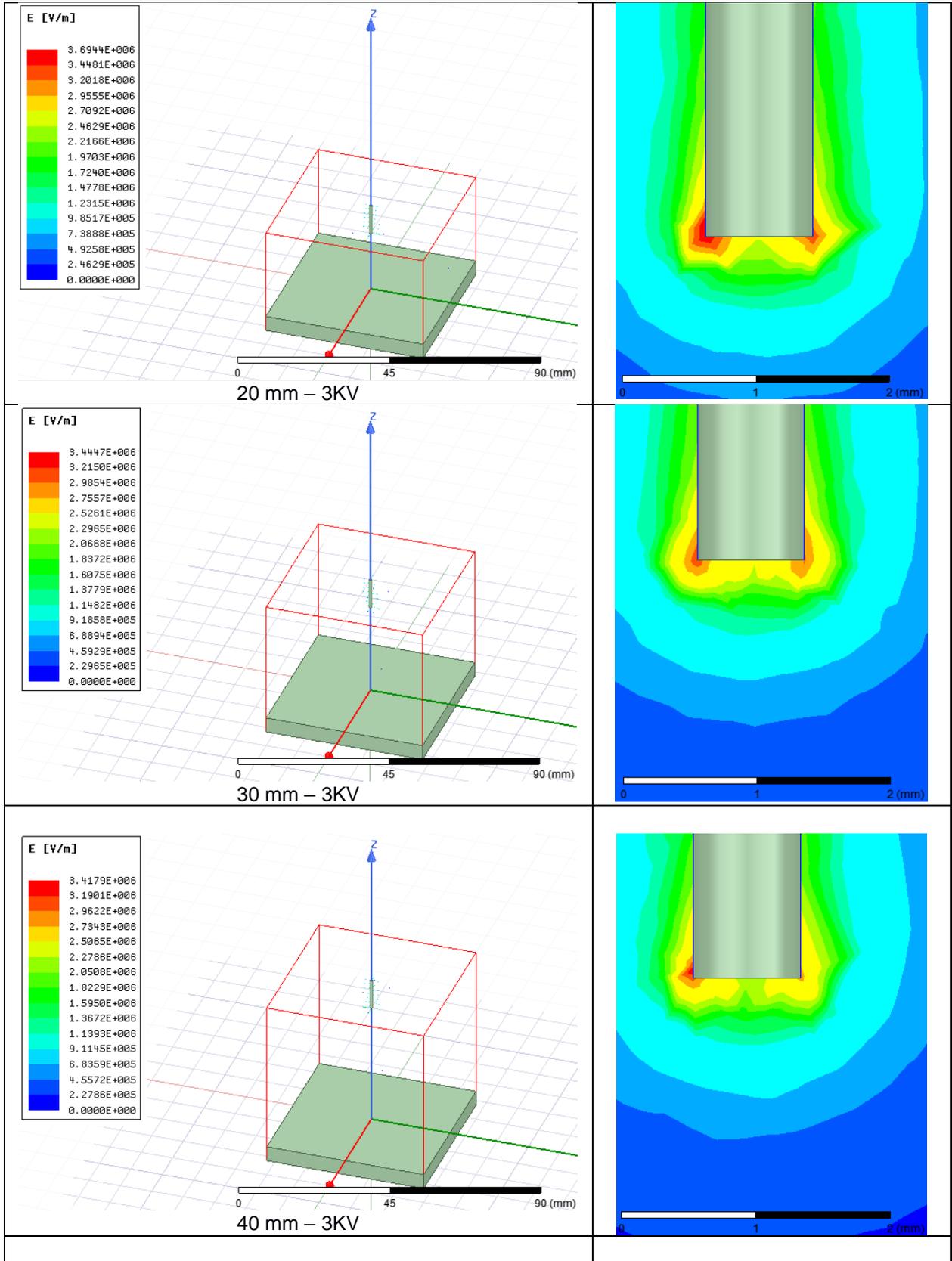


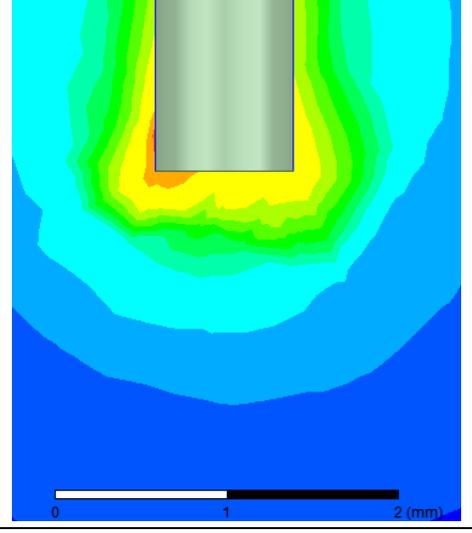
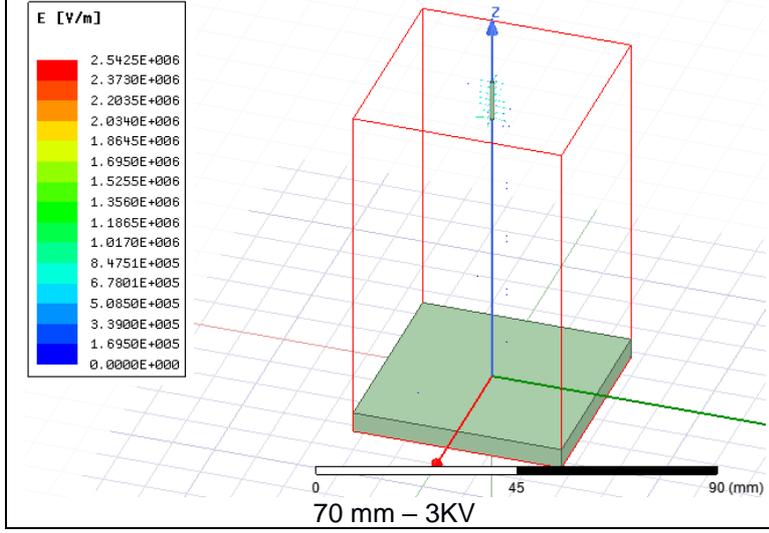
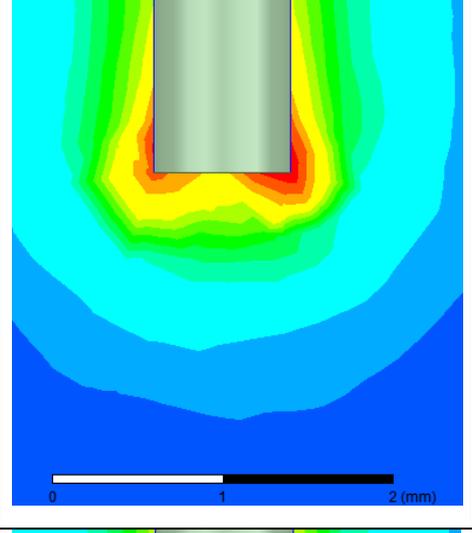
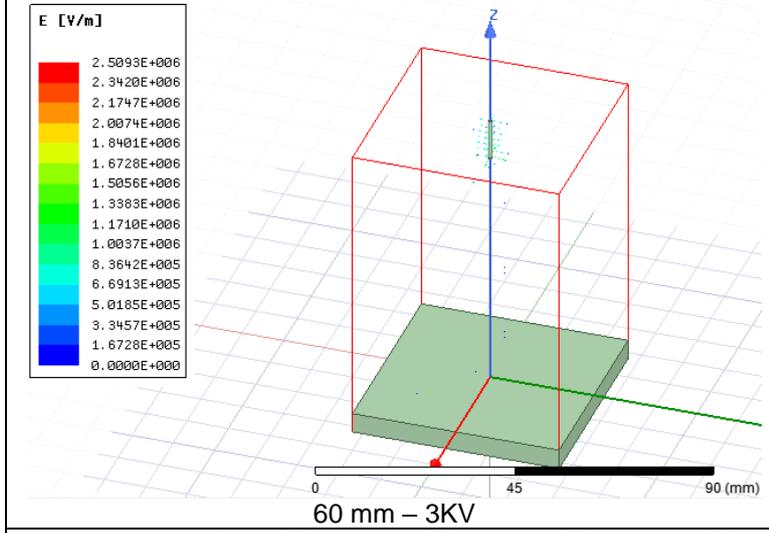
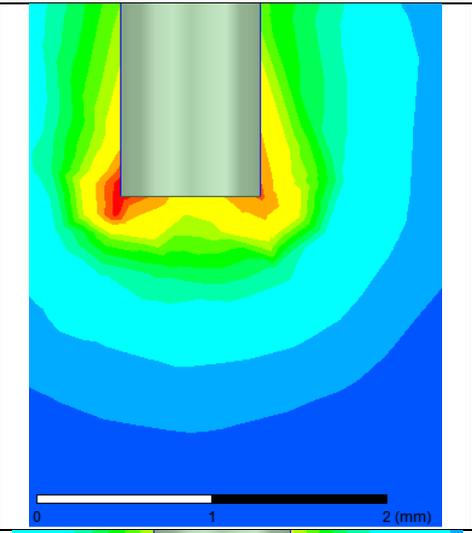
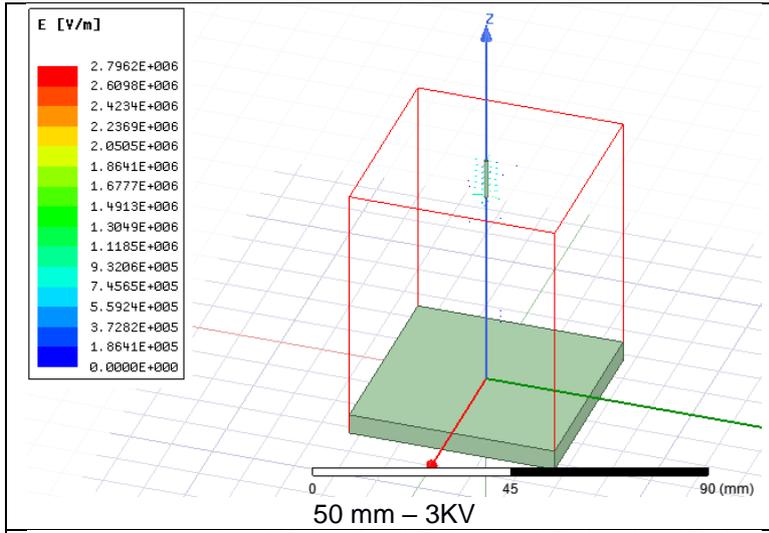






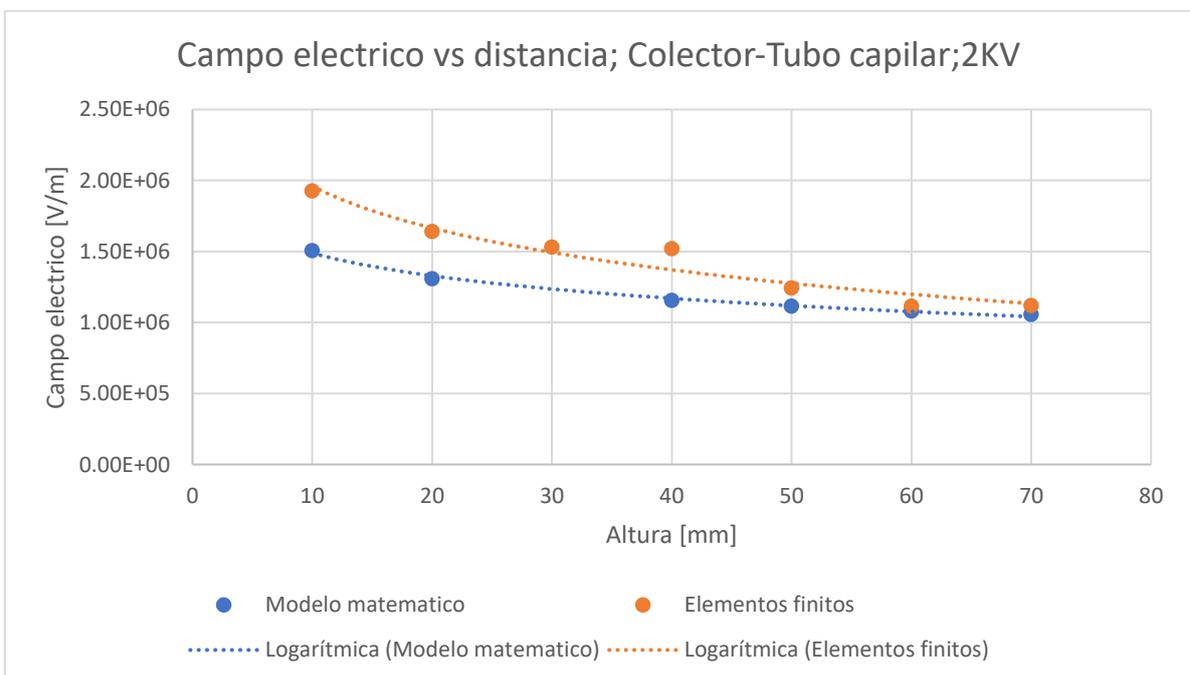
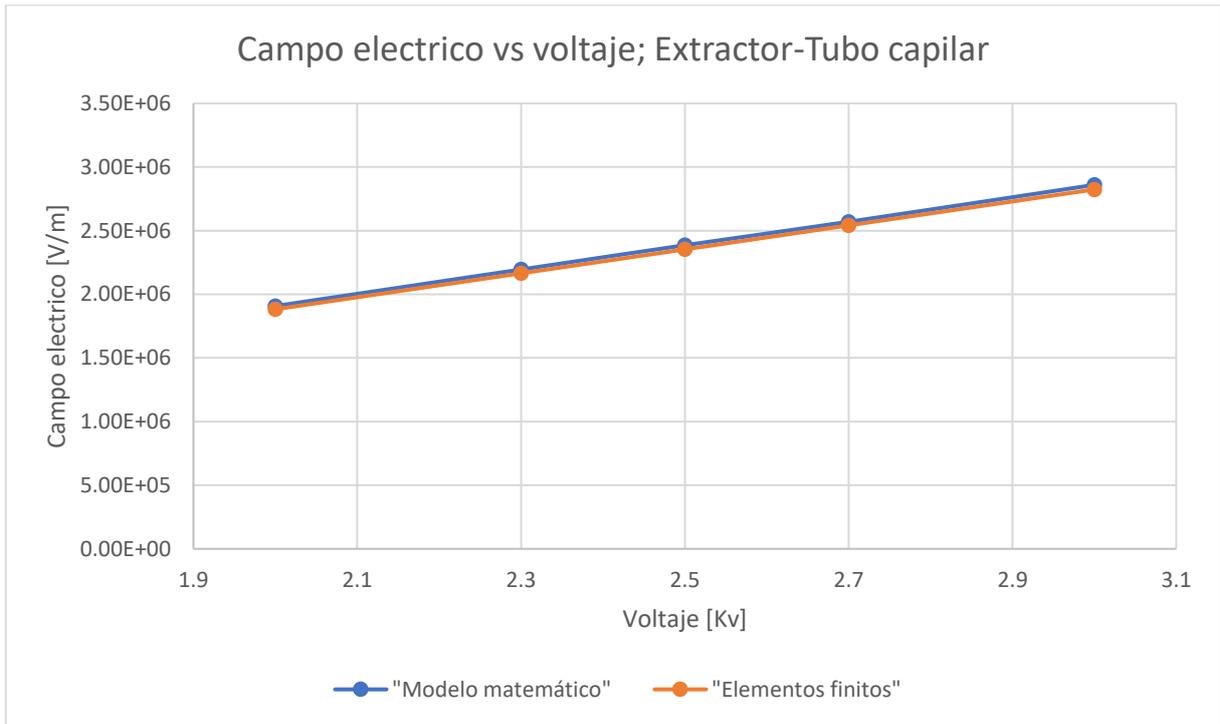




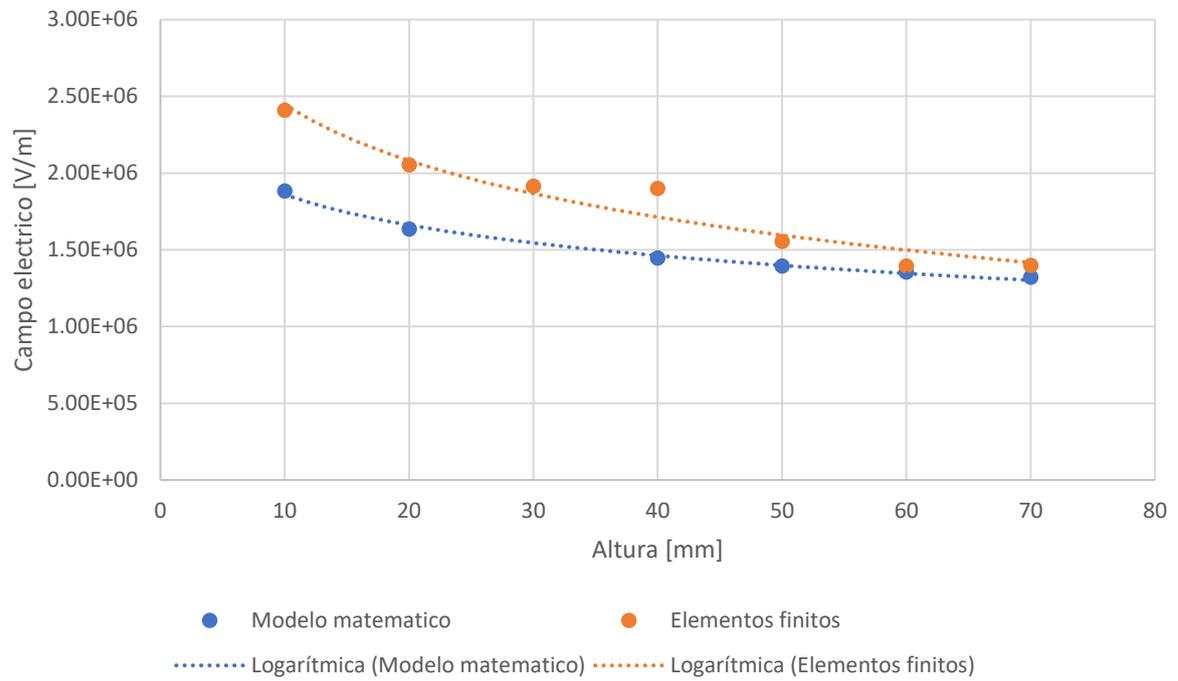


## APÉNDICE N

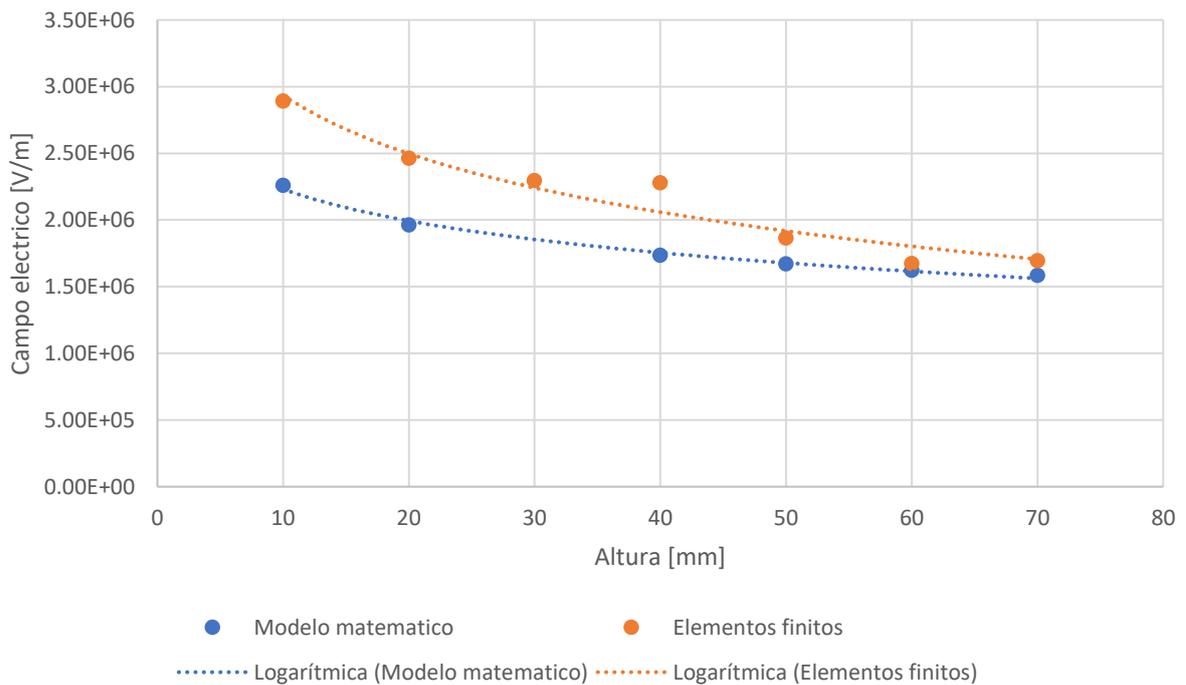
### GRÁFICAS DE CAMPO ELECTRICO – ELEMENTOS FINITOS



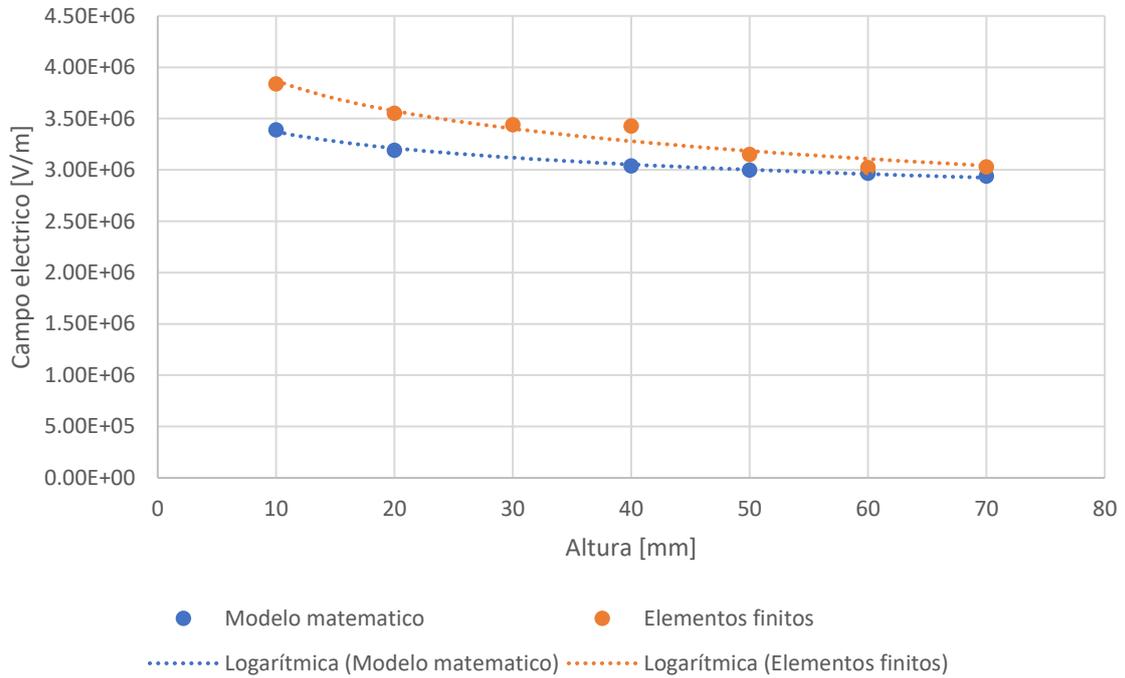
Campo electrico vs distancia; Colector-Tubo capilar; 2.5KV



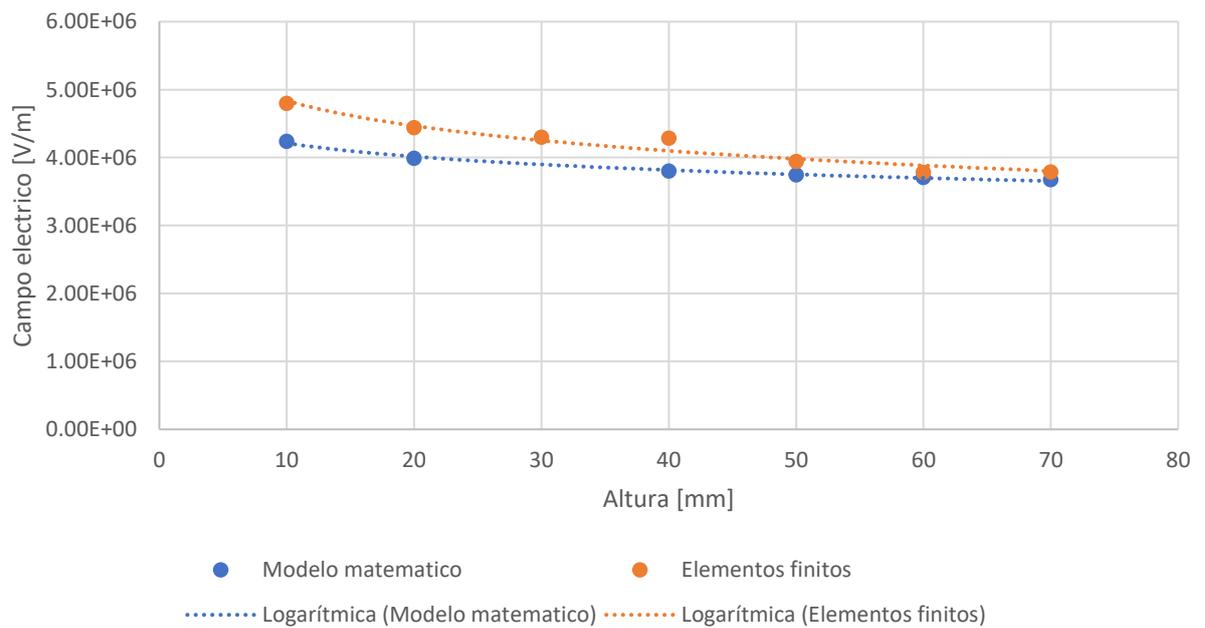
Campo electrico vs distancia; Colector-Tubo capilar; 3KV



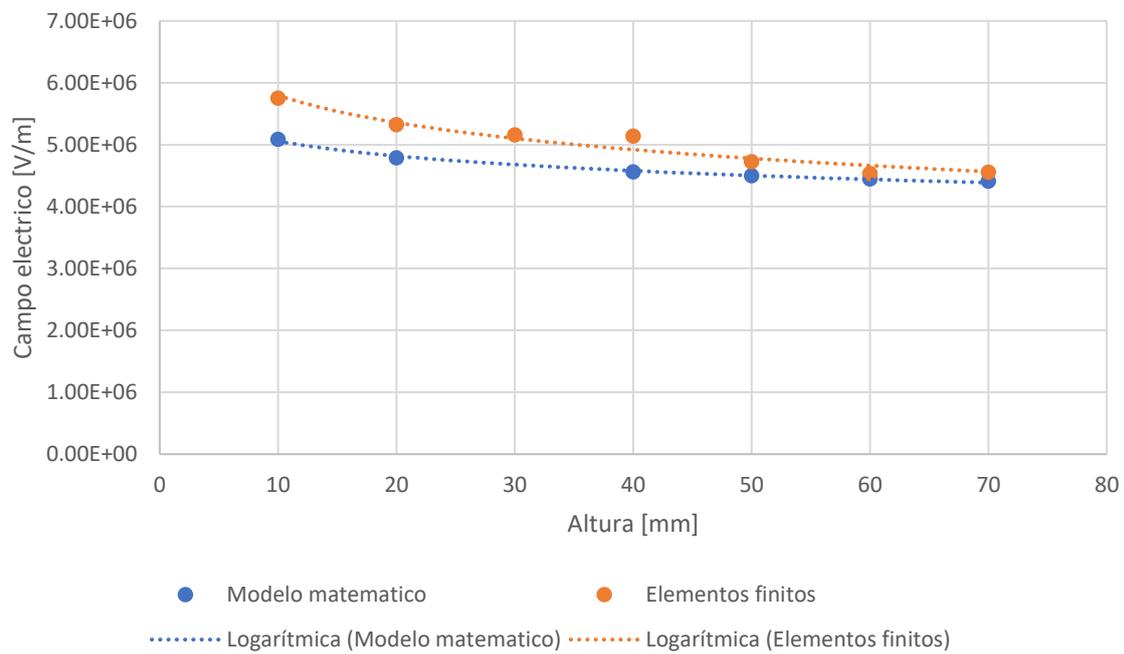
### Campo electrico vs distancia; Electropray;2KV



### Campo electrico vs distancia; Electropray;2.5KV

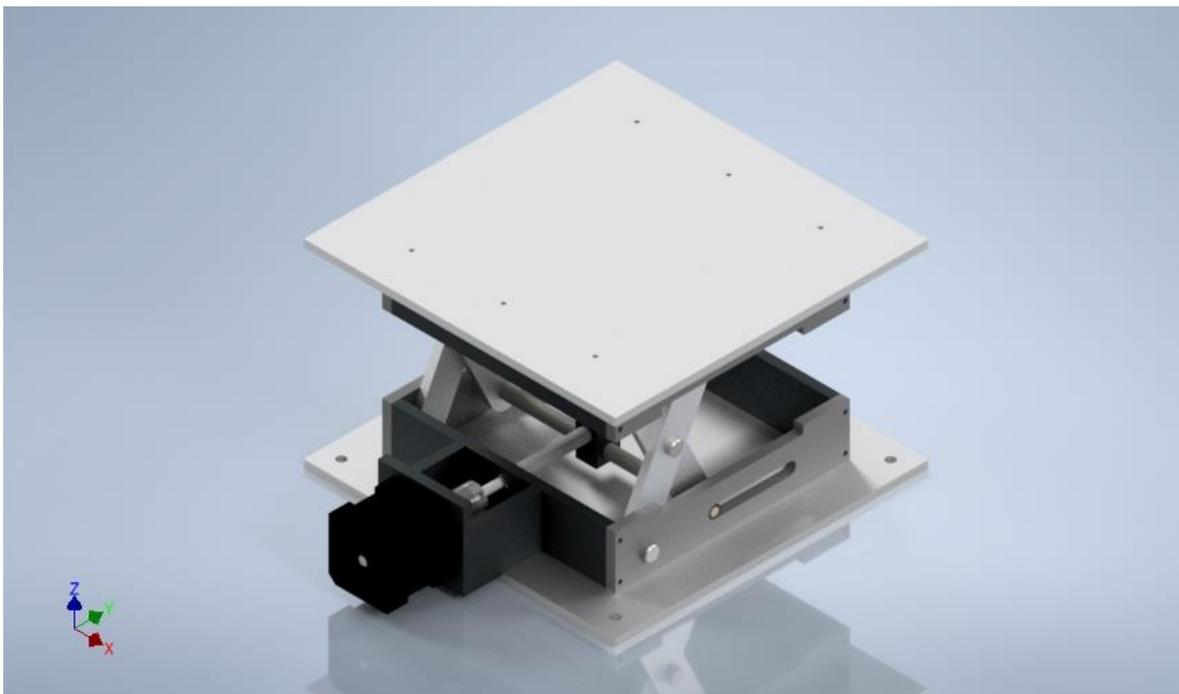
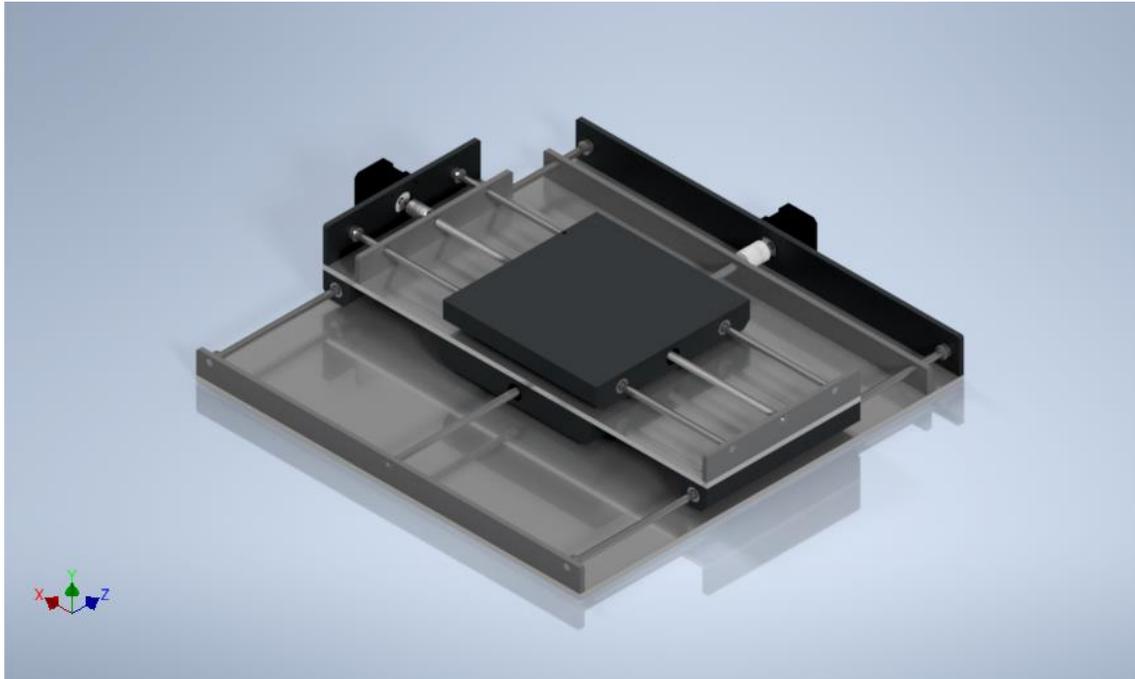


