



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COLD SPRAY

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

CRISTÓBAL JAVIER MASSARDO MORETTI

PROFESOR GUÍA:  
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAVIER LARRONDO PIÑA.  
ALEJANDRO VARGAS USCATEGUI

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: CRISTÓBAL JAVIER MASSARDO MORETTI  
FECHA: 2019  
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE COLD SPRAY

En el desarrollo de las industrias de manufactura se busca acelerar los procesos, en este punto la manufactura aditiva ha ayudado al progreso de la industria gracias a la creación de prototipos rápidos, con precisión, y disminución de costos, entre otros. Existen distintas formas de manufactura aditiva y aplicaciones con distintos materiales, plásticos, metales y cerámicos. Dentro de la manufactura aditiva se encuentran los procesos de proyección térmica usada típicamente con metales, donde se proyectan partículas fundidas, semifundidas o en frío. Este último es el caso de los sistemas de Cold Spray que son utilizados hoy en día para la manufactura de revestimientos, reparación de piezas mecánicas, relleno de orificios, relleno de piezas de fundición defectuosas, entre otros tipos de aplicaciones. Lo mencionado anteriormente tiene aplicaciones en el área de energía, aeroespacial, militar, automotriz, entre otros.

En este proceso de manufactura se proyectan partículas metálicas, por intermedio de un gas que es calentado y acelerado mediante una tobera de Laval a velocidades supersónicas, las partículas logran su adhesión por la deformación plástica sufrida en el impacto.

La presente Memoria consiste el diseño, construcción y pruebas de un sistema de Cold Spray de baja presión. Este proyecto se divide en varias etapas: Definir criterios de diseño, Diseño preliminar, Memoria de cálculo, Selección de componentes, Diseño y validación mediante elementos finitos, Construcción y ensamblaje, Pruebas.

Luego de fabricado el sistema se realizan una serie de pruebas en cada uno de sus subsistemas (control gas, control temperatura, movimiento y gabinete protección). Estas pruebas sirven para observar desperfectos, analizar sus posibles causas y opciones de solución.

Una vez terminada la construcción y pruebas, se plantean mejoras a futuro, donde se destaca la construcción de una nueva tobera y un alimentador de partículas; así como también, la aislación de las partes mecánicas (husillos y ejes lineales), ya que éstas pueden sufrir daños o desperfectos por suciedad o polvos proyectados.

Finalmente con el sistema de Cold Spray se busca realizar posteriores estudios en el ámbito de la manufactura aditiva y así conocer distintos tipos de aplicaciones según sus propiedades mecánicas.

*Dedicado al Audax Club Sportivo Italiano y su gente*

# Agradecimientos

Agradecer en primer lugar al profesor Rubén, por estos últimos años de carrera compartidos no solo en el ámbito académico, también por las conversaciones y risas. A los profesores Javier Larrondo y Alejandro Vargas que aunque nos vimos pocas veces sus consejos siempre fueron un aporte para este trabajo.

Agradecer a mi familia principalmente a mis padres Maria Patricia Moretti y José Masardo por el apoyo y cariño siempre brindado en estos 25 años de vida. A mis hermanos Pao, Loro y Claudio y cuñados Osvaldo, Enzo y Daniela por siempre estar apoyando y pendiente de mi y mis estudios en todo momento. A mis tíos Josefo, Carlitos, Patty Acuña y especial a la Tatty por su paciencia en la ayuda del escrito de esta memoria. A mis primos Coto, Carla y Romi. A los 10 enanos de mis sobrinos por siempre sacar una sonrisa. A la Lili por el cuidado y cariño todo estos años.

A mis compañeros de colegio, pertenecientes al cuadro de honor Nacho Cañas, Pipe Valdes, German, Mono, Chiki, Julio, Joaco, Otavio, Nacho G y Jarita con quienes a pesar de haber salido hace buen rato del colegio siempre hemos estado el contacto, apoyo y cariño en todo momento. Y las grandes amigas que me dejó Vale Bosch, Nati e Iri que aunque hablamos menos el cariño siempre sigue.

A Scout por los años de formación y donde conocí a grandes personas y amigos para toda la vida Pipo, Bauerle, Vicho, Folch, Tonino, Icha. A los hermanos de la de la Tribu por tener esto especial que nos une y las noches mágicas vividas junto al Butalmapu.

Al fútbol. Los Fieles por despegarme domingo a domingo y compartir junto al balón, se que volveremos en grandeza. A Falazias FC por dominar en mecánica y al fin ganar la mona, sin el fútbol en la u estos años hubiesen sido totalmente distintos.

A los compañeros que hice en estos largos años de universidad. Los amiguís de sección Feña, Vale, Seba S, Seba A, Simón, Foncho, porque esas noches de estudio sin canto ni baile no serían lo mismo en plan común, y que lamentablemente siguieron en mecánica junto a los Sebas y Coke amigos que fueron un gran apoyo dentro de mecánica. Y los otros cabros de sección Seba P, Seba M, Richi, Nico, Norman, Seba S. También en mecánica, a todos los cabros de Miércoles y Jueves (y a pizzapizza por hacer los pedidos más rápidos), por hacer el no estudio más agradable. Y al Joaco G, Joaco R, Lukas, Vicho, Danilo, Seba M, Seba S, por hacer de las partidas y Discord un buen lugar de conversación y webeo.

A la gente del Taller de Molina por siempre estar dispuestos a ayudar no solo en este último tramo de mi carrera, si no que en años anteriores y por las conversaciones generadas.

A mi amiga, compañera, amante, cocinera, viajera Victoria Carrasco gracias por todos estos años juntos, paciencia, apoyo, cariño, palabras, estudios, comidas, viajes y mucho más. Gracias por estar siempre ahí y ser un cable a tierra. TE AMO.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes Generales . . . . .	2
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivo General . . . . .	2
1.4. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.5. Alcances . . . . .	3
<b>2. Antecedentes específicos</b>	<b>4</b>
2.1. Cold Spray . . . . .	5
2.1.1. Aceleración del gas . . . . .	7
2.1.2. Velocidad crítica . . . . .	8
2.1.3. Adhesión . . . . .	9
2.1.4. Ventajas y aplicaciones . . . . .	10
2.2. Componentes del sistema . . . . .	11
2.2.1. Subsistema control del gas . . . . .	12
2.2.2. Subsistema control de temperatura . . . . .	13
2.2.3. Subsistema de movimiento . . . . .	14
2.2.4. Subsistema de seguridad . . . . .	16
<b>3. Metodología</b>	<b>17</b>
3.1. Criterios de diseño . . . . .	17
3.2. Diseño preliminar . . . . .	18
3.3. Memoria de cálculo . . . . .	18
3.4. Selección de componentes . . . . .	19
3.5. Diseño y validación mediante elementos finitos . . . . .	19
3.6. Cubicación, construcción y ensamblaje . . . . .	19
<b>4. Diseño preliminar</b>	<b>21</b>
4.1. Diseño . . . . .	21
4.2. Diagramas . . . . .	23
4.2.1. Control de temperatura . . . . .	23
4.2.2. Control de gas . . . . .	23
4.2.3. Movimiento . . . . .	24
<b>5. Memoria de cálculo</b>	<b>25</b>
5.1. Temperatura y presión máxima de trabajo . . . . .	25
5.2. Fuerza impulsión . . . . .	26

5.3.	Flexión ejes . . . . .	27
5.4.	Sistema de transporte horizontal Eje X . . . . .	28
5.4.1.	Consideración de la longitud del eje de husillo . . . . .	28
5.4.2.	Selección método soporte de eje de husillo . . . . .	28
5.4.3.	Análisis de la carga axial admisible . . . . .	29
5.4.4.	Análisis de torsión de fricción debido a una carga externa . . . . .	30
5.5.	Sistema de transporte horizontal Eje Y . . . . .	33
5.5.1.	Consideración de la longitud del eje de husillo . . . . .	33
5.5.2.	Selección método soporte de eje de husillo . . . . .	33
5.5.3.	Análisis de la carga axial admisible . . . . .	34
5.5.4.	Análisis de torsión de fricción debido a una carga externa . . . . .	35
5.6.	Sistema de transporte vertical Eje Z . . . . .	38
5.6.1.	Consideración de la longitud del eje de husillo . . . . .	38
5.6.2.	Selección método soporte de eje de husillo . . . . .	38
5.6.3.	Análisis de la carga axial admisible . . . . .	39
5.6.4.	Análisis de torsión de fricción debido a una carga externa . . . . .	40
<b>6.</b>	<b>Selección Componentes</b>	<b>44</b>
6.1.	Subsistema control de temperatura . . . . .	44
6.1.1.	Termocupla . . . . .	44
6.1.2.	Control de temperatura . . . . .	44
6.2.	Subsistema control de gas . . . . .	45
6.2.1.	Manguera gas . . . . .	45
6.2.2.	Regulador de presión . . . . .	45
6.2.3.	Válvula corte 3 vías . . . . .	46
6.3.	Subsistema movimiento . . . . .	47
6.3.1.	Motor . . . . .	47
6.4.	Rodamientos lineales . . . . .	49
6.4.1.	Perfiles aluminio . . . . .	49
6.4.2.	Husillo . . . . .	50
6.5.	Subsistema seguridad . . . . .	50
<b>7.</b>	<b>Diseño y validación mediante elementos finitos</b>	<b>51</b>
7.1.	Simulaciones . . . . .	51
7.1.1.	Subsistema movilidad . . . . .	51
7.1.2.	Subsistema seguridad . . . . .	53
<b>8.</b>	<b>Construcción y Ensamblaje</b>	<b>54</b>
8.1.	Construcción y Ensamblaje . . . . .	54
8.2.	Diagrama eléctrico . . . . .	59
8.2.1.	Subsistema control de temperatura . . . . .	59
8.2.2.	Subsistema movimiento . . . . .	60
<b>9.</b>	<b>Pruebas</b>	<b>61</b>
9.1.	Subsistema control de gas . . . . .	61
9.2.	Subsistema control de temperatura . . . . .	62
9.3.	Subsistema movimiento . . . . .	64

9.4. Sistema completo . . . . .	64
<b>Conclusión</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>68</b>
<b>A. Anexo I: Planos</b>	<b>70</b>
<b>B. Anexo II: Cubicación y Gastos</b>	<b>77</b>

# Índice de Tablas

2.1. Velocidades críticas materiales . . . . .	9
3.1. Criterios de diseño . . . . .	17
5.1. Parámetros cálculo temperatura y presión máxima . . . . .	25
5.2. Resultados temperatura y presión máxima . . . . .	26
5.3. Parámetros diseño Eje X . . . . .	29
5.4. Resumen calculos sistema de transporte horizontal Eje X . . . . .	32
5.5. Parámetros diseño Eje Y . . . . .	34
5.6. Resumen calculos sistema de transporte horizontal Eje Y . . . . .	37
5.7. Parámetros diseño Eje Z . . . . .	39
5.8. Resumen cálculos sistema de transporte horizontal Eje Z . . . . .	43
6.1. Torque máximos eje . . . . .	47

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Temperatura y velocidades para distintos procesos de proyección térmica . . .	5
2.2.	Esquema sistemas cold spray de alta presión (a) y baja presión (b) . . . . .	6
2.3.	Cambio en el número de Mach a través de una tobera de Laval. La velocidad de flujo es subsónica entrando en la tobera. El flujo acelera hasta que alcanza $M = 1$ en la garganta de la tobera, luego continúa acelerando a través de la porción de expansión de la tobera . . . . .	7
2.4.	Diagrama eficiencia deposición vs velocidad de la partícula . . . . .	8
2.5.	Impacto de una partícula de Cu en un sustrato de Cu en momentos sucesivos: (a) 5 ns, (b) 20 ns, (c) 35 ns, (d) 50 ns . . . . .	10
2.6.	Reparación caja engranaje helicóptero . . . . .	11
2.7.	SSistemas de control de lazo abierto (a) y lazo cerrado (b) . . . . .	12
2.8.	Tobera de Laval convergente-divergente . . . . .	12
2.9.	Calefactor . . . . .	14
2.10.	Brazo robotizado en aplicación de Cold Spray de la empresa Csiro . . . . .	15
2.11.	Husillo y movimiento lineal en 3 ejes . . . . .	16
3.1.	Metodología . . . . .	20
4.1.	Esqueleto acero . . . . .	21
4.2.	Esqueleto aluminio . . . . .	22
4.3.	Cabina . . . . .	22
4.4.	Diagrama del subsistema de control de temperatura . . . . .	23
4.5.	Diagrama del subsistema de control de gas . . . . .	24
4.6.	Diagrama del subsistema de movimiento . . . . .	24
5.1.	DCL . . . . .	26
5.2.	Eje X . . . . .	28
5.3.	Eje Y . . . . .	33
5.4.	Eje Z . . . . .	38
6.1.	Termocupla tipo K . . . . .	44
6.2.	Controlador . . . . .	45
6.3.	Regulador presión alta nitrógeno . . . . .	46
6.4.	Válvula corte 3 vías . . . . .	46
6.5.	Funcionamiento válvula de corte 3 vías . . . . .	47
6.6.	Gráfico torque vs velocidad, motor paso a paso . . . . .	48
6.7.	Kit motores, drivers y fuente de poder . . . . .	48

6.8. Rodamientos lineales . . . . .	49
6.9. Perfil aluminio 6063-T5 . . . . .	49
7.1. Simulación número uno esqueleto aluminio . . . . .	52
7.2. Simulación número dos esqueleto aluminio . . . . .	52
7.3. Simulación cabina . . . . .	53
8.1. Esqueleto aluminio . . . . .	54
8.2. Maquinado y montaje husillo . . . . .	55
8.3. Soporte calefactor . . . . .	56
8.4. Maquinado y montaje acople manguera y termocupla . . . . .	56
8.5. Proceso soldadura gabinete, y montado sistema de movimiento . . . . .	57
8.6. Gabinete y sistema movimiento . . . . .	58
8.7. Gabinete cerrado . . . . .	58
8.8. Diagrama eléctrico control temperatura . . . . .	59
8.9. Diagrama eléctrico sistema de movimiento . . . . .	60
9.1. Segunda prueba . . . . .	62
9.2. Gráfico ON/OFF . . . . .	63
9.3. Gráfico PID . . . . .	63
9.4. Movimientos motores simulación movimiento . . . . .	64
9.5. Prueba sistema completo . . . . .	65

# Capítulo 1

## Introducción

Este último tiempo la manufactura aditiva ha tomado bastante fuerza debido al amplio campo que puede abarcar y al sin fin de soluciones que puede entregar. Estos procesos se caracterizan por agregar o unir materiales, usualmente mediante capas, lo cual es contrario a los procesos tradicionales de manufactura sustractiva, tales como torno o fresa. Uno de los procesos de manufactura aditiva mas conocidos es la impresión 3D y su uso más general es la confección prototipos de plástico[1]. Cada vez más personas cuentan con una de estas impresoras de plástico en casa. Para lograr obtener un prototipo se requiere de un modelo 3D en formato CAD (Computer Aided Design) y luego éste se envia para ser impreso. Gracias a este tipo de tecnología se pueden obtener prototipos rápidos y de disponibilidad inmediata.

En cuanto a la manufactura aditiva con metales se conoce la proyección térmica, donde se proyectar pequeñas partículas fundidas, semi fundidas , calientes e incluso frías las que se unen sucesivamente a una superficie. El uso más común es la adición de capas de metal fundido por sinterizado láser o haz de electrones. Empresas importantes como Airbus ha elegido esta tecnología para implementar en sus proceso de manufactura, lo cual ha reducido tiempos de fabricación. No solo el área aeroespacial es una de la interesada en este tipo de manufactura, también las empresas automotrices o energía han optado por este tipo de soluciones.

Dentro de la proyección térmica con partículas frías está el Cold Spray donde estas partículas impactan en estado sólido contra el sustrato. Hay grandes empresas desarrollando e investigando este campo como lo son Dymet, Centerline, Impact Innovations, CSIRO, entre otras.

Esta Memoria consta del trabajo de diseñar y construir un sistema de Cold Spray de baja presión, con el cual se buscan realizar posteriores estudios.

## 1.1. Antecedentes Generales

Cold Spray es un proceso de proyección (aspersión) térmica, donde se producen revestimientos sin un calentamiento relevante de las partículas a proyectar. A diferencia de otros procesos conocidos de proyección térmica, tales como: plasma, arco eléctrico o llama, no se requiere la fusión de las partículas para adherir éstas al sustrato, si no que ocurre en estado sólido, por lo que se puede usar para depositar en materiales térmicamente sensibles.

En este proceso, se utilizan gases comprimidos a alta temperatura (comúnmente nitrógeno, aire o helio) como gas propulsor para acelerar el material particulado a velocidades supersónicas, y para inducir la deposición cuando los polvos impactan sobre un sustrato (típicamente metales con medidas entre 5-100 [ $\mu m$ ]), estas altas velocidades se adquieren mediante una tobera de Laval, convergente divergente, en esta última sección, divergente, se logran las altas velocidades.

La deposición se logra a través de la unión metalúrgica local y el enlazamiento mecánico que son causados por la deformación plástica localizada en las interfaces entre partículas y sustrato-partícula. Esto permite evitar los defectos que comúnmente se encuentran en los procesos de deposición de alta temperatura, como la oxidación, el estrés térmico residual y la transformación de fase [2].

## 1.2. Motivación

La presente memoria tiene como motivación la construcción de un sistema para el desarrollo de un sistema de Cold Spray, para el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Chile y así poder realizar estudios posteriores en el campo de proyección térmica con un equipo in situ. Por otra parte, el desafío es llevar la teoría a la práctica, ya que utilizando diferentes materiales de partículas metálicas se podría determinar nuevas o mejores aplicaciones.

## 1.3. Objetivo General

Diseñar y construir un sistema Cold Spray capaz de depositar un recubrimiento metálico.

## 1.4. Objetivos Específicos

- Diseñar y construir el sistema de control de presión y temperatura del gas.
- Diseñar y construir la base móvil para el equipo.
- Diseñar y construir un gabinete de protección del equipo.
- Evaluar si el sistema es capaz de generar un revestimiento de cobre.

## 1.5. Alcances

Los alcances de esta Memoria considera la construcción del equipo de Cold Spray de baja presión con su respectivo gabinete de protección y soporte móvil. El sistema de control de gas, para la temperatura y para la presión, el que es parte fundamental para la aceleración del material particulado.

En el presente trabajo no se estudiarán los siguientes aspectos: los materiales particulados a trabajar, el sustrato que recibe dichas partículas, la alimentación del material particulado, y el tipo de gas a trabajar.

Se espera presenciar partículas adheridas a otra superficie luego de terminado el equipo.

# Capítulo 2

## Antecedentes específicos

Los diferentes procesos de proyección térmica tiene en común el aporte de energía cinética y energía térmica al material de recubrimiento, normalmente en forma de polvo o varilla. El material de partida normalmente se funde total o parcialmente y se proyecta sobre una superficie limpia donde impacta e interacciona mecánicamente e incluso metalúrgicamente con el sustrato. Las características del recubrimiento dependen esencialmente del proceso de proyección térmica escogido, de los parámetros de proyección y del material que se proyecta.

En comparación con otros métodos de modificación superficial, la proyección térmica presenta una gran versatilidad en cuanto a los materiales que pueden proyectarse y los sustratos o superficies que se pueden utilizar. Prácticamente todos los materiales que se funden sin descomponerse dando una fase líquida estable, se pueden utilizar para formar recubrimientos por proyección térmica convencional. Aunque el material proyectado llegue al sustrato fundido o parcialmente fundido, el sustrato no se expone a altas temperaturas, por lo cual su forma y características estructurales y mecánicas no cambian, a diferencia de lo que sucede en soldadura y recargues por soldadura, técnicas en las cuales se genera una zona afectada por el calor. En la Figura 2.1 se observan las distintas tecnologías de proyección térmica en función del rango de temperatura y velocidad de las partículas. observamos que Cold Spray (proyección fría CGS) es la con menor temperatura.

En el presente capítulo se mencionara el funcionamiento más específico de los sistemas de Cold Spray, mencionando los diferentes subsistemas que se encuentran, como lo son la temperatura, el gas, sistemas de movimiento y la seguridad, así como lo que sucede en la tobera, con la partícula para lograr la adhesión y los principales factores que afectan para lograr el objetivo de deposición.

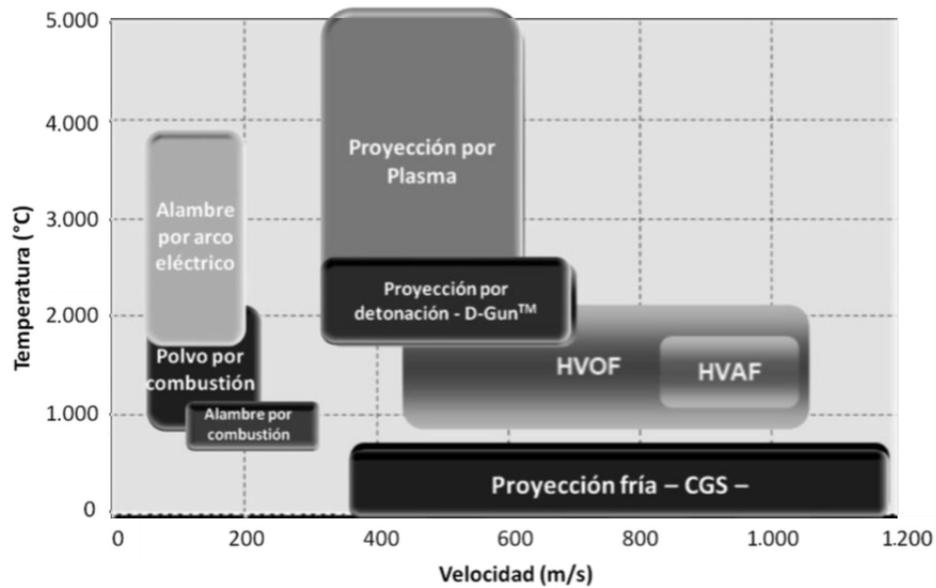


Figura 2.1: Temperatura y velocidades para distintos procesos de proyección térmica. Fuente: [3]

## 2.1. Cold Spray

La base del funcionamiento en un sistema de Cold Spray consiste en un gas inerte que es calentado mediante un calefactor de resistencia eléctrica, lo suficiente para no ablandar las partículas metálicas, pero si para dar velocidad al flujo de gas. El gas se introduce a una tobera de Laval (convergente-divergente) donde se expande y es acelerado a velocidades supersónicas. Un alimentador de polvos inyecta las partículas en el fluido de gas, para que éstas sean aceleradas a altas velocidades por el gas, luego impactan en un sustrato para formar un revestimiento. La adhesión de estas partículas está dada por las altas velocidades que alcanzan y posteriormente, debido al impacto, éstas se deforman plásticamente adhiriéndose al material.

El proceso se puede dividir en dos categorías, Cold Spray de baja presión o Cold Spray de alta presión. Como se puede apreciar en la Figura 2.2, la diferencia recae donde se encuentra el alimentador del polvo.

En la categoría de Cold Spray de alta presión, el flujo de gas se divide en dos, uno pasa por el calefactor para calentar a altas temperaturas con el objetivo mencionado anteriormente y el otro para mover las partículas del alimentador, generando una corriente de polvos, estos posteriormente se unen antes de la entrada a la tobera. La presión del gas con polvos debe ser levemente superior al gas de propulsión para que las partículas puedan incorporarse adecuadamente en la corriente de gas mezclado[2].