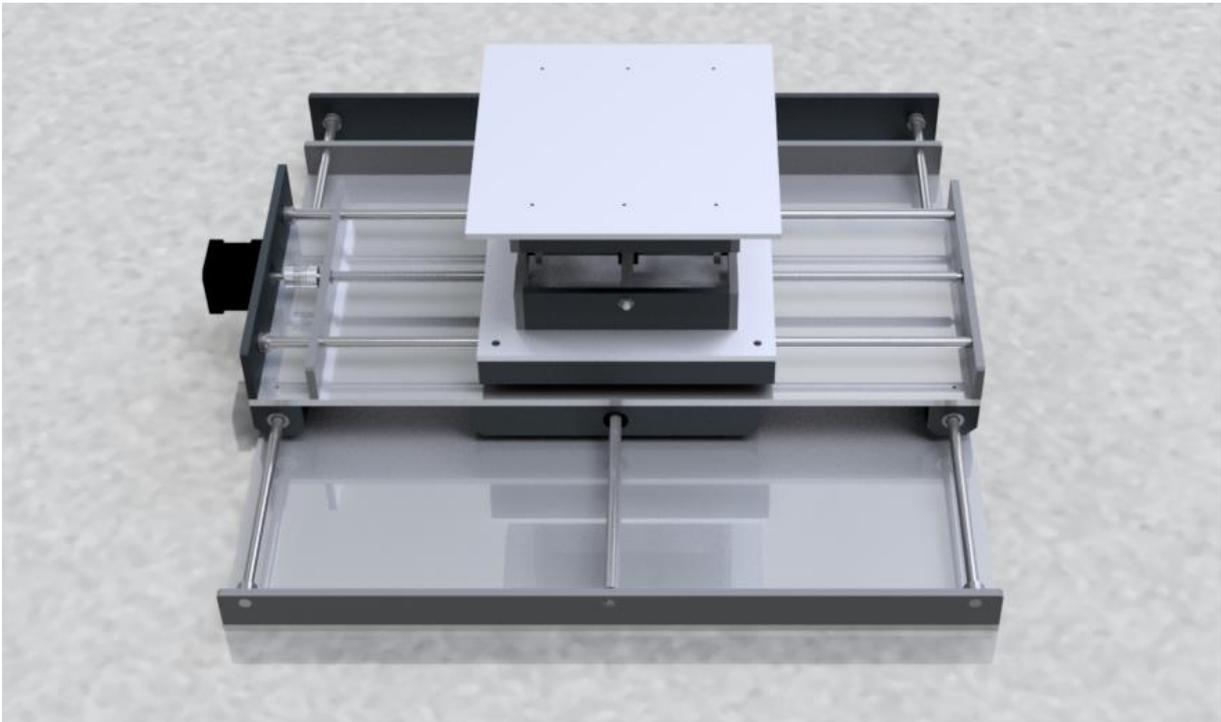
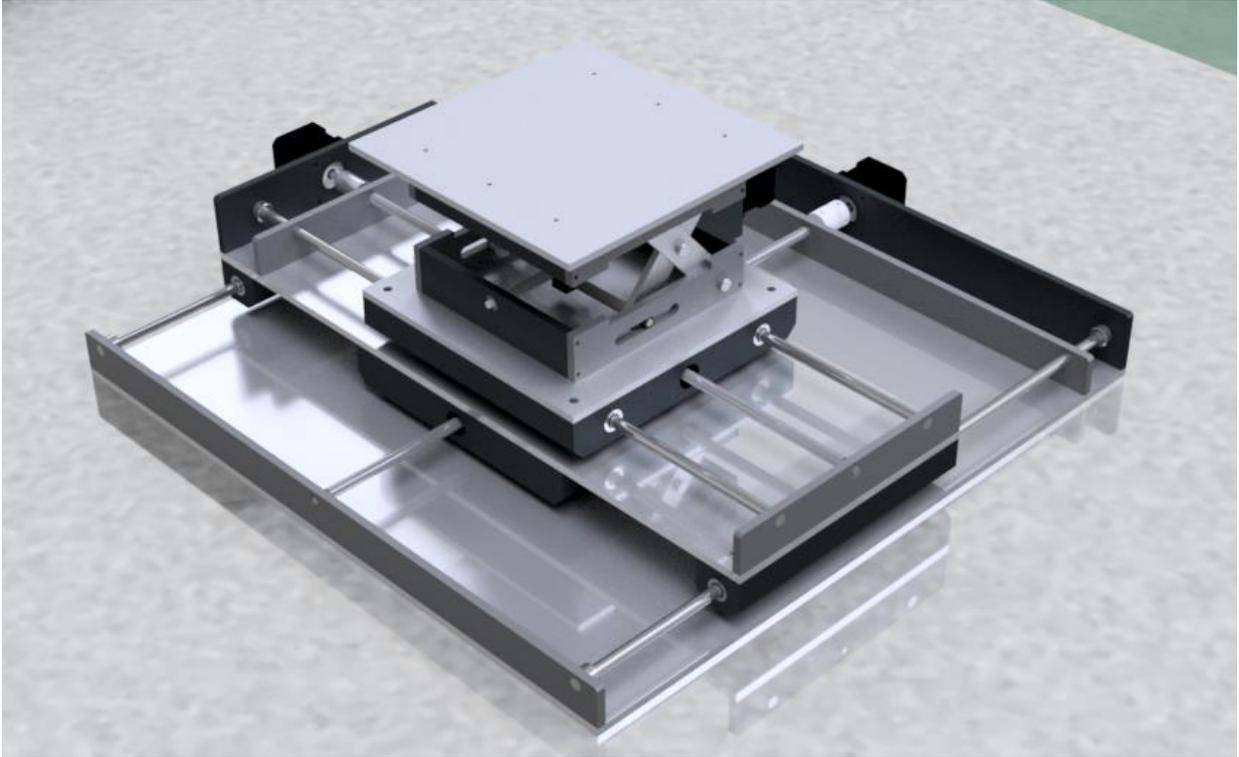
Campo electrico vs distancia; Electropray; 3KV

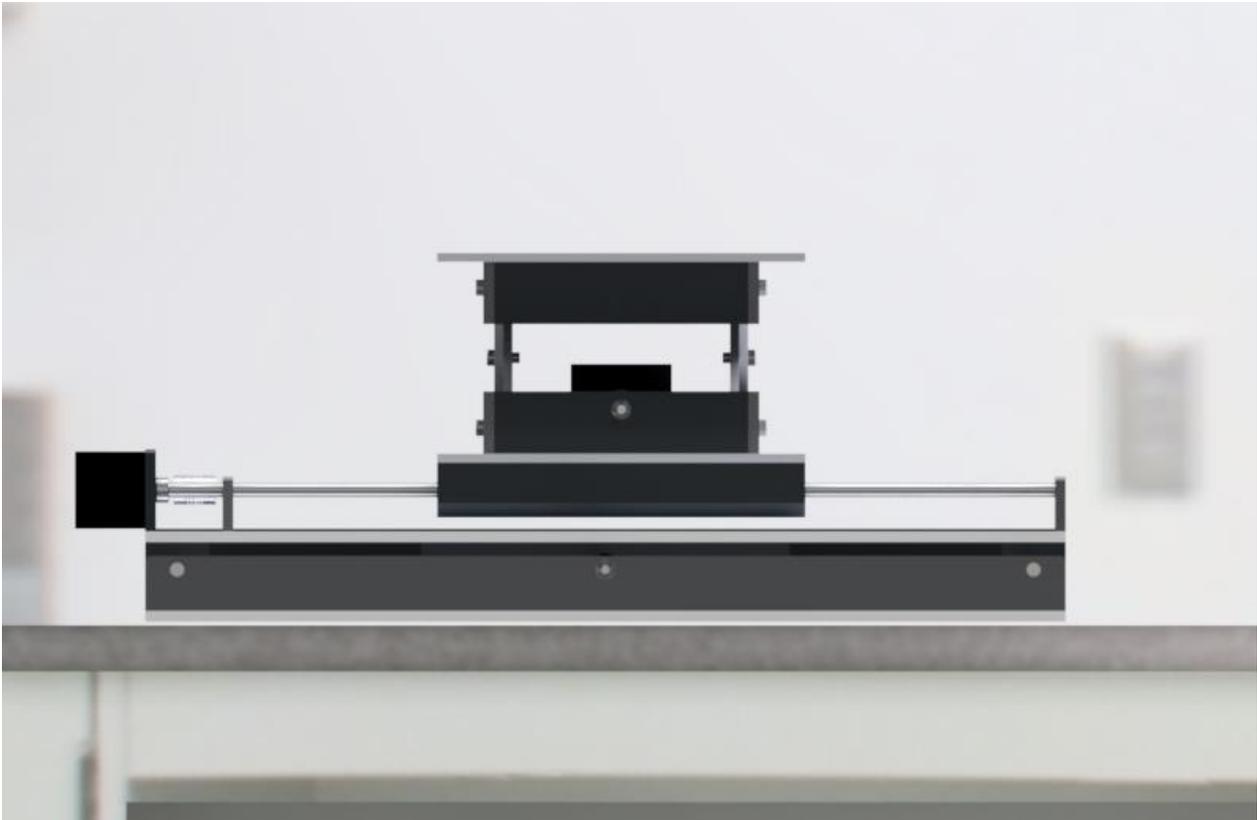


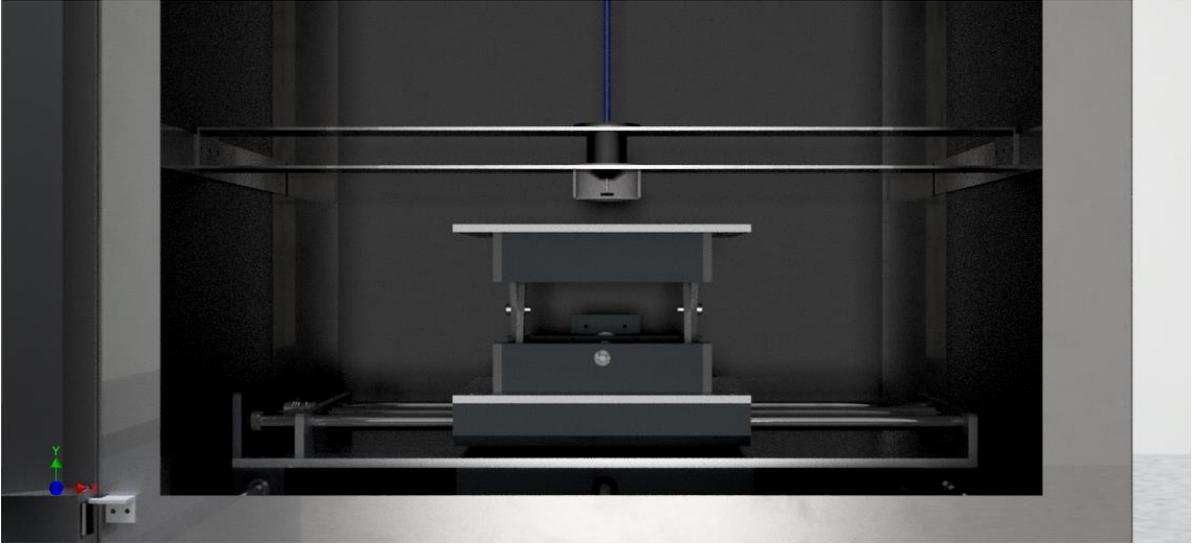
# APÉNDICE O

## RENDERIZADOS











# APÉNDICE P

## ANÁLISIS DE COSTOS

### Modulo XY

#### Piezas diseñadas

n°	Pieza	Cantidad	Material	Masa por unidad [kg]	Masa total [kg]	Precio	
1	Eje 8 mm	4	Acero	0.197	0.788	\$2.05	
2	Base inferior	1	Aluminio	4.05	4.050	\$81.00	
3	Soporte para ejes y motor	1	Aluminio	0.356	0.356	\$7.12	
4	Soporte para tornillo y ejes	2	Aluminio	0.239	0.478	\$9.56	
5	Bloque para husillo	1	Aluminio	3.075	3.075	\$61.50	
6	Bloque para rodamiento lineal	2	Aluminio	0.437	0.874	\$17.48	
7	Base superior	1	Aluminio	1.618	1.618	\$32.36	
8	Soporte superior para ejes y motor	1	Aluminio	0.137	0.137	\$2.74	
9	Soporte superior para ejes y tornillo	2	Aluminio	0.094	0.188	\$3.76	
10	Bloque para rodamientos lineales y husillo	1	Aluminio	2.884	2.884	\$57.68	
					Total	14.448	\$275.25

#### Piezas seleccionadas

n°	Pieza	Cantidad	Precio por unidad	Total	
1	Acople lineal	2	\$2.50	\$5.00	
2	Collar de bloqueo 8mm	8	\$1.70	\$13.60	
3	Husillo SDBD 8X2.5R	2	\$70	\$140.00	
4	Rodamiento 5 mm	4	\$1.70	\$6.80	
5	Rodamiento lineal 8 mm	8	\$1.50	\$12.00	
6	Tornillo de bolas SDBD 8X2.5R	2	\$30.00	\$60.00	
				Total	\$237.40

#### Total

Componentes diseñados	\$275.25
Componentes seleccionados	\$237.40
Manufactura %20	\$55.05
Total, mesa xy	\$567.70

## Modulo z

### Piezas diseñadas

n°	Pieza	Cantidad	Material	Masa por unidad [kg]	Masa total [kg]	Precio	
1	Eje transversal	2	Acero	0.052	0.104	\$0.27	
2	Tornillo	0	Acero	0.058	0.000	\$0.00	
3	Juntas 6x14	4	Acero	0.005	0.020	\$0.05	
4	Juntas 6x19	2	Acero	0.006	0.012	\$0.03	
5	Base 200x200	1	Aluminio	0.479	0.479	\$9.58	
6	Mesa 200x200	1	Aluminio	0.474	0.474	\$9.48	
7	Pared lateral	4	Aluminio	0.069	0.276	\$5.52	
8	Eslabón	8	Aluminio	0.03	0.240	\$4.80	
9	Pared superior	2	Aluminio	0.078	0.156	\$3.12	
10	Soporte de rodamiento	1	Aluminio	0.076	0.076	\$1.52	
11	Pared con agujero	1	Aluminio	0.076	0.076	\$1.52	
12	Unión entre soportes	2	Aluminio	0.025	0.050	\$1.00	
13	Soporte Motor	1	Aluminio	0.037	0.037	\$0.74	
14	Tuerca	1	Aluminio	0.01	0.010	\$0.20	
15	Camisa	4	Bronce	0.004	0.016	\$0.96	
					Total	2.026	\$38.79

### Piezas seleccionadas

n°	Pieza	Cantidad	Precio por unidad	Total	
1	Acople lineal	1	\$2.50	\$2.50	
2	Rodamiento 5mm	2	\$1.70	\$3.40	
3	Tornillo ACME 8X2	1	\$10	\$10.00	
				Total	\$15.90

### Total

Componentes diseñados	\$38.79
Componentes seleccionados	\$15.90
Manufactura %20	\$7.76
Total, mesa z	\$62.45

### Caja

n°	Pieza	Cantidad	Area [mm^2]	Precio
1	Marco	2	4.64E+05	\$3.11
2	Base	1	8.37E+05	\$5.62
3	Transversal	2	3.79E+04	\$0.25

4	Unión Superior	2	6.13E+04	\$0.41
5	Pared	2	7.89E+05	\$5.29
6	Tapa	1	8.60E+05	\$5.77
			Total	\$20.46

## Total

Componentes diseñados	\$20.46
Manufactura %20	\$4.09
Total mesa xy	\$24.55

## Sistema de control

n°	Pieza	Cantidad	Precio por unidad	Total
1	Motor Nema 17 de 0.59Nm	3	\$15.00	\$45.00
2	Control de movimiento	1	\$45.00	\$45.00
3	PLC	3	\$23.00	\$69.00
4	Fuente de poder de 24V-400W	1	\$20.00	\$20.00
			Total	\$179.00

## Sistema sinterizado

n°	Pieza	Cantidad	Precio por unidad	Total
1	LASER 20W	1	\$200.00	\$200.00
2	Lente axicon 2 pulg diam ext	1	\$400.00	\$400.00
3	Lente biconvexo 2pulg diam ext	1	\$20.00	\$20.00
4	Espejo parabólico	1	\$100.00	\$100.00
			Total	\$720.00

## Sistema electropray

Cantidad	Precio por unidad	Total
1	\$300.00	\$300.00
1	\$600.00	\$600.00
1	\$10.00	\$10.00
1	\$10.00	\$10.00
		Total
		\$920.00

**Sistema de dispensador de fluidos cnc**

Modulo xy	\$567.70
Modulo z	\$62.45
Caja	\$24.55
Sistema de control	\$179.00
Sistema de sinterizado	\$720.00
Sistema electrospray	\$920.00
Total	\$2 473.70

# APÉNDICE Q

## CATÁLOGOS

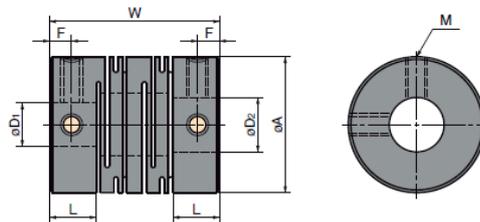
### Acople MST 16

**MST**  
Diá. exterior  $\varnothing 8\text{-}\varnothing 63$



Figura 49. Acoplamiento MST para motores paso a paso. Fuente: (NBK, 2017)

### SERIE MST Prisionero



#### Dimensiones

unit: mm

Tipo	A	L	W	F	M	Par nominal de los prisioneros (N-m)	Ejes en stock D <sub>1</sub> x D <sub>2</sub>							
MST - 8	8	3,5	14	1,7	M2	0,3	2 x 2	2 x 3	3 x 3					
MSTS- 8														
MST -12	12	5	18,5	2,5	M2,5	0,5	3 x 3	3 x 4	4 x 4	4 x 5	4 <sup>5</sup> x 5	5 x 5	5 x 6	
MSTS-12														
MST -16	16	6,5	23	3	M3	0,7	4 x 4	4 x 5	4 x 6	4 <sup>5</sup> x 5	5 x 5	5 x 6		
MSTS-16							5 x 8	6 x 6	6 x 6 <sup>35</sup>	6 x 7	6 x 8	6 <sup>35</sup> x 8		

Figura 50. Dimensiones de acoplamientos MST. Fuente: (NBK, 2017)

#### Especificaciones

Tipo	Eje máximo (mm)	Par nominal (N-m)	Par máximo (N-m)	Frecuencia rotacional máx. (min <sup>-1</sup> )	Momento de inercia* (kg-m <sup>2</sup> )	Dureza torsional estática (N-m/rad)	Desalineamiento para/eje (mm)	Desalineamiento angular (°)	Desalineamiento axial (mm)	Peso* (g)
MST - 8	4	0.1	0.2	78000	1.2x10 <sup>-6</sup>	25	0.10	2	±0.2	1.4
MST -12	6	0.4	0.8	52000	8.3x10 <sup>-6</sup>	35	0.10	2	±0.3	3.7
MST -16	8	0.5	1	39000	3.3x10 <sup>-7</sup>	47	0.10	2	±0.4	8.1

Figura 51. Especificaciones de acoplamientos MST. Fuente: (NBK, 2017)

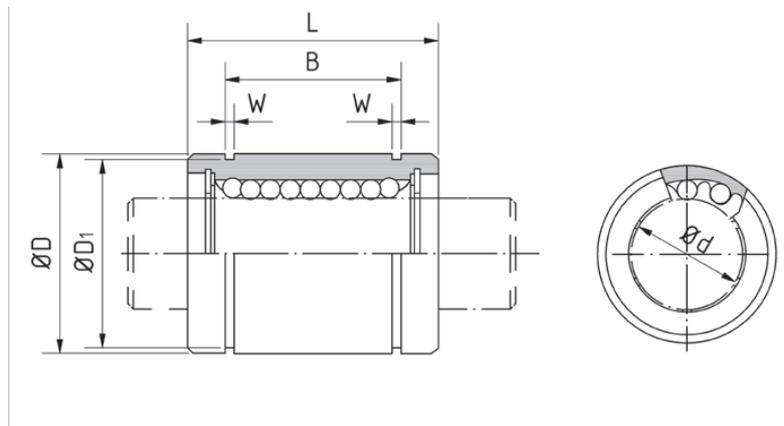
# Rodamiento lineal BBES8A



Figura 52. Rodamiento lineal de bolas. Fuente: (NTN-SNR, 2014)

Referencia				Dimensiones [mm]							
Estándar		Resistente a la corrosión		Ød	Tolerancia	ØD	Tolerancia	L	Tolerancia	B	Tolerancia
Jaula de plástico	Jaula de acero	Jaula de plástico	Jaula de acero inox								
BBE3	BBE3A	BBES3	BBES3A	3	+0,008 0	7	0 -0,008	10	0	-	-
BBE4	BBE4A	BBES4	BBES4A	4		8		12	-0,012	-	-
BBE5	BBE5A	BBES5	BBES5A	5		12		22	0 -0,2	14,5	0 -0,2
BBE8	BBE8A	BBES8	BBES8A	8		16		25		16,5	
BBE10	BBE10A	BBES10	BBES10A	10		19	29	22			
BBE12	BBE12A	BBES12	BBES12A	12		22	32	22,9	0	-0,2	
BBE16	BBE16A	BBES16	BBES16A	16		+0,009	26	36	24,9		

Figura 53. Dimensiones de rodamientos lineales. Fuente: (NTN-SNR, 2014)



W	Ø D1	Número de circuitos de bolas	Excentricidad máx. [µm]	Juego radial máx. [µm]	Capacidad de carga dinámica [N]	Capacidad de carga estática [N]	Peso [g]	Referencia			
								Estándar		Resistente a la corrosión	
								Jaula de plástico	Jaula de acero	Jaula de plástico	Jaula de acero inox
-	-	4	10	-3	44	105	1,4	BBE3	BBE3-A	BBES3	BBES3-A
-	-	4			55	127	2	BBE4	BBE4-A	BBES4	BBES4-A
1,1	11,5	4			159	265	11	BBE5	BBE5-A	BBES5	BBES5-A
1,1	15,2	4			195	402	22	BBE8	BBE8-A	BBES8	BBES8-A

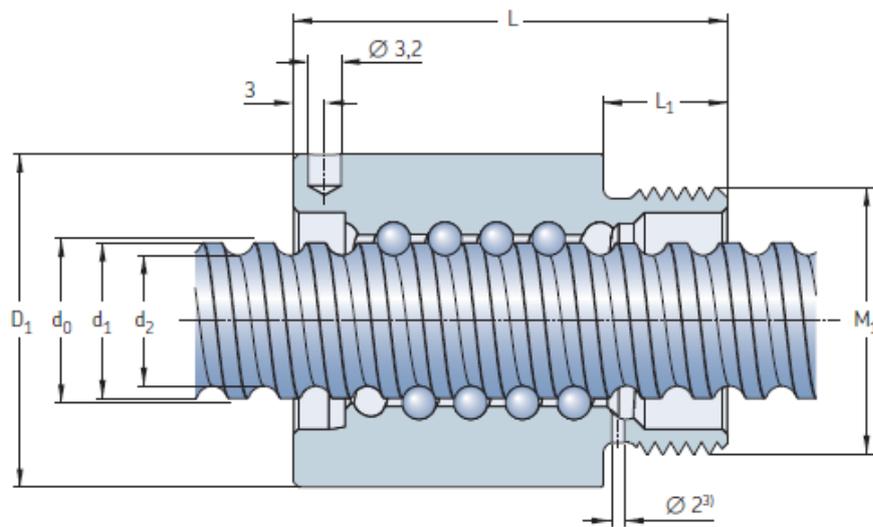
Figura 54. Especificaciones de rodamiento lineal BBES8A. Fuente: (NTN-SNR, 2014)

## Husillo SDBD 8X2.5R



*SD estándar*

Figura 55. Husillo de bolas. Fuente: (SKF, 2013)



Eje del husillo $d_0 \times P_h$	Tuerca		Sin rasca- dor $L \pm 0,3$	Con rasca- dor $L_1$	Llave de apriete (FACOM)	Eje del husillo			Rodamiento de apoyo Rodamientos axiales de apoyo recomendados	Soporte de pie recomendado
	$D_1$ h10	$M_1$ 6g				longitud máx.	$d_2$	$d_1$		
mm	mm	mm	mm	mm	-	mm	mm	mm	-	-
6x2	16,5	M14x1	20	-	7,5	126-A35	1 000	4,7	6	
8x2,5	17,5	M15x1	23,5	23,5	7,5	126-A35	1 000	6,3	7,6	

Figura 56. Dimensiones del husillo de bolas SDBD 8X2.5R. Fuente: (SKF, 2013)

## Cojinete 628/5-2Z

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Mass	Designations	
d	D	B	dynamic	static	$P_u$	Reference speed	Limiting speed <sup>1)</sup>		Bearing open or capped on both sides	capped on one side <sup>1)</sup>
mm			kN		kN	r/min		kg	–	
3	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	▶ 623	–
	10	4	0,54	0,18	0,007	–	40 000	0,0015	▶ 623-2RS1	623-RS1
	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	60 000	0,0015	▶ 623-2Z	623-Z
4	9	2,5	0,423	0,116	0,005	140 000	85 000	0,0007	618/4	–
	9	3,5	0,54	0,18	0,07	140 000	70 000	0,001	628/4-2Z	–
	9	4	0,54	0,18	0,07	140 000	70 000	0,0013	638/4-2Z	–
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	63 000	0,0017	619/4-2Z	–
	11	4	0,624	0,18	0,008	130 000	80 000	0,0017	619/4	–
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	75 000	0,0021	604	–
	12	4	0,806	0,28	0,012	120 000	60 000	0,0021	▶ 604-2Z	604-Z
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	67 000	0,0031	▶ 624	–
	13	5	0,936	0,29	0,012	110 000	53 000	0,0031	▶ 624-2Z	624-Z
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	60 000	0,0054	634	–
	16	5	1,11	0,38	0,016	–	28 000	0,0054	634-2RS1	634-RS1
	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	48 000	0,0054	634-2RZ	634-RZ
5	16	5	1,11	0,38	0,016	95 000	48 000	0,0054	▶ 634-2Z	634-Z
	11	3	0,468	0,143	0,006	120 000	75 000	0,0012	618/5	–
	11	4	0,64	0,26	0,011	120 000	60 000	0,0014	628/5-2Z	–
	11	5	0,64	0,26	0,011	120 000	60 000	0,0016	638/5-2Z	–

Figura 57. Especificaciones del cojinete de bolas 628/5-2Z. Fuente: (SKF, 2018)

## Motor STP-MTR-17048



Figura 58. Motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

Especificaciones del motor paso a paso <i>SureStep™</i>				
Números de artículo	STP-MTR-17048	STP-MTR-23055	STP-MTR-23079	STP-MTR-34066
Flanje del Motor	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 34
Torque de eje detenido máximo	0,59 N-m	1,29 N-m	2,08 N-m	3,06 N-m
	83 onzas-pulgada	166 onzas-pulgada	276 onzas-pulgada	434 onzas-pulgada
	5,2 libras-pulgada	11,4 libras-pulgada	18,4 libras-pulgada	27,1 libras-pulgada
Inertia del rotor	0,000068 kg-m <sup>2</sup>	0,000027 kg-m <sup>2</sup>	0,000047 kg-m <sup>2</sup>	0,00014 kg-m <sup>2</sup>
	0,45 oz-in <sup>2</sup>	1,483 oz-in <sup>2</sup>	2,596 oz-in <sup>2</sup>	7,66 oz-in <sup>2</sup>
	0,00006 lb-in-s <sup>2</sup>	0,00024 lb-in-s <sup>2</sup>	0,00042 lb-in-s <sup>2</sup>	0,0012 lb-in-s <sup>2</sup>
Corriente nominal	2,0 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase
Angulo del paso básico	1,8° (motores bifásicos con cable con conector)			
Peso	210 gramos 0,7 lbs	457 gramos 1,50 lbs	1 Kg 2,2 lbs	1,17 Kg 3,85 lbs
Tolerancia del eje	0,0508 mm o 0,002 pulgadas			
Juego radial del eje @ fuerza de 1 libra	0,0254 mm o 0,001 pulgadas máximas			
Perpendicularidad	0,0762 mm o 0,003 pulgadas			
Concentricidad	0,0508 mm o 0,002 pulgadas			
Temperatura de operación	-20 °C a 50 °C (La temperature externa del motor debe mantenerse abajo de 100 °C (212 °F))			
Fuerza máxima radial	1,82 Kg o 6 lbs	4,57 Kg o 15 lbs	4,57 Kg o 15 lbs	11,89 Kg o 39 lbs
Fuerza máxima axial	1,82 Kg o 6 lbs	3,96 Kg o 13 lbs	3,96 Kg o 13 lbs	7,62 Kg o 25 lbs
Clase de aislación	Clase B 130 °C			
Aprobación de Agencia	CE (cumple con EN55014-1 (1993) y EN60034-1.5.11)			
Cable de extensión (motor al accionamiento)	6 metros o 20 pies - Número de artículo STP-EXT-020			

Figura 59. Especificaciones de motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

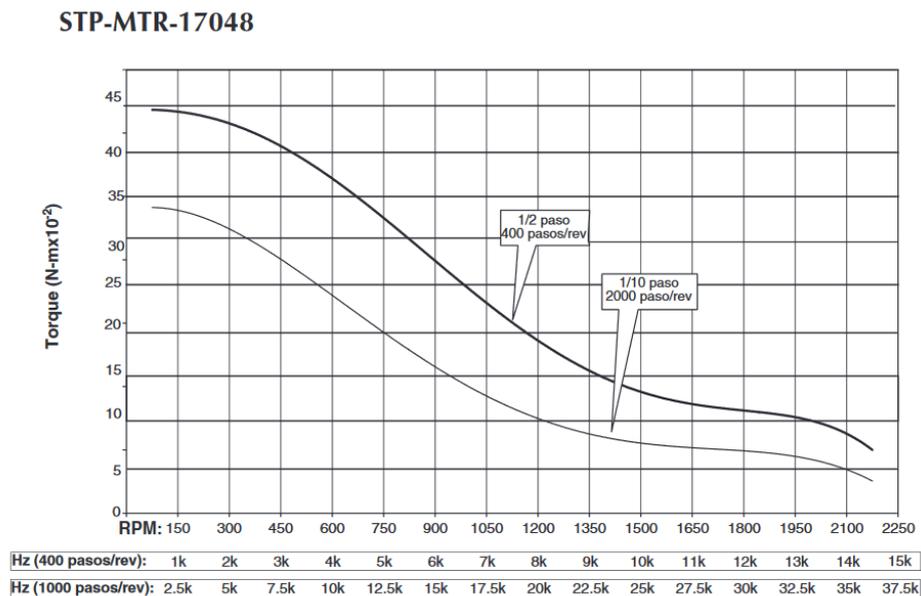


Figura 60. Curvas de funcionamiento de motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

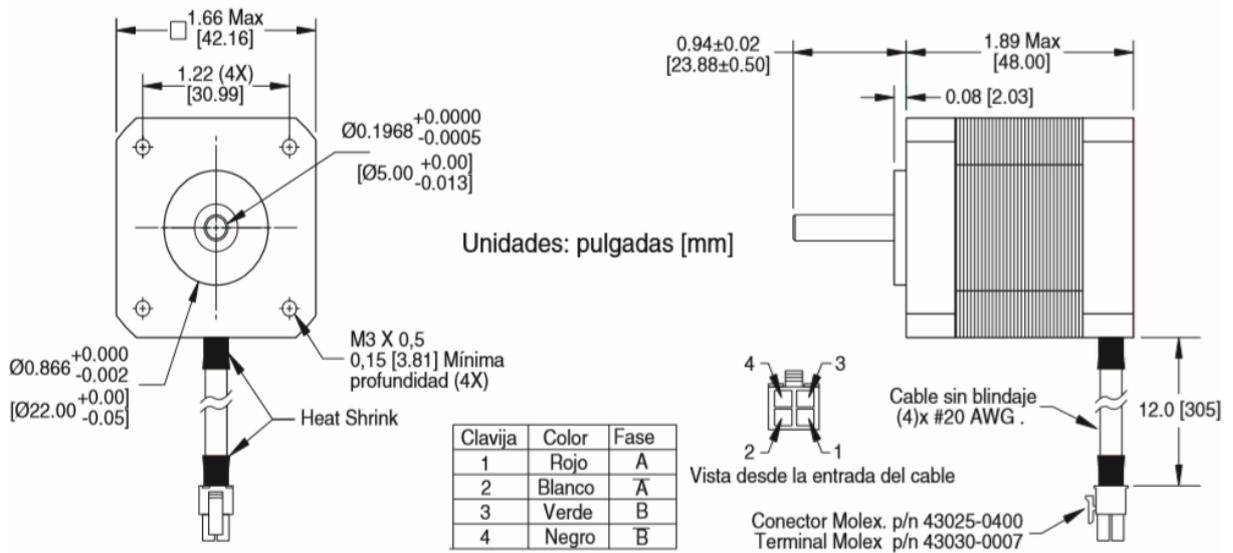


Figura 61. Dimensiones de motor paso a paso NEMA 17 STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

## Fuente de poder STP-PWR-3204



Figura 62. Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

<b>Especificaciones de la fuente de poder <i>SureStep</i><sup>TM</sup></b>	
<b>Número de artículo</b>	<b>STP-PWR-3204</b>
<b>Alimentación (protegida por fusible)</b>	monofásica, 120/240 VCA, 50/60 Hz, 150 VA (Fusible: 3 A, factor de forma 3AG, acción rápida)
<b>Voltajes de entrada (Seleccionado por un switch)</b>	120/240 VCA $\pm$ 10% Nota: El switch de selección de voltaje es configurado en la fábrica como para 240 VCA.
<b>Corriente de Inrush</b>	120 VCA < 12 A / 240 VCA < 14 A
<b>Salida de alimentación del motor (linear no regulada, protegida por fusible e indicador LED de energización)</b>	32 VCC @ 4 A (con carga plena) 35 VCC @ 1 A con carga 41 VCC @ sin carga (Fusible: 6 A, factor de forma 3AG, acción rápida)
<b>Salida de alimentación lógica (regulada a <math>\pm</math> 5%, sobrecarga protegida electronicamente e indicador LED de energización)</b>	5 VCC @ 500 mA (Sobrecarga protegida electrónicamente)
<b>Rango de temperatura de operación</b>	0 °C a 50 °C; disminuye la corriente 1,1% por grado sobre 50 °C; 70 °C máximo
<b>Rango de temperatura de almacenamiento</b>	-55 °C a 85 °C
<b>Humedad relativa</b>	95% (sin condensación) máximo
<b>Método de enfriamiento</b>	Convección natural (monte la fuente sobre una superficie metálica, si es posible)
<b>Dimensiones</b>	4 x 7 x 3¼ pulgadas
<b>Montaje</b>	Use cuatro (4) tornillos #8 or #10 para montar en cualquiera de los lados de la placa.
<b>Peso</b>	2 Kg o 6.5 lbs
<b>Conexiones</b>	Terminales de tornillos
<b>Aprobación de agencias</b>	UL, CSA y CE

**Figura 63. Especificaciones de la Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007)**

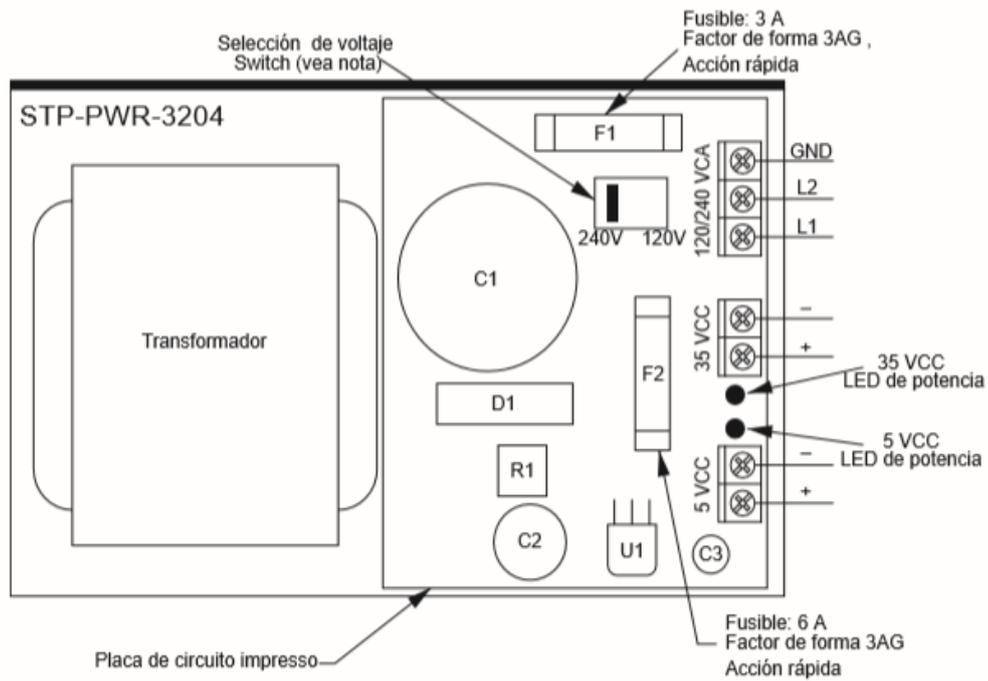


Figura 64. Vista superior Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

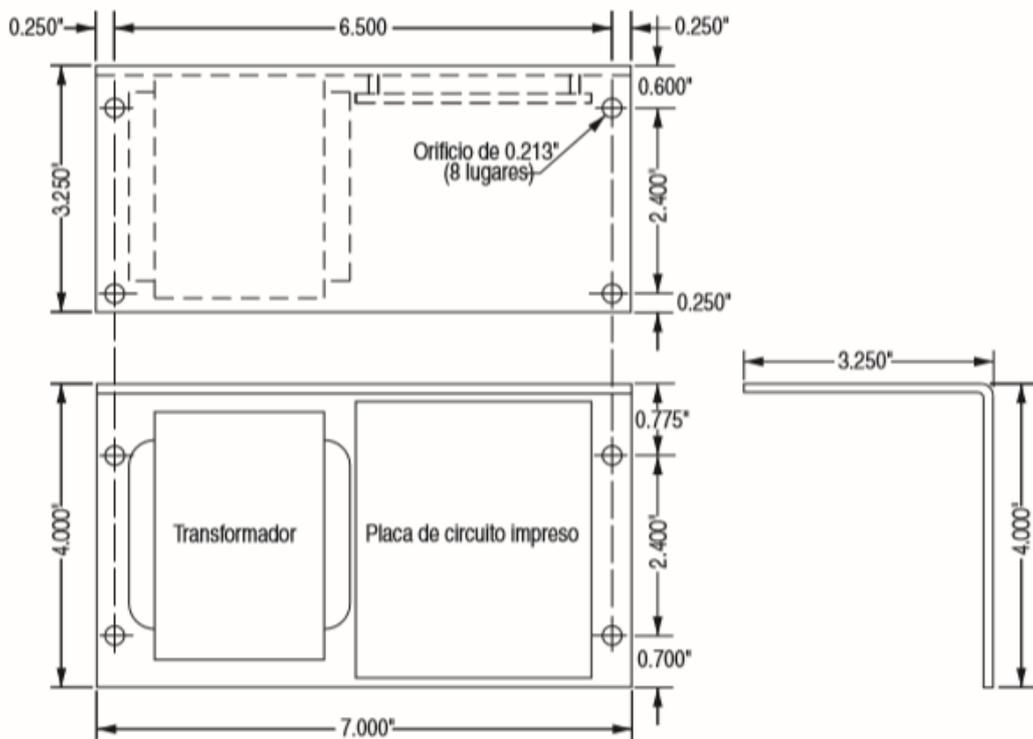


Figura 65. Base para Fuente de poder STP-PWR-3204. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

# Accionamiento STP-DRV-4035

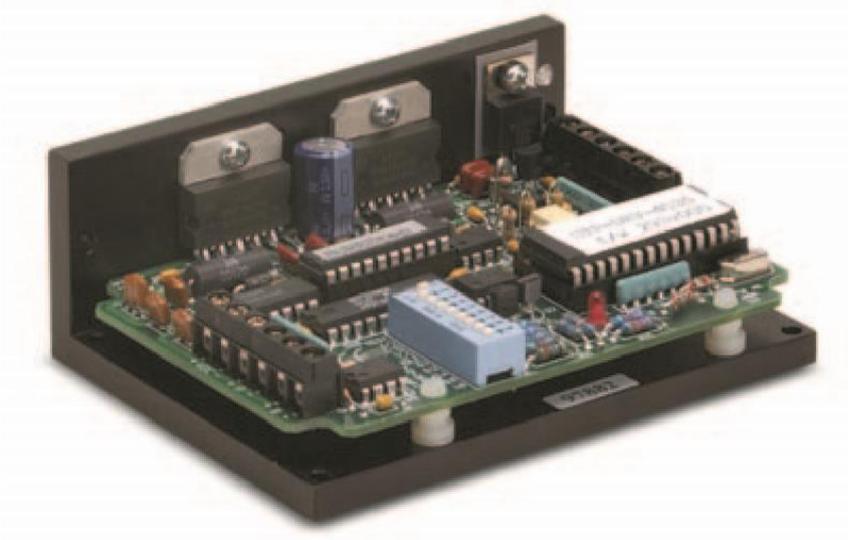


Figura 66. Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

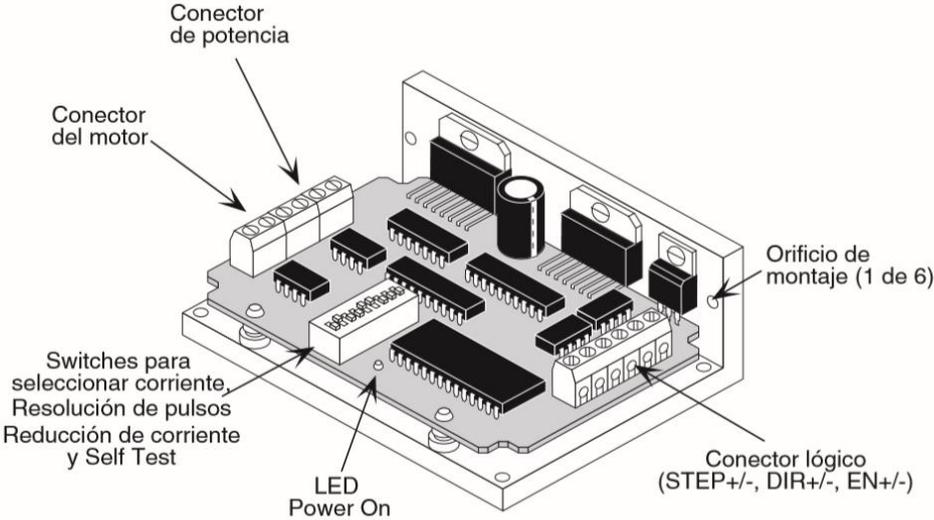


Figura 67. Esquema de Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

Especificaciones del accionamiento <i>SureStep</i> <sup>TM</sup>		
<b>Número de artículo</b>	STP-DRV-4035	
<b>Entrada (con el LED Power encendido)</b>	12-42 VCC (incluyendo el voltaje de ripple u ondulación)	
<b>Salida de corriente</b>	Corriente de salida seleccionable desde 0,4 a 3,5 A/fase (Salida máxima de potencia es de 140 W)	
<b>Controlador de corriente</b>	Controlador Bipolar de Puente Dual H (PWM de 3 estados de 20 kHz con switches MOSFET)	
<b>Señales de entrada</b>	<b>Circuito de señales de entrada</b>	Entrada con opto-acoplador de 440 Ohm de resistencia (5 a 15 mA de corriente de entrada). La señal lógica 0 es llevada a 0,8 VCC o menos. La señal lógica 1 es una entrada de 4 VCC o más grande
	<b>Señal de pulso</b>	Los pulsos del motor en el lado de caída del pulso y el ancho de pulso es de 0,5 microsegundos
	<b>Señal de dirección</b>	Debe cambiar por lo menos 2 microsegundos antes de que sea enviado un pulso de paso
	<b>Señal Enable</b>	La señal lógica 0 corta la corriente al motor (la corriente de salida es permitida con conexión o señal lógica 1)
<b>Funciones seleccionables del DIP Switch</b>	<b>Self Test</b>	Off u On (usa un medio paso para girar 1/2 revolución en cada dirección a 100 pasos/segundo)
	<b>Micropasos</b>	400 (200x2), 1,000 (200x5), 2,000 (200x10), or 10,000 (200x50) pasos/rev
	<b>Reducción de corriente</b>	0% or 50% de reducción (Ajuste de corriente de eje detenido está activada si el motor está detenido por 1 segundo o más)
	<b>Configuración de corriente</b>	0,4 a 3,5 A/fase con 32 niveles de selección
<b>Método de enfriamiento del accionamiento</b>	Convección natural (monte el accionamiento en una superficie metálica si es posible)	
<b>Dimensiones</b>	3 x 4 x 1,5 pulgadas	
<b>Montaje</b>	Use 4 tornillos #4 para montar el el lado mas ancho o 2 tornillos en el lado mas delgado)	
<b>Conectores</b>	Bloques terminales con tornillos con alambre 18 AWG máximo	
<b>Peso</b>	264 gramos o 9,3 onzas	
<b>Temperatura de operación del chasis</b>	0° C a 55° C recomendado, 70° C máximo(use un ventilador si fuera necesario)	
<b>Aprobaciones de agencias</b>	CE (cumple con EN55011A y EN50082-1 (1992))	

**Figura 68. Especificaciones de Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007)**

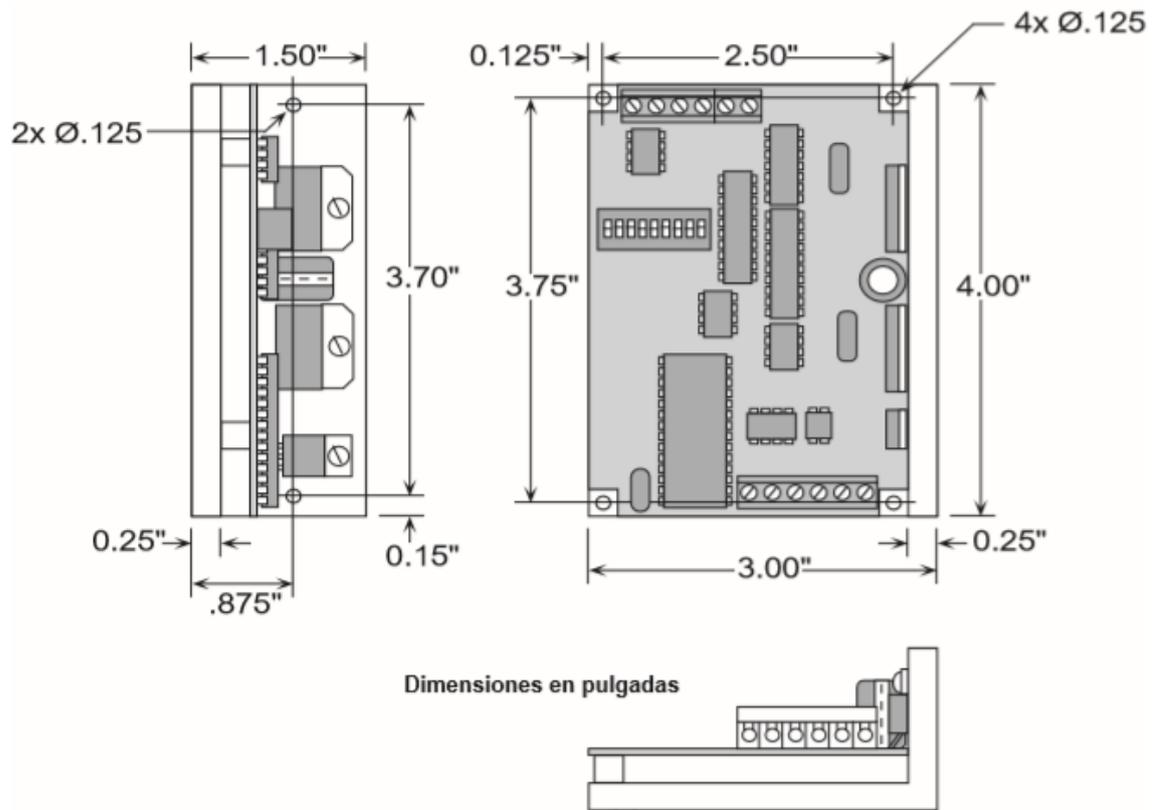


Figura 69. Dimensiones del Accionamiento STP-DRV-4035. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

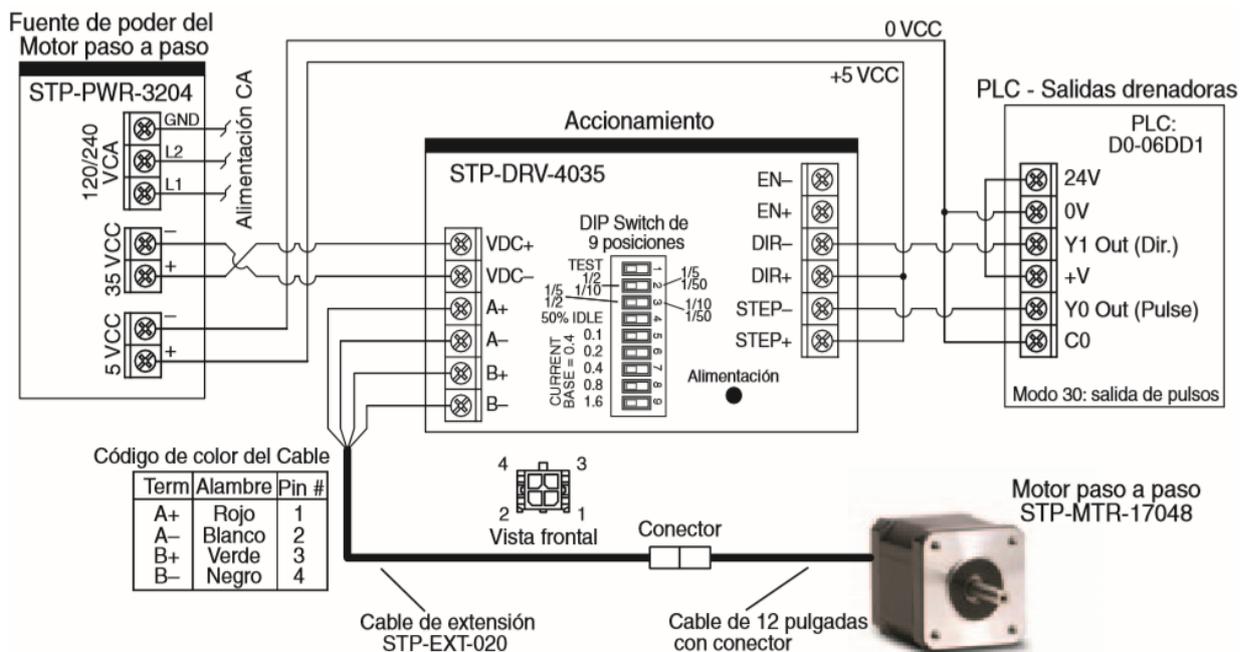


Figura 70. Esquema de conexiones del sistema del motor paso a paso STP-MTR-17048. Fuente: (AutomationDirect, 2007)

## PLC

PLCs y módulos compatibles <i>DirectLOGIC</i> con <i>SureStep</i>	
<b>PLCs DL05</b>	
<b>D0-05AD</b>	PLC DL05, 8 entradas y 6 salidas CC, alimentación 110/220VCA. 8 entradas, 90-120 VCA, 2 comunes aislados. 6 salidas, 6-27 VCC drenadoras, 1,0 A/punto. máx. 2 salidas son configurables para salidas de tren de pulsos con dirección CW/CCW o salidas de paso y pulso de dirección independiente hasta 7KHz (0,5A/pto.).
<b>D0-05DD</b>	PLC DL05, 8 entradas y 6 salidas CC, alimentación 110/220VCA. 8 entradas 12-24 VCC, drenadoras y surtidoras, 2 comunes aislados. 6 salidas, 6-27 VCC drenadoras, 1.0A/punto. máx. 2 salidas son configurables para salidas de tren de pulsos con dirección CW/CCW o salidas de paso y pulso de dirección independiente hasta 7KHz (0.5A/pto.).(No disponibles cuando se usan entradas de alta velocidad).
<b>D0-05DD-D</b>	PLC DL05, 8 entradas y 6 salidas CC, alimentación 12/24VVC. 8 entradas 12-24 VCC, drenadoras y surtidoras, 2 comunes aislados. 6 salidas, 6-27 VCC drenadoras, 1,0A/punto. máx. 2 salidas son configurables para salidas de tren de pulsos con dirección CW/CCW o salidas de paso y pulso de dirección independiente hasta 7KHz (0,5A/pto.). (No disponibles cuando se usan entradas de alta velocidad).

**Figura 71. Especificaciones de PLC. Fuente: (AutomationDirect, 2007)**

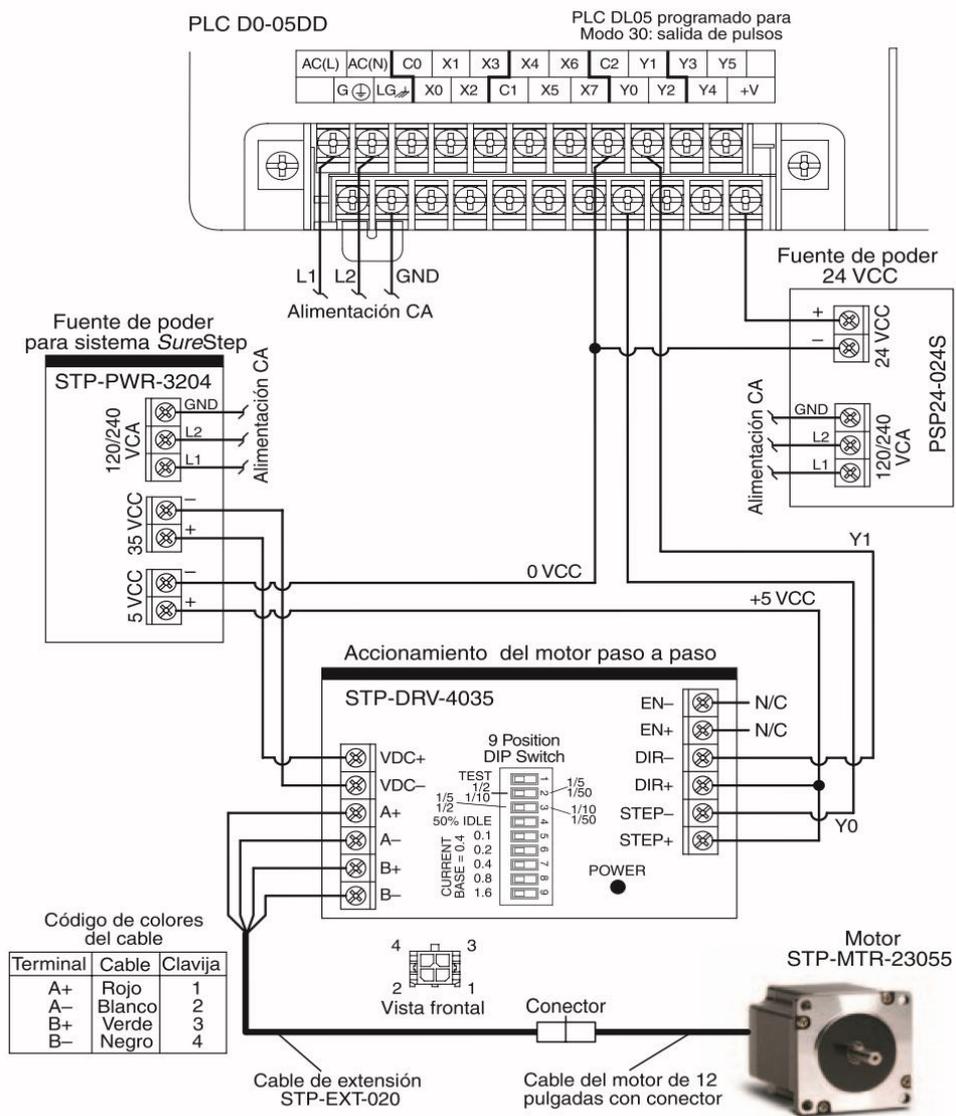
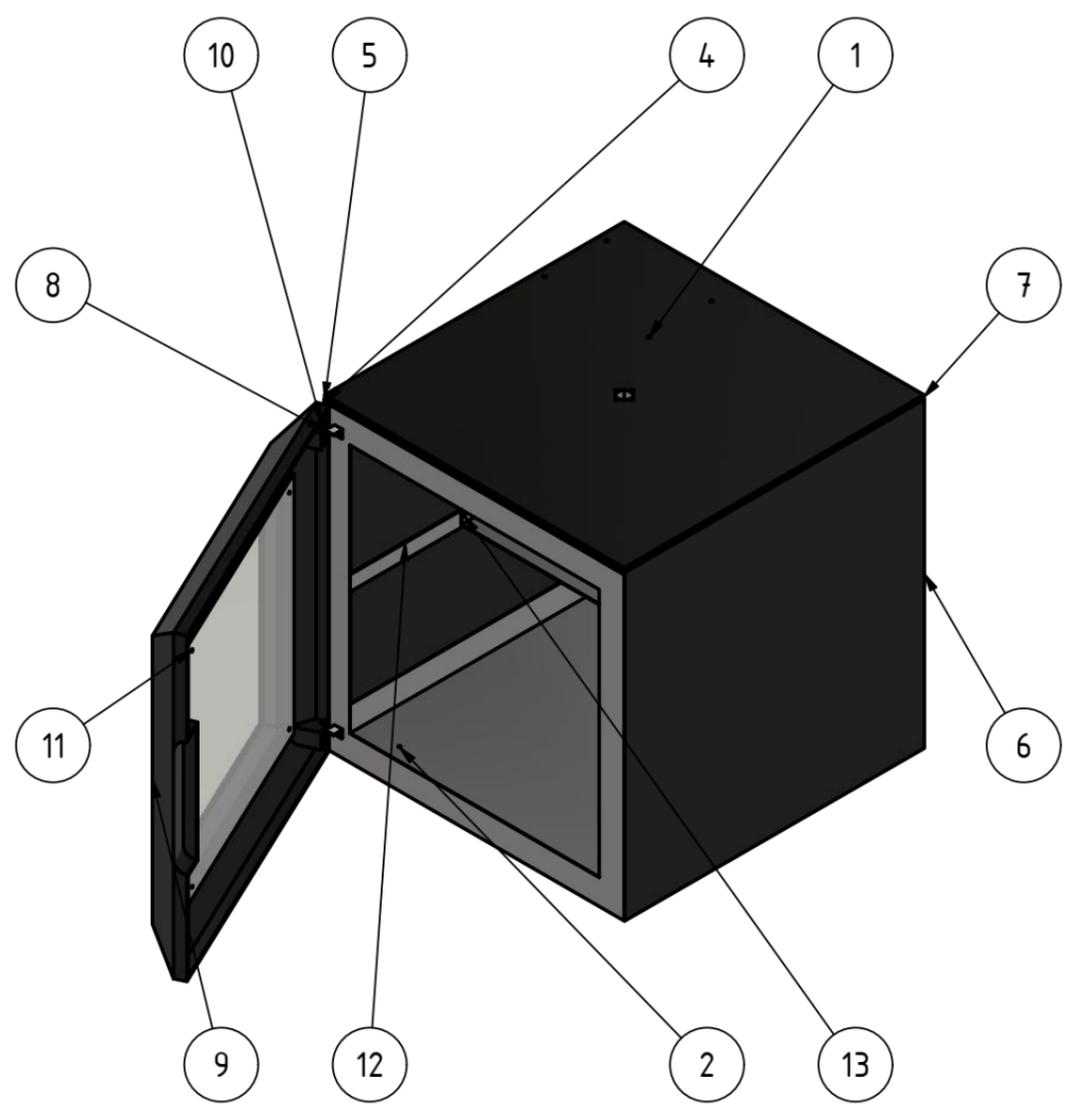
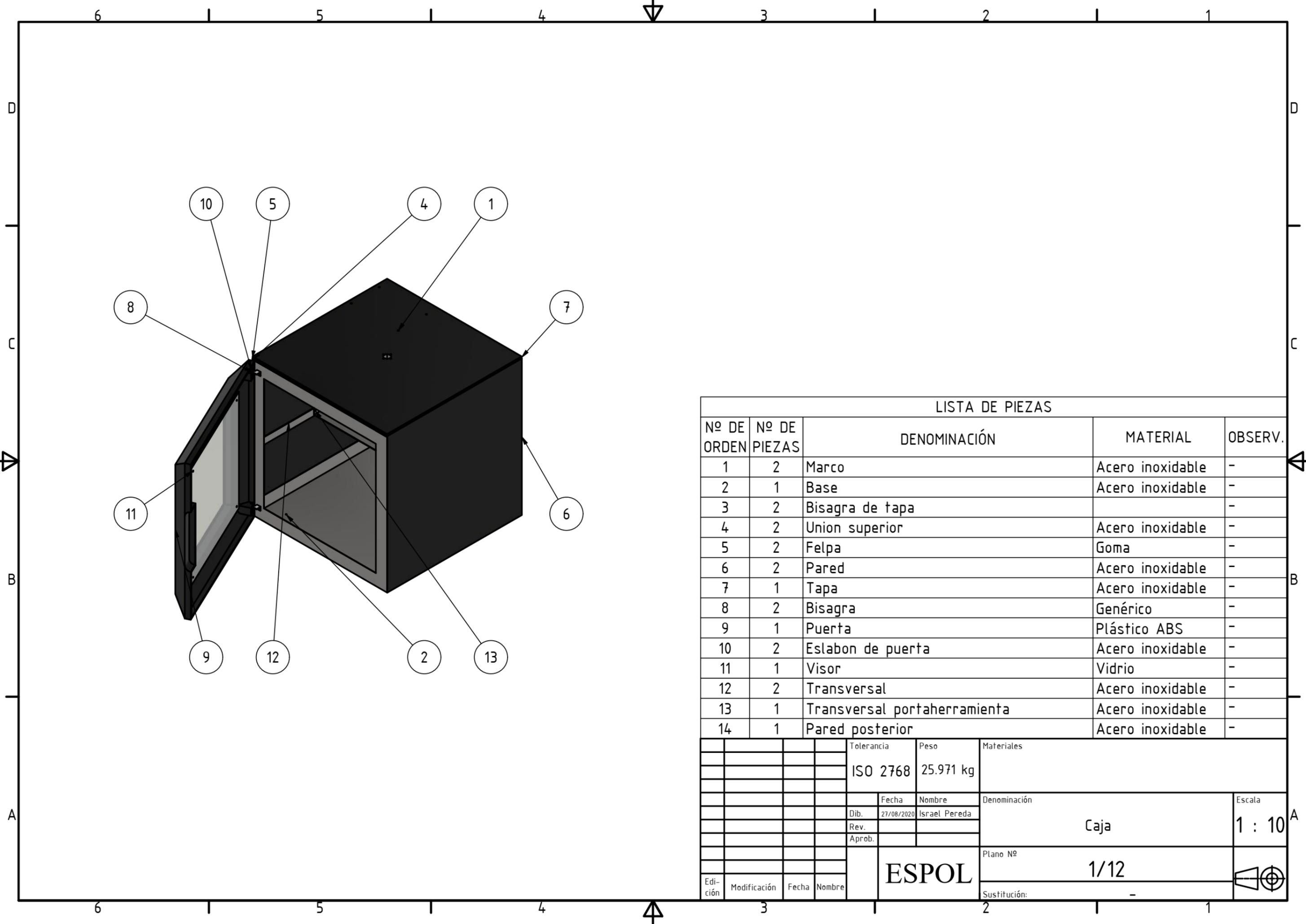