En la categoría de Cold Spray de baja presión, el alimentador se encuentra directamente en la tobera (en la parte divergente de ésta) las partículas de polvo sólido se introducen

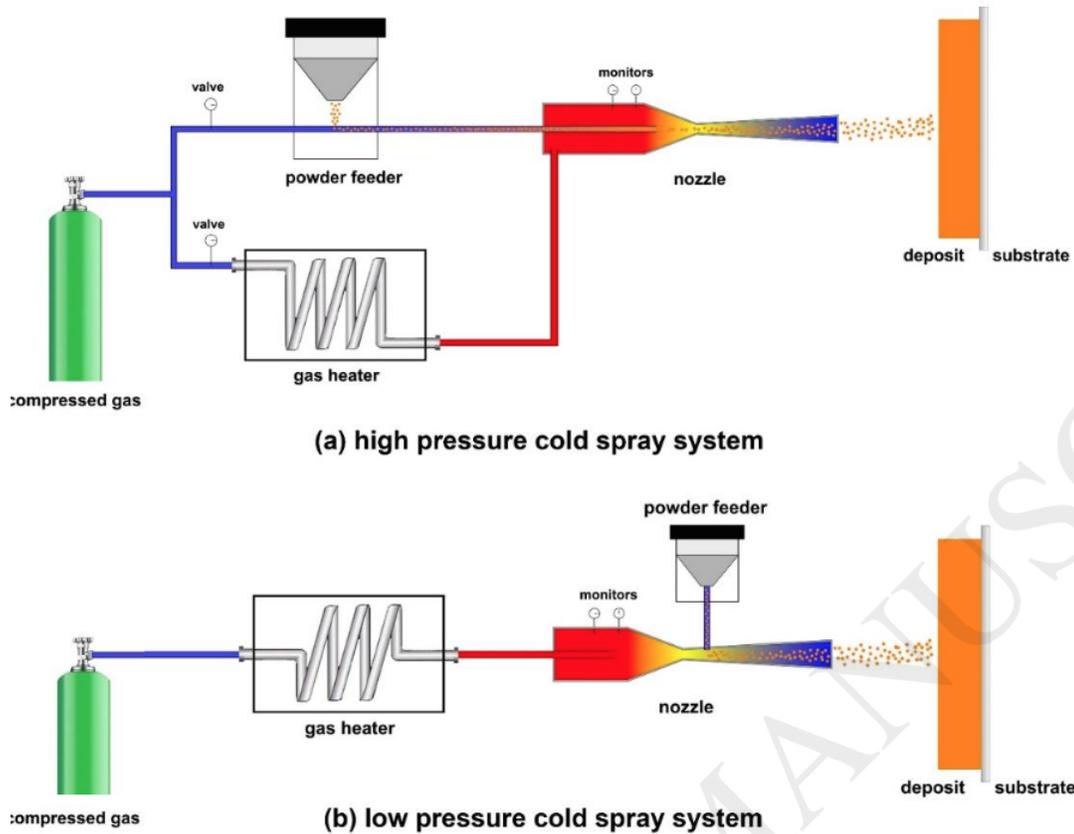


Figura 2.2: Esquema sistemas cold spray de alta presión (a) y baja presión (b). Fuente: [2]

radialmente aguas abajo de la sección de la garganta de la tobera supersónica, lo que elimina la necesidad de un sistema de suministro de alta presión, esto aumenta la portabilidad del sistema, la seguridad operativa y reduce significativamente los costos de pulverización. Dentro de la tobera, la presión estática se mantiene por debajo de la presión atmosférica, lo que garantiza que las partículas se extraigan del alimentador de polvo por efecto Venturi. Esto se logra si la relación del área de la sección transversal de la tobera supersónica en el punto de entrada del polvo  $A^i$ , y a la de la garganta  $A^*$  satisface la Ecuación 2.1 [4]

$$\frac{A^i}{A^*} > 1,3 * P_o + 0,8 \quad (2.1)$$

$P_o$  = Presión del gas a la entrada de la tobera [MPa]

A pesar de las ventajas mencionadas anteriormente sobre la portabilidad, flexibilidad y menores costos de los sistemas de baja presión, también se reduce la eficiencia de deposición (cuociente entre la masa partículas adheridas y masa partículas proyectadas), no superando el 50%, en caso de alta presión la eficiencia puede llegar hasta un 90%. Por otro lado las partículas de polvo no pasan a través de la garganta, por lo tanto, el desgaste de las paredes de la tobera solo se produce en la parte supersónica de ésta (divergente), lo que garantiza una vida útil más larga de las toberas. Además los sistemas de baja presión son más compatibles a la hora de hacer modificaciones al sistema[5].

### 2.1.1. Aceleración del gas

Se emplea una tobera de Laval para aumentar la velocidad a la que fluye un fluido, que convierte la presión de un fluido en energía cinética, aumentando la velocidad del flujo. En los flujos subsónicos internos, las toberas toman la forma de una reducción gradual de la sección transversal del conducto por el que se mueve el fluido. Esta reducción en el área hace que el flujo se acelere debido a la conservación de la masa. Sin embargo, el fluido solo puede acelerarse hasta cierto punto antes de que el flujo se ahogue y su velocidad ya no se pueda aumentar. Esto ocurre cuando el flujo de fluido alcanza una velocidad  $M = 1$ , es decir, el flujo es sónico. Para aumentar la velocidad del flujo más allá de  $M = 1$ , se debe agregar una sección divergente al extremo de la tobera, como se muestra en la Figura 2.3. Esto crea una tobera con una forma convergente-divergente, llamada tobera supersónica o de Laval. En una tobera de Laval, el flujo acelera a través de la sección convergente, alcanza  $M = 1$  en el punto más estrecho, llamado garganta, y luego acelera a  $M > 1$  a través de la sección divergente de la tobera.

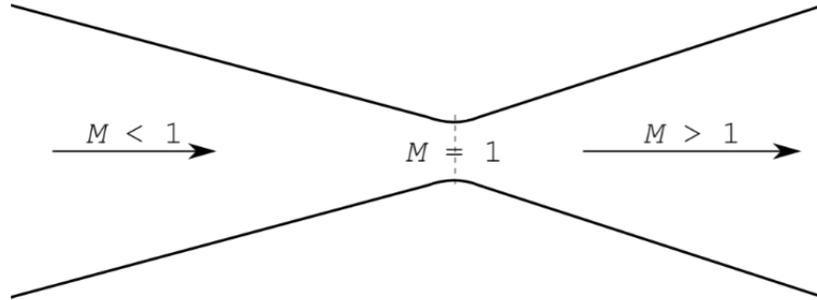


Figura 2.3: Cambio en el número de Mach a través de una tobera de Laval. La velocidad de flujo es subsónica entrando en la tobera. El flujo acelera hasta que alcanza  $M = 1$  en la garganta de la tobera, luego continúa acelerando a través de la porción de expansión de la tobera. Fuente: [6]

El número de Mach ( $M$ ) del flujo en la salida de la tobera es una función de  $\gamma$  y la relación entre el área de salida de la tobera y el área de la garganta, como se muestra en la Ecuación 2.3, donde  $A_e$  es el área de la salida de la tobera y  $A^*$  es el área de la garganta de la tobera.

$$\frac{A_e}{A^*} = \frac{1}{M} \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma+1}{2-2\gamma}} \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} * M^2 \right) \quad (2.2)$$

La diferencia en  $\gamma$  entre  $N_2$  y  $He$  es pequeña, por lo tanto, para una geometría de tobera dada, el número de Mach de salida para cada gas será similar. Sin embargo, la velocidad del sonido en los dos gases es bastante diferente. Por lo tanto, si bien los números de Mach pueden ser similares, la velocidad del flujo de salida será mucho mayor para  $He$  que para  $N_2$ . Este es un resultado importante para las aplicaciones de Cold Spray, ya que significa que la velocidad del flujo de gas y, por lo tanto, la partícula La velocidad, puede ser controlada cambiando las especies de gases [6].

Las mejoras en el diseño de la tobera utilizando modelos dinámicos de gas han llevado a velocidades de deposición más altas y la capacidad de depositar partículas más grandes, lo que resulta en recubrimientos más densos y una mayor eficiencia de deposición. Por lo tanto, la velocidad de las partículas también está influenciada por el diseño de la tobera, como el diámetro de entrada de la tobera, el diámetro de la garganta, el diámetro de salida o la relación de expansión (es decir, la relación del área de la salida a la garganta), la longitud de la sección convergente de entrada (longitud ascendente) y la longitud de salida divergente (longitud descendente). Se ha encontrado que aumentar la longitud de la tobera tiene un efecto significativo en la velocidad de las partículas. Se examina que la velocidad calculada de una partícula de cobre de  $12\ [\mu m]$  se puede aumentar de  $553\ [m/s]$  a  $742\ [m/s]$ , con un aumento del 33% en la velocidad de las partículas al aumentar la longitud de la tobera de  $83\ mm$  a  $211\ [mm]$ , con nitrógeno como el gas portador. Este aumento de la velocidad conduce a un aumento en la eficiencia de deposición desde menos del 10% hasta cerca del 80%. Sin embargo, existen limitaciones de fabricación y materiales que limitan la longitud práctica de las toberas. Por lo tanto, es necesario probar nuevos materiales para mejorar el flujo de polvo a través de la tobera y se requiere optimización en el diseño para minimizar el flujo de gas a través de la tobera [6, 7].

### 2.1.2. Velocidad crítica

El efecto de la velocidad de la partícula antes del impacto con el sustrato es uno de los factores más influyentes en el resultado que se puede obtener en el proceso, debido a que la energía cinética de la partícula se convierte rápidamente. Al deformarse plásticamente la partícula aumenta su superficie de contacto con el sustrato. Un aumento de temperatura se produce debido al roce entre la superficie de trabajo y la partícula, este aumento de temperatura y la alta presión, favorecen en la formación de enlaces metálicos entre la partícula y el sustrato.

En la Figura 2.4 se puede observar este efecto, en el que se aprecian tres fenómenos dependiendo de la velocidad de la partícula ( $V_p$ ). Existe un valor crítico de velocidad ( $V_{crit}$ ) el cual determina lo que sucede con la partícula [8].

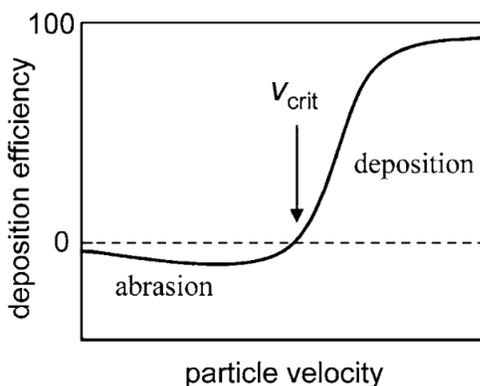


Figura 2.4: Diagrama eficiencia deposición vs velocidad de la partícula. Fuente: [8],[9]

- Cuando  $V_p$  es pequeño, las partículas que impactan rebotan en el sustrato.
- Cuando  $V_p$  alcanza un valor más alto, pero menor a  $V_{crit}$ , las partículas que impactan pueden causar erosión en el sustrato.
- Si  $V_p$  excede  $V_{crit}$ , las partículas se deforman plásticamente y se adhieren al sustrato o entre sí.

Al aumentar la velocidad de la partícula, se observa que también aumenta la eficiencia. Una unión exitosa entonces se logra cuando  $V_p > V_{crit}$ , en caso contrario, solo se logra una erosión del sustrato. Esta velocidad crítica depende del material y determina la transición de erosión del sustrato a deposición de la partícula. La velocidad que logre alcanzar la partícula está dada en función de las condiciones del proceso, dentro de las cuales se encuentran, el tipo de gas, la presión, la temperatura, tamaño de las partículas y propiedades del material. Una partícula de menor tamaño alcanzará velocidades mayores a una de tamaño mayor, pero frente a mismas condiciones de temperatura y velocidad, una partícula de mayor tamaño tiene más energía en su estado inicial, por lo que tiene más posibilidades de adherirse. Por otra parte, la velocidad crítica disminuye con el aumento de la temperatura de la partícula y la velocidad de la partícula aumenta si aumenta la temperatura del gas [9]. Como se menciona anteriormente la velocidad crítica de las partículas cambia con el material de pulverización. En la Tabla 2.1 podemos observar las velocidades críticas para ciertos materiales [10, 5].

Tabla 2.1: Velocidades críticas materiales

Material	Velocidad [m/s]
Cu	560-580
Fe	620-640
Ni	620-640
Al	680-700

### 2.1.3. Adhesión

La deposición se logra a través de la unión metalúrgica local y el entrelace mecánico que son causados por la deformación plástica localizada en las interfaces entre partículas y sustrato-partícula. Durante el impacto, las partículas sólidas sufren una deformación plástica, rompen las películas de superficie delgada (óxidos), logrando un contacto íntimo que combinado con una alta presión de contacto promueve la unión metalúrgica con la superficie. Esto permite evitar los defectos que comúnmente se encuentran en los procesos de deposición de alta temperatura, como la oxidación, el estrés térmico residual y la transformación de fase. Los fenómenos comunes que se encuentran durante la pulverización sobre diversos sustratos es la deformación del sustrato y de la partícula, y la unión al sustrato como se muestra en la Figura 2.5, en la cual una esfera de cobre de 20  $[\mu m]$  impacta sobre un aluminio a 650  $[m/s]$ . Muestra que el material adyacente a la interfaz se comporta como un líquido viscoso, lo que da como resultado la formación de ondas interfaciales, enrollamientos y vórtices, lo que facilita la unión [5, 11].

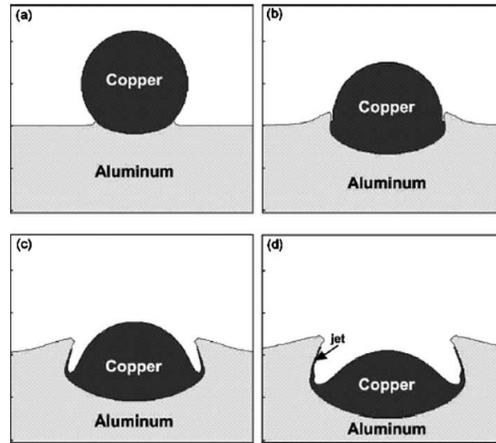


Figura 2.5: Impacto de una partícula de Cu en un sustrato de Cu en momentos sucesivos: (a) 5 ns, (b) 20 ns, (c) 35 ns, (d) 50 ns. Fuente: [5]

#### 2.1.4. Ventajas y aplicaciones

Una ventaja frente a otros procesos de proyección térmica, donde se funde en material, es el gasto energético, mientras en otros procesos se requiere calentar las partículas hasta fundirlas, en Cold Spray las partículas se mantienen en estado sólido en todo el proceso.

Otra característica importante es que al impactar las partículas en estado sólido y deformarse plásticamente, las partículas mantienen su microestructura inicial, por lo que se obtiene un material más resistente y con mejores propiedades mecánica.

El equipo permite también el uso de materiales sensibles a la oxidación como es el caso del Aluminio, Titanio, Cobre e incluso de Carburo de Tungsteno. Además, permite depositar materiales con un alto punto de fusión como es el Tantanio, el Niobio y las superaleaciones metálicas.

En cuanto a usos y aplicaciones de Cold Spray además de generar revestimientos, nos encontramos con reparaciones de piezas mecánicas deterioradas, como se puede observar en la Figura 2.6, donde a la izquierda se observa la pieza dañada y a la derecha la pieza con aplicación de Cold Spray y postprocesado[2].

También relleno en orificios o piezas de fundición defectuosas, por otro lado, dependiendo del material permite aislamiento térmico o eléctrico.



Figura 2.6: Reparación caja engranaje helicóptero. Fuente: [2]

Hoy en día existen muchos trabajos y estudios en manufactura aditiva y en impresión 3D de metales a lo largo del mundo. Debido a los avances en robótica y máquinas CNC, las aplicaciones de Cold spray son diversas y cuentan con un gran potencial, tanto en áreas aeroespaciales, como en energía y uso militar.

## 2.2. Componentes del sistema

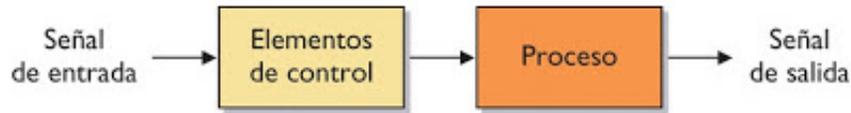
En la presente sección se presentan los diferentes subsistemas y sus principales componentes para un funcionamiento óptimo del sistema de Cold Spray. Los cuatro subsistemas

1. Control de temperatura
2. Control de gas
3. Movimiento
4. Seguridad

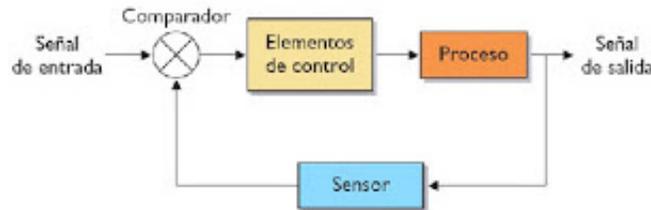
Cabe mencionar que existen distintos tipos de control para un sistema, con un conjunto de dispositivos los cuales ordenan, dirigen o regulan el comportamiento del sistema. En un sistema la señal de salida puede influir o no sobre el funcionamiento del sistema, de esto recae los tipos de sistema de control más comunes, de lazo abierto y lazo cerrado.

Los sistemas de control de lazo abierto la señal de salida no afecta al funcionamiento del sistema, o sea es independiente a la señal de entrada, pero basada en ella. Lo que quiere decir que no existe retroalimentación, como se puede observar en la Figura 2.7 a).

En el caso del sistema de control de lazo cerrado la señal de salida sí tiene influencia en el proceso, creando una realimentación en este modificando la señal de entrada en función de la señal de salida, en la Figura 2.7 b) se puede observar que mediante un sensor ocurre la realimentación [12].



a) Sistema de control de lazo abierto



b) Sistema de control de lazo cerrado

Figura 2.7: Sistemas de control de lazo abierto (a) y lazo cerrado (b). Fuente: Figura es una modificación de [12]

### 2.2.1. Subsistema control del gas

#### Tobera de Laval

Como se menciona en la Sección 2.1.1 las toberas son dispositivo que convierten la energía térmica y presión del fluido, en energía cinética. En el caso de la toberas de Laval, éstas tienen una parte convergente por donde entra el flujo y otra divergente por donde sale el flujo, en ésta última gracias a que la sección de la tobera va aumentando de diámetro, la velocidad se incrementa, como se observa en la Figura 2.8; en este proceso el gas sufre una disminución de presión y de temperatura.

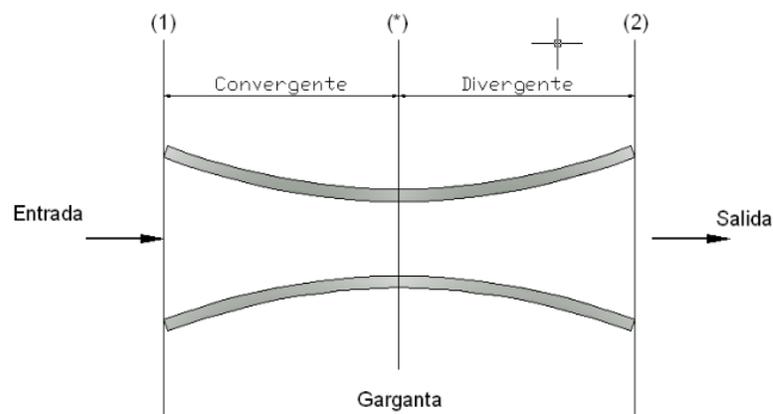


Figura 2.8: Tobera de Laval convergente-divergente.

## 2.2.2. Subsistema control de temperatura

### Controladores de temperatura

Para regular con precisión la temperatura del proceso sin la participación continua del operador, un sistema de control de temperatura se basa en un regulador, el cual acepta un sensor de temperatura tal como un termopar. Se compara la temperatura real a la temperatura de control deseada, o punto de ajuste, y proporciona una salida a un elemento de control. Puntos de consideración de un controlador:

1. Tipo de sensor de entrada (termopar, RTD) y rango de temperatura
2. Tipo de salida requerida (relé electromecánico, SSR, salida analógica)
3. Algoritmo de control necesario (encendido / apagado, control proporcional, controlador PID)
4. Número y tipo de salidas (calor, frío, alarma, límite)

Los algoritmo de control mas comunes es de *ON/OFF* (encendido/apagado) y *PID*. En *ON/OFF* se fija la temperatura del sistema. Si el medidor de temperatura (termocupla tipo K) lee menor temperatura de la deseada, el control activa la señal para activar el paso de corriente y así enciende el calefactor, cuando éste sobrepasa la temperatura fijada, se desactiva el paso de la corriente. Nuevamente, si baja de la temperatura deseada se manda la señal de activación y asi sucesivamente.

En "*PID*" se tienen 3 tipos de variables: *P* que es la variable proporcional, *I* la variable integral y *D* la variable derivativa, estas tres variables nos permiten ajustar el proceso de control de temperatura a la temperatura deseada. La variable proporcional depende del error actual, la integral depende de los errores pasados y la derivativa es una predicción de los errores futuros[13].

Control proporcional es una parte del control *PID* donde solo se considera la variable proporcional *P*

### Termocupla

También llamados termopares, están conformados por dos metales distintos, los cuales producen una diferencia de potencial en función de la diferencia de temperatura en la junta de los extremos. Existen distintos tipos de termocuplas según el material de fabricación, lo que nos determina su rango de temperatura entre otras características. Además existen de distintos diámetros y tipos de conexiones [14]

### Calefactor

El calefactor es un aparato eléctrico que transforma energía eléctrica en energía calorífica, ésto debido a resistencias en su interior y el efecto Joule.

Existen tres formas de transferir calor: por conducción, convección y radiación. El utilizado en este caso es de convección, donde el flujo de aire entra por un extremo, y su salida es por el otro extremo con la temperatura deseada como podemos observar en la Figura 2.9. Los calefactores que se usan actualmente tienen los siguientes parámetros:

- Temperatura salida: 25°C a 1000°C.
- Poder calorífico 2-15 kW.

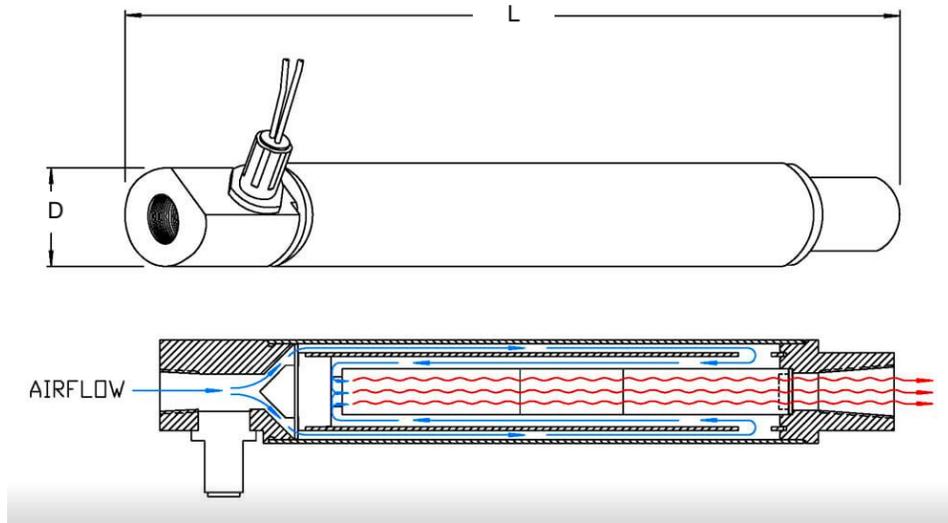


Figura 2.9: Calefactor.