Figura 72. Esquema de conexiones del sistema del motor paso a paso STP-MTR-23055.  
Fuente: (AutomationDirect, 2007)



LISTA DE PIEZAS				
Nº DE ORDEN	Nº DE PIEZAS	DENOMINACIÓN	MATERIAL	OBSERV.
1	2	Marco	Acero inoxidable	-
2	1	Base	Acero inoxidable	-
3	2	Bisagra de tapa		-
4	2	Union superior	Acero inoxidable	-
5	2	Felpa	Goma	-
6	2	Pared	Acero inoxidable	-
7	1	Tapa	Acero inoxidable	-
8	2	Bisagra	Genérico	-
9	1	Puerta	Plástico ABS	-
10	2	Eslabon de puerta	Acero inoxidable	-
11	1	Visor	Vidrio	-
12	2	Transversal	Acero inoxidable	-
13	1	Transversal portaherramienta	Acero inoxidable	-
14	1	Pared posterior	Acero inoxidable	-

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	25.971 kg		
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Caja
				Rev.			
				Aprob.			
							Plano Nº
							1/12
							Sustitución:
							-
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	<b>ESPOL</b>		Escala 1 : 10	



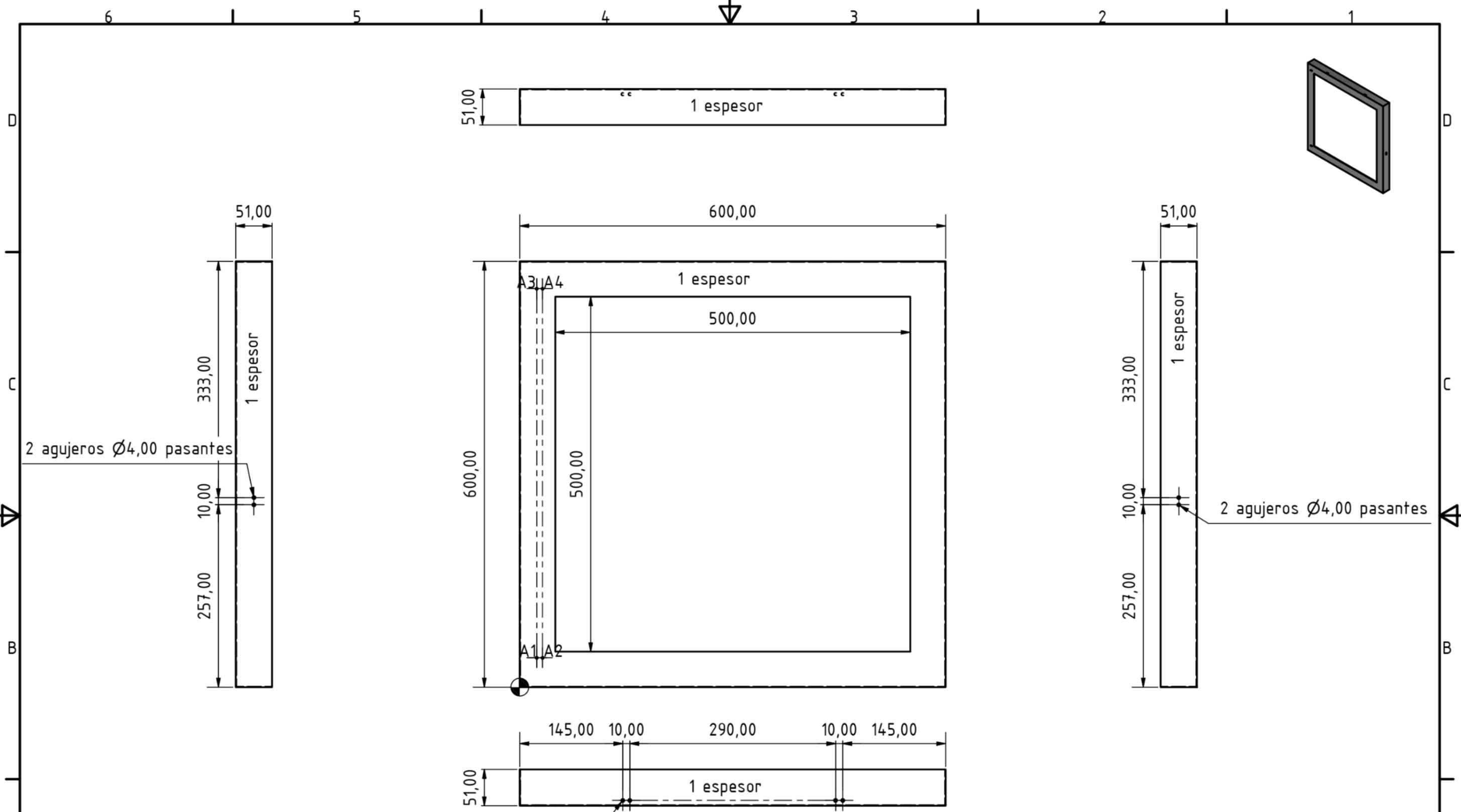


TABLA DE AGUJEROS

AGUJERO	X	Y	Ø
A1	24,00	41,50	Ø3,00 pasante
A2	32,00	41,50	Ø3,00 pasante
A3	24,00	561,50	Ø3,00 pasante
A4	32,00	561,50	Ø3,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	1.837 kg	Acero inoxidable	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib. 27/08/2020	Israel Pereda	Marco	1 : 5
				Rev.			
				Aprob.		Plano Nº	
				<b>ESPOL</b>		2/12	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución:	-

A

A

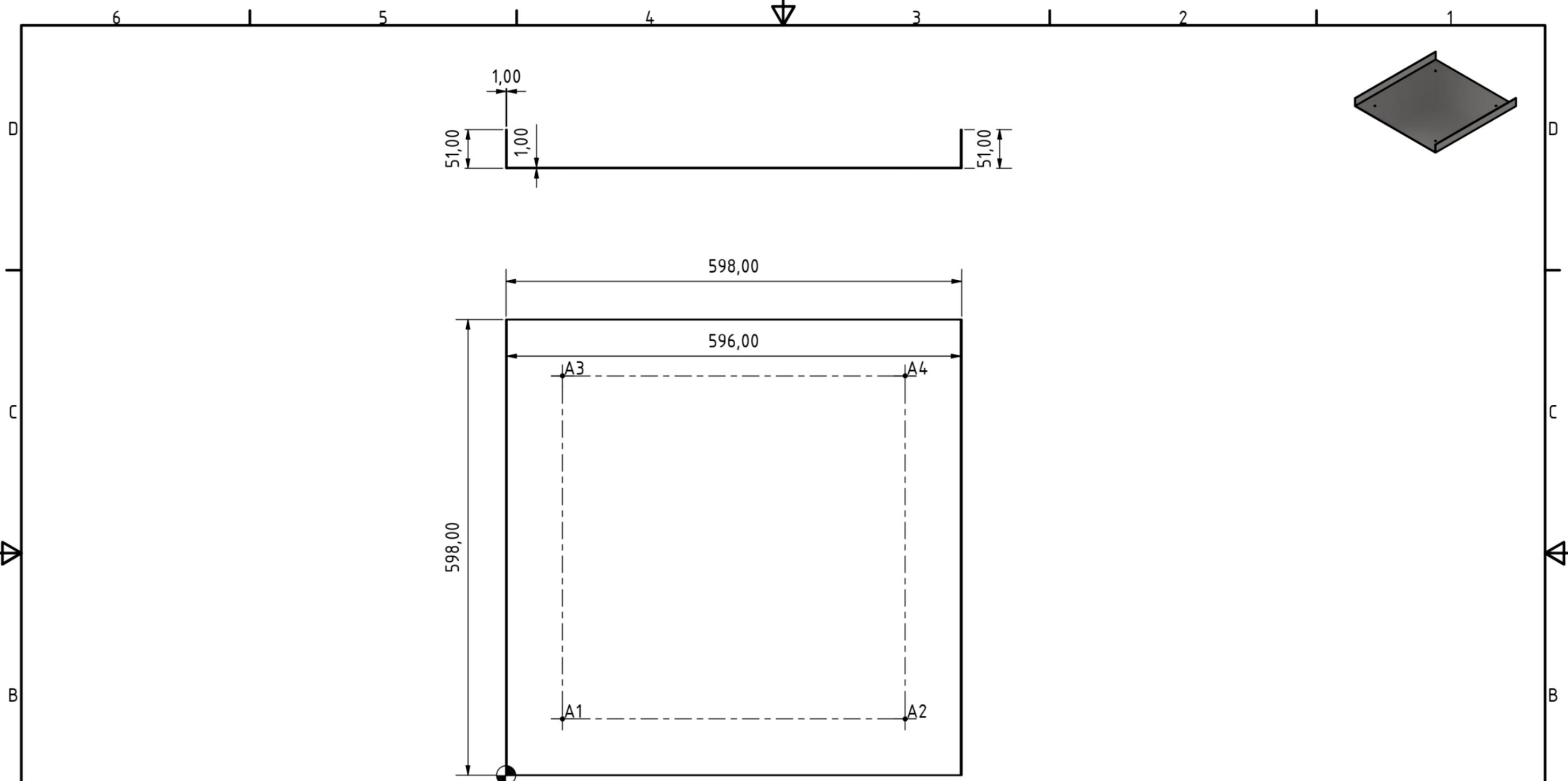
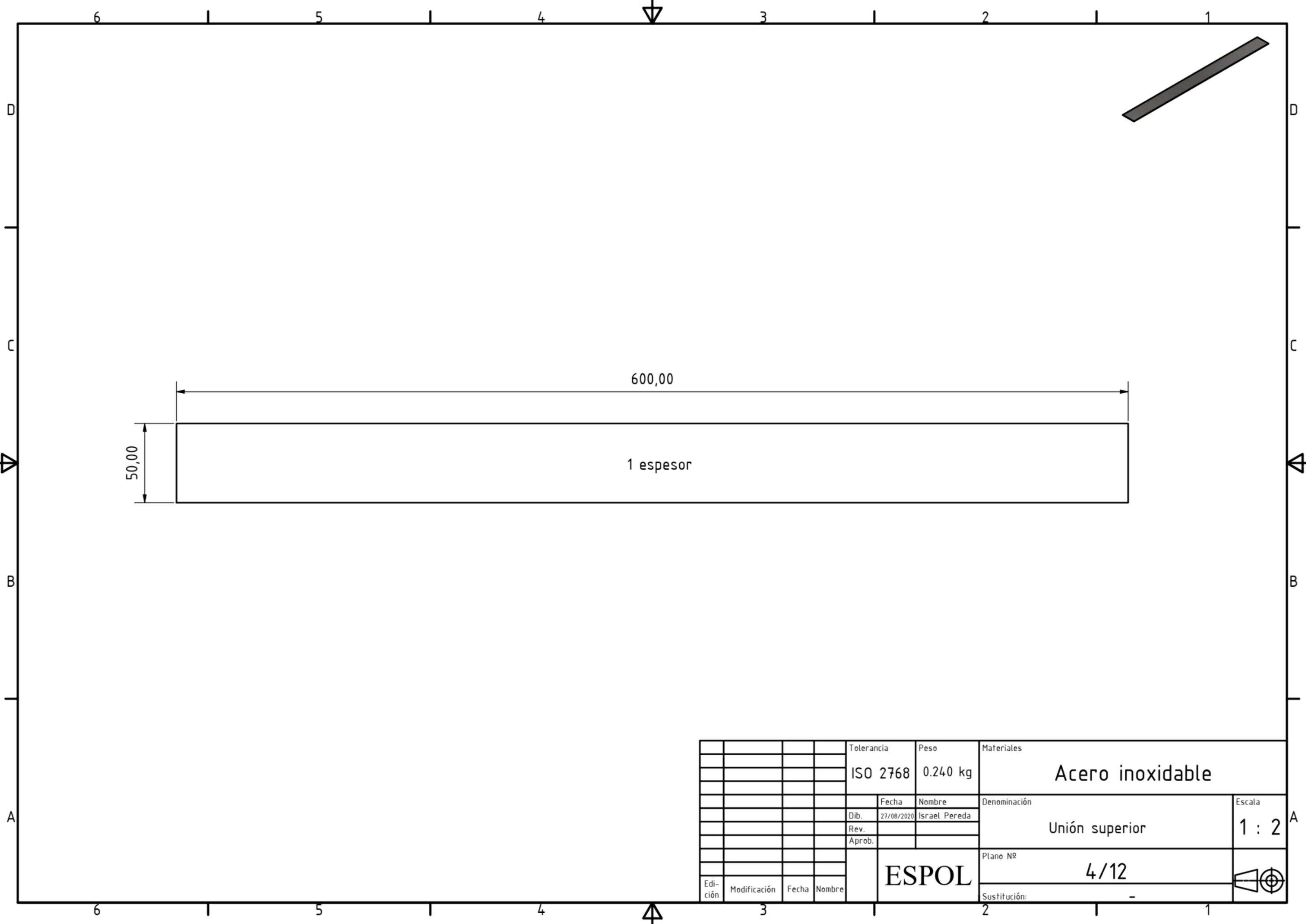


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	DESCRIPCIÓN
A1	74,00	74,00	Ø4,00 pasante
A2	524,00	74,00	Ø4,00 pasante
A3	74,00	524,00	Ø4,00 pasante
A4	524,00	524,00	Ø4,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	3.339 kg	Acero inoxidable	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Base
				Rev.			
				Aprob.			Escala
							1 : 5
						Plano Nº	
						3/12	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	ESPOL		Sustitución:	-



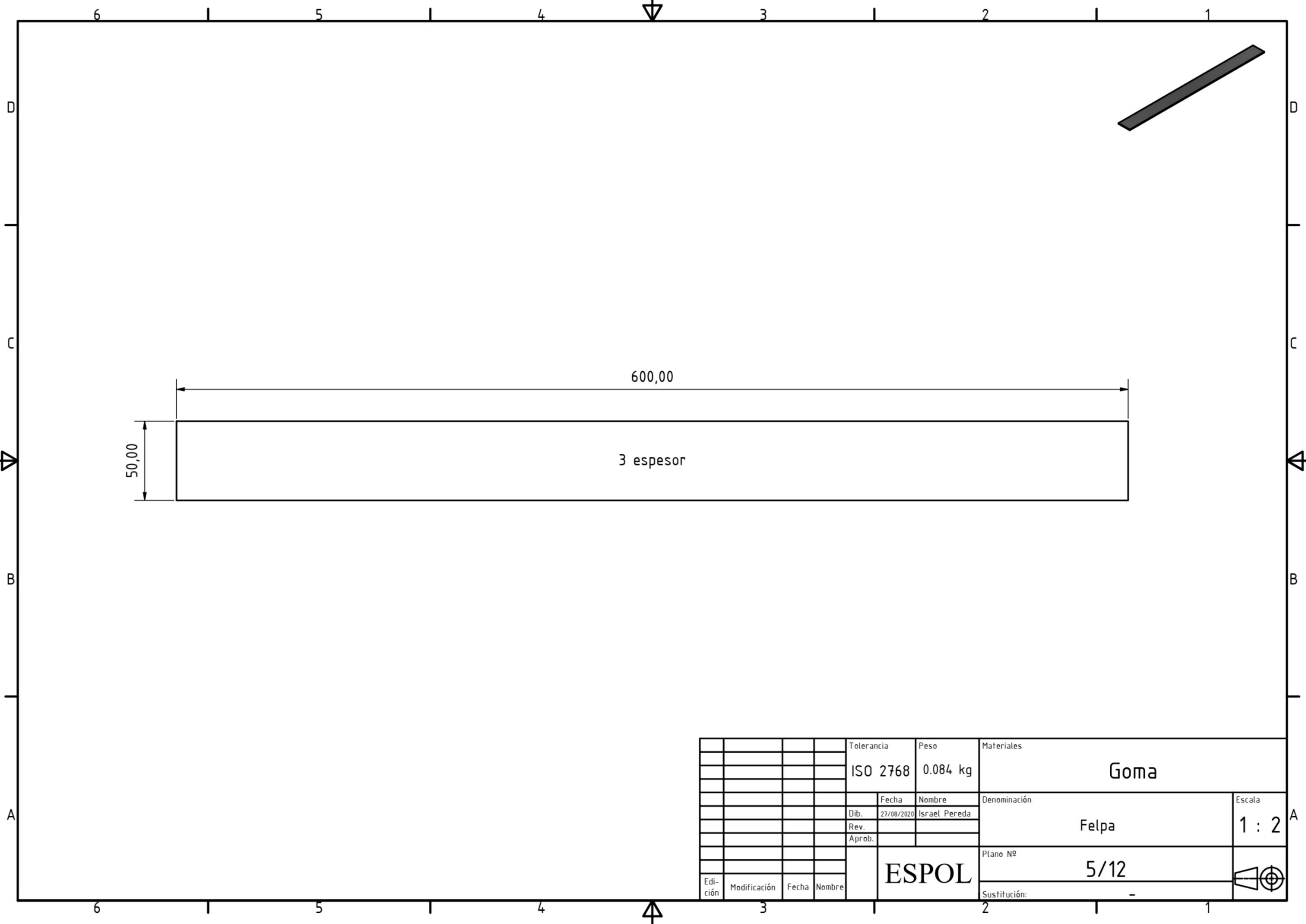
600,00

50,00

1 espesor

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.240 kg	Acero inoxidable	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Unión superior
				Rev.			
				Aprob.			
							Escala
							1 : 2
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	<b>ESPOL</b>		Plano Nº	4/12
						Sustitución:	





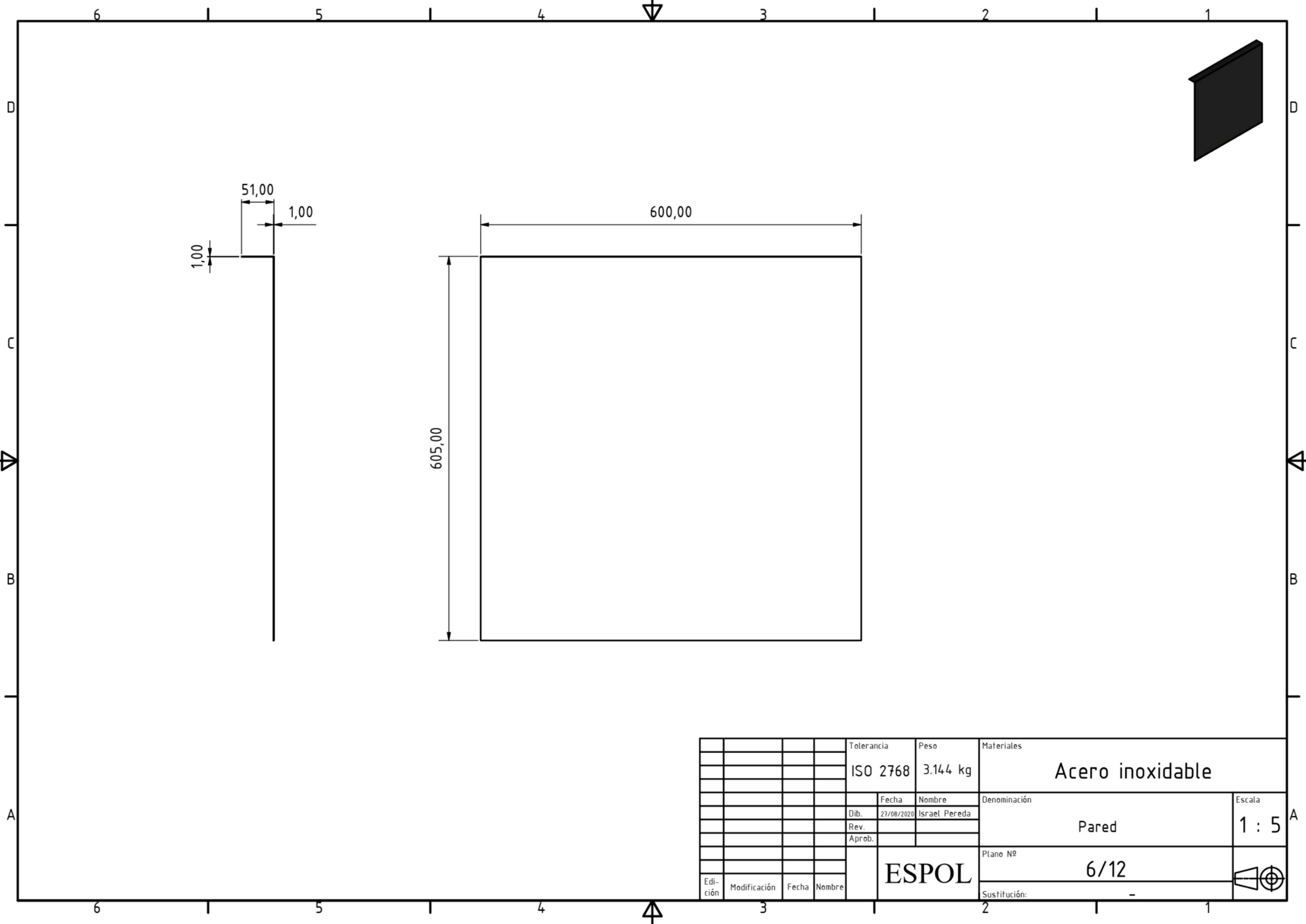
600,00

50,00

3 espesor

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.084 kg	Goma	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Felpa
				Rev.			Escala 1 : 2
				Aprob.			
							Plano Nº
							5/12
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Plano Nº	
						Sustitución: -	

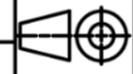


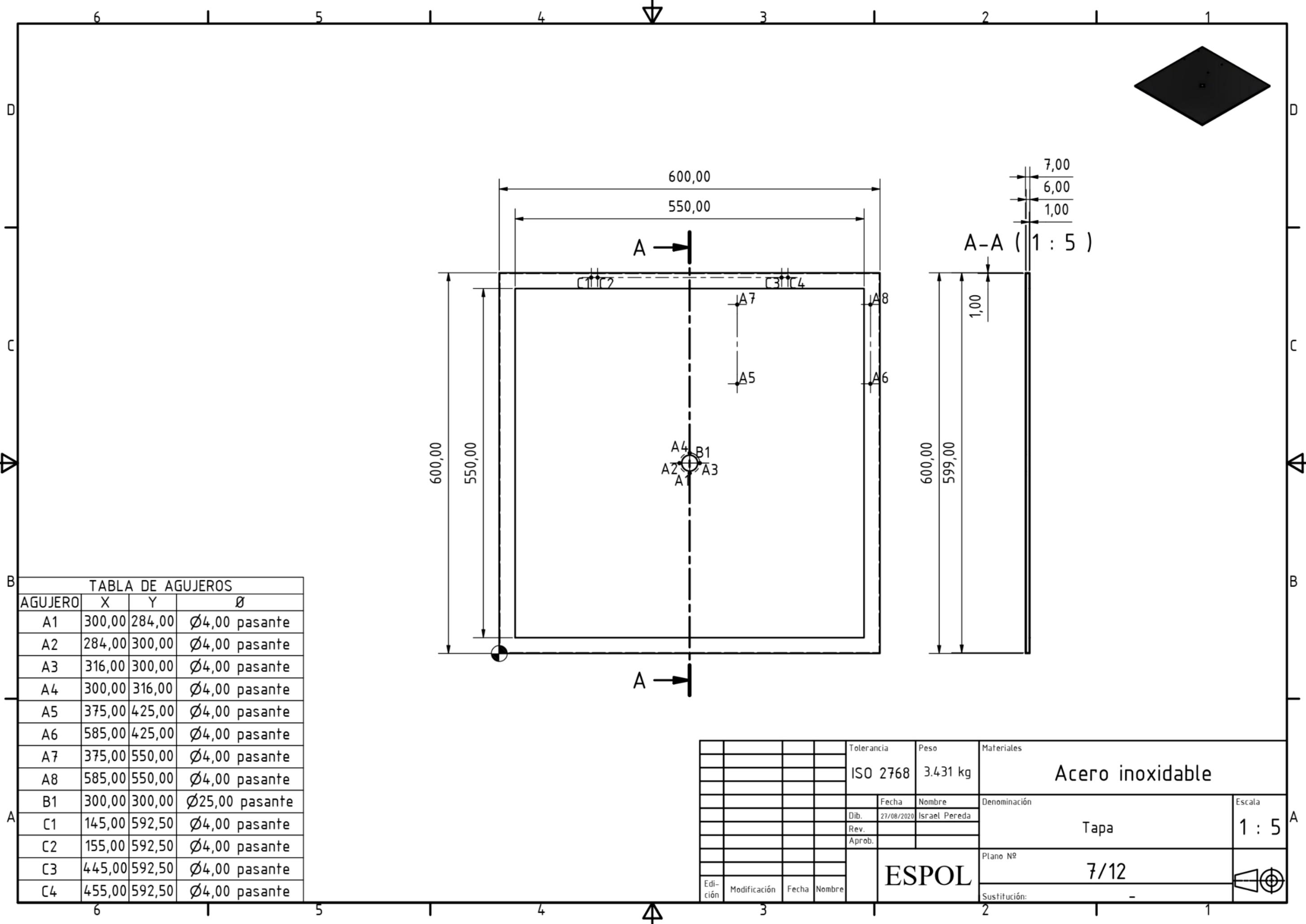


51,00  
1,00

600,00  
605,00

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	3.144 kg	Acero inoxidable	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Pared
				Rev.			
				Aprob.			Escala 1 : 5
						Plano Nº	6/12
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Sustitución:	-





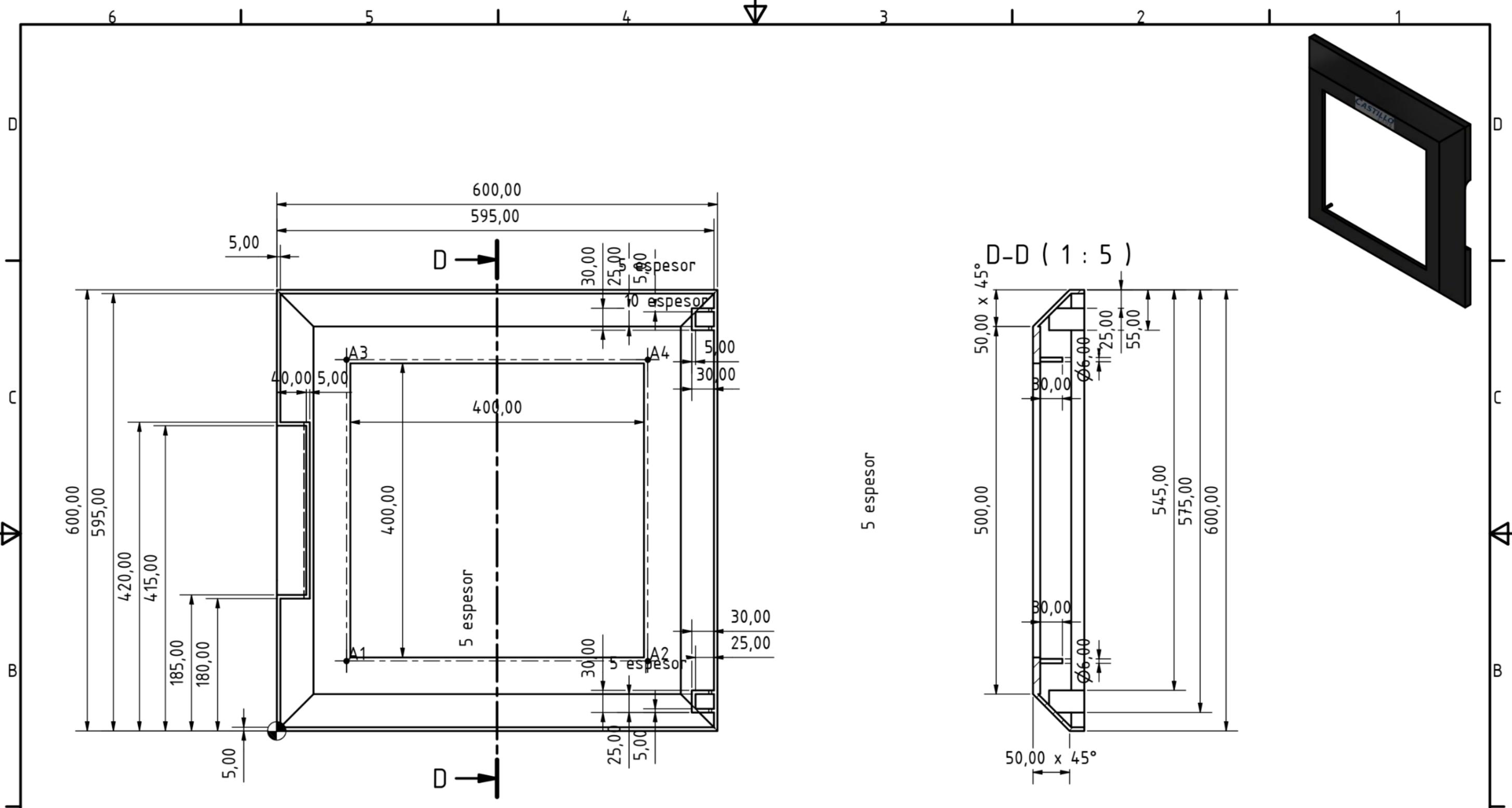
**TABLA DE AGUJEROS**

AGUJERO	X	Y	Ø
A1	300,00	284,00	Ø4,00 pasante
A2	284,00	300,00	Ø4,00 pasante
A3	316,00	300,00	Ø4,00 pasante
A4	300,00	316,00	Ø4,00 pasante
A5	375,00	425,00	Ø4,00 pasante
A6	585,00	425,00	Ø4,00 pasante
A7	375,00	550,00	Ø4,00 pasante
A8	585,00	550,00	Ø4,00 pasante
B1	300,00	300,00	Ø25,00 pasante
C1	145,00	592,50	Ø4,00 pasante
C2	155,00	592,50	Ø4,00 pasante
C3	445,00	592,50	Ø4,00 pasante
C4	455,00	592,50	Ø4,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	3.431 kg	Acero inoxidable	
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib. 27/08/2020	Israel Pereda		
				Rev.			
				Aprob.		Tapa	1 : 5
						Plano Nº	
						7/12	
						Sustitución:	

**ESPOL**





6 1 5 4 3 2 1

D

5,00

600,00

595,00

420,00

415,00

185,00

180,00

5,00

40,00

5,00

400,00

5 espesor

A3

A4

30,00

25,00

5,00

10 espesor

5,00

30,00

5,00

30,00

25,00

5 espesor

30,00

25,00

5,00

5 espesor

50,00 x 45°

50,00 x 45°

50,00

545,00

575,00

600,00

5 espesor

D-D ( 1 : 5 )

CASTILLO

D

C

B

A

TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	95,00	95,00	Ø4,00 pasante
A2	505,00	95,00	Ø4,00 pasante
A3	95,00	505,00	Ø4,00 pasante
A4	505,00	505,00	Ø4,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	2.195 kg	Plástico ABS	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Puerta
				Rev.			
				Aprob.			
						Plano Nº	8/12
						Sustitución:	-
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			

6 1 5 4 3 2 1

A

1 : 5

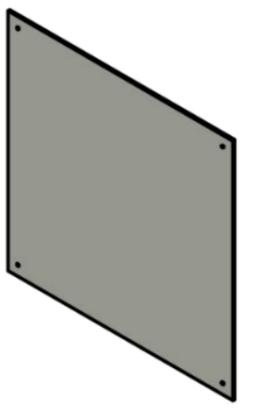
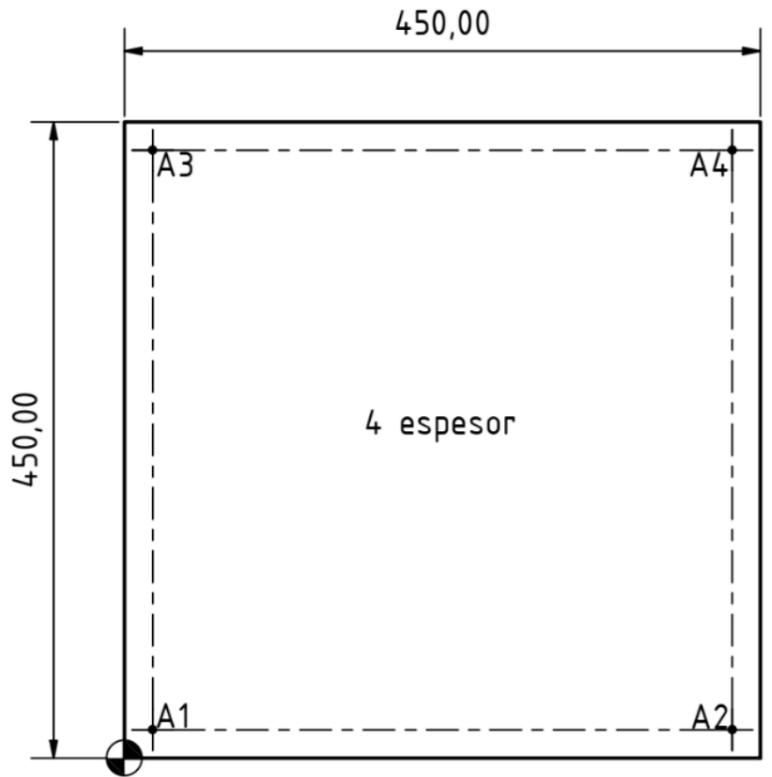
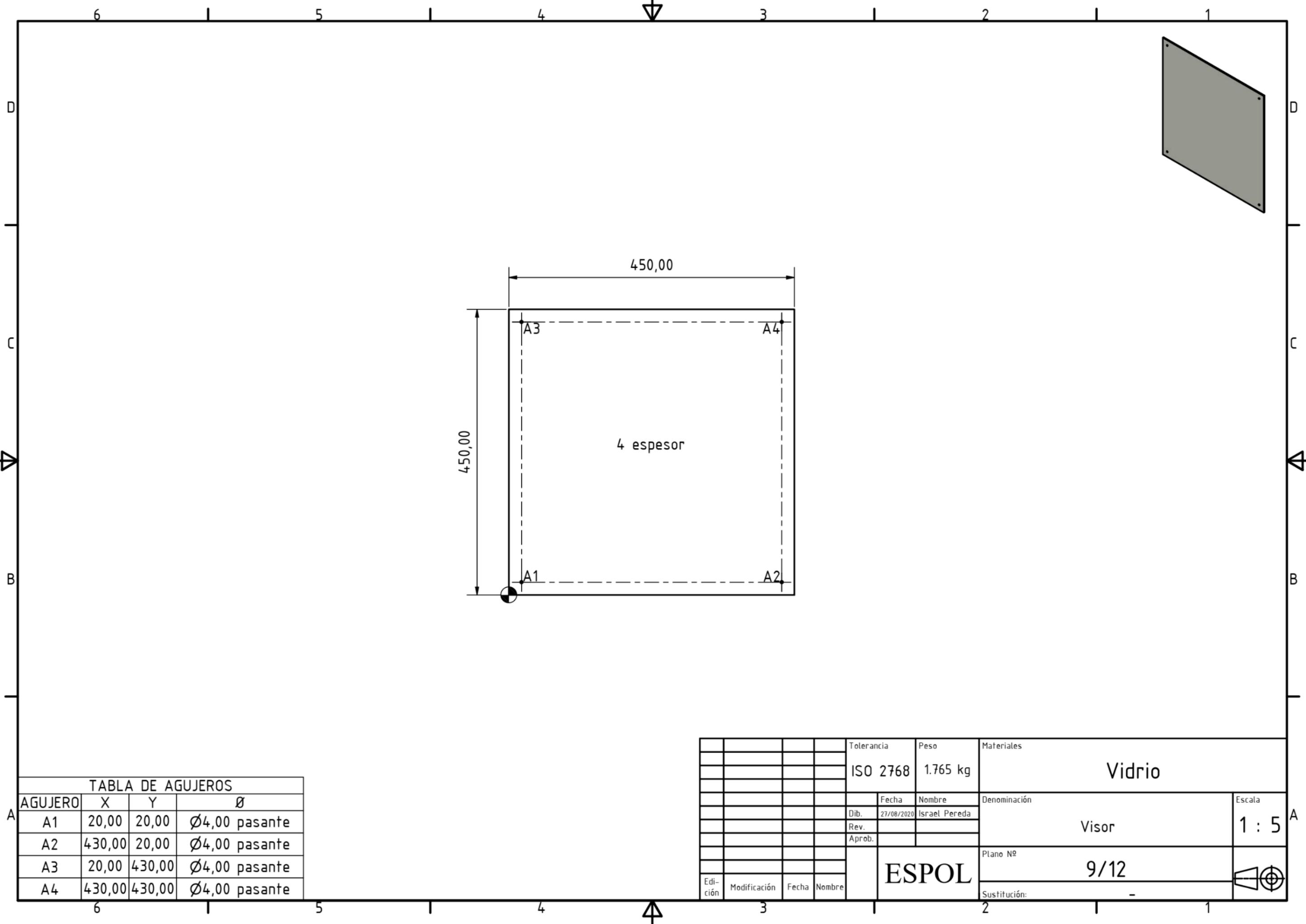


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	20,00	20,00	Ø4,00 pasante
A2	430,00	20,00	Ø4,00 pasante
A3	20,00	430,00	Ø4,00 pasante
A4	430,00	430,00	Ø4,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	1.765 kg	Vidrio	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Visor
				Rev.			
				Aprob.			Plano Nº
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	<b>ESPOL</b>		9/12	
						Sustitución: -	

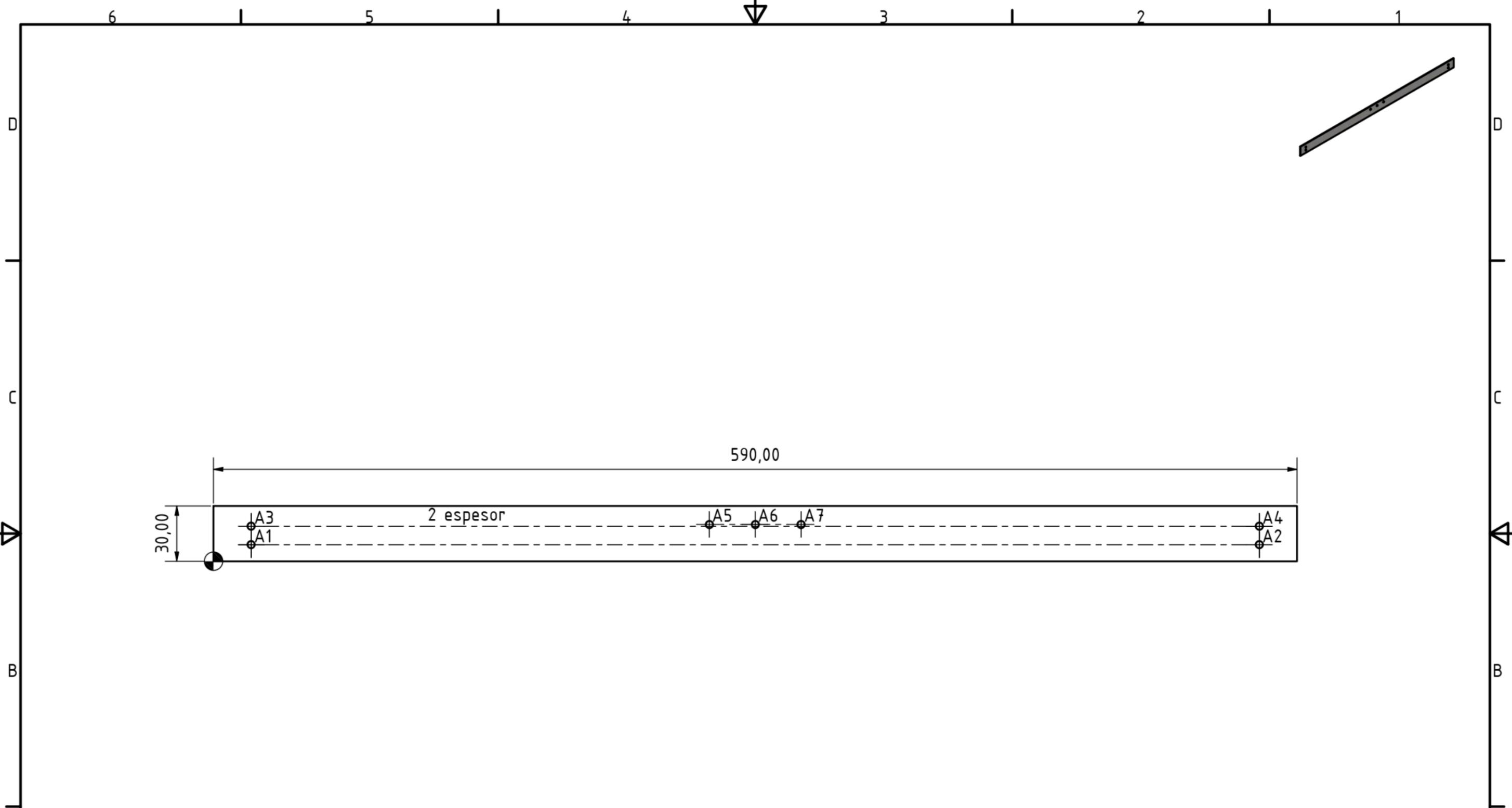


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	20,50	9,00	Ø4,00 pasante
A2	569,50	9,00	Ø4,00 pasante
A3	20,50	19,00	Ø4,00 pasante
A4	569,50	19,00	Ø4,00 pasante
A5	270,00	20,00	Ø4,00 pasante
A6	295,00	20,00	Ø4,00 pasante
A7	320,00	20,00	Ø4,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales		
				ISO 2768	0.282 kg	Acero inoxidable		
					Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Transversal	1 : 2
				Rev.				
				Aprob.			Plano Nº	
							10/12	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Plano Nº		
						Sustitución: -		

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D D

C C

B B

A A

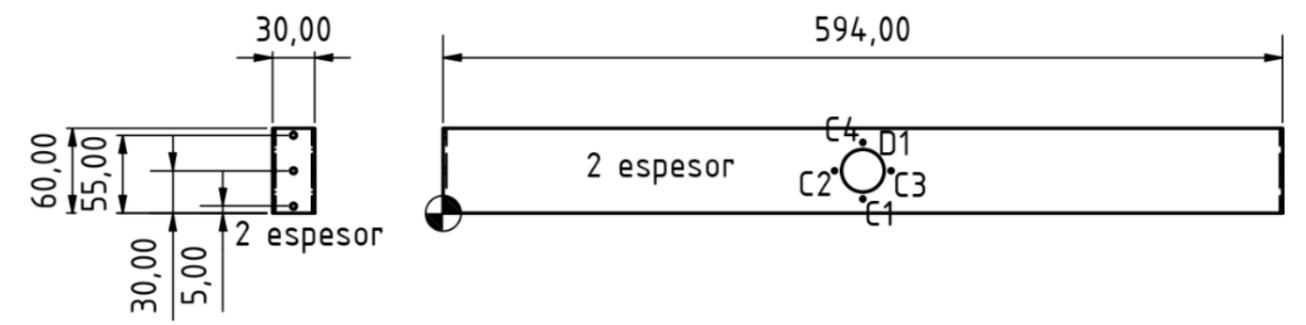
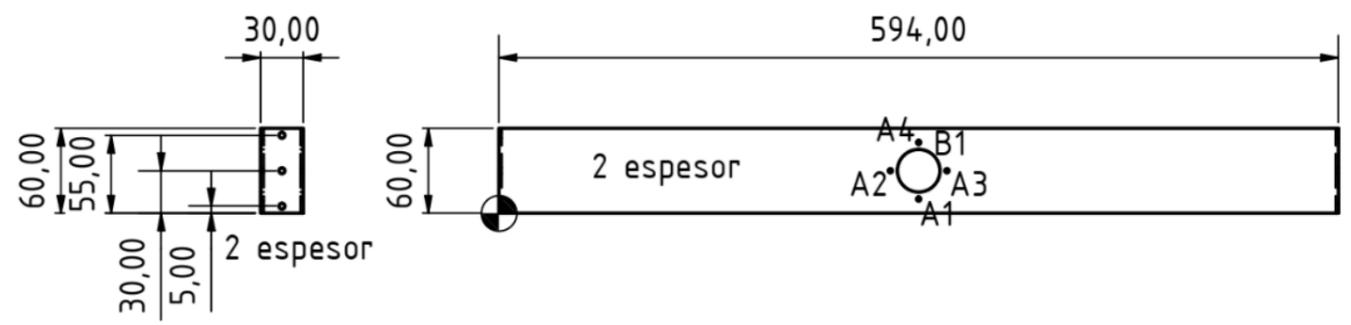
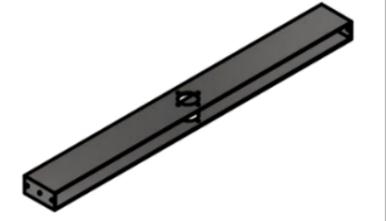
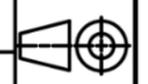


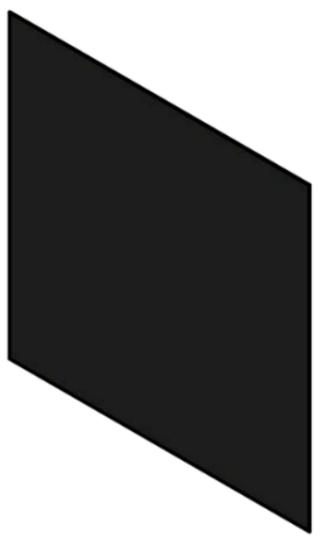
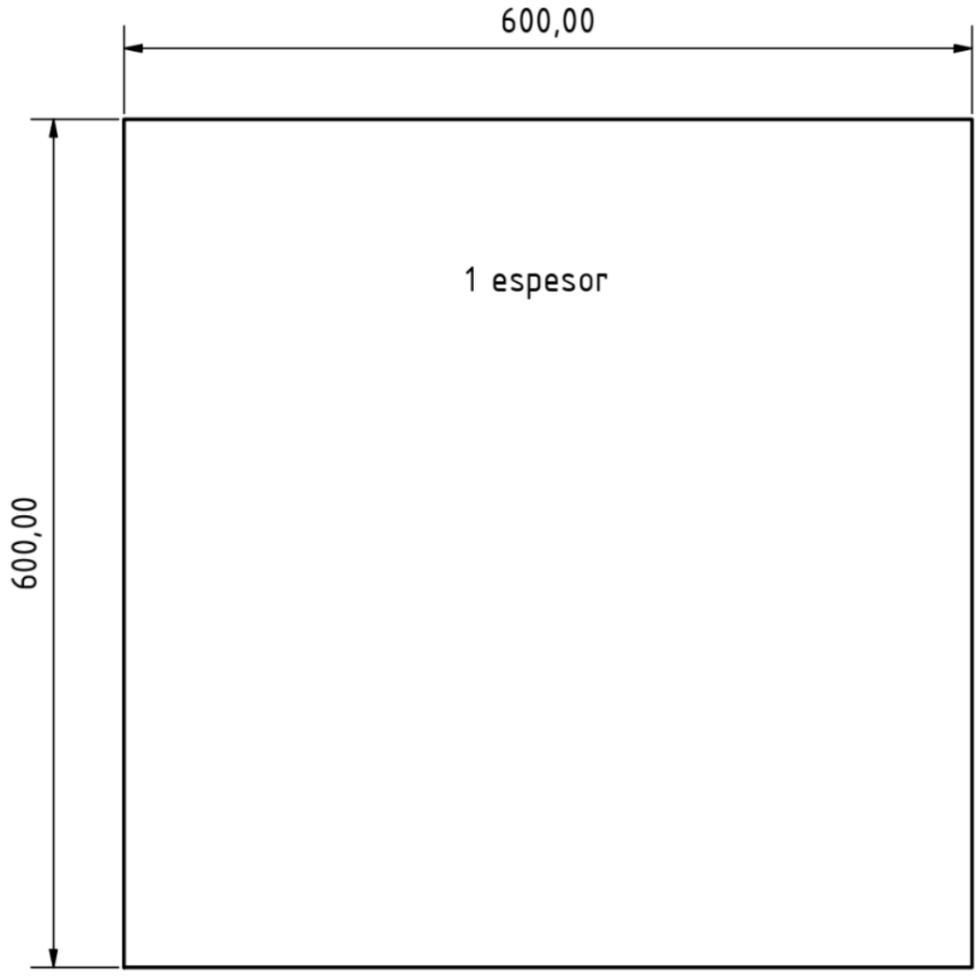
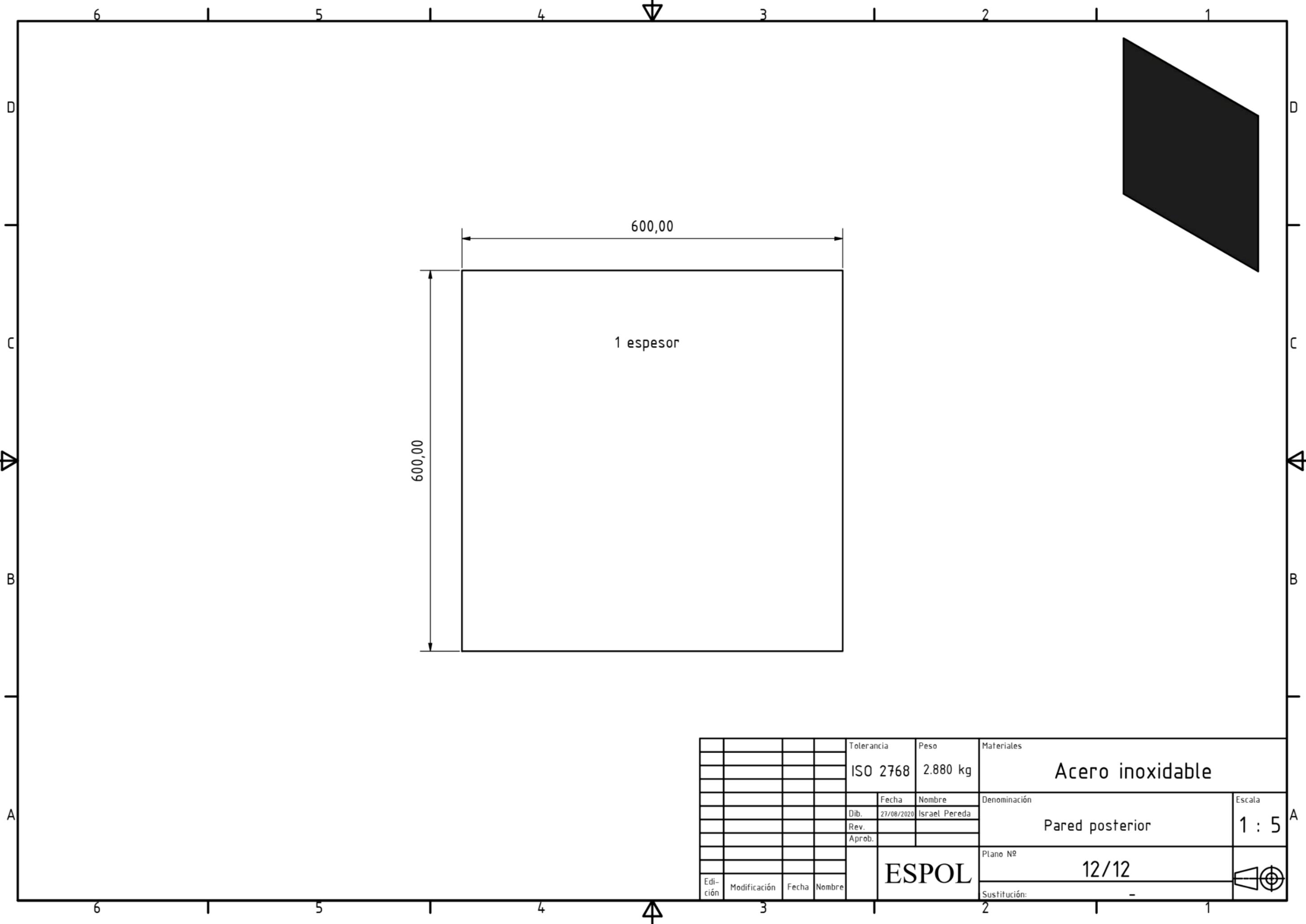
TABLA DE AGUJEROS				TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø	AGUJERO	X	Y	Ø
A1	297,00	10,00	Ø3,00 pasante	C1	297,00	10,00	Ø3,00 pasante
A2	277,00	30,00	Ø3,00 pasante	C2	277,00	30,00	Ø3,00 pasante
A3	317,00	30,00	Ø3,00 pasante	C3	317,00	30,00	Ø3,00 pasante
A4	297,00	50,00	Ø3,00 pasante	C4	297,00	50,00	Ø3,00 pasante
B1	297,00	30,00	Ø30,00 pasante	D1	297,00	30,00	Ø30,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	1.166 kg	Acero inoxidable	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Transversal portaherramienta
				Rev.			
				Aprob.			Plano Nº
							11/12
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			

A

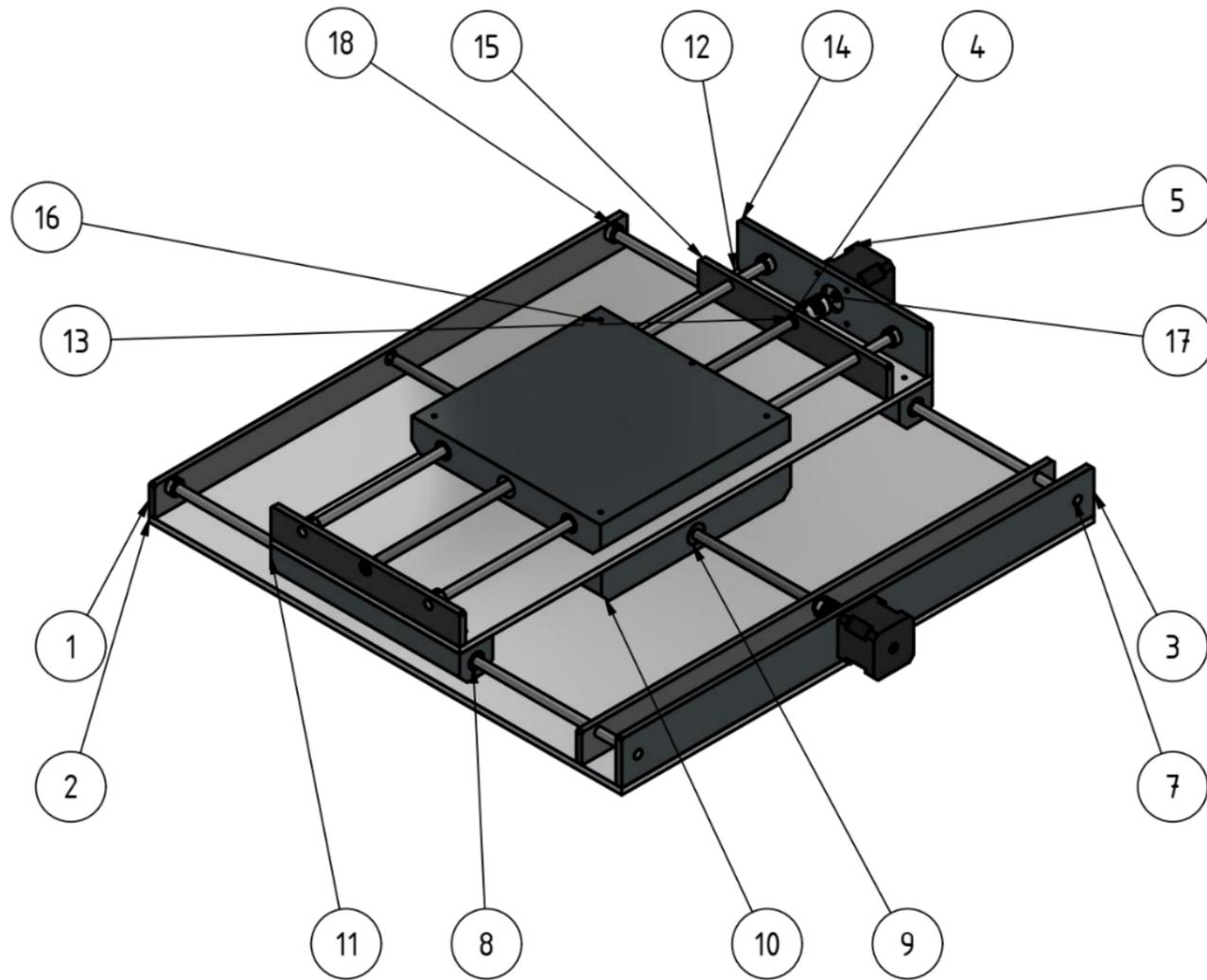


6 1 5 1 4 3 1 2 1 1



				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	2.880 kg	Acero inoxidable	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	27/08/2020	Israel Pereda	Pared posterior
				Rev.			
				Aprob.			Escala 1 : 5
						Plano Nº	12/12
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	<b>ESPOL</b>		Plano Nº	12/12
						Sustitución:	





LISTA DE PIEZAS					
Nº DE ORDEN	Nº DE PIEZAS	DENOMINACIÓN	MATERIAL	OBSERV.	
1	2	Soporte para tornillo y ejes	Aluminio 6061	-	
2	1	Base inferior	Aluminio 6061	-	
3	1	Soporte para ejes y motor	Aluminio 6061	-	
4	4	Rodamiento 628 5-2Z	Acero	-	
5	2	Nema 17 - STP-MTR-17048	Acero	-	
7	4	Eje 8mm	Acero	-	
8	8	Rodamiento lineal BBES8A	Acero	-	
9	2	Husillo SDBD 8x2.5R	Acero	-	
10	1	Bloque para husillo	Aluminio 6061	-	
11	2	Bloque para rodamientos lineales	Aluminio 6061	-	
12	1	Base superior	Aluminio 6061	-	
13	2	Tornillo de bolas SDBD 8x2.5R	Acero	-	
14	1	Soporte superior para ejes y motor	Aluminio 6061	-	
15	2	Soporte superior para ejes y tornillo	Aluminio 6061	-	
16	1	Bloque para rodamientos lineales y husillo	Aluminio 6061	-	
17	2	Acople MST 16 5x5	Aluminio 6061	-	
18	8	Collar de bloqueo T8	Acero	-	
		Tolerancia	Peso	Materiales	
		ISO 2768	16.146 kg		
		Fecha	Nombre	Denominación	Escala
		Dib. 18/08/2020	Israel Pereda	Mesa XY	1 : 5
		Rev.			
		Aprob.			
		ESPOL		Plano Nº	
				1/11	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	Sustitución: -	