### 2.2.3. Subsistema de movimiento

Existen distintas formas de movimientos para máquinas y herramientas, tanto manuales como computarizados (CNC). El control numérico computarizado o CNC, en la actualidad, se encuentra en casi todas partes, ya que no solo abarcan los grandes establecimientos industriales, sino también talleres de todo tipo, tanto de pequeña como mediana envergadura. El control numérico computarizado es el uso de una computadora para controlar y monitorear los movimientos de una máquina herramienta. Entre esas máquinas herramienta, tanto estáticas como portátiles, podemos mencionar: fresadora, torno, rectificadora, máquina de corte por láser, por chorro de agua, prensa, e incluso brazos robotizados como el de la Figura 2.10, entre otros. Las máquinas de gran porte cuentan con una computadora dedicada que forma parte del equipo, y la mayoría dispone de un sofisticado sistema de realimentación que monitorea y ajusta constantemente la velocidad y posición de la herramienta de corte. Las máquinas menos exigentes usadas en talleres admiten el uso de una computadora personal externa. El controlador CNC trabaja en conjunto con una serie de motores (servomotores y/o motores paso a paso), así como componentes de accionamiento para desplazar los ejes de la máquina de manera controlada y ejecutar los movimientos programados.

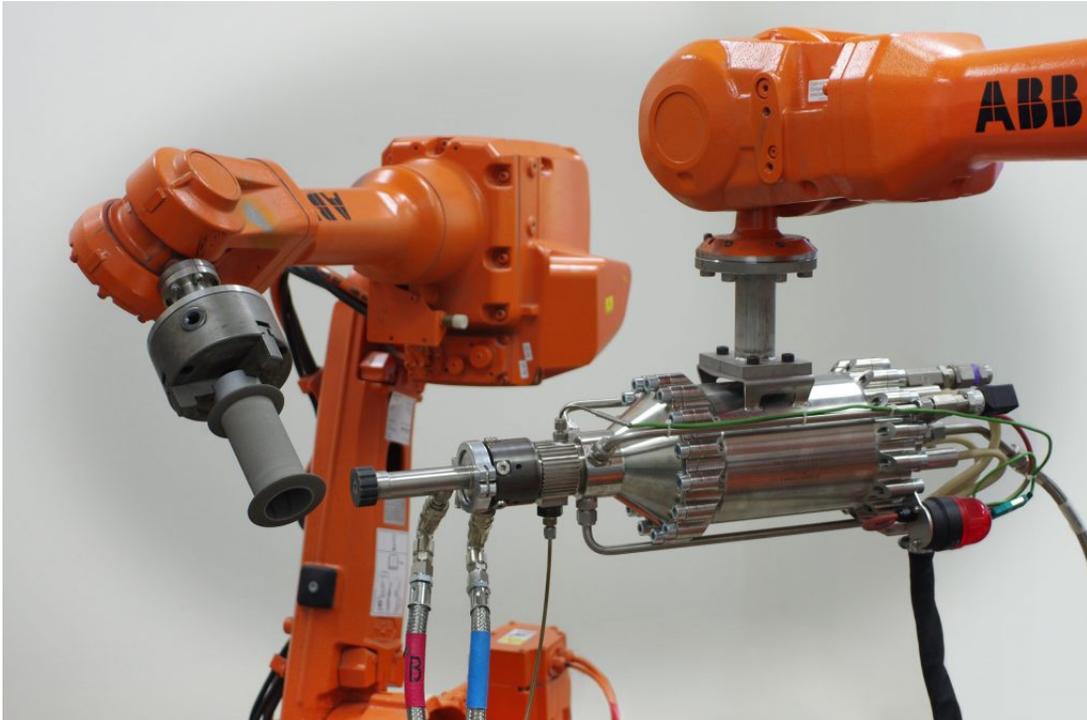


Figura 2.10: Brazo robotizado en aplicación de Cold Spray de la empresa Csiro[15]

El controlador de las máquinas CNC recibe instrucciones de la computadora (en forma de códigos G) y mediante su propio software convierte esas instrucciones en señales eléctricas destinadas a activar los motores que, a su vez, pondrán en marcha el sistema de accionamiento. Todas las máquinas CNC comparten una característica en común: tienen dos o más direcciones programables de movimiento llamadas ejes. Un eje de movimiento puede ser lineal (en línea recta) o rotatorio (en una trayectoria circular). Una de las primeras especificaciones que implica la complejidad de una máquina CNC es la cantidad de ejes que tiene. En términos generales, a mayor cantidad de ejes, mayor complejidad.

### **Motores stepper**

Los motores paso a paso (stepper) son dispositivos electromecánicos, los cuáles convierten impulsos eléctricos en desplazamientos angulares, un paso equivale a  $1,8^\circ$  de giro por lo que para una vuelta entera se requieren de 200 pasos. Estos motores poseen alta precisión, lo cual es su ventaja, por esto son ideales para máquinas CNC u otras máquinas de automatización, pero su desventaja es la pérdida de potencia a medida que aumentan las revoluciones.

## Husillo

El husillo es un tipo de tornillo largo y gran diámetro, como se puede apreciar en la Figura 2.11 (a), el cual permite el desplazamiento lineal de un carro, usado generalmente en fresas o tornos, este será usado para movimiento lineal en 3 ejes del sistema como se observa en la Figura 2.11 (b).

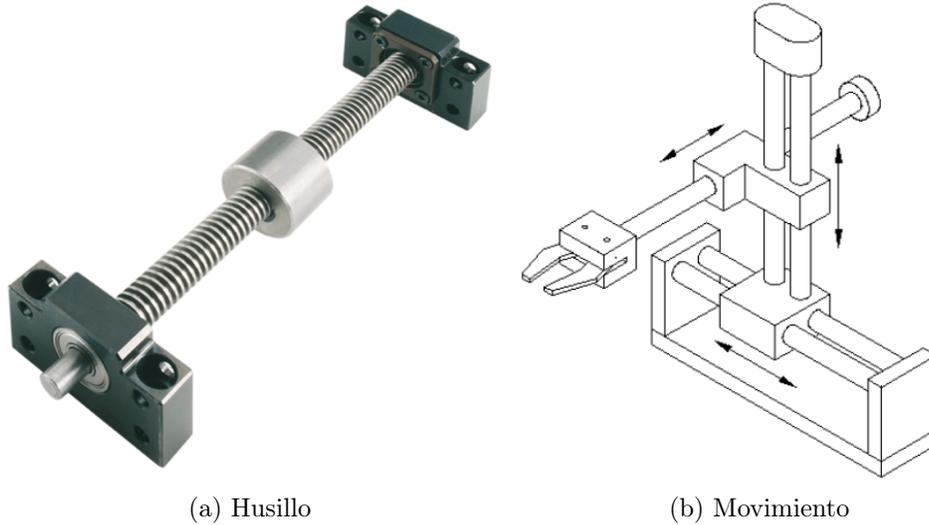


Figura 2.11: Husillo y movimiento lineal en 3 ejes

### 2.2.4. Subsistema de seguridad

La seguridad en todo proceso es un tema importante, ya que los accidentes pueden ocurrir por diferentes causas, ya sea un mal mantenimiento, falta de protecciones, mal manejo del equipo, entre otras cosas.

En cuanto a las protecciones que deben considerarse en un sistema de Cold Spray, se pueden apreciar los siguientes aspectos; inhalación de partículas o polvos contaminantes, daño auditivo por el sonido, salto partículas a ojos y el contacto de partes móviles y/o calientes. Es por esto que es necesaria una cabina de protección que aísle estos peligros al usuario.

Por consiguiente, el uso de elementos de protección personal (EPP) es muy importante para cuidar el cuerpo humano, total o en parte, de los riesgos del trabajo. Protector auditivo, guantes, lentes seguridad, zapatos de seguridad, mascarilla son los principales EPP que se deben emplear.

# Capítulo 3

## Metodología

La metodología que utilizada en el presente trabajo de título es la siguiente:

- Definir criterios de diseño
- Diseño preliminar
- Memoria de cálculo
- Selección de componentes
- Diseño y validación mediante elementos finitos.
- Cubicación, construcción y ensamblaje
- Pruebas

### 3.1. Criterios de diseño

Para la construcción del presente sistema se definen los siguientes criterios de diseño:

Tabla 3.1: Criterios de diseño

Sistema Cold Spray	Baja Presión
Gas	Aire comprimido, Nitrogeno
Movimiento	Motorizado
Desplazamiento mínimo	200x200x50 [mm]
Temperatura	Hasta 500 [°C]
Presión	Hasta 500 [psi]
Calefactor	3.8 [kW]

## 3.2. Diseño preliminar

El diseño preliminar es necesario antes de realizar la memoria de cálculo para tener un concepto claro de lo que se quiere realizar, este se observa en detalle en el Capítulo 4.

## 3.3. Memoria de cálculo

### Subsistema control de temperatura y subsistema control de gas

En la memoria de cálculo para los subsistemas de control de temperatura y control de gas, se utilizarán las mismas ecuaciones, es por esto que consideran en un mismo capítulo. Lo calculado en esta sección es para saber hasta qué presión podemos trabajar a cierta temperatura, y con hasta qué temperatura podemos trabajar a cierta presión, esto depende de la potencia de calefactor que tenemos y del flujo másico de nuestro sistema. Al existir dependencia de una ecuación respecto a la otra, debido a la presión temperatura y flujo másico, será necesaria realizar una iteración en los resultados para llegar al definitivo.

Se realizará el cálculo para  $500[^\circ C]$  y ver hasta qué presión de trabajo se puede alcanzar. Y también se hará el cálculo a  $500[Psi]$  para ver qué temperatura se puede alcanzar el gas.

### Subsistema de movimiento

La memoria de cálculo se realiza para los elementos más importantes del sistema de movimiento, como son los ejes guías, el husillo para el desplazamiento lineal y los motores.

En primera instancia se calcula la fuerza de impulsión generada por el flujo de gas que sale de la tobera es calculada para comprobar si se debe tener en cuenta o no en los cálculos posteriores, ya que se contrarresta a la fuerza peso generada por los otros componentes del sistema (fuerza impulsión y fuerza peso misma dirección pero diferente sentido).

Posteriormente se calcula la flexión en los ejes en donde la flexión máxima es calculada para el eje que recibe la mayor carga. En este caso es para el eje  $X$ , que soporta al calefactor, al sistema de movimiento del eje  $Z$  y a la fuerza de impulsión mencionada anteriormente (en caso de considerarse ya que si es muy baja este cálculo se realizará cuando el sistema este en reposo y solo se considerara fuerza peso). El eje  $Y$  solo soporta al sustrato, que en este caso solo serán placas de aluminio. Cabe destacar que este cálculo se realiza si la carga total fuese en un solo eje, pero en la realidad son dos por.

Finalmente se realiza los cálculos para el sistema de transporte tanto horizontal del eje  $X$  como del eje  $Y$  y vertical del eje  $Z$ , donde los más importantes consideran a las fuerzas aplicadas en aceleración, movimiento uniforme y deceleración. cargas críticas axiales y torque requerido para el motor

### 3.4. Selección de componentes

En base a lo anterior y a la disponibilidad del mercado se seleccionan los componentes, equipos, materiales e instrumentos para cada subsistema.

**Control de temperatura:** Termocupla, controlador temperatura

**Control de gas:** Manguera, regulador presión.

**Movimiento:** perfiles de estructura, husillo, ejes lineales, rodamientos, motor,

**Seguridad:** perfiles de estructura, enchapado.

### 3.5. Diseño y validación mediante elementos finitos

El modelo 3D y la validación mediante elementos finitos se realiza en el software Inventor. La iteración en el diseño, es en base al análisis de elementos finitos y a la disponibilidad en el mercado de componentes o materiales.

### 3.6. Cubicación, construcción y ensamblaje

Finalizado lo anterior se realiza la cubicación del todo el sistema su correspondiente cotización y las compras.

La construcción del equipo de Cold Spray se lleva a cabo en las dependencias de la Universidad, específicamente en el taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica, donde se cuenta con las condiciones necesarias para la construcción de éste.

Con la adquisición del calefactor y tobera se procederá a definir las medidas para la estructura móvil, y su respectiva construcción. En conjunto a la realización de la estructura móvil se realizarán los soportes para los distintos ejes y calefactor, una vez terminado se realiza la prueba de control de gas.

Superada la primera prueba se realizará la prueba de control de temperatura, en paralelo se continúa con el término del subsistema de movimiento. Se confeccionará el alimentador de partículas. Una vez terminado nuevamente se realizarán pruebas para comprobar la correcta proyección de partículas.

En todo este proceso, se seguirá con pruebas de proyecciones de partículas y corroborando el correcto funcionamiento del subsistema de control de gas y temperatura.

Finalmente, se procederá a realizar un soporte del sustrato y las protecciones del equipo para la seguridad del operario. En la Figura 3.1 se pueden apreciar las etapas del trabajo.

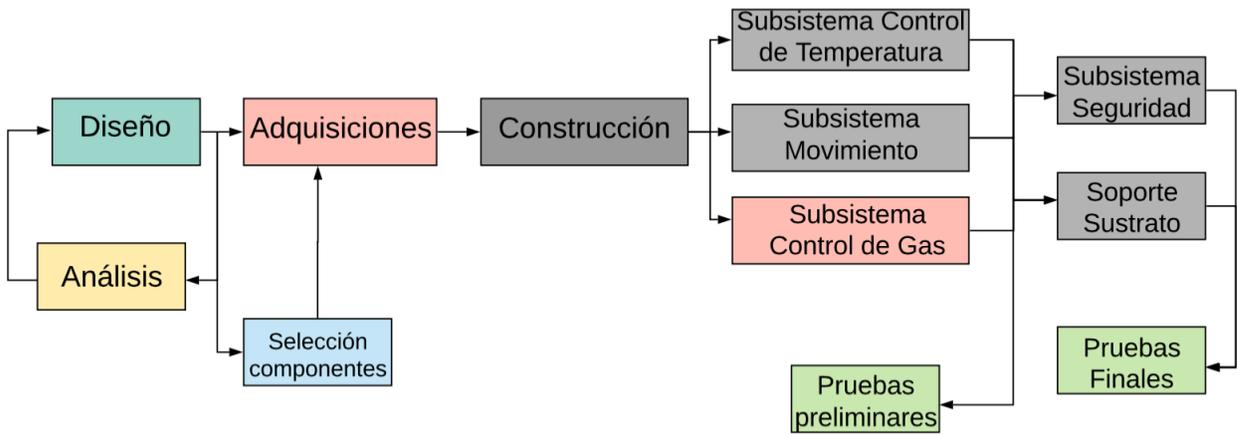


Figura 3.1: Metodología. Fuente: Elaboración propia

# Capítulo 4

## Diseño preliminar

### 4.1. Diseño

En primera instancia se estima realizar el esqueleto de todo el sistema, con perfiles de acero, cuadrados y rectangulares, soldando éstos entre si como se aprecia en la Figura 4.1.



Figura 4.1: Esqueleto acero. Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar varias opciones y según disponibilidad en el mercado nacional, se opta por usar perfiles de aluminio mencionados la Sección 6.5., los cuales al poseer canaletas, las que tienen tuercas deslizantes especiales, hacen más fácil el movimiento de sus componentes y acoples, el armado y desarmado de todo este sistema. Este se puede observar en la Figura 4.2.



Figura 4.2: Esqueleto aluminio. Fuente: Elaboración propia

Se puede además observar que los husillos necesitan un apoyo y espacio para su acople con el motor, por lo que se debe dejar una distancia considerable para que puedan ser maquinados (quitar hilo y rebajar diámetro)

Por otro lado, tenemos la cabina de protección la cual en un principio, será con perfiles de acero cuadrados, cerrada con láminas de acero y acrílico, como se observa en la Figura 8.5.



Figura 4.3: Cabina. Fuente: Elaboración propia

El acrílico facilita la visión del proceso además de asegura el cuidado del usuario, en la Figura además se puede presenciar en amarillo donde se dispondrá la caja con los componentes eléctricos.

## 4.2. Diagramas

En la presente sección se presentan los diagramas electrónicos y del fluido y sus principales componentes.

### 4.2.1. Control de temperatura

En la Figura 4.4 podemos observar el diagrama del subsistema de control de temperatura, donde mediante el controlador de temperatura envía la señal a un relé de estado sólido y posterior al calefactor para llegar a la temperatura deseada, a la salida de este se tiene un sensor el cual es una termocupla que hace la realimentación del proceso, se puede apreciar claramente que es un control de sistema de lazo cerrado a diferencia del que se observa en la Figura 4.5.

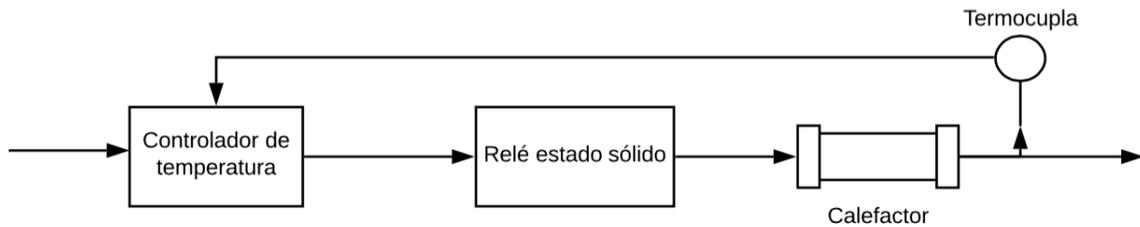


Figura 4.4: Diagrama del subsistema de control de temperatura. Fuente: Elaboración propia

### 4.2.2. Control de gas

En la Figura 4.5 podemos observar el diagrama del subsistema de control de gas, en donde tanto el cilindro de nitrógeno como el compresor de aire cuentan con un regulador de presión, posteriormente se encuentran en una válvula de corte de 3 vías, tipo *L*, la cual permite el paso de un solo fluido al calefactor, luego del calefactor nos encontramos con la tobera de Laval.

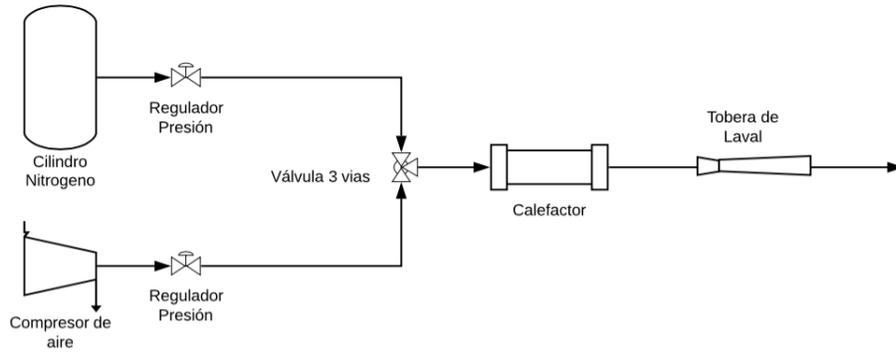


Figura 4.5: Diagrama del subsistema de control de gas. Fuente: Elaboración propia

### 4.2.3. Movimiento

En el subsistema de movimiento se tienen un controlador que envía señales a los motores en código G de los tres ejes, en los tres ejes existe un final de carrera los que señalan la posición (0, 0, 0) del sistema. Por otro lado se tiene un computador el cual mediante un software genera el código G para el movimiento de los ejes, esto se puede observar en la en la Figura 4.6

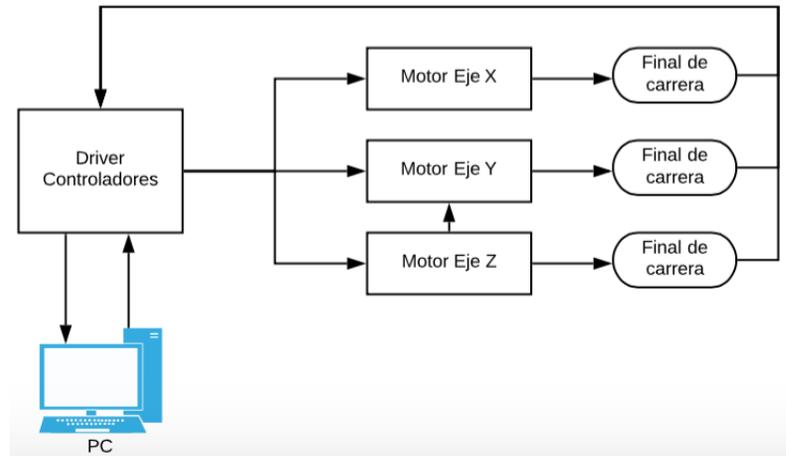


Figura 4.6: Diagrama del subsistema de movimiento. Fuente: Elaboración propia

# Capítulo 5

## Memoria de cálculo

### 5.1. Temperatura y presión máxima de trabajo

Con la potencia del calefactor  $P[W]$  Ecuación 5.1 [16], se puede obtener la máxima diferencia de temperatura que podemos tener, dependiendo también del flujo másico  $\dot{m}[kg/s]$  y el calor específico  $C_p[kJ/kgK]$ .

$$P = \dot{m} * C_p * \Delta T[W] \quad (5.1)$$

Con lo que la diferencia de temperatura nos queda de la siguiente forma

$$\Delta T = \frac{P}{\dot{m} * C_p}[K] \quad (5.2)$$

El flujo másico se obtiene de la Ecuación 5.3 [17]

$$\dot{m} = \frac{A * P_t}{\sqrt{T_t}} * \sqrt{\frac{\gamma}{R}} * \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{\frac{-\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}[kg/s] \quad (5.3)$$

Los datos que no cambian son los siguientes ya que son propios del Nitrogeno [18]

Tabla 5.1: Parámetros cálculo temperatura y presión máxima

Parámetro	Parámetro	Valor
Area (carganta tobera)	$A$	$3,14[mm^2]$
Calor específico	$C_p$	$1040[J/kg * K]$
Constante gas	$R$	$297[J/kgK]$
Relación de calor específico	$\gamma$	$1,4$

Con estas ecuaciones se puede fijar la temperatura máxima de  $500[^\circ C]$  para buscar la presión máxima de trabajo  $P_t$ , se tendrán una diferencia de temperatura de  $\delta T = 485[^\circ C]$  (suponiendo una temperatura inicial del gas de  $15[^\circ C]$ ).

Luego se fija una presión máxima  $P_t = 500[\text{Psi}]$ , para buscar la temperatura máxima de trabajo. Los resultados se muestran en la tabla a continuación

Tabla 5.2: Resultados temperatura y presión máxima

Valor Fijo	Resultado valor trabajo máximo
Temperatura = $500[^\circ\text{C}]$	Presión = $243[\text{Psi}]$
Presión = $500[\text{Psi}]$	Temperatura = $199[^\circ\text{C}]$

## 5.2. Fuerza impulsión

La primera fuerza que se calcula es la fuerza de chorro, Ecuación 5.5, generada por el flujo de gas que sale de la tobera. Para este cálculo la densidad que se utiliza es la del aire a temperatura ambiente  $\rho = 1,225[\text{kg}/\text{m}^3]$ , el diámetro de la salida de la tobera de  $r = 10[\text{mm}]$ , y a una velocidad de salida de  $V = 1000[\text{m}/\text{s}]$ . Los valores elegidos son para maximizar esta fuerza y tener mayor seguridad en los componentes. El cálculo del caudal  $Q[\text{m}^3/\text{s}]$  se observa en la Ecuación 5.4. [19]

$$Q = A * V = r^2 * \pi * V = 0,079[\text{m}^3/\text{s}] \quad (5.4)$$

$$F_i = \rho * Q * V = 59[\text{N}] \quad (5.5)$$

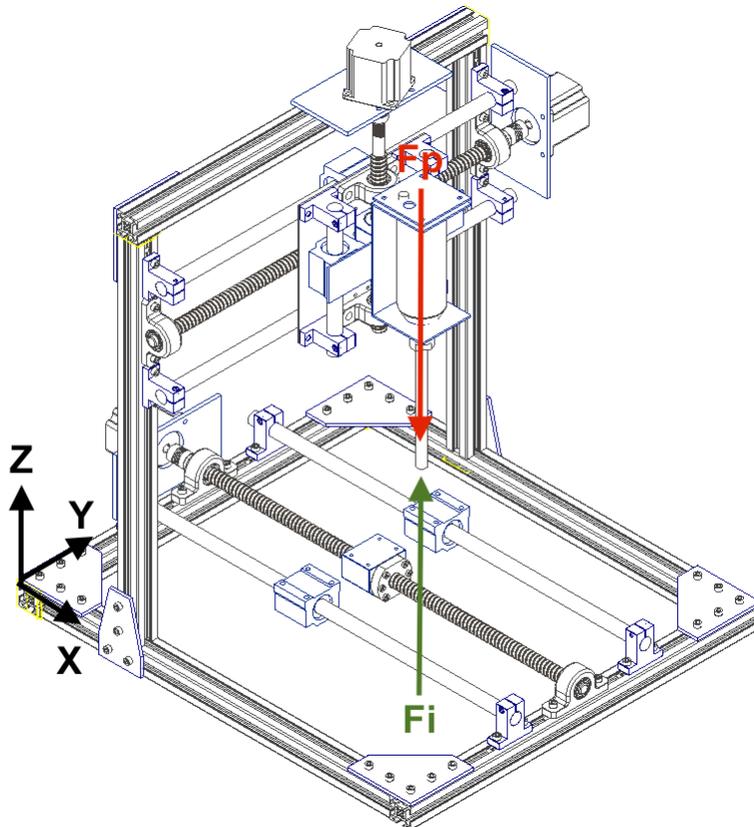


Figura 5.1: DCL. Fuente: Elaboración propia

### 5.3. Flexión ejes

La flexión máxima es calculada para el eje que recibe la mayor carga. En este caso es para el eje  $X$ , que soporta al calefactor, al sistema de movimiento del eje  $Z$  y a la fuerza de impulsión mencionada anteriormente. El eje  $Y$  solo soporta al sustrato, que en este caso solo serán placas de aluminio.

La fuerza para el cálculo es la suma de la fuerza peso con la fuerza de impulsión, que al tener sentido contrario se restan, como se observa en la Figura 5.1. La fuerza peso  $F_p$  se estima en  $200[N]$

$$F = F_p + F_i = 200 - 59 = 141[N] \quad (5.6)$$

Pero esta fuerza es menor que la fuerza peso  $F_p$ , por lo que en el estado de reposo la carga es mayor, es por esto el el cálculo se realiza con la fuerza peso.

La longitud de este eje es de  $l = 470[mm]$  entre los apoyos, el modulo de young para el acero es de  $E = 2,06 * 10^5[N/mm^2]$ , y el momento geometrico mínimo de inercia del eje  $I$  ésta dado por la Ecuación 4.4, con un diametro  $d = 16[mm]$

$$I = \pi * \frac{d^4}{64} = 3216[mm^2] \quad (5.7)$$

$$Y_{max} = \frac{-F * l^3}{48 * E * I} = 0,46[mm] \quad (5.8)$$

Lo que nos da una tasa de deformación de  $0,09\%$ , y se exige una máxima de  $0,1\%$

## 5.4. Sistema de transporte horizontal Eje X

Los procedimientos de cálculos desarrollados a continuación son referidos de la empresa THK [20]

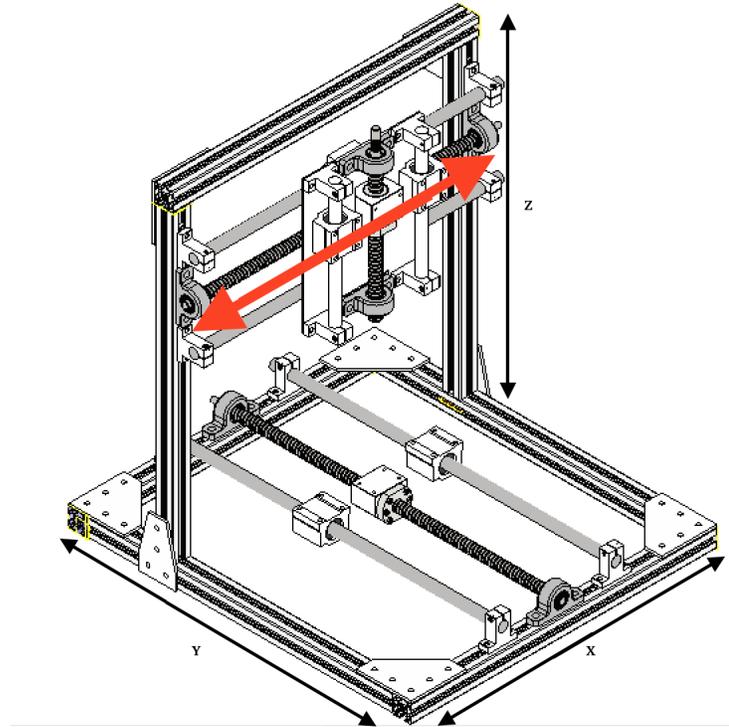


Figura 5.2: Eje X. Fuente: Elaboración propia

### 5.4.1. Consideración de la longitud del eje de husillo

El largo de carrera, considerado como parámetro de diseño para el movimiento en el eje X, es de 470 [mm], pero hay que considerar los apollos y acople con el motor. Los husillos se encuentran con hilo en todo el eje, por ésto se requiere un husillo de 520 [mm] de longitud, el cual es mecanizado en los extremos.

### 5.4.2. Selección método soporte de eje de husillo

Con la carrera de 470 [mm] y una velocidad máxima de 0,07 [m/s], se puede seleccionar la configuración para el soporte del eje de husillo fija-con soporte o fija-fija, esta última requiere una estructura compleja, se necesita una alta precisión de instalación, por lo que se elige la configuración fija-con soporte como el método de soporte.

### 5.4.3. Análisis de la carga axial admisible

#### Cálculo de la carga axial máxima

Tabla 5.3: Parámetros diseño Eje X

Parámetro	Parámetro	Valor
Resistencia de la superficie de la guía	$f$	20[N] sin carga
Masa de la tabla	$m_1$	15[kg]
Masa de trabajo	$m_2$	10[kg]
Coefficiente fricción	$\mu$	0,003
Velocidad máxima	$V_{max}$	0,07[m/s]
Aceleración gravitacional	$g$	9,81[m/s <sup>2</sup> ]
Tiempo de aceleración	$t_1$	0,2[s]

A partir de los parámetros nombrados anteriormente se obtiene la aceleración.

$$\alpha = \frac{V_{max}}{t_1} = 0,35[m/s^2] \quad (5.9)$$

Se identifican 6 fuerzas axiales dependiendo del desplazamiento que se realice. Dos sentidos derecha e izquierda y 3 situaciones aceleración, movimiento uniforme y desaceleración

Durante la aceleración hacia derecha:

$$Fa_1 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f + (m_1 + m_2) * \alpha = 29,49[N] \quad (5.10)$$

Durante el movimiento uniforme hacia derecha:

$$Fa_2 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f = 20,74[N] \quad (5.11)$$

Durante la deceleración hacia derecha:

$$Fa_3 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f - (m_1 + m_2) * \alpha = 11,99[N] \quad (5.12)$$

Durante la aceleración hacia la izquierda:

$$Fa_4 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f - (m_1 + m_2) * \alpha = -29,49[N] \quad (5.13)$$

Durante el movimiento uniforme hacia izquierda:

$$Fa_5 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f = -20,74[N] \quad (5.14)$$

Durante deceleración hacia izquierda:

$$Fa_6 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f + (m_1 + m_2) * \alpha = -11,99[N] \quad (5.15)$$

Así se obtiene la carga axial máxima aplicada sobre el husillo

$$Fa_{max} = Fa_1 = 29,49[N]$$

### Carga axial crítica

Es necesario seleccionar un eje de husillo que no se pandee al aplicar la máxima carga de compresión en la dirección axial

Pero antes del cálculo de la carga de pandeo  $P_1[N]$ , es necesario conocer los siguientes parámetros:

- Distancia entre dos superficies de montaje  $l_a = 470[mm]$
- Modulo de Young  $E = 2,06 * 10^5 N/mm^2$
- Momento geométrico mínimo de inercia del eje  $I$
- Diámetro menor de rosca del eje de husillo  $d_1 = 14[mm]$

$$I = \frac{\pi}{64} * d_1^4 = 1885[mm^4] \quad (5.16)$$

$\eta_1$  = Factor de acuerdo metodo de montaje

- Fijo - libre:  $\eta_1 = 0,25$
- Fijo - con soporte:  $\eta_1 = 2$
- Fijo - fijo:  $\eta_1 = 4$

En este caso se usa  $\eta_1 = 2$ , fijo-con soporte como se menciona anteriormente

$$P_1 = \frac{\eta_1 * \pi * E * I}{l_a^2} * 0,5 = 17356[N] \quad (5.17)$$

#### 5.4.4. Análisis de torsión de fricción debido a una carga externa

##### Par de torsión de fricción debido a una carga externa

El par de torsión de fricción  $T_1$  se obtiene de la siguiente manera, donde  $Fa$  es la fuerza durante movimiento uniforme ( $Fa_2$ )[N],  $Ph$  es el paso  $5[mm]$  y  $\eta$  es el factor asociado al coeficiente de fricción  $0,9$ .

$$T_1 = \frac{Fa_2 * Ph}{2 * \pi * \eta} = 18,33[N/mm] \quad (5.18)$$

## Par de torsión debido a una carga previa sobre el husillo

El husillo de bolas no incluye una carga previa

## Par de torsión requerido para la aceleración

Para conocer los torques relacionados con la aceleración, primero es necesario conocer el momento de inercia del eje del husillo  $J_s$ . Se tiene también que el momento inercial por unidad de largo del husillo es de  $I = 3,9 * 10^{-4} [Kg * cm^2/mm]$  y para un largo de  $l = 520 [mm]$  se tiene un momento de inercia del eje del husillo :

$$J_s = I * l = 0,2028 [Kg * cm^2] \quad (5.19)$$

A partir de lo anterior, el momento de inercia

$$J = (m_1 + m_2) * \left(\frac{Ph}{2 * \pi}\right)^2 * 10^{-6} + J_s^2 = 3,6 * 10^5 [Kg * m^2] \quad (5.20)$$

## Revoluciones promedio por minuto

Para los siguientes cálculos, se necesitan en primera instancia las revoluciones promedio por minuto  $N_m$ , donde se tienen las reciprocaciones por minuto  $n = 5 [rpm]$ , el paso mencionado anteriormente  $Ph = 5 [mm]$ , y el largo de carrera  $l_s = 470 [mm]$

$$N_m = \frac{2 * n * l_s}{Ph} = 940 [rpm^{-1}] \quad (5.21)$$

## Aceleración angular

Por otro lado, se tiene la aceleración angular:

$$w' = \frac{2 * \pi}{60 * t_1} = 492 [rad/s] \quad (5.22)$$

## Par de torsión

Considerando el momento de inercia del motor  $J_m = 3 * 10^{-5} [Kg * m^2]$  (dato del fabricante), y a partir de lo anterior, el par de torsión requerido para la aceleración se obtiene de la siguiente manera

$$T_2 = (J + J_m) * w' = 0,032 [N * m] = 32,54 [N * mm] \quad (5.23)$$

Por lo tanto, el par de torsión requerido queda de la siguiente manera

Durante la aceleración:

$$T_k = T_1 + T_2 = 50,87[N * mm] \quad (5.24)$$

Durante movimiento uniforme

$$T_t = T_1 = 18,33[N * mm] \quad (5.25)$$

Durante la deceleración:

$$T_g = T_1 - T_2 = -14,20[N * mm] \quad (5.26)$$

Torque requerido para el motor

De lo realizado anteriormente, es posible determinar el torque máximo que se requiere para realizar el desplazamiento en el eje X, el cual es en fase de aceleración  $T_{max} = T_k = 50,87[N * mm]$

Tabla 5.4: Resumen calculos sistema de transporte horizontal Eje X

Parámetro	Parámetro	Valor
Fuerza aceleración hacia derecha	$F_{a1}$	<b>29,49 [N]*</b>
Fuerza movimiento uniforme hacia derecha	$F_{a2}$	20,74[N]
Fuerza deceleración hacia derecha	$F_{a3}$	11,99[N]
Fuerza aceleración hacia izquierda	$F_{a1}$	-29,49[N]
Fuerza movimiento uniforme hacia izquierda	$F_{a2}$	-20,74[N]
Fuerza deceleración hacia izquierda	$F_{a3}$	-11,99[N]
Momento geométrico mínimo de inercia del eje	$I$	1885[mm <sup>4</sup> ]
Carga de pandeo	$P_1$	17356[N]
Par de torsión	$T_1$	18,33[N/mm]
Momento de inercia	$J_s$	$3,6 * 10^5 [kg * m^2]$
Revoluciones promedio por minuto	$N_m$	940[rpm <sup>-1</sup> ]
Aceleración angular	$w'$	492[rad/s]
Par torsión requerido para aceleración	$T_2$	32,54[N * mm]
Par de torsión durante la aceleración	$T_k$	<b>50,87[N*mm]*</b>
Par de torsión durante movimiento uniforme	$T_t$	18,33[N * mm]
Par de torsión durante la deceleración	$T_g$	-14,20[N * mm]

\* En negrilla valores máximos de fuerza y torsión.

## 5.5. Sistema de transporte horizontal Eje Y

Los procedimientos de cálculos desarrollados a continuación son referidos de la empresa THK [20]

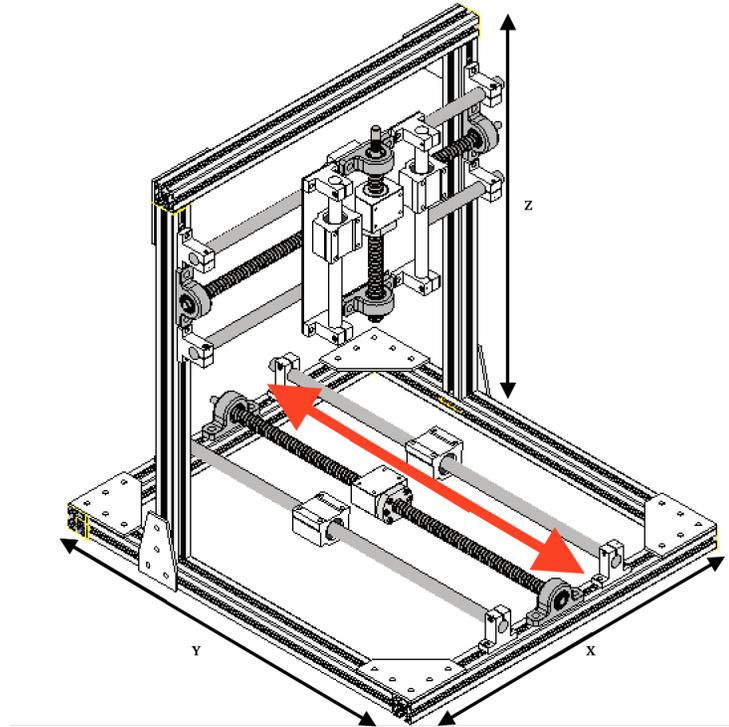


Figura 5.3: Eje Y. Fuente: Elaboración propia

### 5.5.1. Consideración de la longitud del eje de husillo

El largo de carrera considerado como parámetro de diseño para el movimiento en el eje X es de 510 [mm], pero hay que considerar los apollos y acople con el motor, los husillos se encuentran con hilo en todo el eje, es por esto que se requiere un husillo de 570 [mm] de longitud, el cual es mecanizado en los extremos.

### 5.5.2. Selección método soporte de eje de husillo

Con la carrera de 510 [mm] y una velocidad máxima de 0,07 [m/s], se puede seleccionar la configuración para el soporte del eje de husillo fija-con soporte o fija-fija. Ésta última requiere una estructura compleja, se necesita una alta precisión de instalación, por lo que se elige la configuración fija-con soporte como el método de soporte.

### 5.5.3. Análisis de la carga axial admisible

#### Cálculo de la carga axial máxima

Tabla 5.5: Parámetros diseño Eje Y

Parámetro	Parámetro	Valor
Resistencia de la superficie de la guía	$f$	20[N] sin carga
Masa de la tabla	$m_1$	10[kg]
Masa de trabajo	$m_2$	10[kg]
Coefficiente fricción	$\mu$	0,003
Velocidad máxima	$V_{max}$	0,07[m/s]
Aceleración gravitacional	$g$	9,81[m/s <sup>2</sup> ]
Tiempo de aceleración	$t_1$	0,2[s]

A partir de los parámetros nombrados anteriormente se obtiene la aceleración.

$$\alpha = \frac{V_{max}}{t_1} = 0,35[m/s^2] \quad (5.27)$$

Se identifican 6 fuerzas axiales dependiendo del desplazamiento que se realice. Dos sentidos adelante y atrás, y 3 situaciones aceleración, movimiento uniforme y desaceleración

Durante la aceleración hacia adelante:

$$Fa_1 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f + (m_1 + m_2) * \alpha = 27,59[N] \quad (5.28)$$

Durante el movimiento uniforme hacia adelante:

$$Fa_2 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f = 20,59[N] \quad (5.29)$$

Durante la deceleración hacia adelante:

$$Fa_3 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f - (m_1 + m_2) * \alpha = 13,59[N] \quad (5.30)$$

Durante la aceleración hacia atrás:

$$Fa_4 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f - (m_1 + m_2) * \alpha = -27,59[N] \quad (5.31)$$

Durante el movimiento uniforme hacia atrás:

$$Fa_5 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f = -20,59[N] \quad (5.32)$$

Durante deceleración hacia atrás:

$$Fa_6 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f + (m_1 + m_2) * \alpha = -13,59[N] \quad (5.33)$$

Así se obtiene la carga axial máxima aplicada sobre el husillo

$$Fa_{max} = Fa_1 = 27,59[N]$$

### Carga axial crítica

Es necesario seleccionar un eje de husillo que no se pandee al aplicar la máxima carga de compresión en la dirección axial

Pero, antes del cálculo de la carga de pandeo  $P_1[N]$ , es necesario conocer los siguientes parámetros:

- Distancia entre dos superficies de montaje  $l_a = 510[mm]$
- Modulo de Young  $E = 2,06 * 10^5 N/mm^2$
- Momento geométrico mínimo de inercia del eje  $I$
- Diámetro menor de rosca del eje de husillo  $d_1 = 14[mm]$

$$I = \frac{\pi}{64} * d_1^4 = 1885[mm^4] \quad (5.34)$$

$\eta_1$  = Factor de acuerdo metodo de montaje

- Fijo - libre:  $\eta_1 = 0,25$
- Fijo - con soporte:  $\eta_1 = 2$
- Fijo - fijo:  $\eta_1 = 4$

En este caso se usa  $\eta_1 = 2$ , fijo-con soporte como se menciona anteriormente

$$P_1 = \frac{\eta_1 * \pi * E * I}{l_a^2} * 0,5 = 14740[N] \quad (5.35)$$

### 5.5.4. Análisis de torsión de fricción debido a una carga externa

#### Par de torsión de fricción debido a una carga externa

El par de torsión de fricción  $T_1$  se obtiene de la siguiente manera, donde  $Fa$  es la fuerza durante movimiento uniforme ( $Fa_2$ )[N],  $Ph$  es el paso  $5[mm]$  y  $\eta$  es el factor asociado al coeficiente de fricción  $0,9$ .

$$T_1 = \frac{Fa_2 * Ph}{2 * \pi * \eta} = 18,20[N/mm] \quad (5.36)$$

## Par de torsión debido a una carga previa sobre el husillo

El husillo de bolas no incluye una carga previa

## Par de torsión requerido para la aceleración

Para conocer los torques relacionados con la aceleración, primero es necesario conocer el momento de inercia del eje del husillo  $J_s$ . Se tiene también que el momento inercial por unidad de largo del husillo es de  $I = 3,9 * 10^{-4} [Kg * cm^2 / mm]$ , y para un largo de  $l = 570 [mm]$  se tiene un momento de inercia del eje del husillo :

$$J_s = I * l = 0,2223 [Kg * cm^2] \quad (5.37)$$

A partir de lo anterior, el momento de inercia

$$J = (m_1 + m_2) * \left(\frac{Ph}{2 * \pi}\right)^2 * 10^{-6} + J_s^2 = 3,5 * 10^5 [Kg * m^2] \quad (5.38)$$

## Revoluciones promedio por minuto

Para los siguientes cálculos se necesitan, en primera instancia, las revoluciones promedio por minuto  $N_m$ , donde se tienen las reciprocaciones por minuto  $n = 5 [rpm]$ , el paso mencionado anteriormente  $Ph = 5 [mm]$ , y el largo de carrera  $l_s = 510 [mm]$

$$N_m = \frac{2 * n * l_s}{Ph} = 1020 [rpm^{-1}] \quad (5.39)$$

## Aceleración angular

Por otro lado, se tiene la aceleración angular:

$$w' = \frac{2 * \pi}{60 * t_1} = 534 [rad/s] \quad (5.40)$$

## Par de torsión

Considerando el momento de inercia del motor  $J_m = 3 * 10^{-5} [Kg * m^2]$  (dato del fabricante), y a partir de lo anterior, el par de torsión requerido para la aceleración se obtiene de la siguiente manera

$$T_2 = (J + J_m) * w' = 0,034 [N * m] = 33,68 [N * mm] \quad (5.41)$$

Por lo tanto, el par de torsión requerido queda de la siguiente manera

Durante la aceleración:

$$T_k = T_1 + T_2 = 52,86[N * mm] \quad (5.42)$$

Durante movimiento uniforme:

$$T_t = T_1 = 18,20[N * mm] \quad (5.43)$$

Durante la deceleración:

$$T_g = T_1 - T_2 = -16,45[N * mm] \quad (5.44)$$

### Torque requerido para el motor

De lo realizado anteriormente, es posible determinar el torque máximo que se requiere para realizar el desplazamiento en el eje Y, el cual es en fase de aceleración  $T_{max} = T_k = 52,86[N * mm]$

Tabla 5.6: Resumen calculos sistema de transporte horizontal Eje Y

Parámetro	Parámetro	Valor
Fuerza aceleración hacia adelante	$F_{a1}$	<b>27,59 [N]*</b>
Fuerza movimiento uniforme hacia adelante	$F_{a2}$	20,59[N]
Fuerza deceleración hacia adelante	$F_{a3}$	13,59[N]
Fuerza aceleración hacia atrás	$F_{a1}$	-27,59[N]
Fuerza movimiento uniforme hacia atrás	$F_{a2}$	-20,59[N]
Fuerza deceleración hacia atrás	$F_{a3}$	-13,59[N]
Momento geométrico minimo de inercia del eje	$I$	1885[mm <sup>4</sup> ]
Carga de pandeo	$P_1$	14740[N]
Par de torsión	$T_1$	18,20[N/mm]
Momento de inercia	$J_s$	$3,5 * 10^5 [kg * m^2]$
Revoluciones promedio por minuto	$N_m$	1020[rpm <sup>-1</sup> ]
Aceleración angular	$w'$	534[rad/s]
Par torsión requerido para aceleración	$T_2$	33,68[N * mm]
Par de torsión durante la aceleración	$T_k$	<b>52,86[N*mm]*</b>
Par de torsión durante movimiento uniforme	$T_t$	18,20[N * mm]
Par de torsión durante la deceleración	$T_g$	-16,45[N * mm]

\* En negrilla valores máximos de fuerza y torsión.