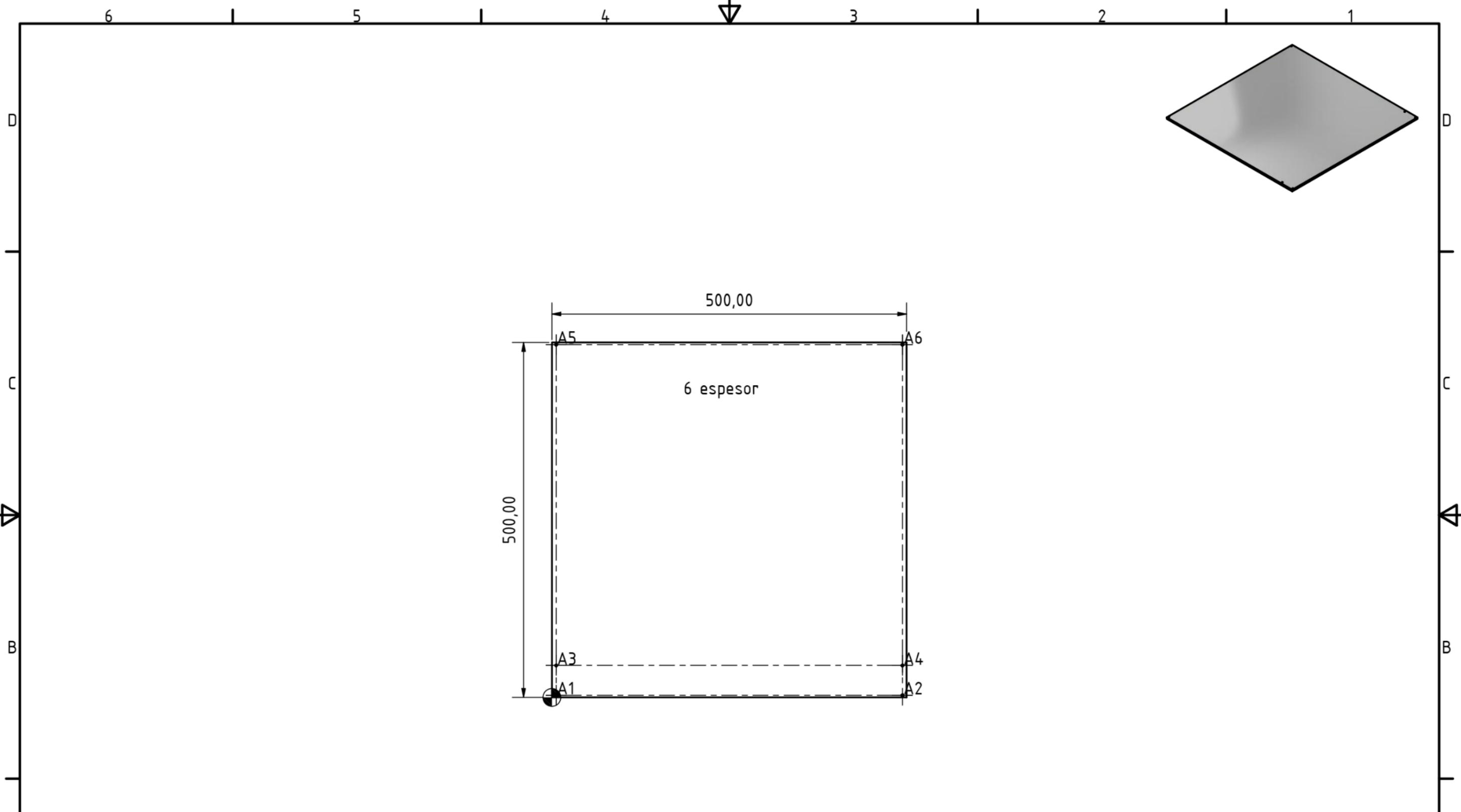


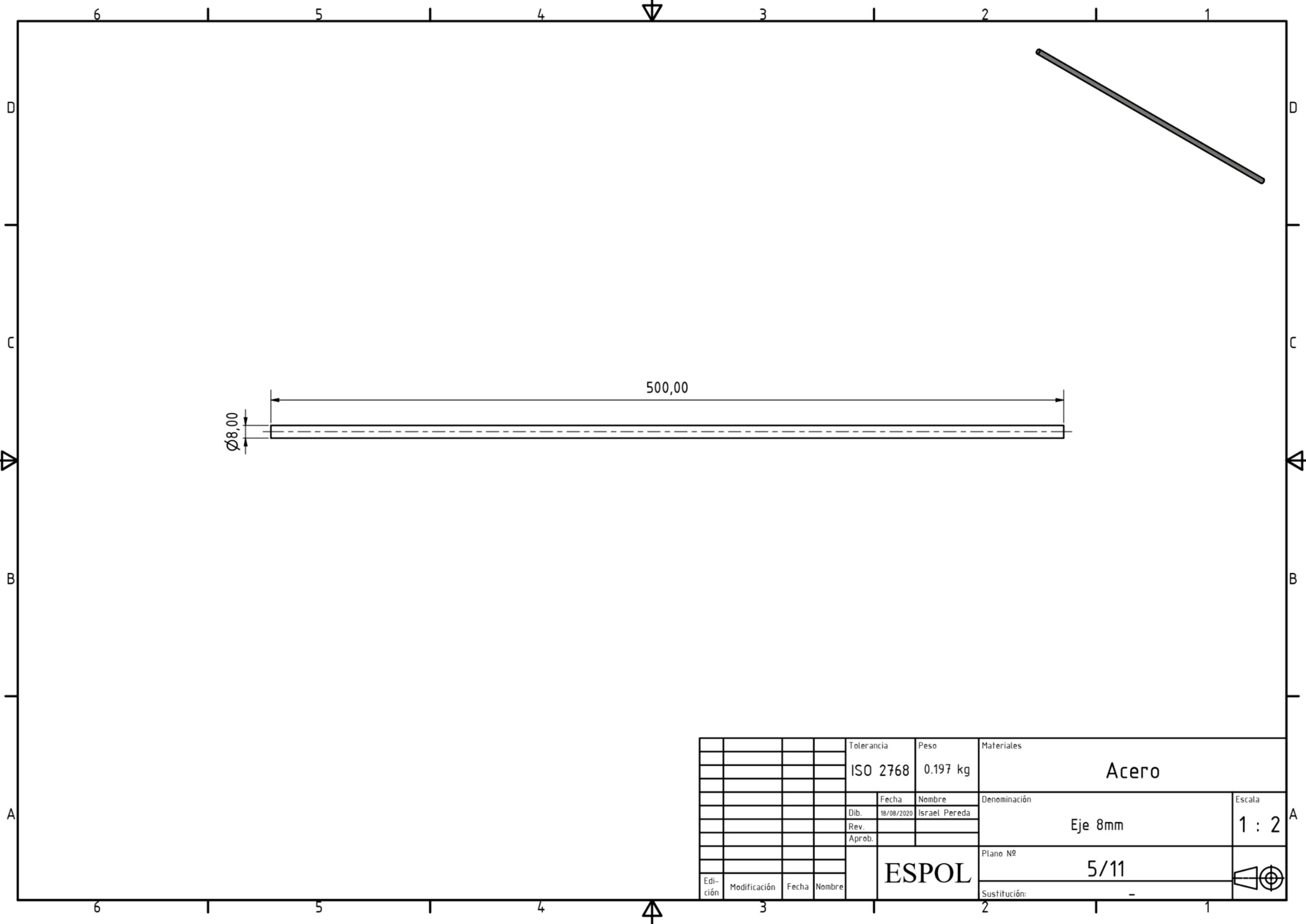
TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	6,00	3,00	Ø3,00 Pasante
A2	494,00	3,00	Ø3,00 Pasante
A3	6,00	45,00	Ø3,00 Pasante
A4	494,00	45,00	Ø3,00 Pasante
A5	6,00	497,00	Ø3,00 Pasante
A6	494,00	497,00	Ø3,00 Pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	4.049 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	18/08/2020	Israel Pereda	Base inferior
				Rev.			
				Aprob.			
							Plano Nº
							2/11
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Escala 1 : 5	









				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.197 kg	Acero	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	18/08/2020	Israel Pereda	Eje 8mm
				Rev.			1 : 2
				Aprob.			
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Plano Nº	5/11
						Sustitución:	-



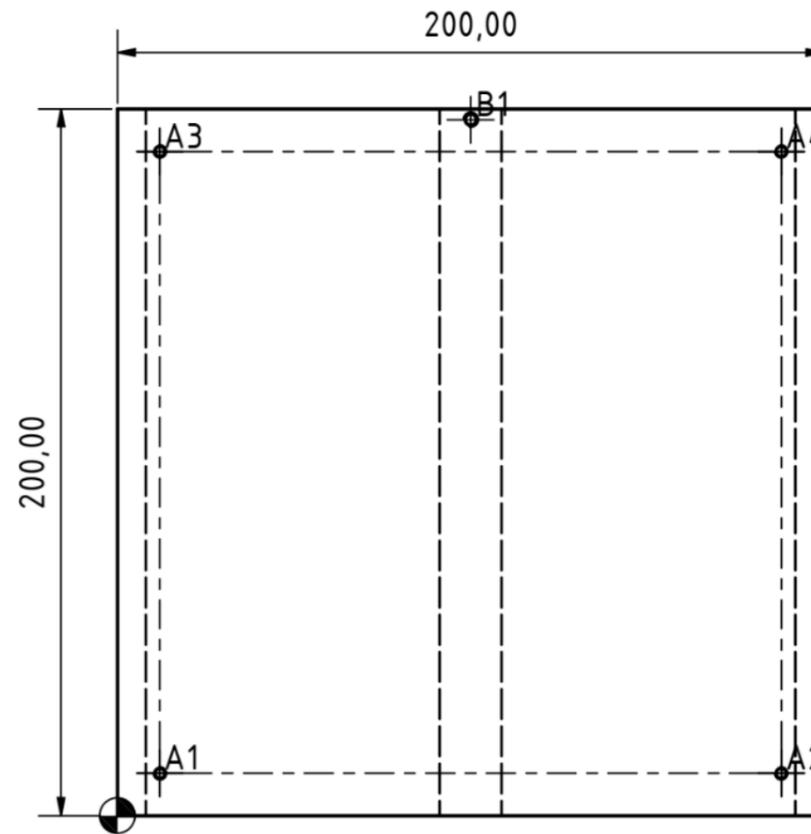
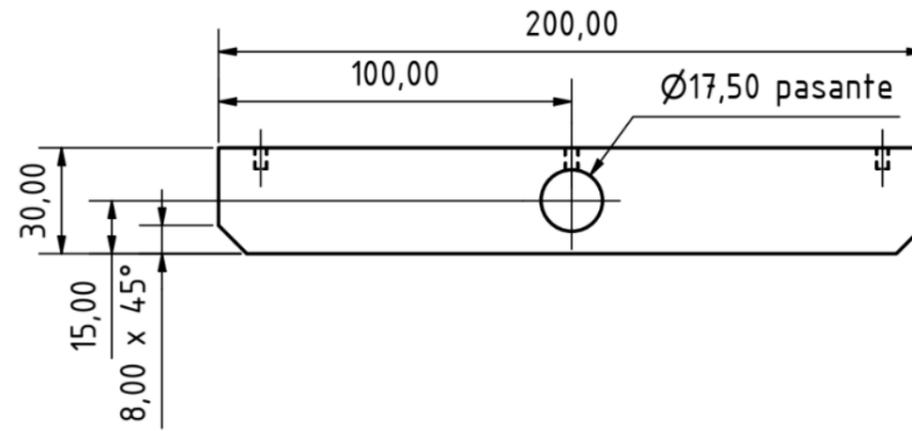
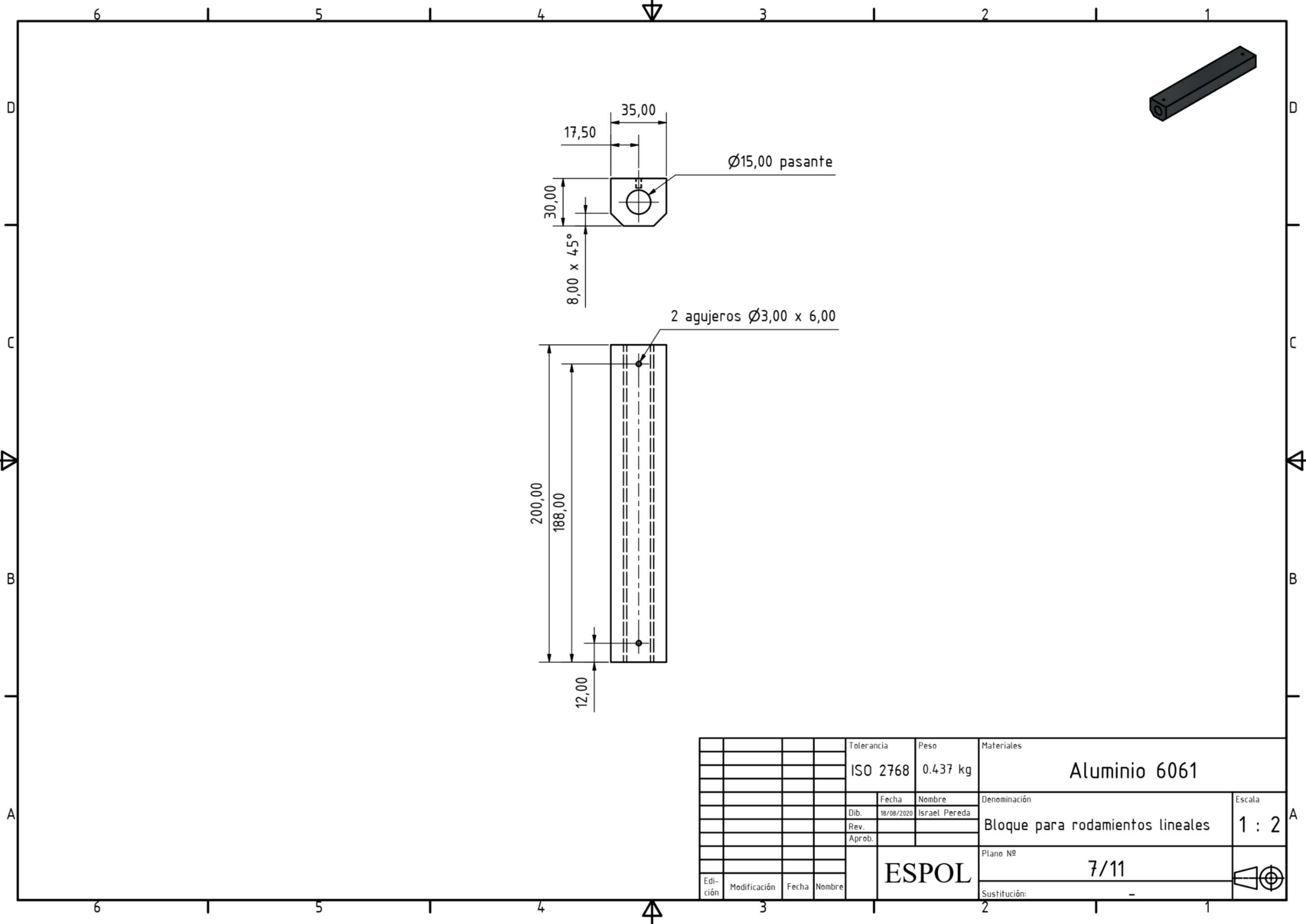


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	12,00	12,00	Ø3,00 pasante
A2	188,00	12,00	Ø3,00 pasante
A3	12,00	188,00	Ø3,00 pasante
A4	188,00	188,00	Ø3,00 pasante
B1	100,00	197,00	Ø3,20 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	3.075 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	18/08/2020	Israel Pereda	Bloque para husillo
				Rev.			
				Aprob.			Plano Nº
							6/11
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	ESPOL			
							1 : 2





				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.437 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	18/08/2020	Israel Pereda	Bloque para rodamientos lineales
				Rev.			
				Aprob.			
							Plano Nº
							7/11
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			



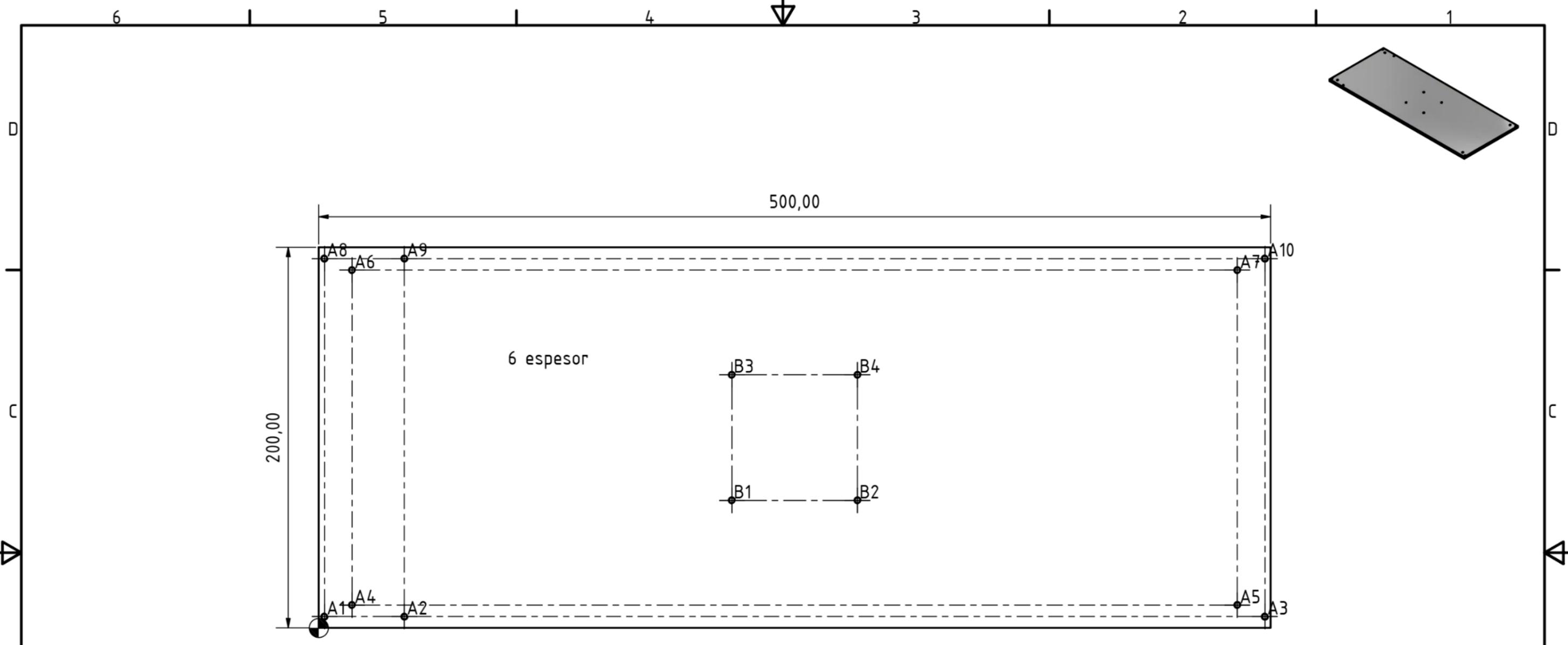
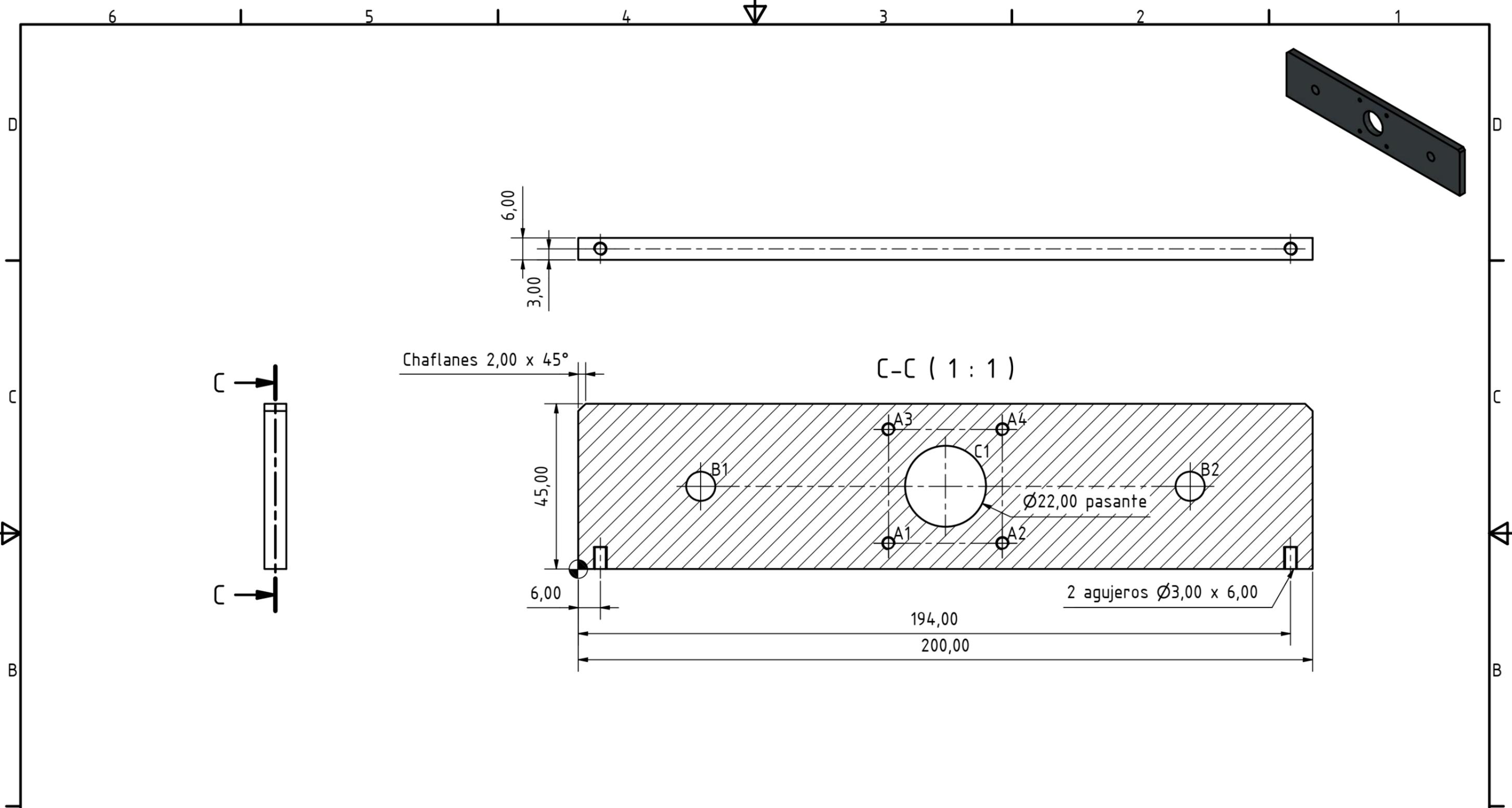


TABLA DE AGUJEROS

AGUJERO	X	Y	Ø
A1	3,00	6,00	Ø3,00 pasante
A2	45,00	6,00	Ø3,00 pasante
A3	497,00	6,00	Ø3,00 pasante
A4	17,50	12,00	Ø3,00 pasante
A5	482,50	12,00	Ø3,00 pasante
A6	17,50	188,00	Ø3,00 pasante
A7	482,50	188,00	Ø3,00 pasante
A8	3,00	194,00	Ø3,00 pasante
A9	45,00	194,00	Ø3,00 pasante
A10	497,00	194,00	Ø3,00 pasante
B1	217,00	67,00	Ø3,00 pasante
B2	283,00	67,00	Ø3,00 pasante
B3	217,00	133,00	Ø3,00 pasante
B4	283,00	133,00	Ø3,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	1.618 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	18/08/2020	Israel Pereda	Base superior
				Rev.			
				Aprob.			
						Plano Nº	8/11
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	<b>ESPOL</b>		Sustitución:	-
							1 : 2





Chaflanes 2,00 x 45°

C-C ( 1 : 1 )

Ø22,00 pasante

2 agujeros Ø3,00 x 6,00

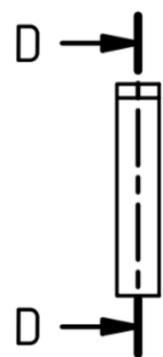
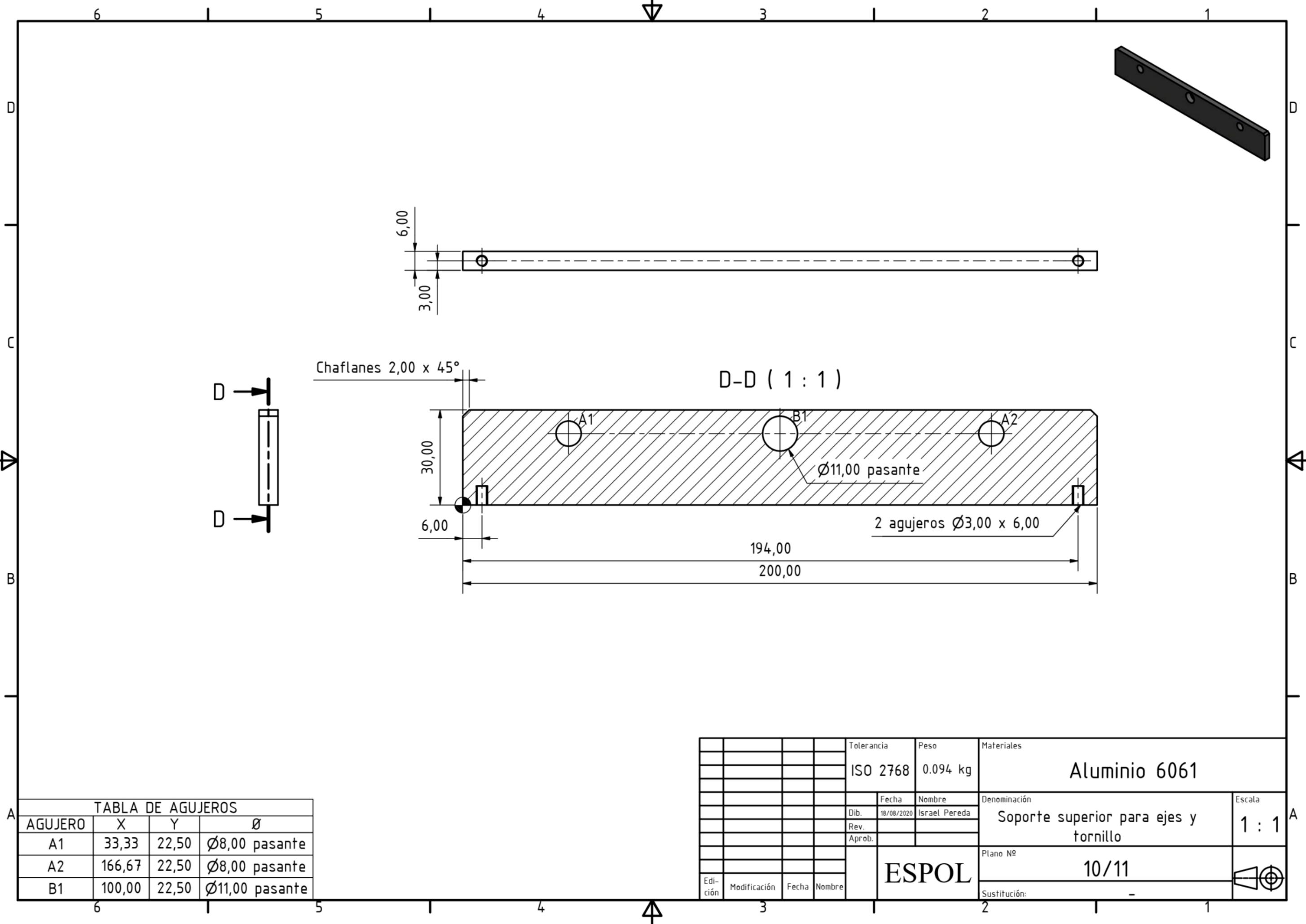
TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	84,50	7,00	Ø3,00 pasante
A2	115,50	7,00	Ø3,00 pasante
A3	84,50	38,00	Ø3,00 pasante
A4	115,50	38,00	Ø3,00 pasante
B1	33,33	22,50	Ø8,00 pasante
B2	166,67	22,50	Ø8,00 pasante
C1	100,00	22,50	Ø22,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.137 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
					18/08/2020	Israel Pereda	Soporte superior para ejes y motor
							1 : 1
						Plano Nº	
						9/11	
						Sustitución:	
Edi- ción	Modificac ión	Fecha	Nombre	ESPOL			

A

A





Chafilanes 2,00 x 45°

D-D ( 1 : 1 )

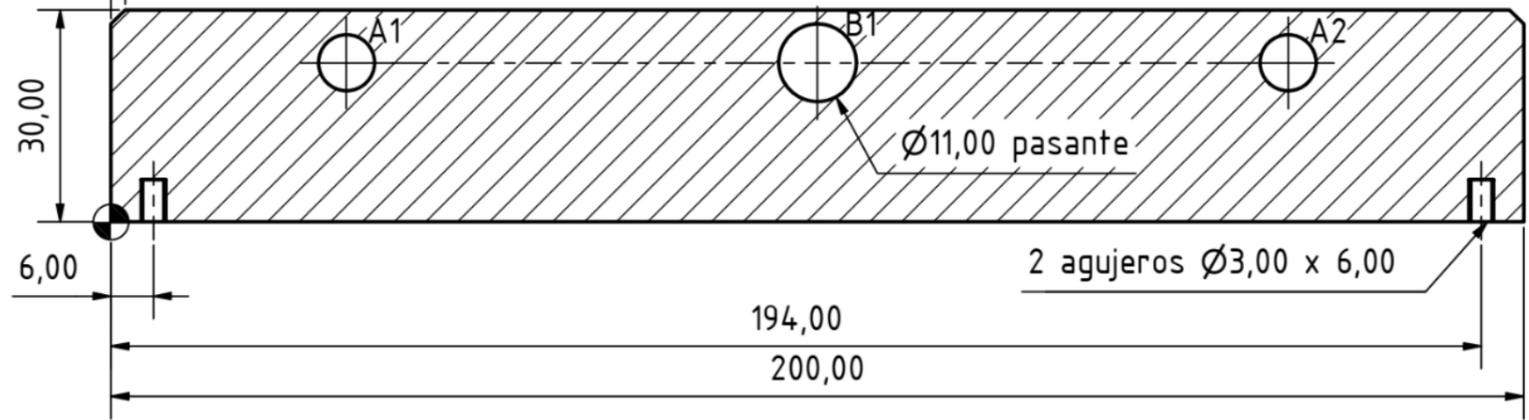
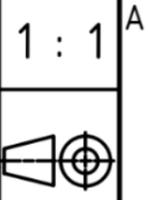


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	33,33	22,50	Ø8,00 pasante
A2	166,67	22,50	Ø8,00 pasante
B1	100,00	22,50	Ø11,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.094 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
					Dib. 18/08/2020	Israel Pereda	Soporte superior para ejes y tornillo
					Rev.		
					Aprob.		
							Plano Nº
							10/11
							Sustitución:
							-
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			