## 5.6. Sistema de transporte vertical Eje Z

Los procedimientos de cálculos desarrollados a continuación son referidos de la empresa THK [20]

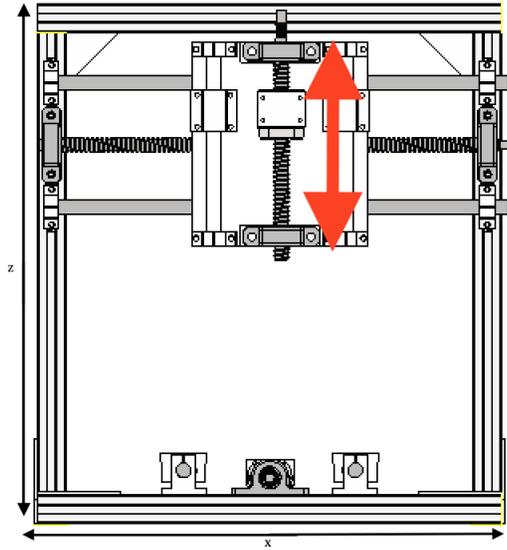


Figura 5.4: Eje Z. Fuente: Elaboración propia

### 5.6.1. Consideración de la longitud del eje de husillo

El largo de carrera, considerado como parámetro de diseño para el movimiento en el eje  $Z$ , es de  $175 [mm]$ , pero hay que considerar los apollos y acople con el motor, los husillos se encuentran con hilo en todo el eje, es por esto que se requiere un husillo de  $236 [mm]$  de longitud, el cual es mecanizado en los extremos.

### 5.6.2. Selección método soporte de eje de husillo

Con la carrera de  $175 [mm]$  y una velocidad máxima de  $0,07 [m/s]$ , se puede seleccionar la configuración para el soporte del eje de husillo fija-con soporte o fija-fija. Esta última requiere una estructura compleja, se necesita una alta precisión de instalación, por lo que se elige la configuración fija-con soporte como el método de soporte.

Tabla 5.7: Parámetros diseño Eje Z

Parámetro	Parámetro	Valor
Resistencia de la superficie de la guía	$f$	20[N] sin carga
Masa de la tabla	$m_1$	10[kg]
Masa de trabajo	$m_2$	15[kg]
Coefficiente fricción	$\mu$	0,003
Velocidad máxima	$V_{max}$	0,07[m/s]
Aceleración gravitacional	$g$	9,81[m/s <sup>2</sup> ]
Tiempo de aceleración	$t_1$	0,2[s]

### 5.6.3. Análisis de la carga axial admisible

#### Cálculo de la carga axial máxima

A partir de los parámetros nombrados anteriormente se obtiene la aceleración.

$$\alpha = \frac{V_{max}}{t_1} = 0,35[m/s^2] \quad (5.45)$$

Se identifican 6 fuerzas axiales dependiendo del desplazamiento que se realice. Dos sentidos arriba y abajo, y 3 situaciones aceleración, movimiento uniforme y desaceleración

Durante la aceleración hacia arriba:

$$Fa_1 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f + (m_1 + m_2) * \alpha = 274[N] \quad (5.46)$$

Durante el movimiento uniforme hacia arriba:

$$Fa_2 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f = 265,25[N] \quad (5.47)$$

Durante la deceleración hacia arriba:

$$Fa_3 = \mu * (m_1 + m_2) * g + f - (m_1 + m_2) * \alpha = 256,5[N] \quad (5.48)$$

Durante la aceleración hacia abajo:

$$Fa_4 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f - (m_1 + m_2) * \alpha = 216,5[N] \quad (5.49)$$

Durante el movimiento uniforme hacia abajo:

$$Fa_5 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f = 225,25[N] \quad (5.50)$$

Durante deceleración hacia abajo:

$$Fa_6 = \mu * (m_1 + m_2) * g - f + (m_1 + m_2) * \alpha = 256,6[N] \quad (5.51)$$

Asi podemos ver que la carga axial máxima:  $Fa_{max} = Fa_1 = 274[N]$

## Carga axial crítica

Es necesario seleccionar un eje de husillo que no se pandee al aplicar la máxima carga de compresión en la dirección axial

Pero, antes del cálculo de la carga de pandeo  $P_1[N]$ , es necesario conocer los siguientes parámetros:

- Distancia entre dos superficies de montaje  $l_a = 190[mm]$
- Modulo de Young  $E = 2,06 * 10^5 N/mm^2$
- Momento geométrico mínimo de inercia del eje  $I$
- Diámetro menor de rosca del eje de husillo  $d_1 = 14[mm]$

$$I = \frac{\pi}{64} * d_1^4 = 1885[mm^4] \quad (5.52)$$

$\eta_1$  =Factor de acuerdo metodo de montaje

- Fijo - libre:  $\eta_1 = 0,25$
- Fijo - con soporte:  $\eta_1 = 2$
- Fijo - fijo:  $\eta_1 = 4$

En este caso se usa  $\eta_1 = 2$ , fijo-con soporte como se menciona anteriormente

$$P_1 = \frac{\eta_1 * \pi * E * I}{l_a^2} * 0,5 = 106204[N] \quad (5.53)$$

### 5.6.4. Análisis de torsión de fricción debido a una carga externa

#### Par de torsión de fricción debido a una carga externa

El par de torsión de fricción  $T_1$  se obtiene de la siguiente manera.

Durante el movimiento uniforme hacia arriba:

$$T_1 = \frac{F a_2 * Ph}{2 * \pi * \eta} = 234[N * mm] \quad (5.54)$$

Durante el movimiento uniforme hacia abajo:

$$T_2 = \frac{F a_5 * Ph}{2 * \pi * \eta} = 199[N * mm] \quad (5.55)$$

En este caso se consideran la fuerza durante movimiento uniforme hacia arriba y hacia abajo ( $F a_2$ )y( $F a_5$ )[N],  $Ph$  es el paso  $5[mm]$  y  $\eta$  es el factor asociado al coeficiente de fricción  $0,9$ .

## Par de torsión debido a una carga previa sobre el husillo

El husillo de bolas no incluye una carga previa

## Par de torsión requerido para la aceleración

Para conocer los torques relacionados con la aceleración, primero es necesario conocer el momento de inercia del eje del husillo  $J_s$ . Se tiene también que el momento inercial por unidad de largo del husillo es de  $I = 3,9 * 10^{-4} [Kg * cm^2/mm]$ , y para un largo de  $l = 260 [mm]$  se tiene un momento de inercia del eje del husillo :

$$J_s = I * l = 0,1014 [Kg * cm^2] \quad (5.56)$$

A partir de lo anterior, el momento de inercia

$$J = (m_1 + m_2) * \left(\frac{Ph}{2 * \pi}\right)^2 * 10^{-6} + J_s^2 = 1,06 * 10^5 [Kg * m^2] \quad (5.57)$$

## Revoluciones promedio por minuto

Para los siguientes cálculos se necesitan, en primera instancia, las revoluciones promedio por minuto  $N_m$ , donde se tienen las reciprocaciones por minuto  $n = 5 [rpm]$ , el paso mencionado anteriormente  $Ph = 5 [mm]$ , y el largo de carrera  $l_s = 470 [mm]$

$$N_m = \frac{2 * n * l_s}{Ph} = 380 [rpm^{-1}] \quad (5.58)$$

## Aceleración angular

Por otro lado, se tiene la aceleración angular:

$$w' = \frac{2 * \pi}{60 * t_1} = 198 [rad/s] \quad (5.59)$$

## Par de torsión

Considerando el momento de inercia del motor  $J_m = 3 * 10^{-5} [Kg * m^2]$  (dato del fabricante), y a partir de lo anterior, el par de torsión requerido para la aceleración se obtiene de la siguiente manera:

$$T_3 = (J + J_m) * w' = 9,93 [N * mm] \quad (5.60)$$

Por lo tanto, el par de torsión requerido queda de la siguiente manera

**Durante la aceleración hacia arriba:**

$$T_{k1} = T_1 + T_3 = 242[N * mm] \quad (5.61)$$

**Durante el movimiento uniforme hacia arriba:**

$$T_{t1} = T_1 = 234[N * mm] \quad (5.62)$$

**Durante la deceleración hacia arriba:**

$$T_{g1} = T_1 - T_3 = 226[N * mm] \quad (5.63)$$

**Durante la aceleración hacia abajo:**

$$T_{k2} = T_2 + T_3 = 207[N * mm] \quad (5.64)$$

**Durante el movimiento uniforme hacia abajo:**

$$T_{t2} = T_2 = 199[N * mm] \quad (5.65)$$

**Durante la deceleración hacia abajo:**

$$T_{g2} = T_2 - T_3 = 191[N * mm] \quad (5.66)$$

**Torque requerido para el motor**

De lo realizado anteriormente es posible determinar el torque máximo que se requiere para realizar el desplazamiento en el eje  $Z$ , el cual es en fase de aceleración  $T_{max} = T_k = 242[N * mm]$

Tabla 5.8: Resumen cálculos sistema de transporte horizontal Eje Z

Parámetro	Parámetro	Valor
Fuerza aceleración hacia arriba	$F_{a1}$	<b>274 [N]*</b>
Fuerza movimiento uniforme hacia arriba	$F_{a2}$	265, 25[N]
Fuerza deceleración hacia arriba	$F_{a3}$	256, 59[N]
Fuerza aceleración hacia abajo	$F_{a1}$	216, 5[N]
Fuerza movimiento uniforme hacia abajo	$F_{a2}$	225, 25[N]
Fuerza deceleración hacia abajo	$F_{a3}$	256, 6[N]
Momento geométrico mínimo de inercia del eje	$I$	1885[mm <sup>4</sup> ]
Carga de pandeo	$P_1$	106204[N]
Par de torsión hacia arriba	$T_1$	234[N/mm]
Par de torsión hacia abajo	$T_2$	199[N/mm]
Momento de inercia	$J_s$	1, 06 * 10 <sup>5</sup> [kg * m <sup>2</sup> ]
Revoluciones promedio por minuto	$N_m$	380[rpm <sup>-1</sup> ]
Aceleración angular	$w'$	198[rad/s]
Par torsión requerido para aceleración	$T_3$	9, 93[N * mm]
Par de torsión durante la aceleración hacia arriba	$T_{k1}$	<b>242[N*mm]*</b>
Par de torsión durante movimiento uniforme hacia arriba	$T_{t1}$	234[N * mm]
Par de torsión durante la deceleración hacia arriba	$T_{g1}$	226[N * mm]
Par torsión requerido para abajo	$T_{k2}$	207[N * mm]
Par de torsión durante la aceleración hacia abajo	$T_{t2}$	199[N * mm]
Par de torsión durante movimiento uniforme hacia abajo	$T_{g2}$	191[N * mm]

\* En negrilla valores máximos de fuerza y torsión.

# Capítulo 6

## Selección Componentes

### 6.1. Subsistema control de temperatura

#### 6.1.1. Termocupla

La usada en este trabajo es de tipo K (cromel/alumel), como la que se observa en la Figura 6.1, que puede trabajar hasta una temperatura de  $+700^{\circ}\text{C}$ , está posee un diámetro de  $1,5[\text{mm}]$ , la que permite medir la temperatura a la salida del calefactor.



Figura 6.1: Termocupla tipo K. Fuente [21]

#### 6.1.2. Control de temperatura

Dentro de la amplia gama de controladores de temperaturas se selecciona el control de temperatura TCN4 Figura 6.2, que permite, mediante una termocupla tipo K, especificada en la Sección 6.4.1., medir la temperatura del fluido. La temperatura se controla mediante botones, una pantalla digital y un relé de estado sólido, el cual optimiza el funcionamiento del sistema sin dañar el calefactor.



Figura 6.2: Controlador TCN4. Fuente [22]

Este control cuenta con dos sistemas de funcionamiento *ON/OFF* y *PID*, además para este ultimo caso se cuenta con un programa de *autotuning* donde las variables *P*, *I* y *D* se programan automáticamente.

## 6.2. Subsistema control de gas

### 6.2.1. Manguera gas

Es necesario que la manguera soporte al menos 500[psi], por esto es que se selecciona un tipo de manguera con malla metálica, por disponibilidad de mercado y otorgar mayor seguridad. Se adquiere una manguera que soporta hasta 1500[psi], ésta en sus extremos posee uniones con adaptadores, para el calefactor, el regulador de presión y válvula corte 3 vías.

### 6.2.2. Regulador de presión

Un regulador de presión controla el paso de un fluido desde una sección a otra, en este caso del cilindro de gas al sistema de Cold Spray. El regulador de presión es necesario que soporte los 500 [psi] mencionados anteriormente, además ser apto para el gas de nitrógeno que será usado, por otro lado, se busca uno con facilidad de conexión al cilindro de gas sin necesidad de un acomple. Por disponibilidad del mercado se encuentra uno capaz de soportar hasta los 1000 [psi] y con conexión al cilindro de gas de “Indura”. En la Figura 6.3 se observa el regulador seleccionado.



Figura 6.3: Regulador presión alta nitrógeno. Fuente: Elaboración propia

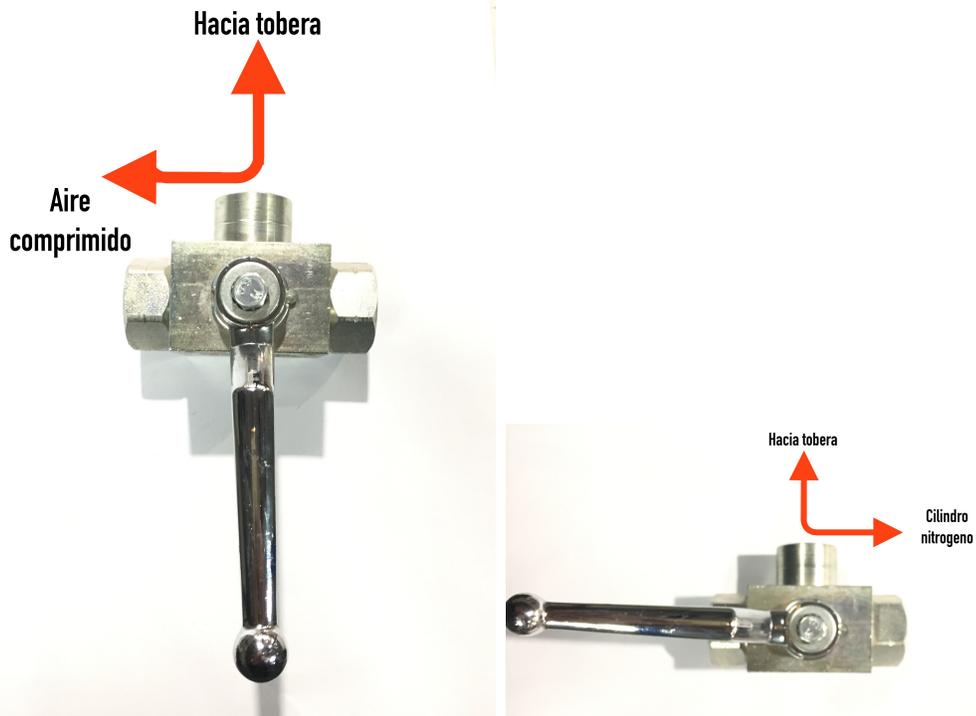
### 6.2.3. Válvula corte 3 vías

La finalidad de una válvula de corte de 3 vías es cortar el caudal de un fluido en una tubería o manguera, y a la vez se abre el caudal de un fluido en otra tubería o manguera, para mezclar o separar estos fluidos. En este caso se cuenta con 3 entradas/salidas, las llamaremos *A*, *B* y *C*, en una posición de la llave, fluido que entra por *A* sale por *C* y *B* cerrado en otra posición, fluido entra por *B*, sale por *C* mientras *A* esta cerrado. Servirá para separar el uso de gas de nitrógeno y aire comprimido, la presión máxima de trabajo es de 500 [psi], con conexiones NTP. En la Figura 6.4 se puede apreciar este tipo de válvula.



Figura 6.4: Válvula corte 3 vías Fuente: [23]

En la Figura 6.5 podemos ver las dos posiciones de la llave y el respectivo paso que representan.



(a) Posición A aire comprimido a tobera (b) Posición B cilindro nitrogeno a tobera

Figura 6.5: Funcionamiento válvula de corte 3 vías. Fuente Elaboración propia

### 6.3. Subsistema movimiento

#### 6.3.1. Motor

Para la selección del motor paso a paso se utilizan los resultados de la memoria de cálculo, donde el torque más alto que se tiene es en el eje  $Z$  (eje vertical), esto se observa en la comparativa de la tabla 6.1. Como se menciona en la Sección 2.2.3., los motores stepper bajan su torque a medida que aumenta la velocidad, por eso es que se selecciona un motor de  $1,9[N * m](1900[N * mm])$ , cuyo gráfico se observa en la Figura 6.6.

Tabla 6.1: Torque máximos eje

Eje	X	Y	Z
Torque $[N * mm]$	51	53	242

## 573S20-EC

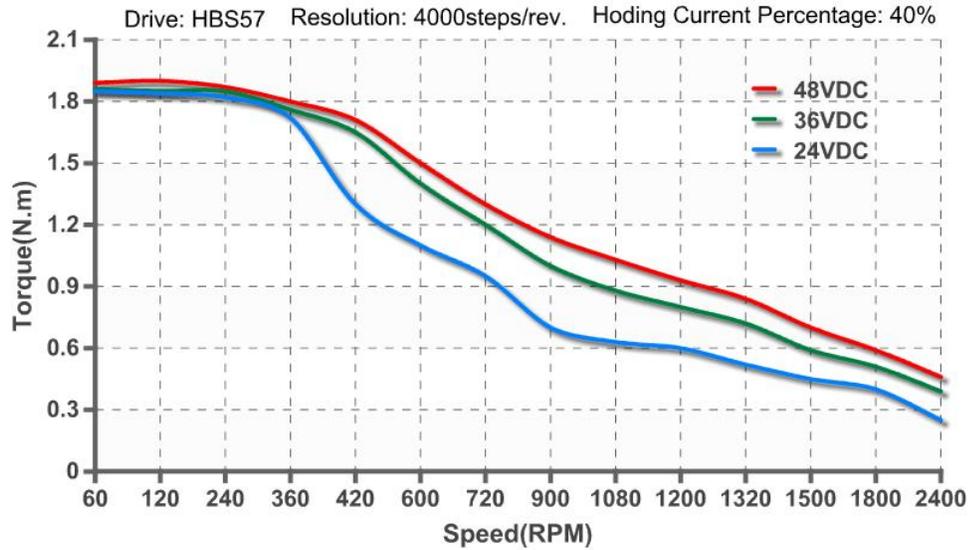


Figura 6.6: Gráfico torque vs velocidad, motor paso a paso. Fuente:[24]

Por disponibilidad del mercado se compra un pack donde se obtienen estos 3 motores en conjunto, inferior Figura 6.7, junto a sus drivers y fuente de poder, superior izquierda y derecha Figura 6.7 respectivamente. Por otro lado con estos motores se pueden realizar posteriores modificaciones al sistema sin cambiar estos mismos.



Figura 6.7: Kit motores, drivers y fuente de poder. Fuente:[25]

## 6.4. Rodamientos lineales

Según las cargas calculadas en la Sección 5.1, los rodamientos SC16UU resisten las cargas correspondientes. En la Figura 6.8, se observan las características de éstos, la carga estática  $C_0 = 1170[N]$  y carga dinámica máxima  $C = 770[N]$

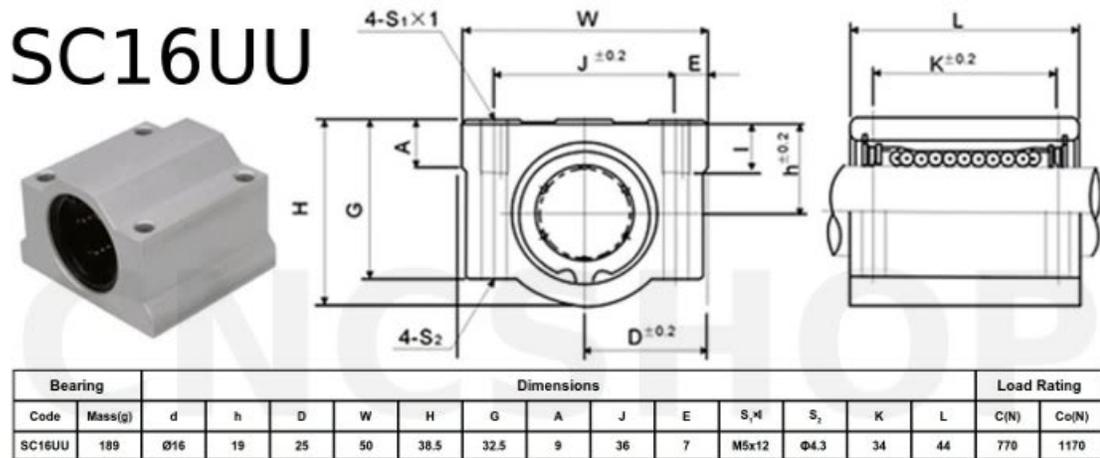


Figura 6.8: Rodamientos lineales. Fuente: [26]

### 6.4.1. Perfiles aluminio

Se seleccionan perfiles de aluminio estructural (T-slot), los cuales son usados en la fabricación de máquinas, prototipos o estructuras en general. Son modulares y fáciles de ensamblar, debido a la canales que poseen, se pueden observar en la Figura 6.9 , además son resistentes y ligeros pues están fabricados de Aluminio 6063-T5, el límite de fluencia es de  $105[MPa]$



Figura 6.9: Perfil aluminio 6063-T5. Fuente: [25]

### 6.4.2. Husillo

El husillo es de 16[mm] de diámetro y 5[mm] de paso (diámetro interior 14[mm]), esto debido a la disponibilidad en el mercado, referente tanto a los largos como el diámetro de los mismos, En el mercado se encuentran husillos generalmente de 8[mm] de diámetro y un largo no mayor a los 500[mm] y esta medida no resiste la deflexión calculada. Por esto es elegido un husillo de diámetro 16[mm], paso 5[mm] y largo 1000[mm]. Este largo posteriormente es maquinado para cumplir con las medidas de nuestro sistema y obtener los husillos para los 3 ejes. Fue necesario adquirir 2 de este tipo debido a que los largos son de 515[mm] eje X, 573[mm] eje Y, y 236[mm] eje Z. Ver plano anexo "Planos husillos largo".

## 6.5. Subsistema seguridad

Para la cabina de seguridad se seleccionan perfiles cuadrados de acero de 30x30x2 [mm], estos se adquieren en tiras de 6 [m], por lo que se requiere la compra de 3 unidades para toda la estructura. Por otro lado para las puertas se adquieren 2 unidades de perfiles cuadrados de acero de 15x15x2 [mm], además de planchas de acero dimensionadas de 1 [mm] de espesor, y para la visibilidad del sistema se adquieren dos planchas de acrilico dimensionadas de 250x450 [mm] de 5 [mm] de espesor.

# Capítulo 7

## Diseño y validación mediante elementos finitos

### 7.1. Simulaciones

Se realiza un análisis de tensiones y desplazamientos, en el software Inventor, al esqueleto que soporta la parte móvil y a la cabina de protección de todo el Sistema.

#### 7.1.1. Subsistema movilidad

##### Esqueleto sistema móvil

- **Material:** Aluminio 6035
- **Condiciones de borde:** Empotrado puntos 1, 2, 3 y 4 (rojos)
- **Fuerza:** Existen dos tipos de fuerzas involucradas en este proceso, la primera generada por la gravedad y la segunda producida por el flujo del gas. Para el estudio solo se consideró la fuerza peso  $400[N]$ , ésto porque ambas fuerzas se contrarrestan y el mayor esfuerzo se dá en caso estático. (amarillo)
- **Malla:** Se utiliza malla estándar generada automáticamente por el programa.

En primera instancia se aplica la fuerza en el centro del perfil superior, como se observa en la Figura 7.1. El desplazamiento es de  $0,1836 [mm]$  lo que nos da un porcentaje de deformación  $0,03\%$  , que es menor al  $0,1\%$ .

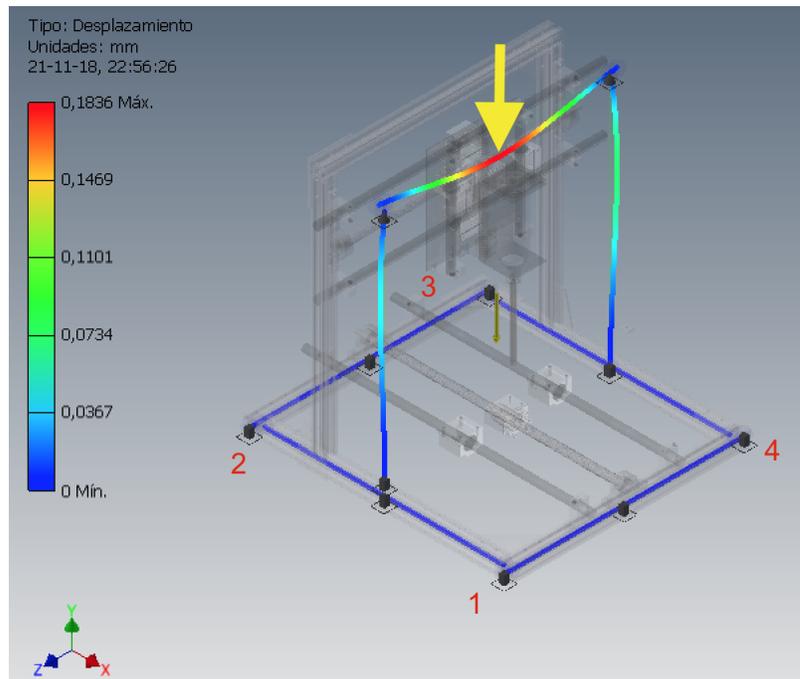


Figura 7.1: Simulación número uno esqueleto aluminio. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se realiza la simulación, pero con las fuerzas en los perfiles verticales, como es realmente en el Sistema. Se pueden apreciar estos esfuerzos en la Figura 7.2, porcentaje de deformación 0,0003 %, por lo que la estructura soporta sin mayor problema los esfuerzos del Sistema.

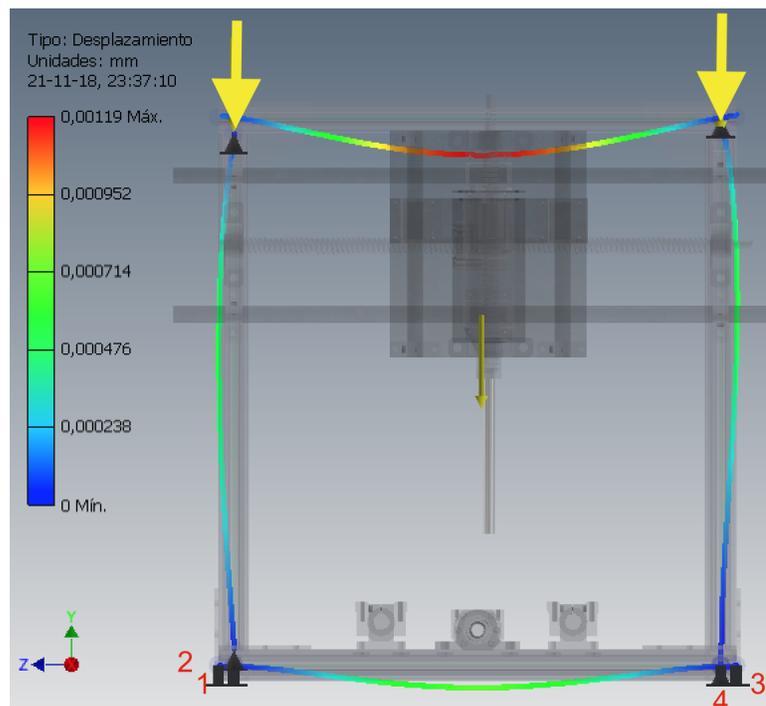


Figura 7.2: Simulación número dos esqueleto aluminio. Fuente: Elaboración propia

## 7.1.2. Subsistema seguridad

### Estructura cabina seguridad

- **Material:** Acero ASTM A36
- **Condiciones de borde:** Empotrado puntos 1, 2, 3 y 4 (rojos)
- **Fuerza:** La fuerza involucrada para esta estructura es la generada por el peso de todo el equipo, equivalente a  $500[N]$  (amarillos)
- **Malla:** Se utiliza malla estándar generada automáticamente por el programa

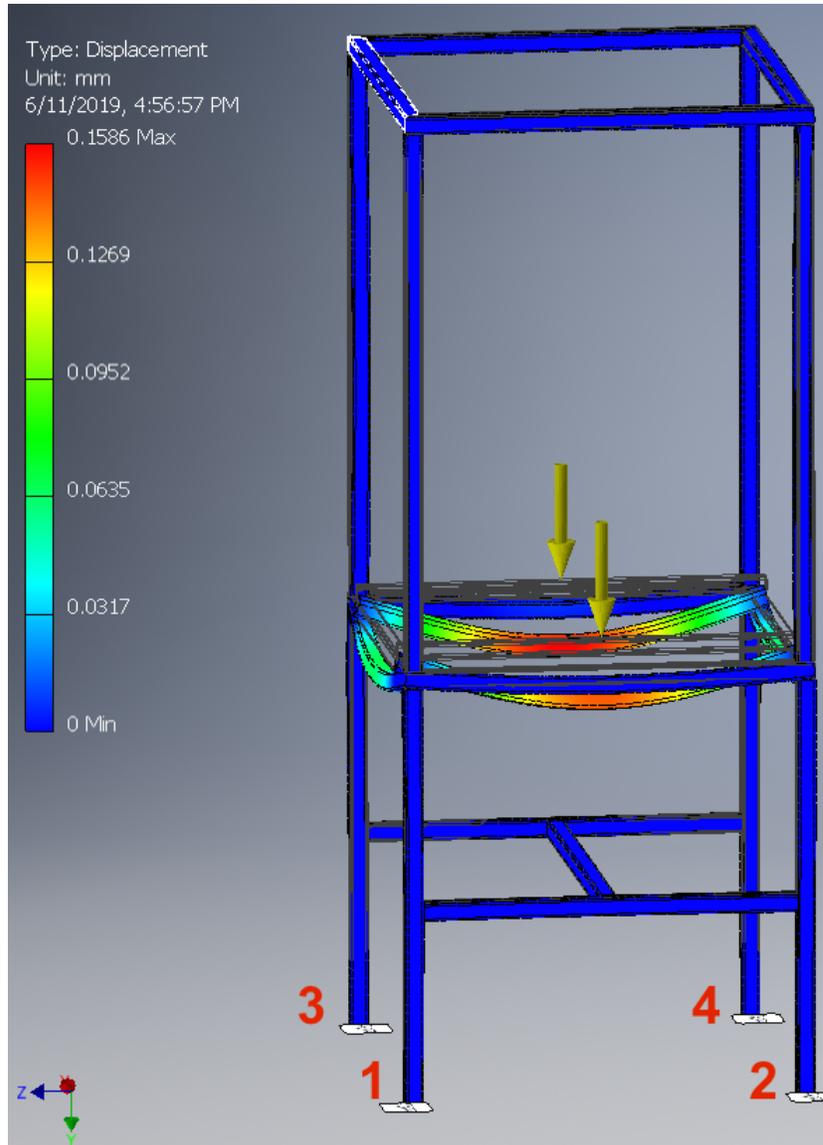


Figura 7.3: Simulación cabina. Fuente: Elaboración propia

En este caso se tiene una deformación máxima de  $0,1586 [mm]$ , lo que significa un porcentaje de deformación  $0,032\%$ , que es menor al  $0,1\%$  propuesto anteriormente

# Capítulo 8

## Construcción y Ensamblaje

### 8.1. Construcción y Ensamblaje

Después de las etapas de diseño y cubicación, ésta última en la Anexo B, comienzan las adquisiciones y construcción del sistema. Se reitera que toda la construcción del equipo se realiza en las dependencias del taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica. Lo primero fue el esqueleto de la parte móvil, con sus respectivos pernos, tuercas corredizas, placas para uniones de 90 grados en L y T, y ángulo de unión en 90 grados, se forma la estructura de la Figura 8.1.



Figura 8.1: Esqueleto aluminio. Fuente: Elaboración propia

Se continúa con el maquinado de los husillos Figura 8.2a y ensamblaje de éstos junto con los ejes guías, tanto para el eje  $X$  como para el eje  $Y$  Figura 8.2b (el maquinado del husillo del eje  $Z$  se dejó para después, por si sufre cambio el soporte de este eje en el ensamblaje),

los husillos se apoyan sobre rodamientos con soporte de pie KP001 y los ejes de 16 mm sobre soportes SK16.

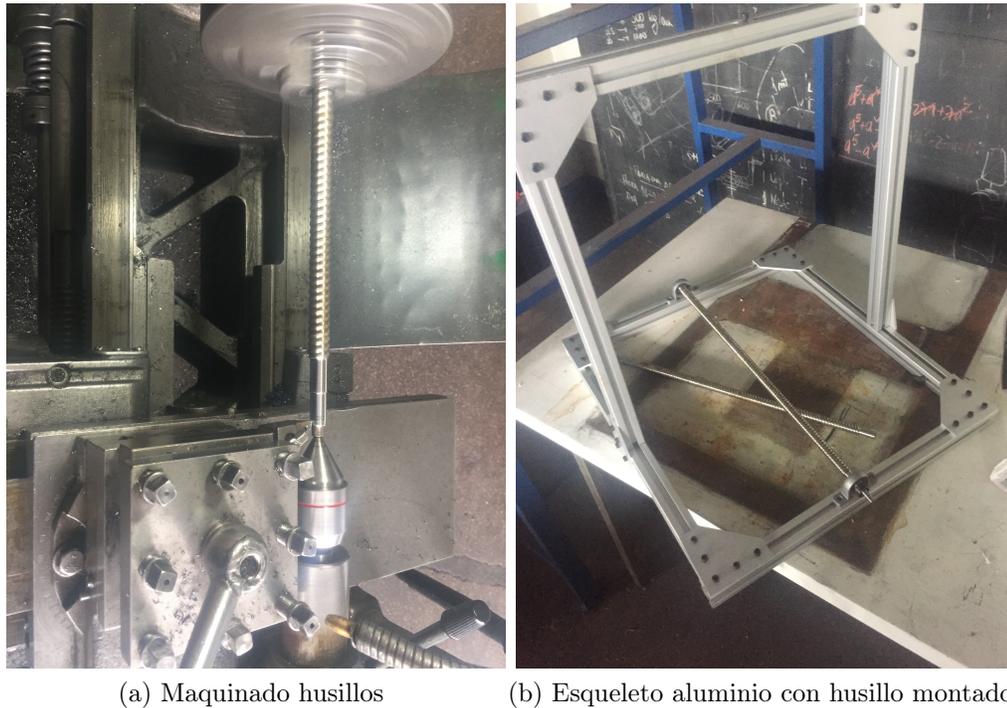


Figura 8.2: Maquinado y montaje husillo. Fuente Elaboracion propia

Luego la placa de aluminio de soporte del eje  $Z$  se corta a medida y se perfora para unirla al eje  $X$ , con las medidas de ésta confirmadas se continúa con el maquinado del husillo del eje  $Z$  y se ensambla junto a los ejes guías.

Posteriormente, se realizan los soporte de los motores. Se comprar soportes ya existentes, pero se prefirió diseñarlos, ya que los que ofrecen en el mercado no quedan alineados con el eje del husillo, los soportes para los tres motores se realizan con las mismas medidas de las perforaciones, pero en diferente orientación según el eje.

Por otro lado, se realiza el soporte para el calefactor el cual posee anclaje en la parte superior lo que facilita su conexión. Este se une mediante un perfil de aluminio a la placa de movimiento del eje  $Z$ , lo que permite menores vibraciones. Figura 8.3



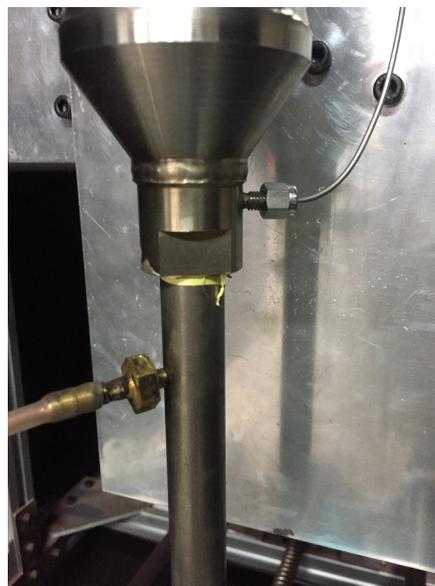
Figura 8.3: Soporte calefactor. Fuente: Elaboración propia

La tobera finalmente se diseñó y maquinó en el taller de mecánica en una barra redonda de acero inoxidable, esto en un principio no estaba previsto ya que se iba a adquirir fuera de Chile lo cual no fue posible. Se necesitaron herramientas especiales como brocas de mayor largo, para alcanzar las medidas previstas, por otro lado como se comentará en el Capítulo 9 de Pruebas se realizaron dos diseños de estas (ver plano anexo "ToberaSI").

Para la termocupla se adquiere una unión Swagelok la que se conecta al calefactor. Además en el torno se realiza un acople para la unión Figura 8.4a, entre la manguera que viene del alimentador de polvos a la tobera, vemos en la Figura 8.4b como queda la configuración.



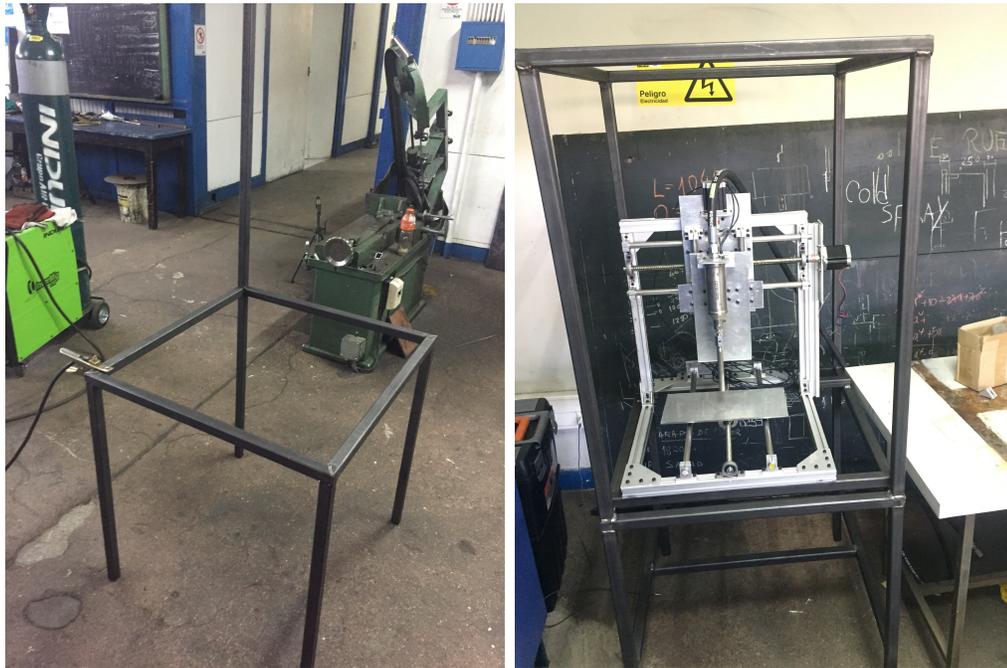
(a) Torneado acople manguera



(b) Montado acoples

Figura 8.4: Maquinado y montaje acople manguera y termocupla. Fuente Elaboración propia

Luego los perfiles de acero, se cortan y sueldan para realizar la estructura del gabinete, se sueldan los dos rectangulos (del medio y superior), los cuales tienen angulo de 45 grados para facilitar su union. Luego a uno de éstos se le sueldan las patas Figura 8.5a, se sigue con los perfiles que conectan el rectangulo medio con el superior, posteriormente se sueldan los perfiles donde irá apoyado el sistema móvil y se termina con la  $H$  de la base para dar mayor resistencia, en la Figura 8.5b podemos observar el gabinete con el sistema de movimiento sobrepuesto.



(a) Patas gabinete

(b) Gabinete y estructura de movimiento

Figura 8.5: Proceso soldadura gabinete, y montado sistema de movimiento. Fuente Elaboración propia

Se realizan todas las perforaciones a la estructura del gabinete, para afirmar la parte móvil, para cerrar la estructura y para colocar el tablero de eléctrico, posteriormente se pinta junto a las láminas de acero dimensionadas para su cierre. En la Figura 8.6, se puede apreciar la estructura móvil dentro del gabinete ya cerrado

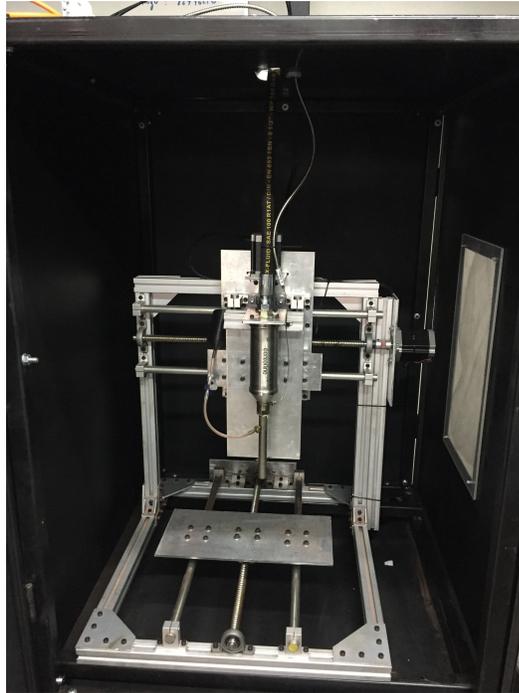


Figura 8.6: Gabinete y sistema movimiento. Fuente: Elaboración propia

Finalmente se realizan las estructuras de las puertas soldadas y unidas con pomeles a la estructura de la cabina, mediante tornillos autoperforantes para la unión con las planchas con visibilidad. Por otro lado se colocan unas ruedas para facilitar la movilidad de todo el sistema. Observamos en la Figura 8.7 el gabinete con la caja eléctrica, el control de temperatura y boton de emergencia.



Figura 8.7: Gabinete cerrado. Fuente: Elaboración propia

## 8.2. Diagrama eléctrico

La parte eléctrica está dividida en dos sectores, uno compuesto por el sistema de control de temperatura y el otro por el sistema de movimiento.

Ambos comienzan con tres cables, parte negra superior derecha, cable color amarillo refiere a la tierra, color blanco al neutro y color rojo a fase. Cable color blanco se conecta a un borne de distribución y el cable color rojo a un interruptor automático.

### 8.2.1. Subsistema control de temperatura

La salida del interruptor automático va conectada al terminal 5 del control TCN4S y otra al terminal 1 del relé de estado sólido (SSR). Del borne de distribución para el cable de fase, se conecta con el terminal 6 del control TCN4S. Por otro lado, la termocupla tipo K se conecta al control TCN4S por los terminales 11 y 10 positivo y negativo, respectivamente. El relé de estado sólido tiene lado positivo (3) y negativo (4), los que se conectan al positivo (1) y negativo (2) de la salida SSR del control TCN4S. Para cerrar el circuito el terminal 2, el relé va conectado al calefactor por el cable rojo y cierra en el borne de distribución por el cable blanco (neutro). Esto se puede observar en la Figura 8.8.