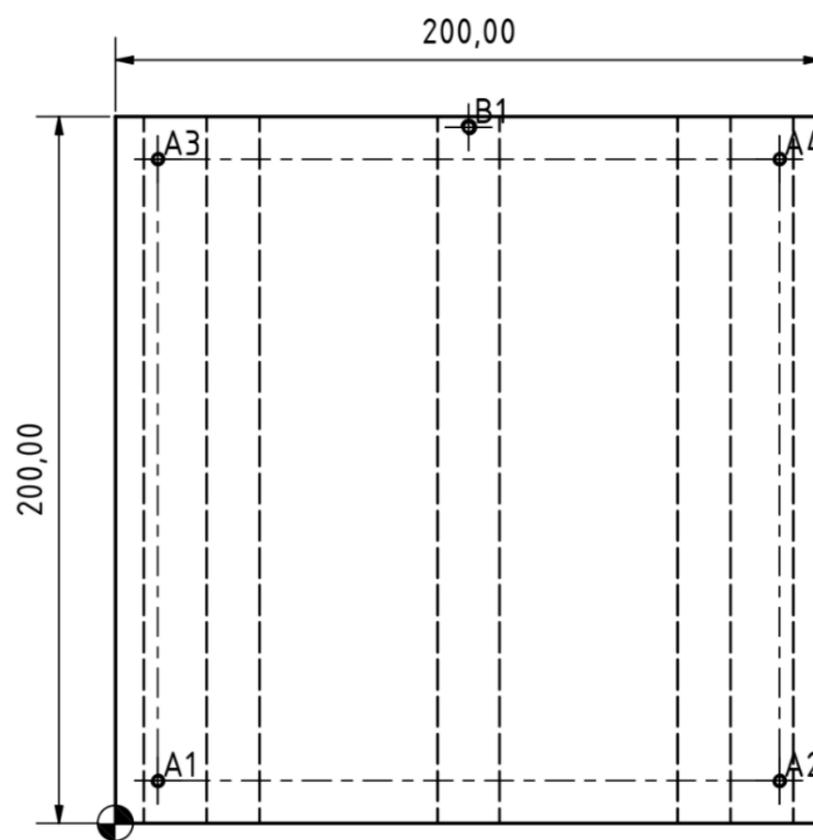
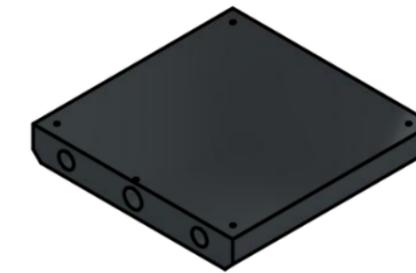
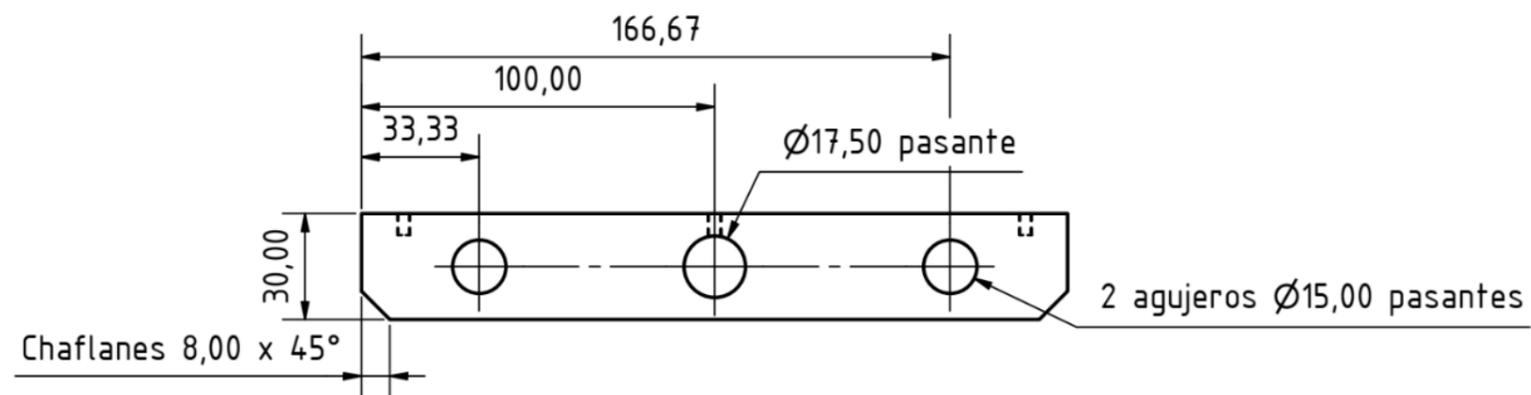
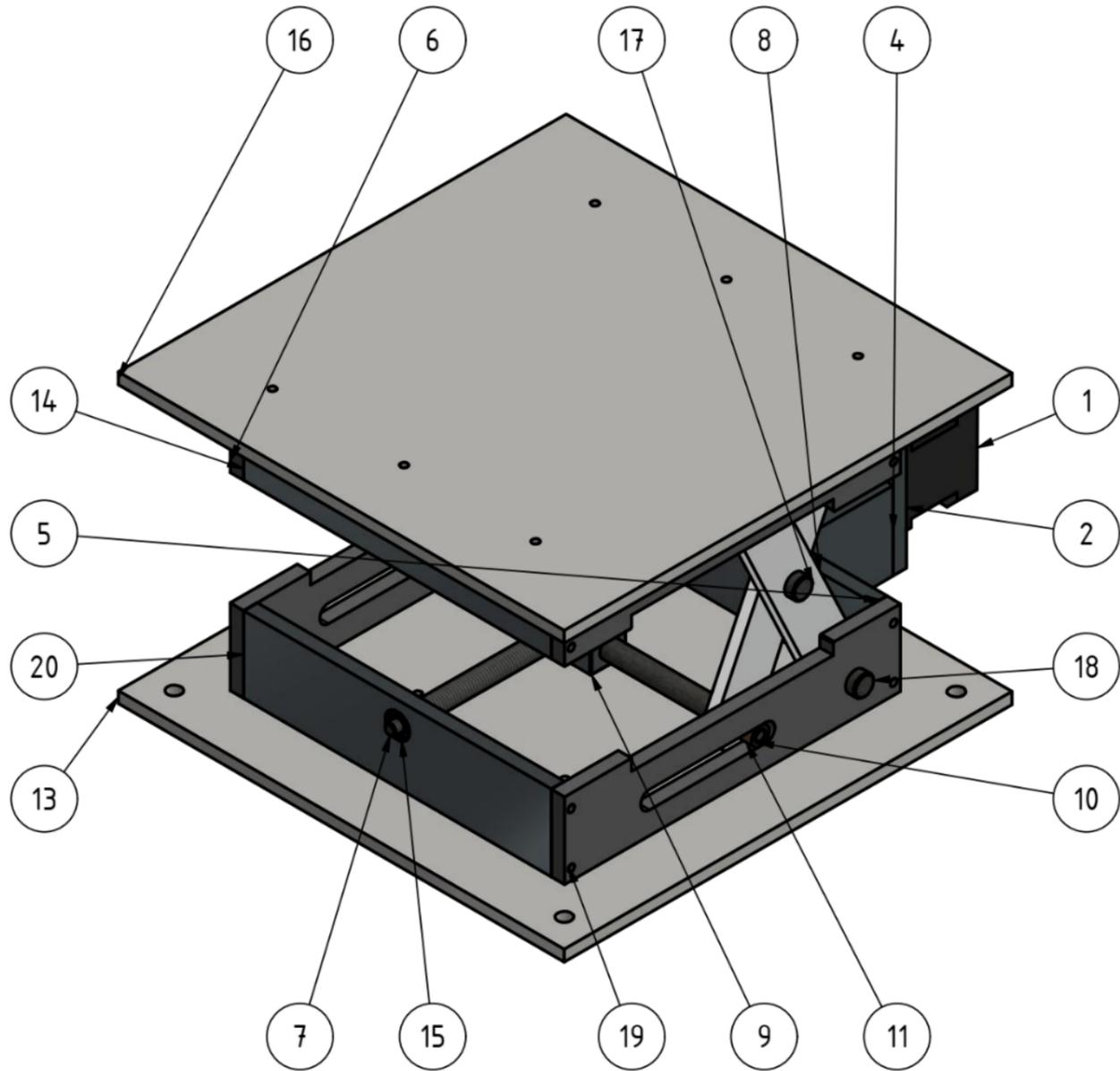


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	12,00	12,00	Ø3,00 pasante
A2	188,00	12,00	Ø3,00 pasante
A3	12,00	188,00	Ø3,00 pasante
A4	188,00	188,00	Ø3,00 pasante
B1	100,00	197,00	Ø3,20 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	2.884 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	18/08/2020	Israel Pereda	Bloque para rodamientos lineales y husillo
				Rev.			
				Aprob.			
						Plano Nº	1 : 2
						11/11	
						Sustitución:	-
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	ESPOL			





LISTA DE PIEZAS

Nº DE ORDEN	Nº DE PIEZAS	DENOMINACIÓN	MATERIAL	OBSERV.
1	1	Nema 17 - STP-MTR-17048	Acero	-
2	1	Soporte motor eje	Aluminio 6061	-
3	1	Acople MST 16 5x5	Aluminio 6061	-
4	2	Union entre soportes	Aluminio 6061	-
5	1	Soporte rodamiento eje	Aluminio 6061	-
6	2	Pared lateral superior	Aluminio 6061	-
7	1	Tornillo ACME 8x2.5	Acero	-
8	4	Eslabon 100x20	Aluminio 6061	-
9	1	Dado	Aluminio 6061	-
10	2	Eje transversal superior	Acero	-
11	4	Camisa	Bronce, fundido	-
12	2	Junta superior	Acero	-
13	1	Base 200x200	Aluminio 6061	-
14	2	Pared superior	Aluminio 6061	-
15	2	Rodamiento 628 5-2Z	Acero	-
16	1	Mesa 200x200	Aluminio 6061	-
17	2	Junta de eslabones	Acero	-
18	2	Junta inferior	Acero	-
19	2	Pared lateral	Aluminio 6061	-
20	1	Pared rodamiento eje posterior	Aluminio 6061	-

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	2.488 kg		
				Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib. 09/08/2020	Israel Pereda		
				Rev.			
				Aprob.			
				<b>ESPOL</b>		Plano Nº	1 : 2
						1/17	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre			Sustitución:	



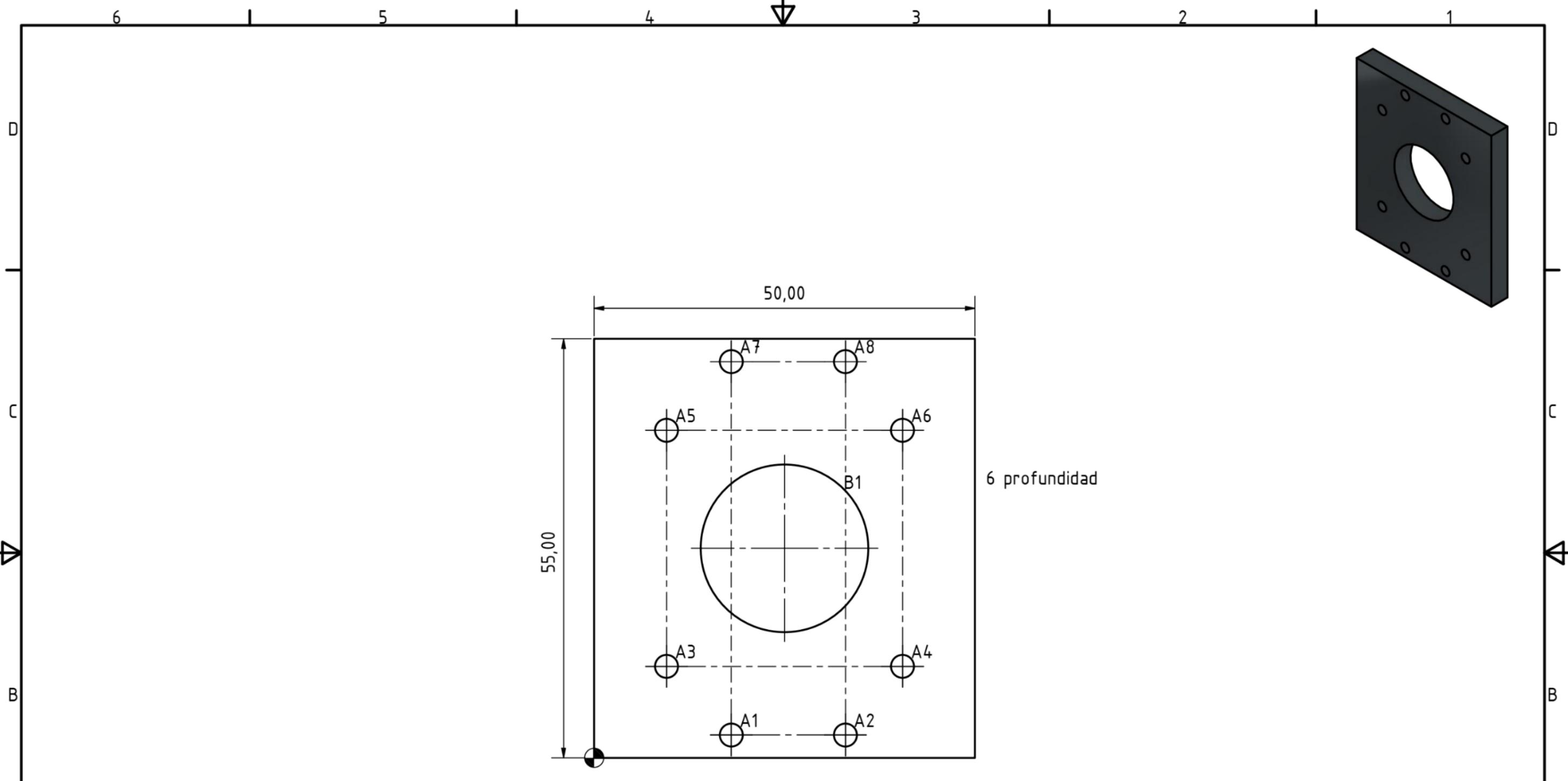
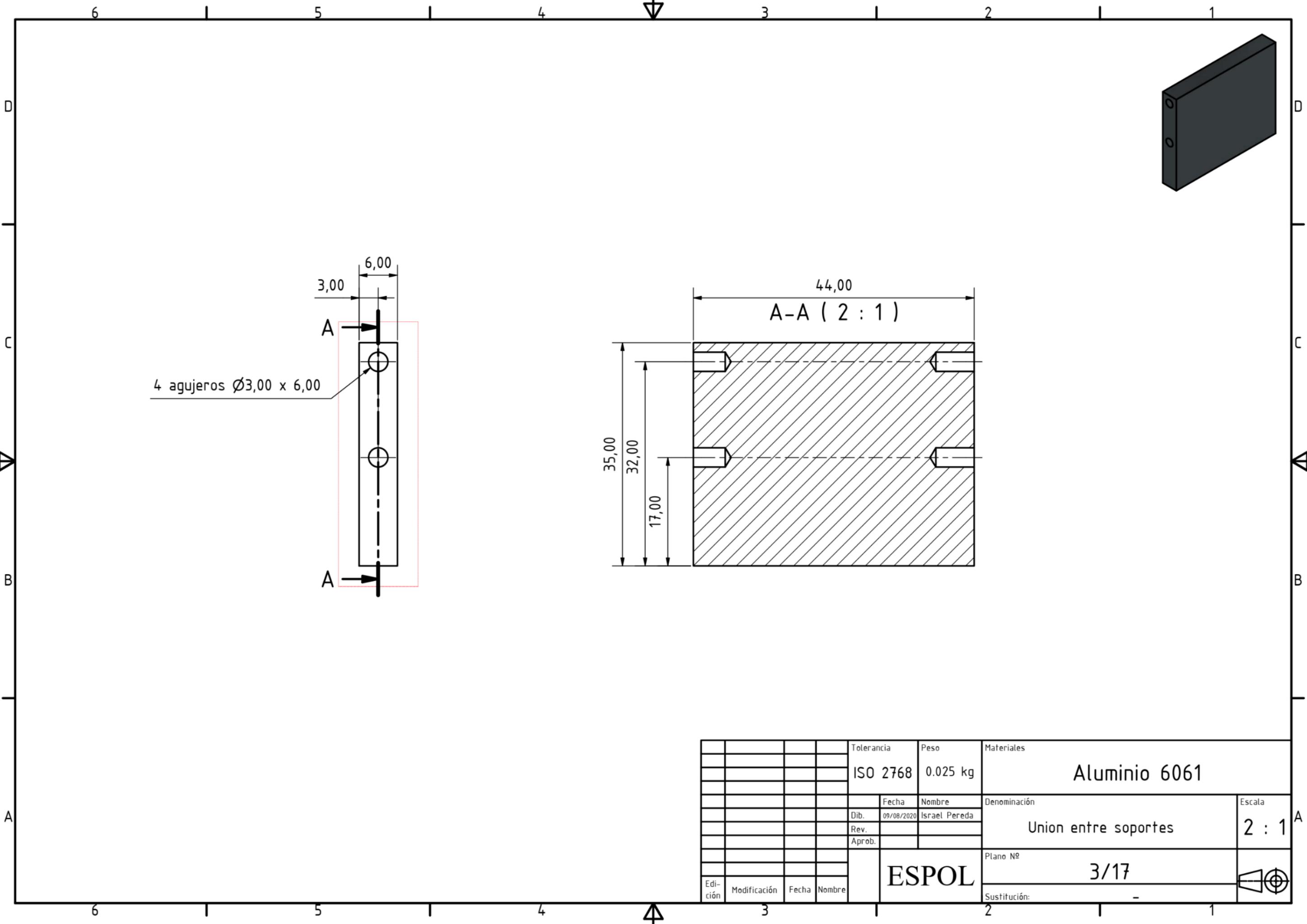


TABLA DE AGUJEROS

AGUJERO	X	Y	Ø
A1	18,00	3,00	Ø3,00 pasante
A2	33,00	3,00	Ø3,00 pasante
A3	9,50	12,00	Ø3,00 pasante
A4	40,50	12,00	Ø3,00 pasante
A5	9,50	43,00	Ø3,00 pasante
A6	40,50	43,00	Ø3,00 pasante
A7	18,00	52,00	Ø3,00 pasante
A8	33,00	52,00	Ø3,00 pasante
B1	25,00	27,50	Ø22,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.037 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
					09/08/2020	Israel Pereda	Soporte motor eje
							Escala
							2 : 1
						Plano Nº	
						2/17	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Sustitución:	-



4 agujeros Ø3,00 x 6,00

A-A ( 2 : 1 )

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.025 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Union entre soportes
				Rev.			
				Aprob.			
						Plano Nº	Escala
						3/17	2 : 1
						Sustitución:	
						-	

**ESPOL**



6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

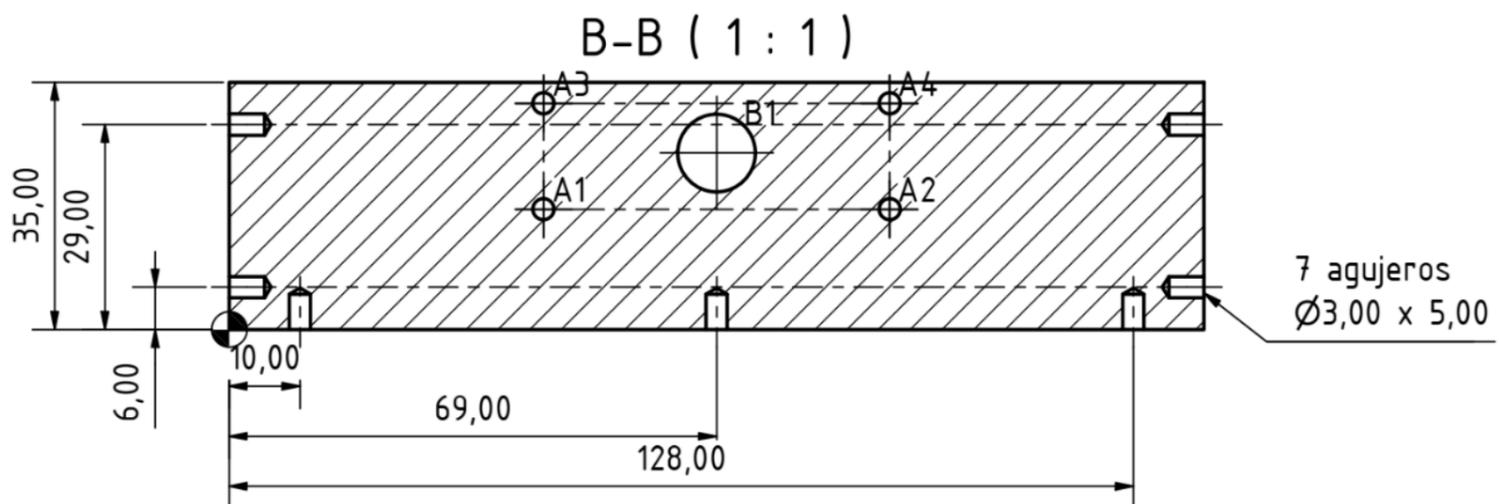
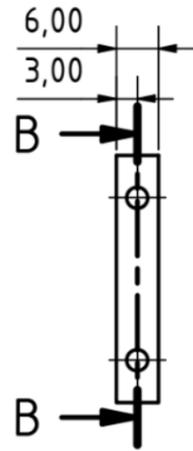
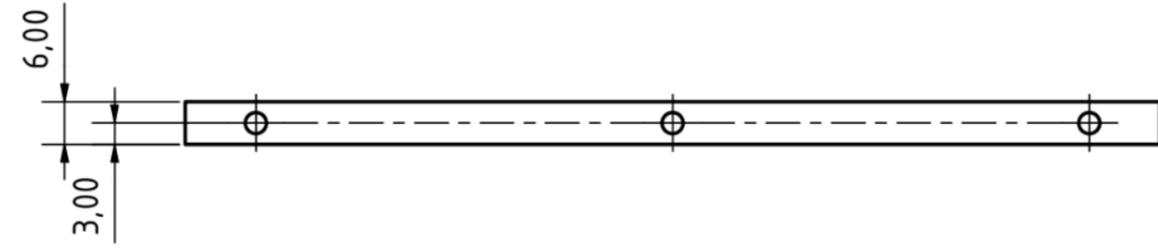
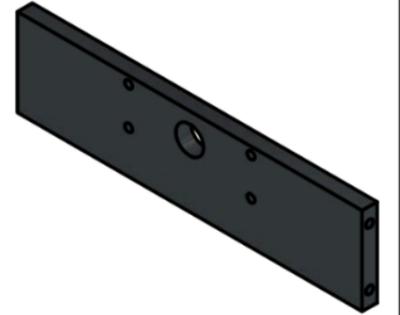


TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	44,50	17,00	Ø3,00 pasante
A2	93,50	17,00	Ø3,00 pasante
A3	44,50	32,00	Ø3,00 pasante
A4	93,50	32,00	Ø3,00 pasante
B1	69,00	25,00	Ø11,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.076 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
					09/08/2020	Israel Pereda	Soporte rodamiento eje
							Escala
							1 : 1
						Plano Nº	
						4/17	
						Sustitución:	
						-	
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

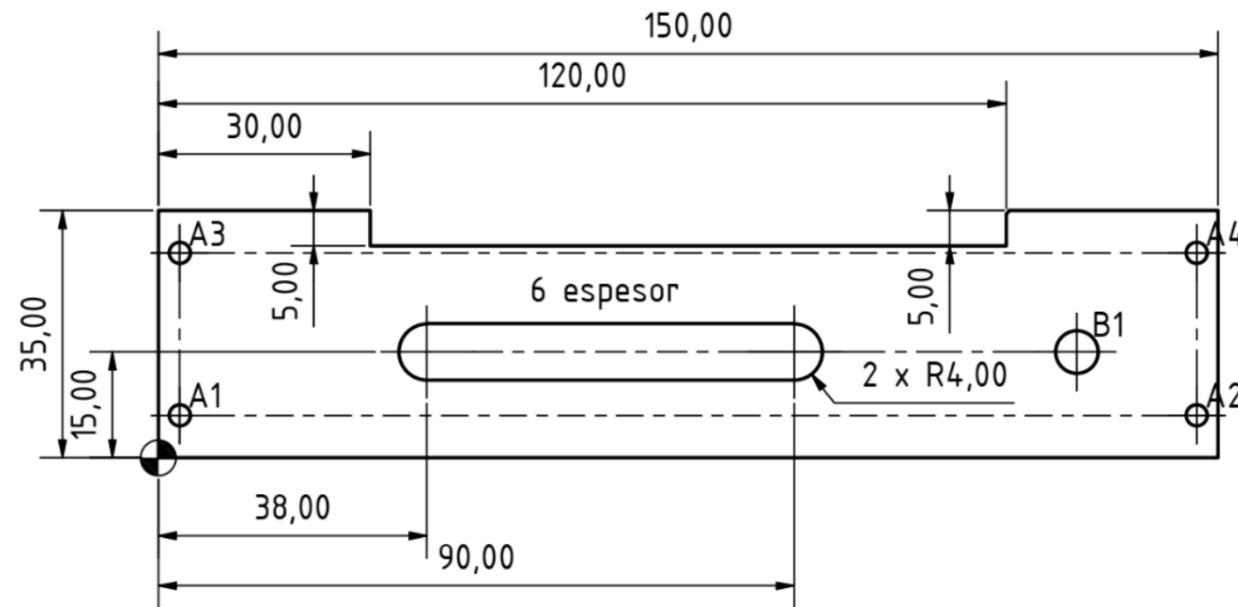
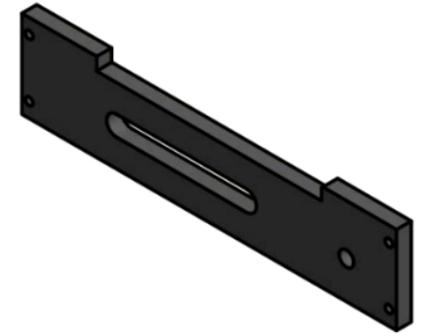
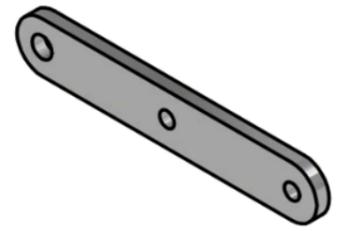
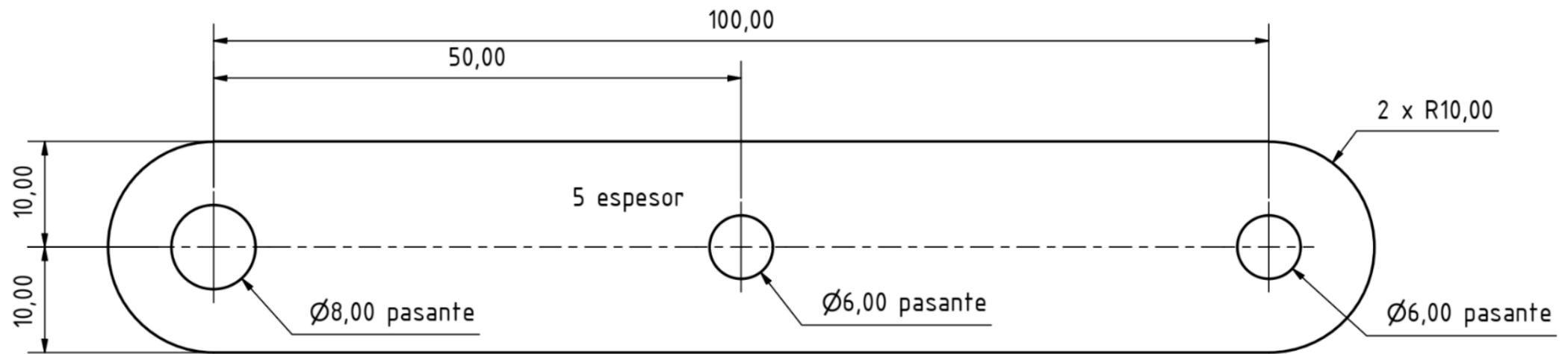


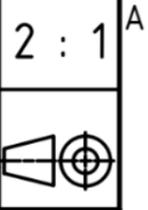
TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	3,00	6,00	Ø3,00 pasante
A2	147,00	6,00	Ø3,00 pasante
A3	3,00	29,00	Ø3,00 pasante
A4	147,00	29,00	Ø3,00 pasante
B1	130,00	15,00	Ø6,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.069 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
					Dib. 09/08/2020	Israel Pereda	Pared lateral
					Rev.		
					Aprob.		
							Plano Nº
							5/17
							Sustitución:
							-
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Escala	
						1 : 1	



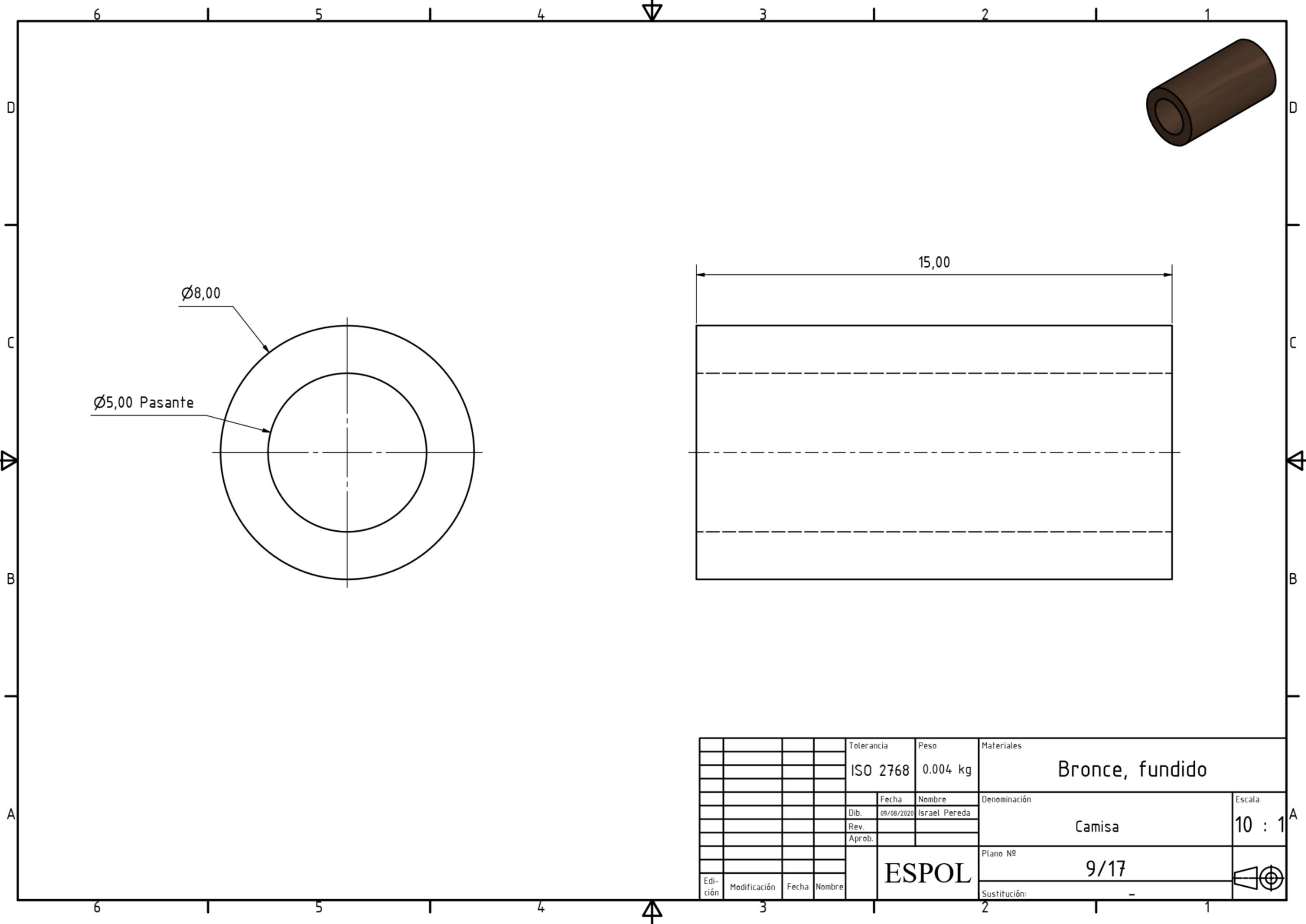


				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.030 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Eslabon 100x20
				Rev.			
				Aprob.			
							Plano Nº
							6/17
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			









Ø8,00

Ø5,00 Pasante

15,00

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.004 kg	Bronce, fundido	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Camisa
				Rev.			
				Aprob.			
						Plano Nº	Escala
						9/17	10 : 1
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Plano Nº	
						Sustitución:	

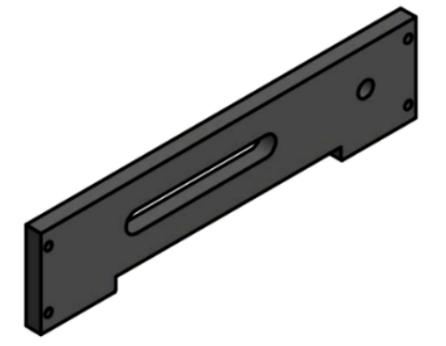
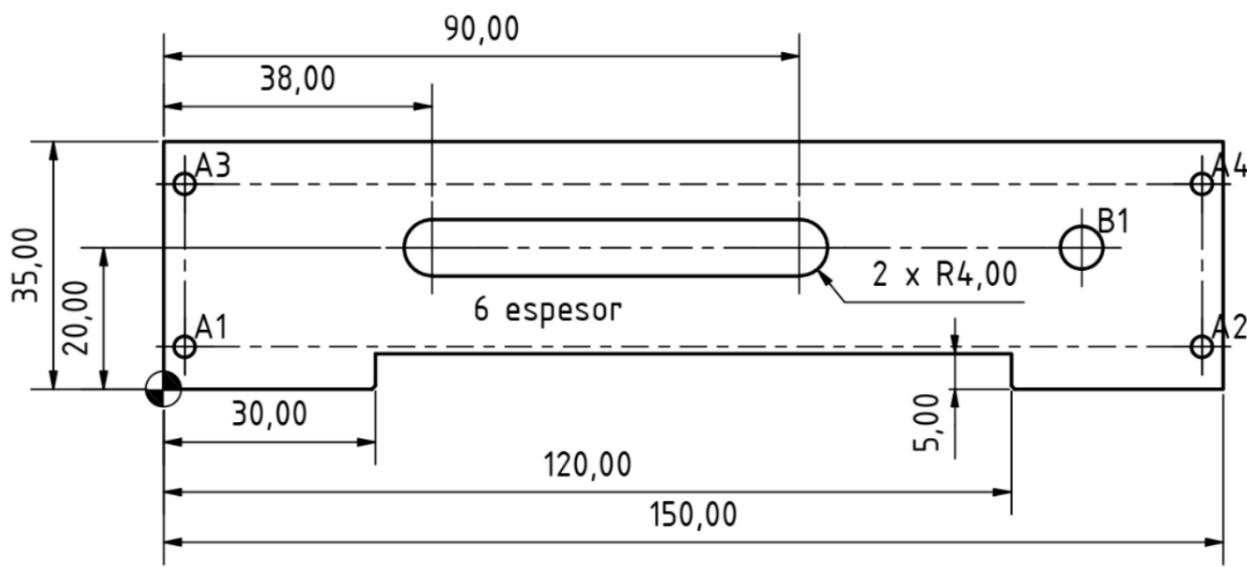
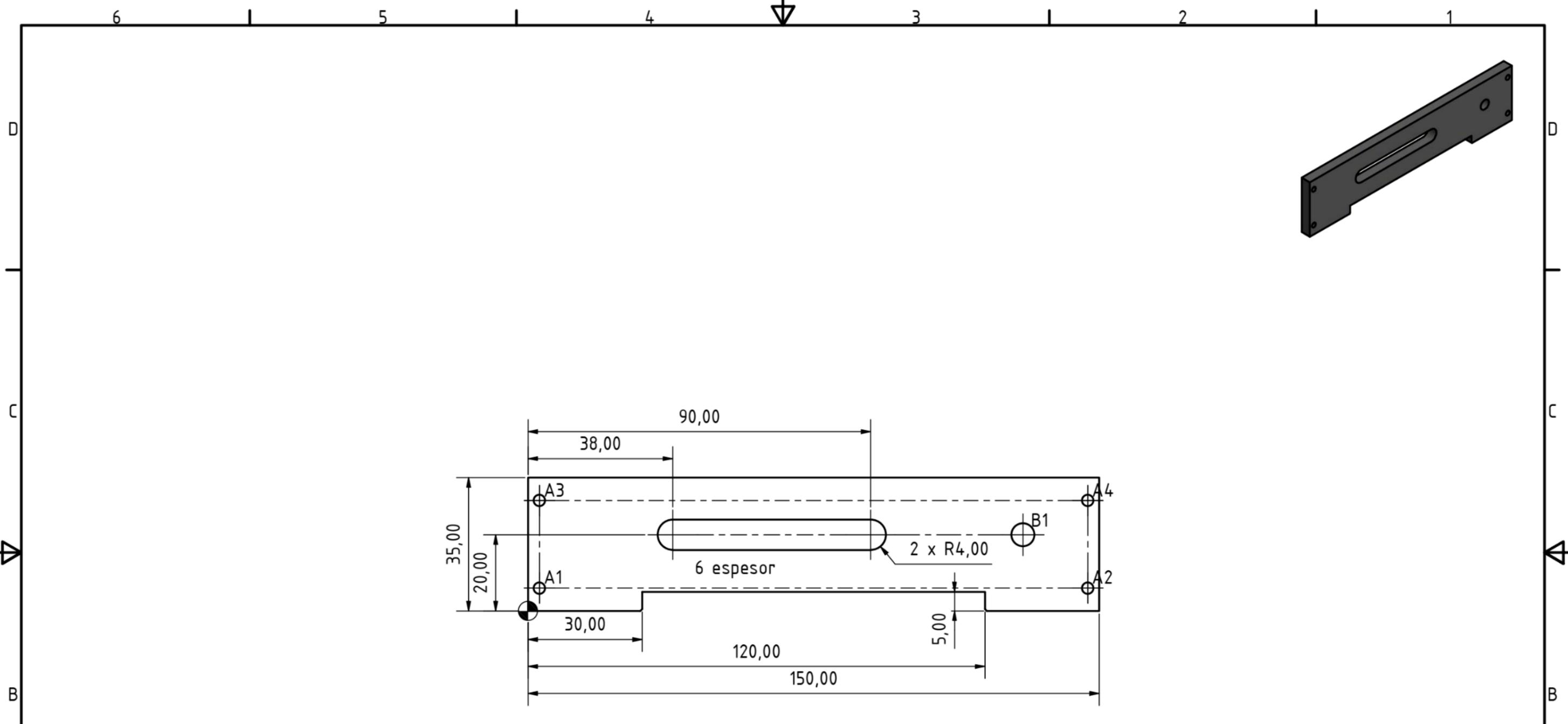
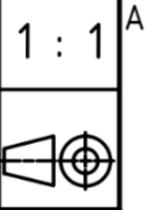
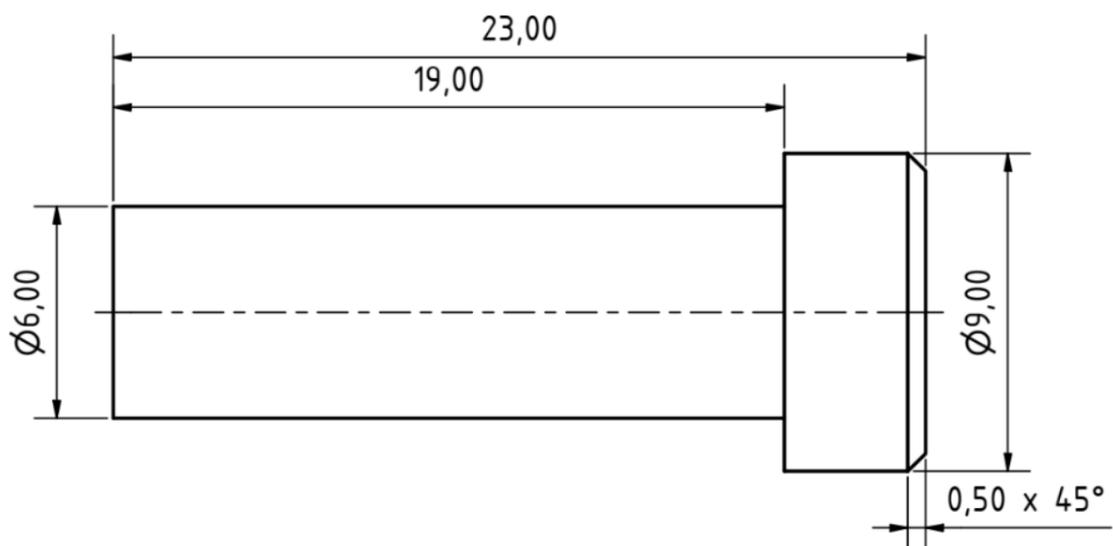


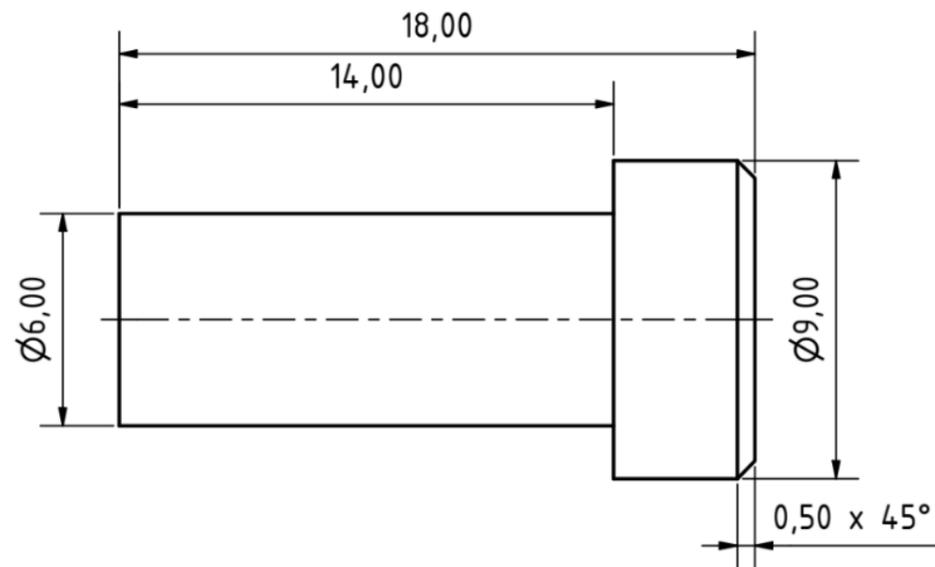
TABLA DE AGUJEROS			
AGUJERO	X	Y	Ø
A1	3,00	6,00	Ø3,00 pasante
A2	147,00	6,00	Ø3,00 pasante
A3	3,00	29,00	Ø3,00 pasante
A4	147,00	29,00	Ø3,00 pasante
B1	130,00	20,00	Ø6,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.069 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Pared lateral superior
				Rev.			
				Aprob.			
							Plano Nº
							10/17
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	ESPOL			

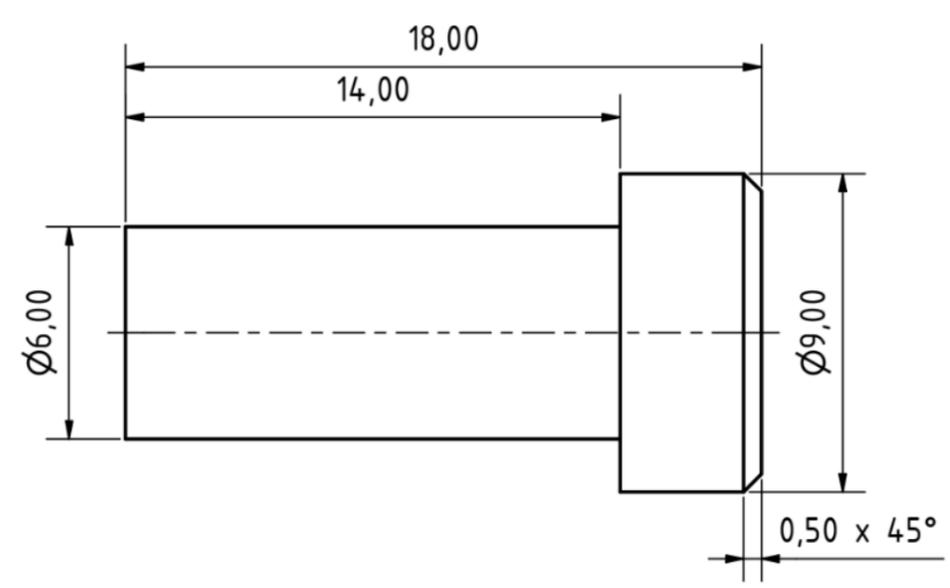




				Tolerancia	Peso	Materiales		
				ISO 2768	0.006 kg	Acero		
					Fecha	Nombre	Denominación	Escala
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Junta superior	5 : 1
				Rev.				
				Aprob.				
							Plano Nº	
							11/17	
							Sustitución:	
							-	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	<b>ESPOL</b>				



				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.005 kg	Acero	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Junta de eslabones
				Rev.			
				Aprob.			
							Escala
							5 : 1
						Plano Nº	
						12/17	
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	ESPOL		Sustitución:	-



				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.005 kg	Acero	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Junta inferior
				Rev.			
				Aprob.			
							Escala
							5 : 1
						Plano Nº	
						13/17	
						Sustitución:	-
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	ESPOL			

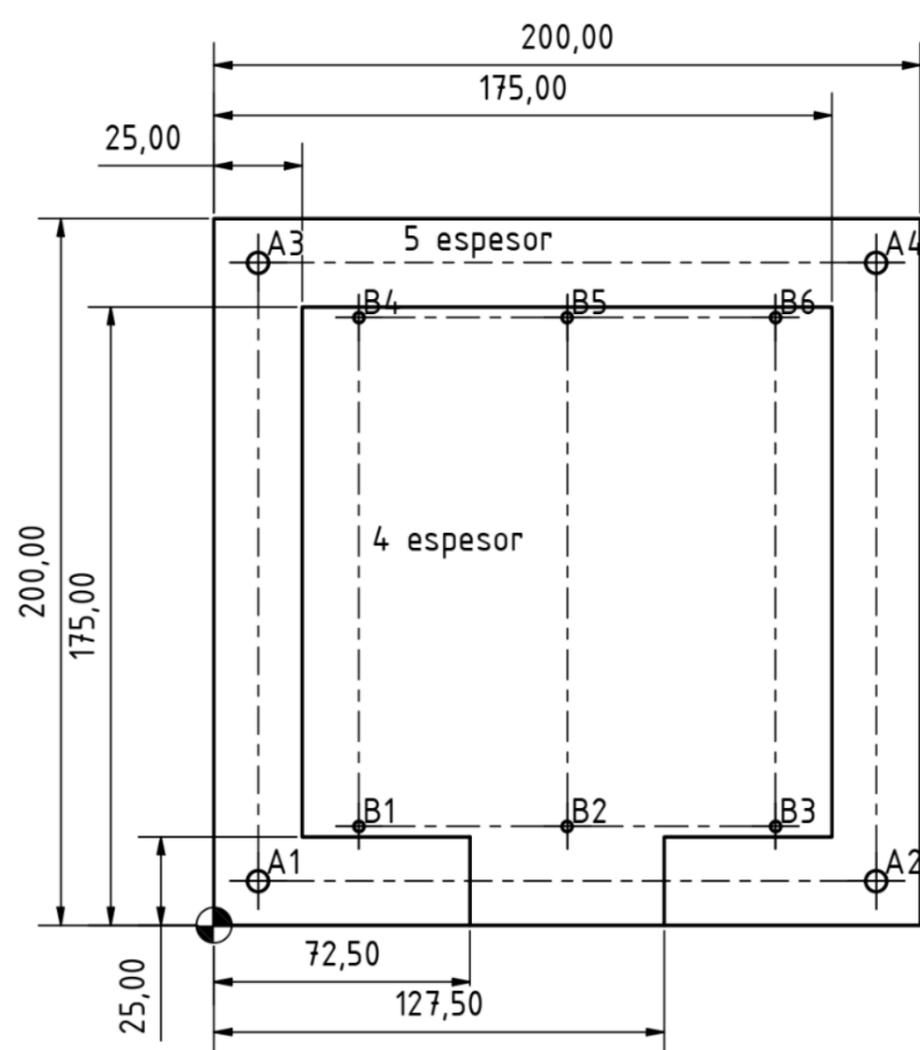
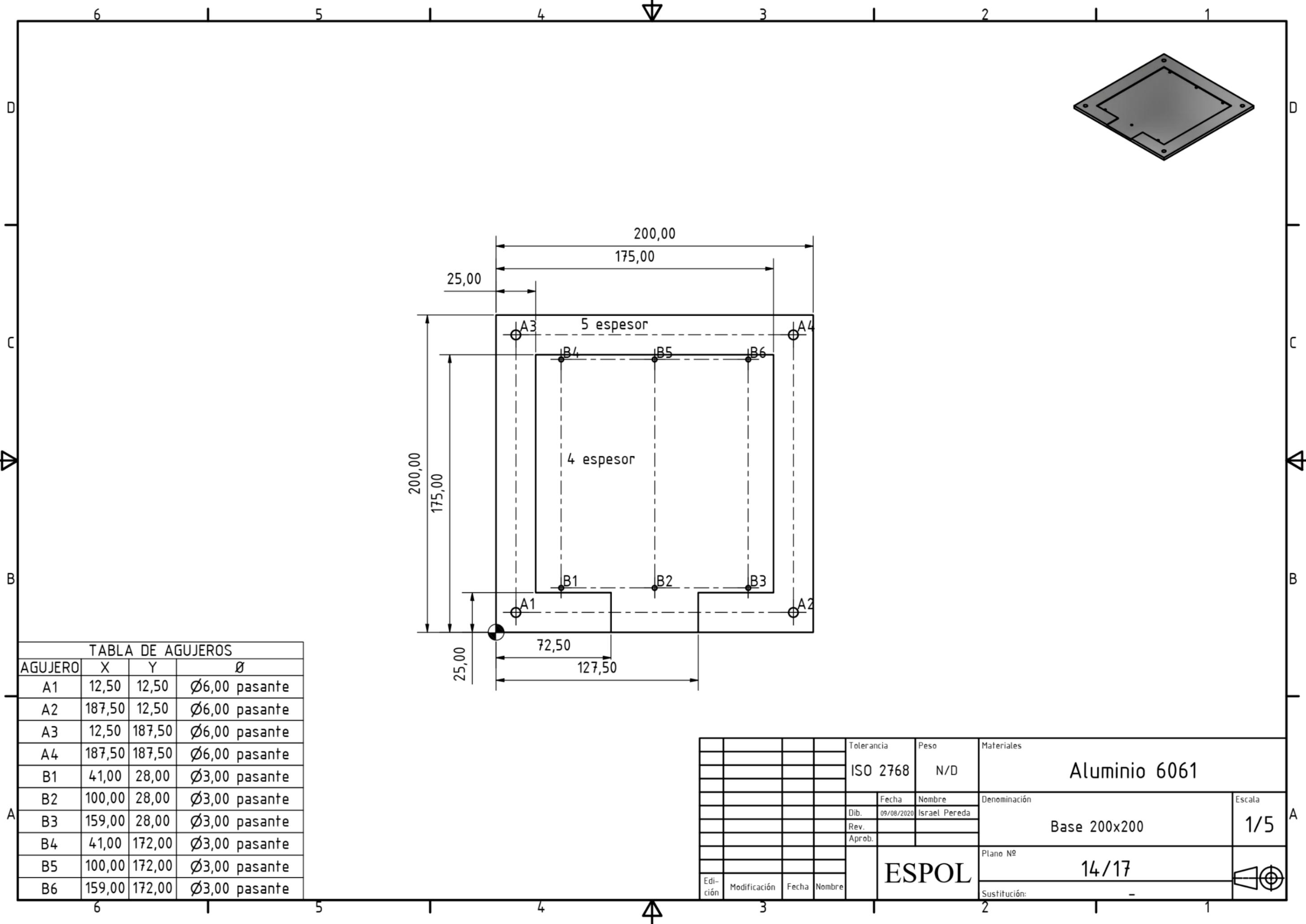
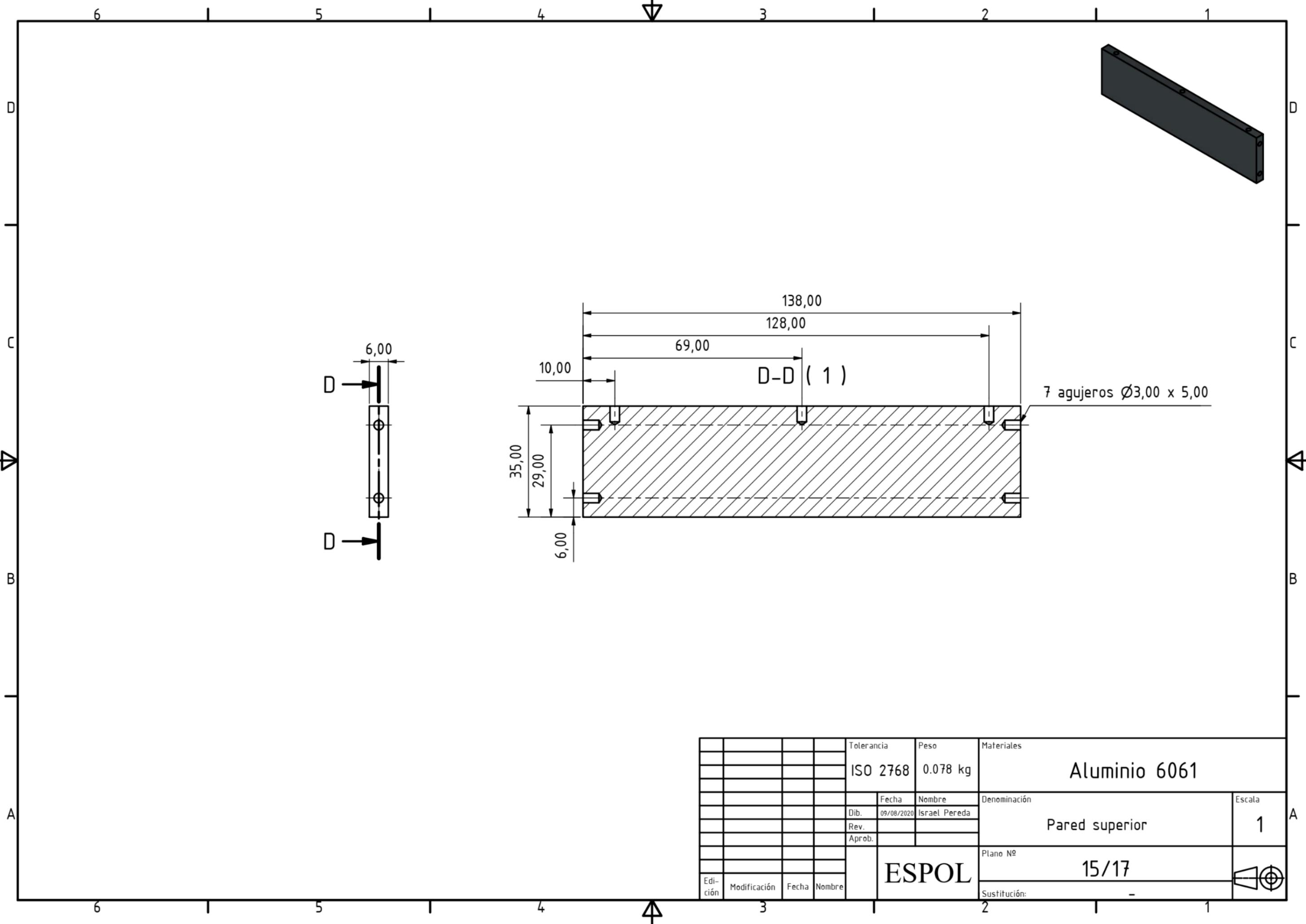


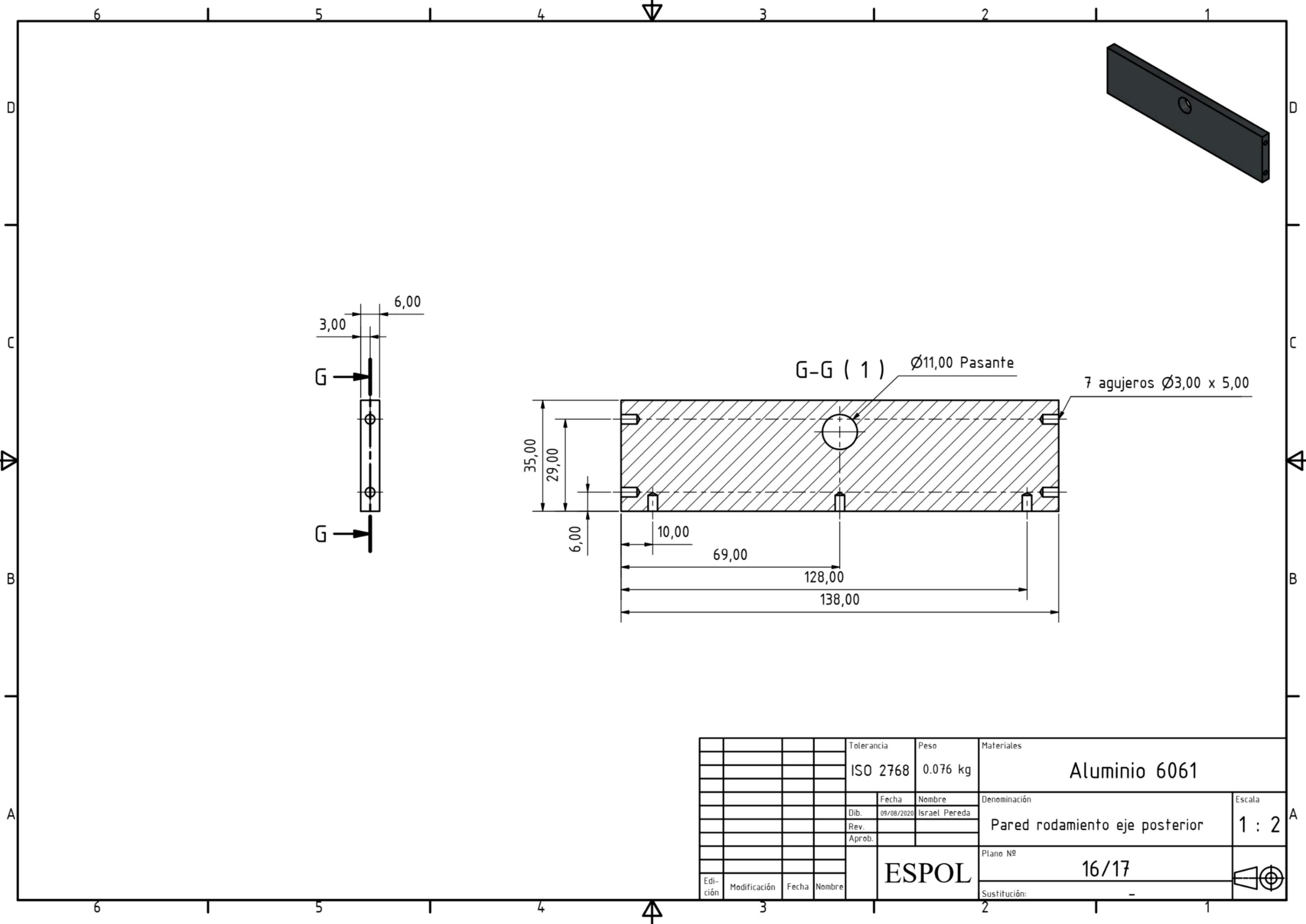
TABLA DE AGUJEROS

AGUJERO	X	Y	Ø
A1	12,50	12,50	Ø6,00 pasante
A2	187,50	12,50	Ø6,00 pasante
A3	12,50	187,50	Ø6,00 pasante
A4	187,50	187,50	Ø6,00 pasante
B1	41,00	28,00	Ø3,00 pasante
B2	100,00	28,00	Ø3,00 pasante
B3	159,00	28,00	Ø3,00 pasante
B4	41,00	172,00	Ø3,00 pasante
B5	100,00	172,00	Ø3,00 pasante
B6	159,00	172,00	Ø3,00 pasante

				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	N/D	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Base 200x200
				Rev.			
				Aprob.			
						Plano Nº	14/17
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL		Sustitución:	-







6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

D

C

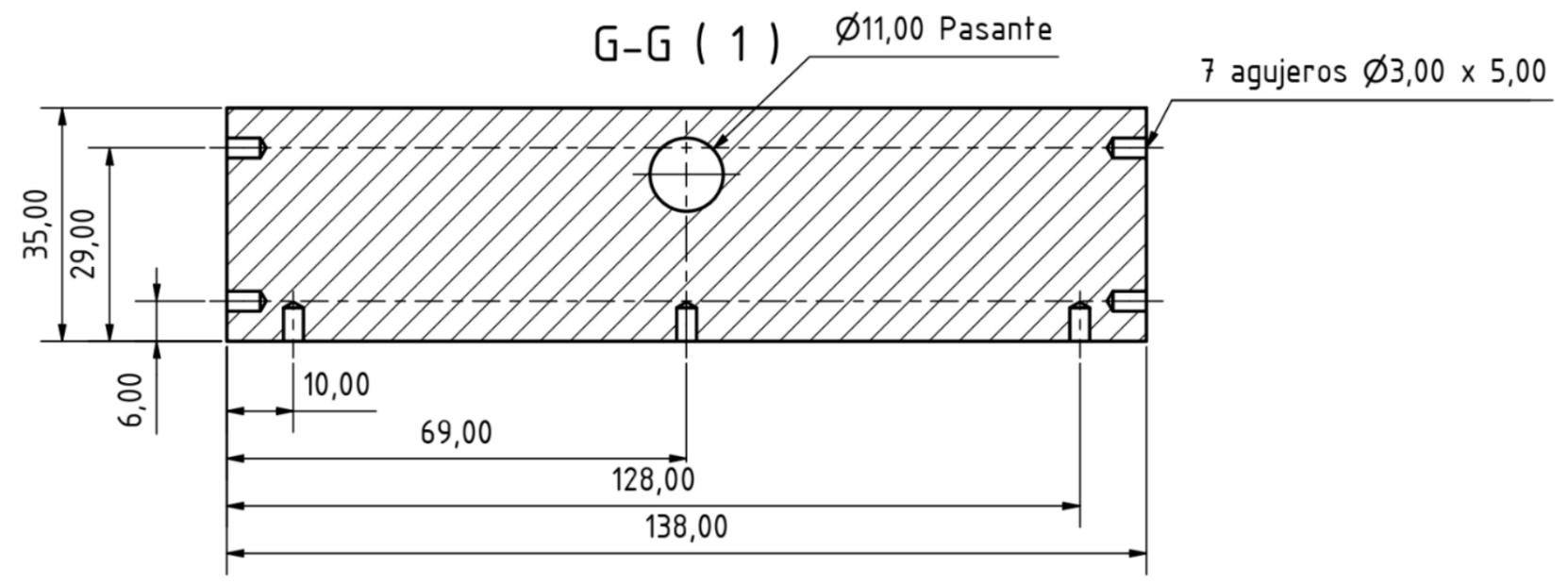
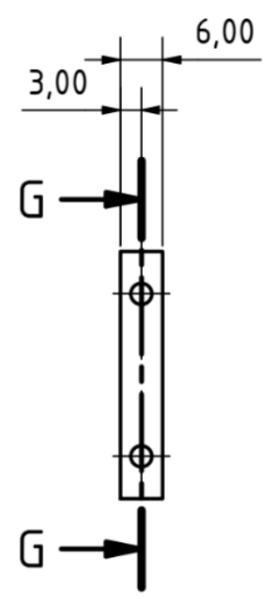
C

B

B

A

A



				Tolerancia	Peso	Materiales	
				ISO 2768	0.076 kg	Aluminio 6061	
					Fecha	Nombre	Denominación
				Dib.	09/08/2020	Israel Pereda	Pared rodamiento eje posterior
				Rev.			
				Aprob.			
							Plano Nº
							16/17
							Sustitución:
							-
Edi- ción	Modificación	Fecha	Nombre	ESPOL			