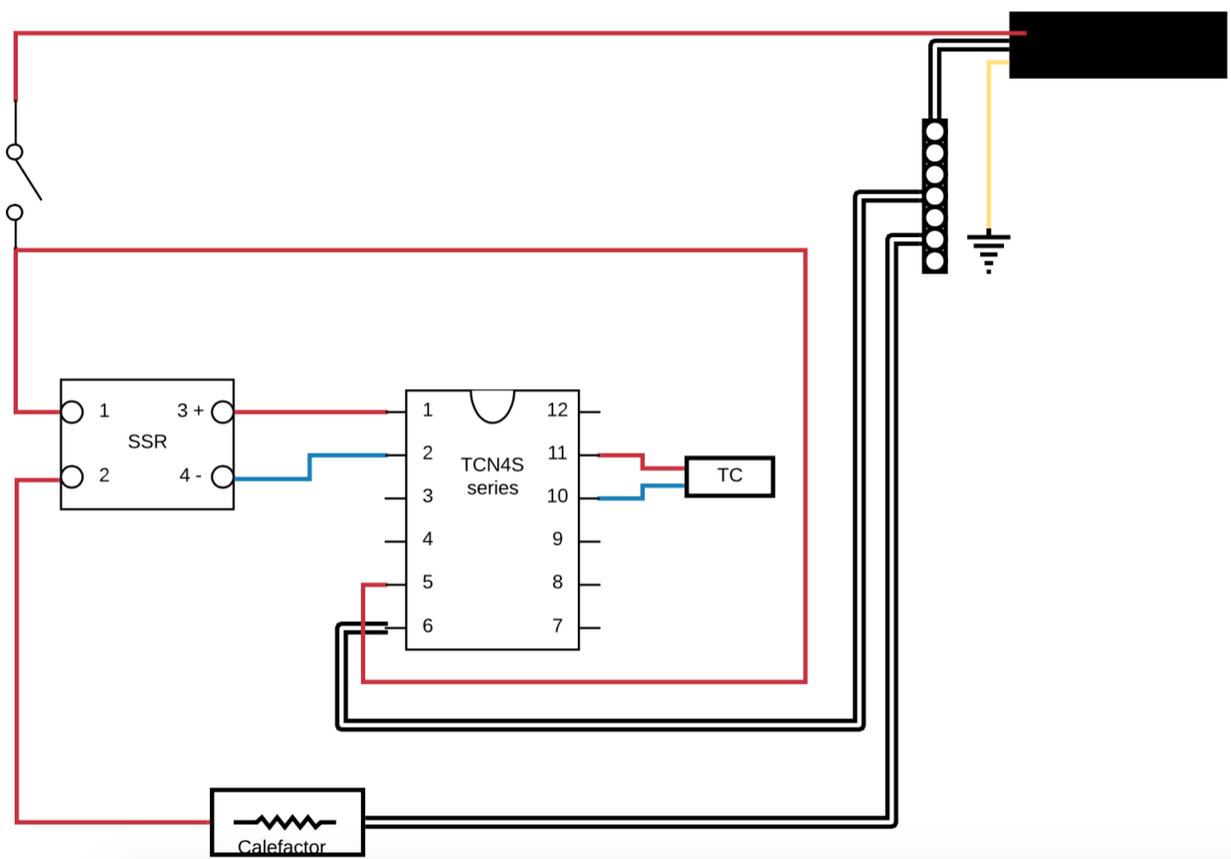


Figura 8.8: Diagrama eléctrico control temperatura. Fuente: Elaboración propia

## 8.2.2. Subsistema movimiento

La salida del interruptor automático va conectada a la fuente de poder junto con un cable neutro del borne de distribución. La fuente de poder entrega el voltaje necesario para el driver, en el cual se conectan los tres motores, en el que cada uno contiene 4 cables, negro, rojo, verde y azul; por otro lado, el driver se conecta mediante puerto paralelo a un computador. Éste último se conecta a corriente normal, por lo que no se muestra en el diagrama de la Figura 8.9

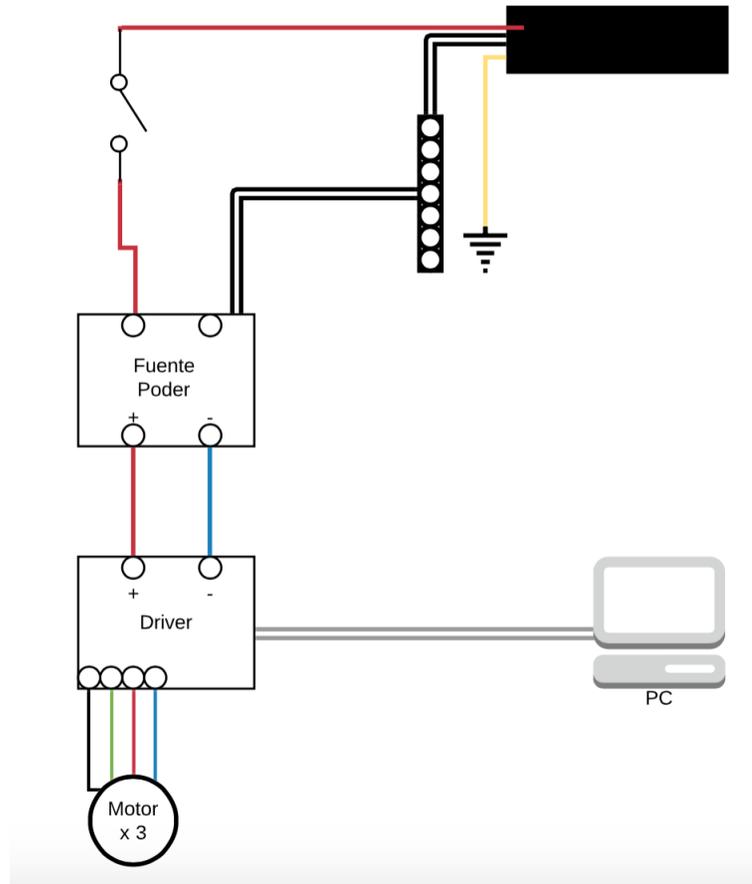


Figura 8.9: Diagrama eléctrico sistema de movimiento. Fuente: Elaboración propia

# Capítulo 9

## Pruebas

### 9.1. Subsistema control de gas

La primera prueba que se realiza, es para comprobar el correcto funcionamiento del calefactor y control de temperatura. Esta prueba se realiza con aire comprimido (que no es el gas que se usará finalmente, pero sirve para comprobar los funcionamientos mencionados anteriormente). Lo primero que se observa y se anota son todas las pérdidas de flujo que se tienen y su posterior solución. Por otro lado, se observa un correcto funcionamiento tanto del calefactor, como del control de temperatura. Como se menciona en la Sección 2.2.2. se tiene 2 opciones de trabajo, en esta prueba solo se usa el tipo de control *ON/OFF*.

La segunda prueba se realiza con el material particulado, se tiene un alimentador simple, en esta prueba se observa que al aumentar la presión del fluido se genera presión positiva en el alimentador de polvos, esto debido, en gran parte, al diseño de la tobera, la cual fue construida en el *taller* como se menciona anteriormente, por lo que no fue una prueba exitosa. Se propone realizar nuevamente la tobera, y definir parámetros de presión y temperatura, para un manejo óptimo del control de temperatura TCN4S, además de un alimentador de polvos cerrado.

Las siguientes pruebas de este subsistema se realiza con la nueva tobera y un alimentador de polvos cerrado, como el de la Figura 9.1, con el gas de nitrógeno y control *PID*, a 200 [psi] y 450 [°C]. Con la manguera de silicona no fue óptimo el resultado, ya que al generarse presión positiva la manguera no soporta la presión y se desune. Se opta por una unión metálica y roscada, la cual tampoco entregó un resultado satisfactorio.

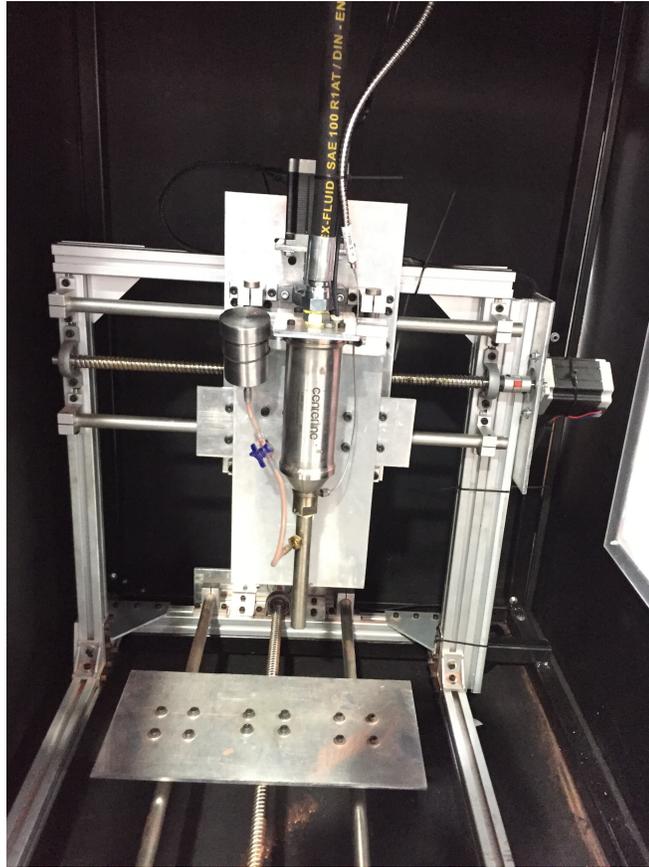


Figura 9.1: Segunda prueba. Fuente: Elaboración propia

## 9.2. Subsistema control de temperatura

La tercera prueba se realiza para comprobar el funcionamiento del control *ON/OFF* y *PID*, a temperaturas de  $250[^\circ C]$  y  $450[^\circ C]$ , y a una presión de  $40[psi]$ .

En la Figura 9.2 se puede observar la temperatura medida en el tiempo en caso *ON/OFF*. En el caso *PID* el modo de *Autotuning* que indica los siguientes parámetros  $P = 130$ ,  $I = 22$ ,  $D = 4$ . El gráfico obtenido se observa en la Figura 9.3.

Cabe destacar que en estas mediciones la termocupla fue ubicada en la salida de la tobera, por lo que es una representación de los valores tomados, pero se puede observar claramente el como el caso *ON/OFF* es una fluctuación de la temperatura con una amplitud mayor y en el caso *PID* como se tiene un salto grande al principio y luego se mantiene la temperatura deseada con una amplitud menor en las variaciones de temperatura.

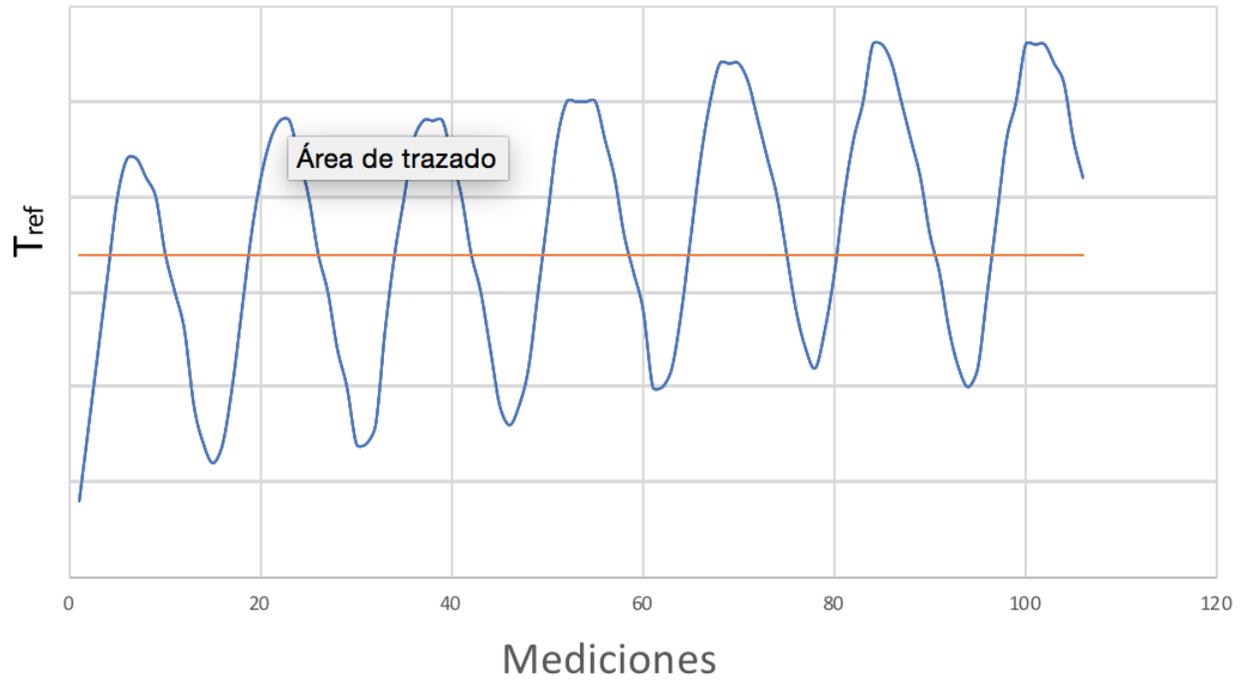


Figura 9.2: Gráfico ON/OFF. Fuente: Elaboración propia

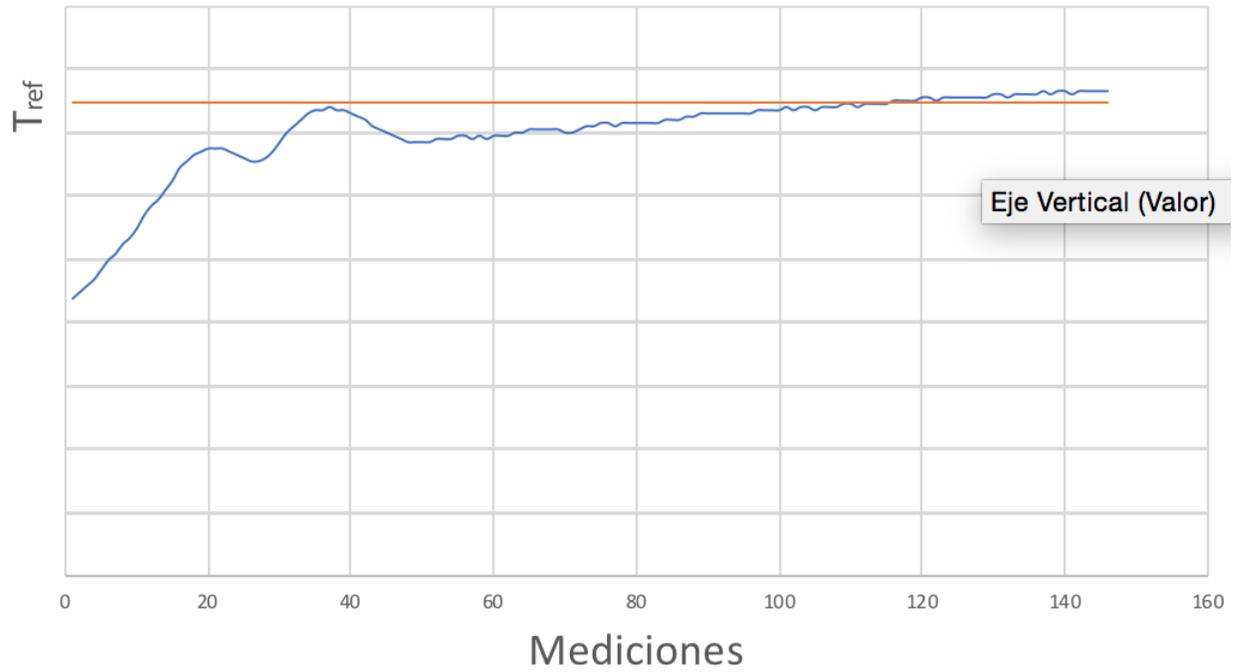
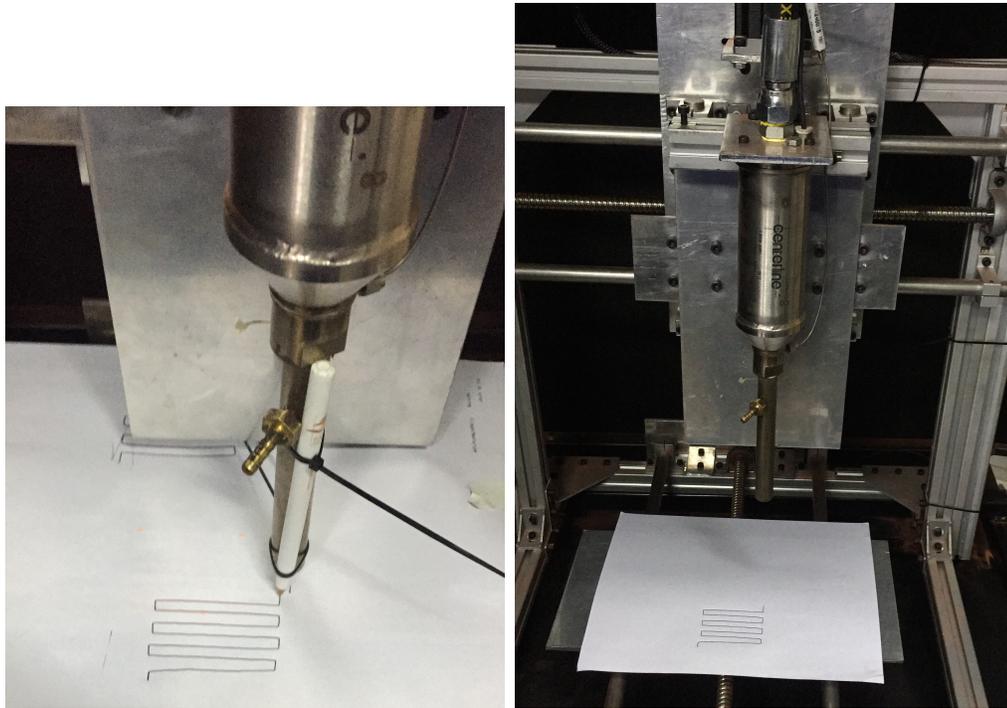


Figura 9.3: Gráfico PID. Fuente: Elaboración propia

### 9.3. Subsistema movimiento

La cuarta prueba realizada es de los motores, se utiliza el software Mach3, el cual permite comandar manualmente los motores y además puede generar gcodes que comandan los motores y permite el movimiento de estos. En primera instancia se prueba el movimientos correcto de los 3 ejes manualmente, logrando un exito hasta los extremos de los ejes posteriormente se realiza una prueba con un lápiz de tinta y una hoja simulando como se vera un revestimiento, en la Figura 9.4 se observa el resultado final.



(a) Lápiz usado para simular revestimiento (b) Estructura con simulación de revestimiento

Figura 9.4: Movimientos motores simulación movimiento. Fuente Elaboración propia

### 9.4. Sistema completo

Finalmente se realiza la prueba final, calentando primero con aire comprimido y luego dando paso al nitrógeno a una temperatura de  $450[^\circ C]$  y con una presión del gas de nitrógeno de  $200[psi]$ , estos dos parámetros se encuentra bajo el máximo permitido de  $500[^\circ C]$  y  $243[psi]$  calculados en el Capítulo 5, se realizaron varias pruebas en esta condición donde no se logró el objetivo de revestir el material debido a la conexión entre el alimentador de polvo con la tobera. Pero si se comprobó la seguridad que otorga la cabina para el usuario.



Figura 9.5: Prueba sistema completo. Fuente: Elaboración propia

# Conclusión

El proyecto significó más de seis meses de trabajo para lograr su completo desarrollo, desde la revisión bibliográfica hasta las pruebas finales y se requirió una inversión de aproximadamente 1.500.000 pesos, correspondiente de alrededor de la cuarta parte de un equipo comercial. Por lo que lograr este tipo de proyecto es factible hoy en día.

A lo largo del proceso de construcción, se implementan los conocimientos de procesos de manufactura y herramientas adquiridos a lo largo de la carrera. Por otra parte, se profundiza el conocimiento sobre los distintos tipos de manufactura aditiva que existen hoy en día, los que permiten desarrollar la creatividad y nuevas soluciones en el día a día.

A pesar de presentar dificultades durante el proyecto, como problemas con adquisiciones, poca familiarización con el gran campo de catálogos, se logra llevar a cabo en gran medida, entregando nuevos dominios para enfrentar el campo laboral.

## Objetivos

Se cumplen tres de los cuatro objetivos principales:

-Se obtiene un control manual tanto para la presión del gas como de la temperatura. Además se tiene que para una temperatura de  $500[^\circ C]$  se puede trabajar a una presión máxima de  $243[psi]$  y que para una presión de  $500[psi]$  se puede alcanzar una temperatura máxima de  $199[^\circ C]$  debido a la potencia del calefactor y al flujo que se genera.

-Se obtiene una base móvil con capacidad máxima movimiento de  $400[mm] \times 450[mm] \times 100[mm]$ , el control se logra mediante un computador y el software Mach3, el que permite generar gcode, para dar instrucciones a los motores en cuanto a los movimientos requeridos.

-La cabina de protección permite la observación sin exponer a peligros al usuario u otras personas.

-El cuarto objetivo no se logra y queda como posterior trabajo es el de generar un revestimiento, esto dado a no tener una tobera y alimentador de partículas óptimos.

## **Limitantes y mejoras**

Uno de los errores que se comete durante el trabajo, es que a pesar de no estar en los alcances el alimentador de polvos, este es uno de los componentes mas importantes para un correcto funcionamiento junto con la tobera y se dejo de lado su implento hasta estar cercano a las pruebas.

El tiempo desplegado en los estudios de los subsistemas, es un punto importante a destacar, ya que al cerrar la busqueda de solo en un tipo, se pierden el abanico de posibilidades que existe. Lo mencionado anteriormente es en referencia al control de temperatura, debido a que en un principio no se tenia en consideración el control seleccionado finalmente, si no que se busco por otros medios realizar el sistema de control de temperatura.

Una de las limitantes y probable causa del largo tiempo empleado en el trabajo de título, es la adquisición de una tobera de Laval y un alimentador de polvos, estas adquisiciones no se pudieron lograr. Es por esto, que se diseñan ambos componentes, de los cuales se requiere un mayor estudio y tiempo para lograr de buena manera, es probable que esto influyo en el resultado final y no cumplimiento de uno de los objetivos. Por esto mismo, estos dos ítems quedan como una de las mejoras importantes para futuro.

Por otro parte, al ser un trabajo con componentes eléctricos y mecánicos, toma más tiempo debido a que se requiere conocimientos en ambos ámbitos, para lograr los objetivos. Dividir este trabajo en ambos sectores, eléctricos y macánicos, con más integrantes, puede dar como resultado un trabajo con mayor rapidez y detalle.

Otra mejora importante es la aislación de elementos mecánicos, como los ejes lineales y husillos, los cuáles puede ser dañados si la superficie de éstos no esta lo suficientemente limpia, ésto refire a los polvos usados en el sistema, debido a que pueden quedar adherirdos a estas partes inadvertidamente.

## **Proyecciones del Sistema de Cold Spray**

Debido a amplio campo que puede abarcar esta tecnología y al estar en pleno desarrollo, el equipo de Cold Spray servirá para realizar pruebas con distintos materiales particulados y estudiar las propiedades mecánicas que se pueden lograr y aplicaciones futuras. También se puede probar con distinto tipo de gas como lo es el helio, que debido a su alto coste no se recomienda.

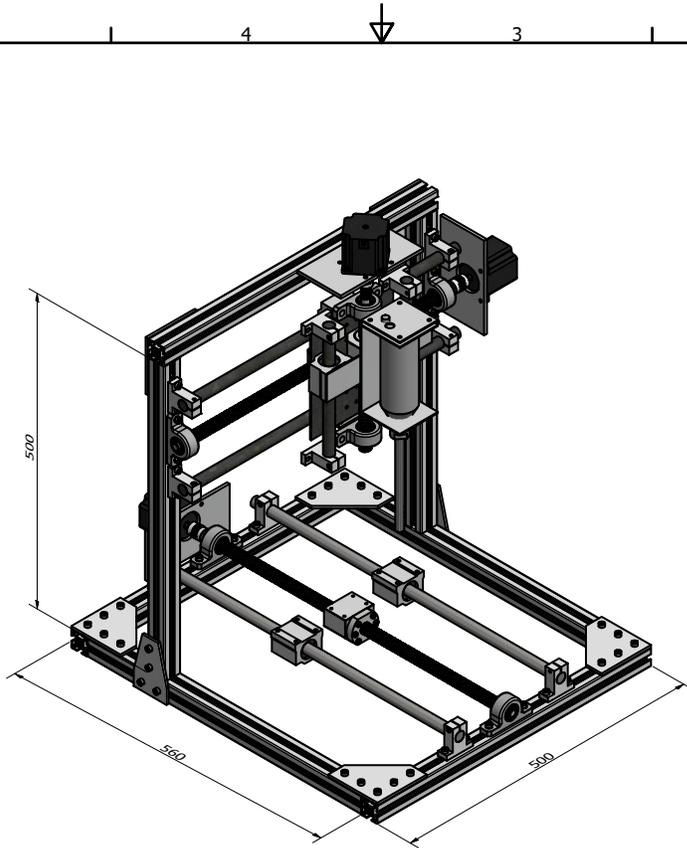
# Bibliografía

- [1] Fabio Nonino and Mojtaba Khorram Niaki. Additive manufacturing management: A review and research agenda. *International Journal of Production Research*, 55(5):1419–1439, 2017.
- [2] Shuo Yin, Pasquale Cavaliere, Barry Aldwell, Richard Jenkins, Hanlin Liao, Wenya Li, and Rocco Lupoi. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing*, 21(April):628–650, 2018.
- [3] J. Bedoya, N. Cinca, and J. M. Guilemany. Recubrimientos micro/nanoestructurados de aleaciones ligeras mediante proyección fría para la protección y reparación de componentes de elevado valor añadido: Estado del arte. *Revista de Metalurgia*, 49(3):223–236, 2013.
- [4] Sanyangare Edwin Tinashe. Conceptual Design of a Low Pressure Cold Gas Dynamic Spray ( LPCGDS ) System. 2010.
- [5] Harminder Singh, T. S. Sidhu, and S. B.S. Kalsi. Cold spray technology: Future of coating deposition processes. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 22(October):69–84, 2012.
- [6] Steven W Dean and Steven W Dean. ENERGETIC INTERMETALLIC MATERIALS FORMED BY COLD SPRAY. (May), 2015.
- [7] Karthikeyan J. Development of oxidation resistant coatings on GRCop-84 substrates by cold spray process. *Nasa/Cr*, 214706(May 2007):1–16, 2007.
- [8] Yingying WANG. Electrochemical behavior of cold sprayed coatings dedicated to corrosion protection applications. page 196, 2015.
- [9] Frank Gärtner, Thorsten Stoltenhoff, Tobias Schmidt, and Heinrich Kreye. The cold spray process and its potential for industrial applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 15(2):223–232, 2006.
- [10] J Karthikeyan and A. Kay. Cold spray technology: International status and USA efforts. *ASBindustries Inc*, (December):1–14, 2004.
- [11] Arbegast Materials Processing, South Dakota School of Mines Joining Lab, and Technology. Cold Spray A guide to best practice, 2012.

- [12] Tipos de sistemas de CSP [Online]. <http://tecnologiagama2000seda.blogspot.com/2016/04/tipos-de-sistemas-de-control.html> [Accessed: 21-May-2019], 2016.
- [13] Omega. Controladores de temperatura [Online] <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura> [Accessed: 20-Mar -2019], 2012.
- [14] ARIAN Control & Instrumentación. ¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas? pages 1–10.
- [15] CSIRO. Cold spray heats up[ONLINE]<https://blog.csiro.au/cold-spray-heats-up/> [Accessed: 10-Feb -2019]. pages 1–6, 2017.
- [16] Adgefficiency. Heat transfer [Online]. <https://adgefficiency.com/energy-basics-q-m-cp-dt/> [Accessed: 10-Jun-2019], 2009.
- [17] Nasa. Mass Flow Choking [Online] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mflchk.html> [Accessed: 10-Jun-2019], 2007.
- [18] Engineering Toolbox. Specific Heat and Individual Gas Constant of Gases [Online]. [https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d\\_159.html](https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-gases-d_159.html) [Accessed: 10-Jun-2019], 2003.
- [19] G.U.N.T. Geratebau GmbH. Manual de experimentos HM150.08 Estudio de las Fuerzas en Chorro.
- [20] THK. Ejemplos de selección de un husillo de bolas.
- [21] Veto. Sensor Standar [Online] <https://www.veto.cl/sensor-standard-f4240016.html> [Accessed: 20-Mar-2019], 2019.
- [22] Rhona. Control De Temperatura [Online] <https://www.rhona.cl/producto/8715/control-de-temperatura.html> [Accessed: 20-Mar-2019], 2007.
- [23] Multiadapters Hidraulica. Valvulas alta presión [Online] <http://www.multiadapters.cl/a.p.valvulas.altapsi.htm> [Accessed: 21-May-2019].
- [24] Soprolec. Servomotor-19nm [Online]. [www.soprolec.com](http://www.soprolec.com) [Accessed: 20-Dec-2018].
- [25] Cimech3D. Tienda online de productos para proyectos relacionados con máquinas CNC, Impresoras 3D, Robótica, Automatización [Online]. <http://www.cimech3d.cl> [Accessed: 21-May-2019].
- [26] Makershopbcn. rodamiento-lineal-sc16uu [Online] [makershopbcn.com](http://makershopbcn.com) [accessed:20-Dec-2018].

# Apéndice A

## Anexo I: Planos



DESIGNED BY	CHECKED BY	APPROVED BY	DATE	DATE	
cmassardo				05/03/2019	
				<b>Estructura movil</b>	
				ISSUE	SHEET
				Estructura movil	1/1

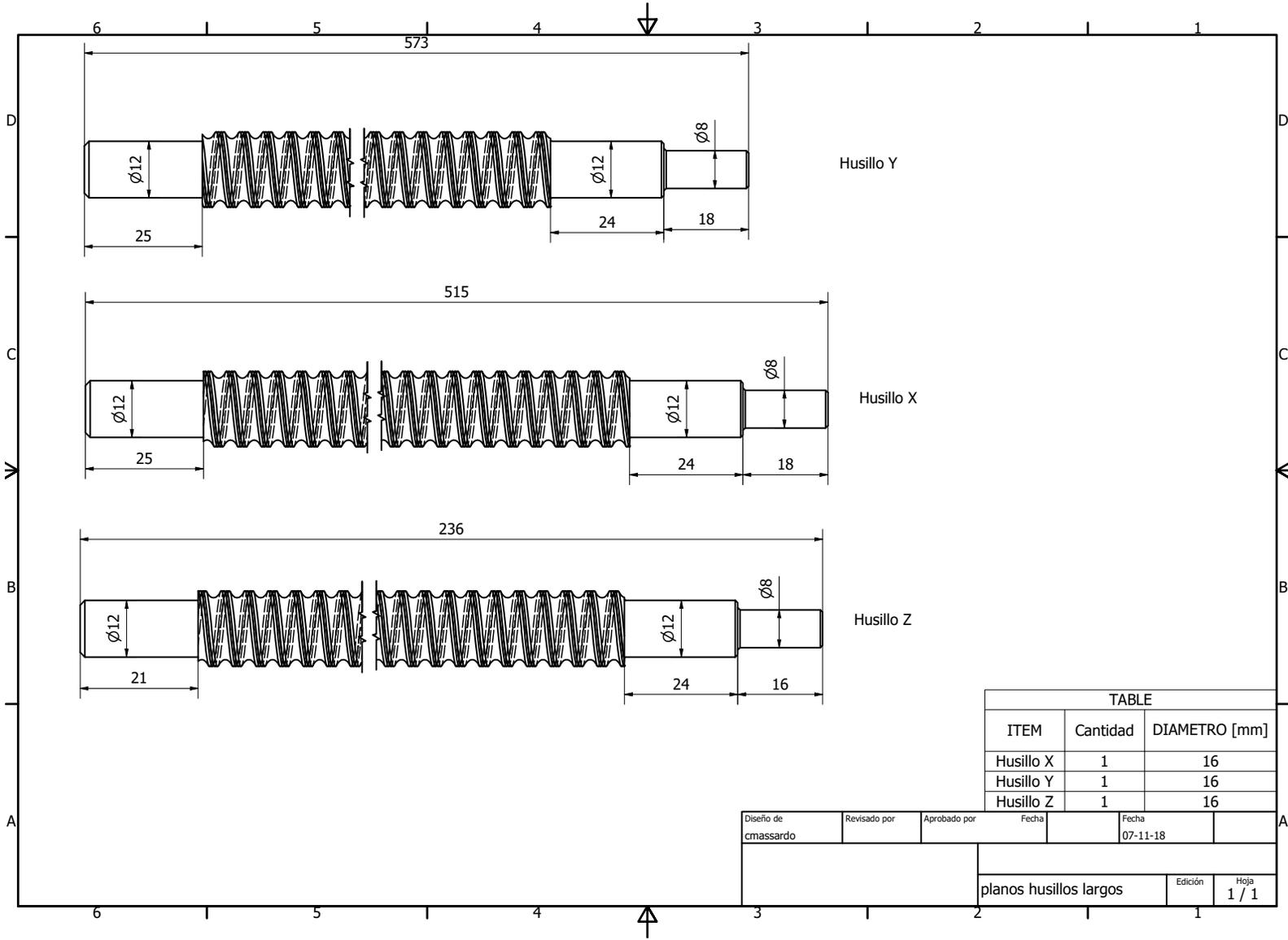
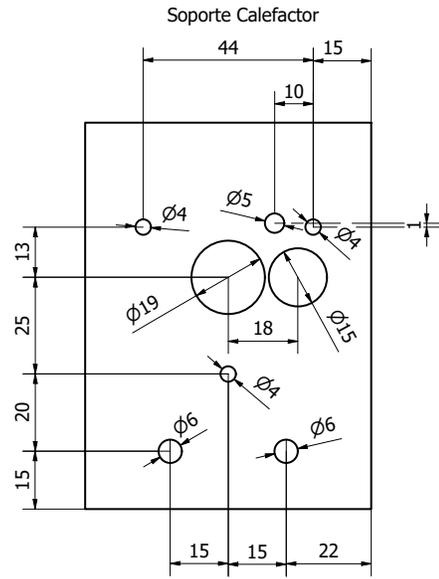
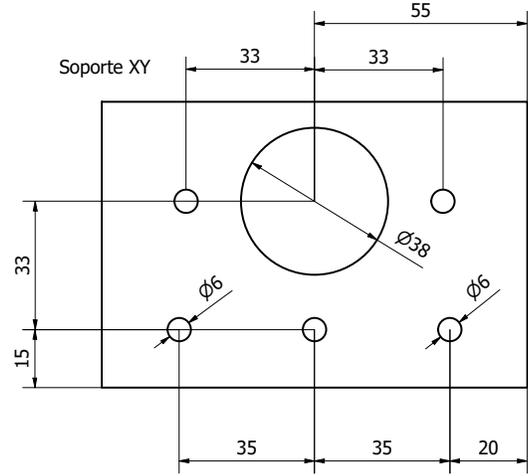
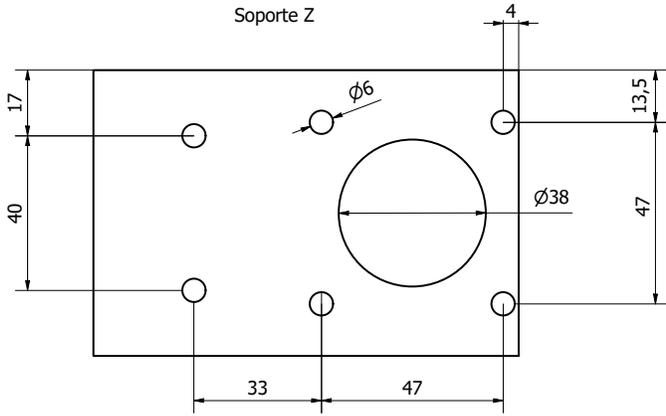
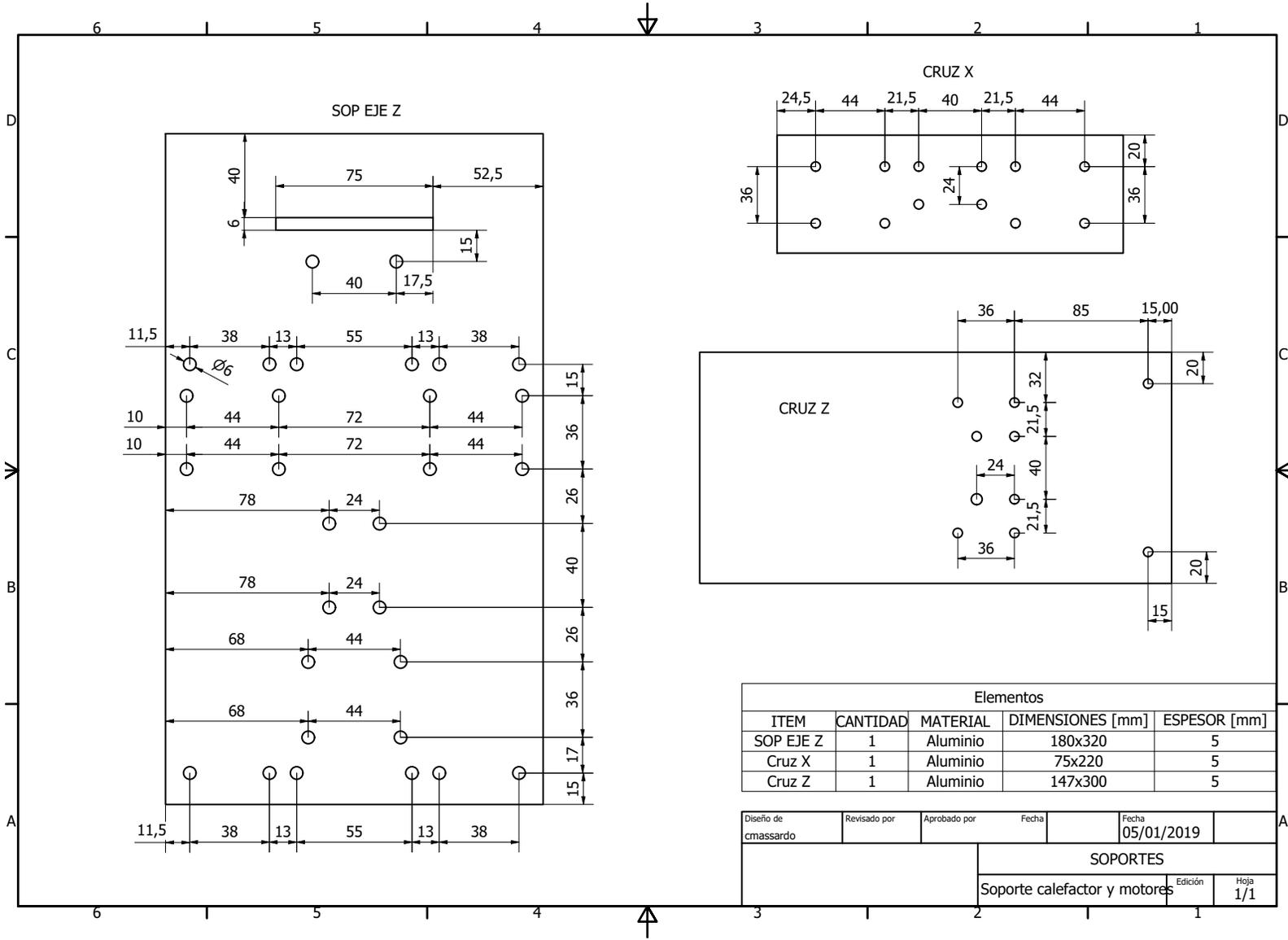


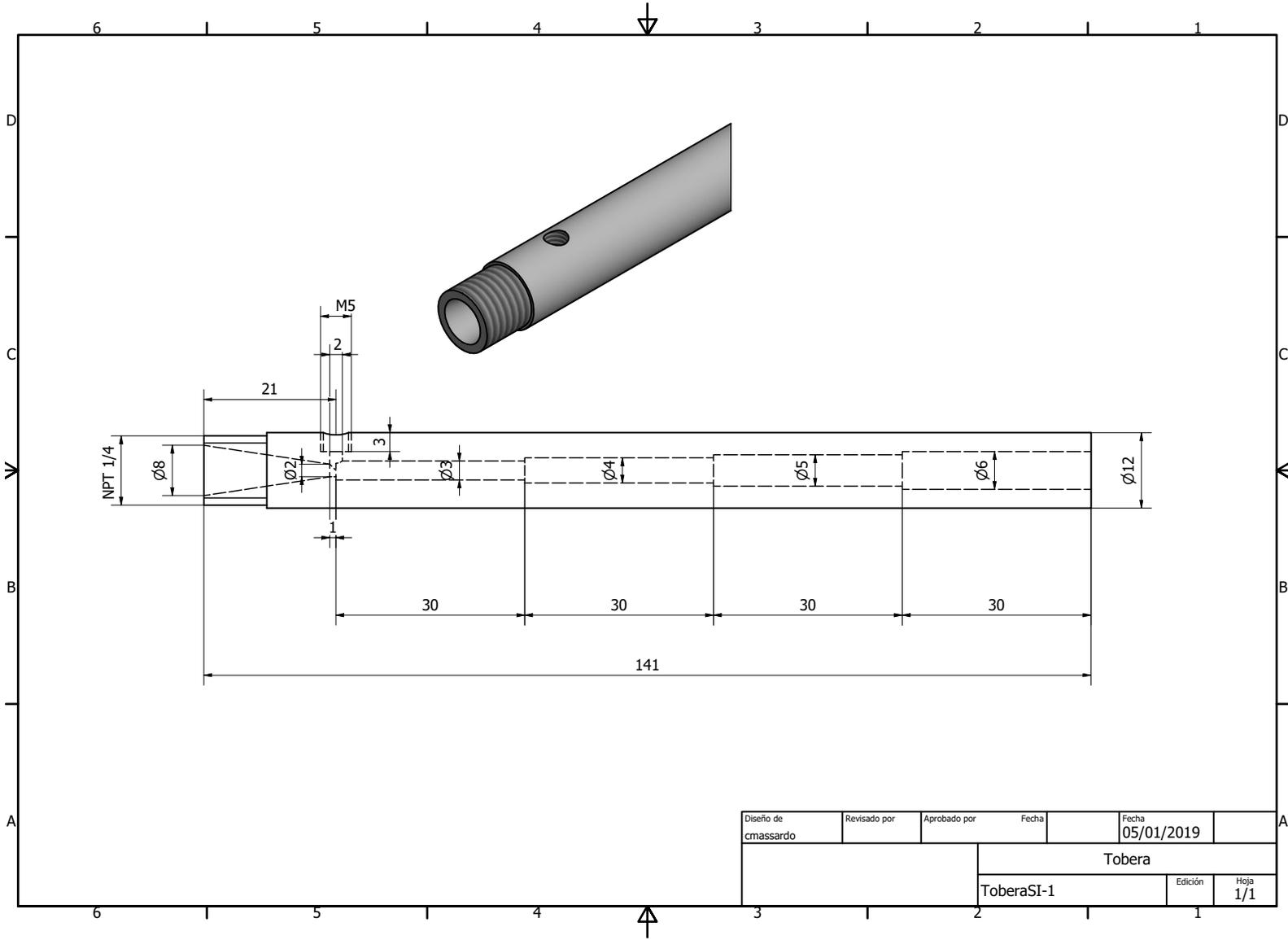
TABLE		
ITEM	Cantidad	DIAMETRO [mm]
Husillo X	1	16
Husillo Y	1	16
Husillo Z	1	16

Diseño de cmassardo	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha
				07-11-18
planos husillos largos			Edición	Hoja
				1 / 1

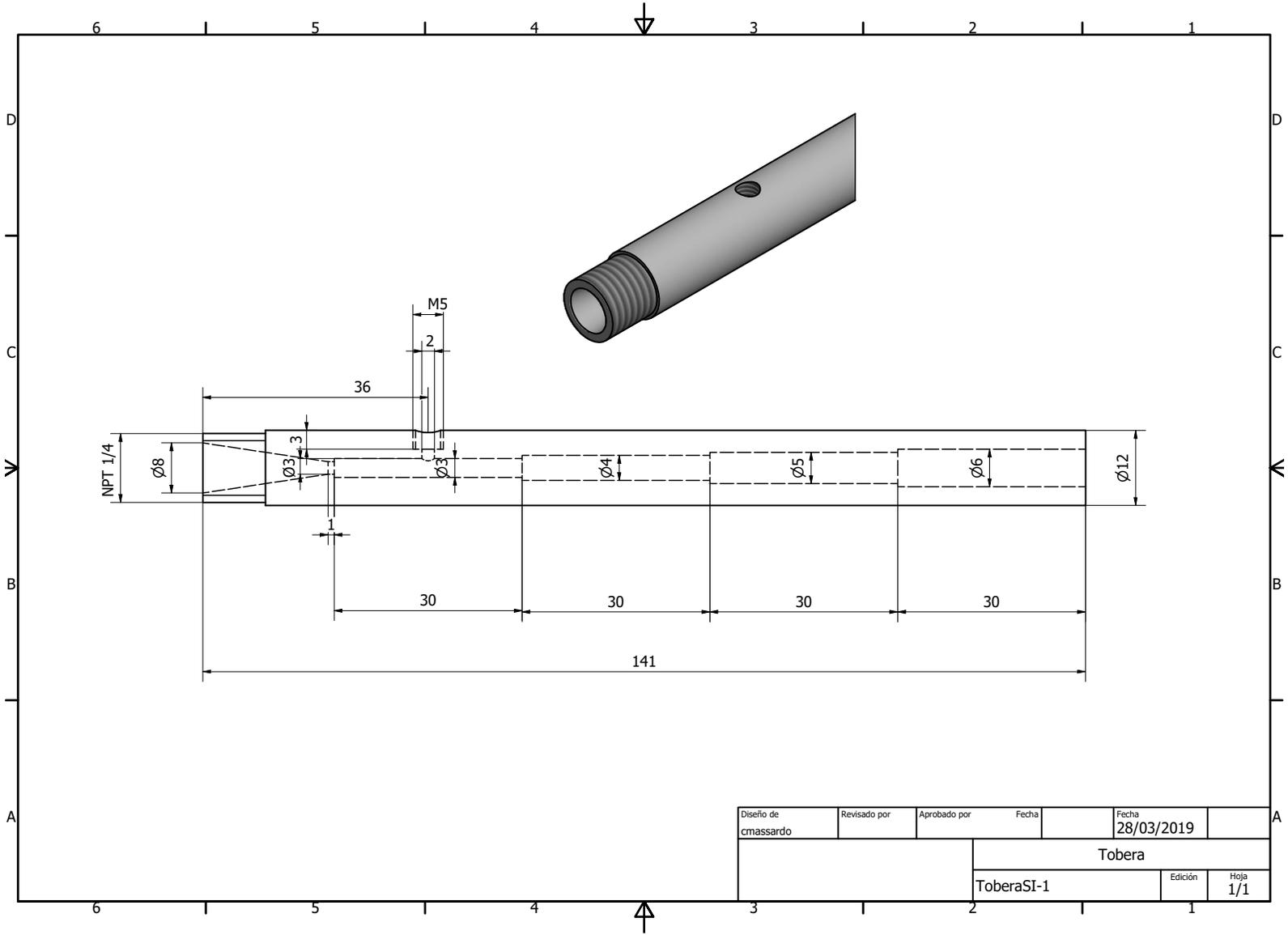


Elementos				
ITEM	CANTIDAD	MATERIAL	DIMENSIONES [mm]	ESPEJOR [mm]
Soporte Z	1	Aluminio	97x110	5
Soporte X Y	2	Aluminio	97x110	5
Soporte Calefactor	1	Aluminio	74x100	5
Diseño de cmassardo	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 05/01/2019
SOPORTES				
Soporte calefactor y motores				Edición 1/1





Diseño de cmassardo	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 05/01/2019	
			Tobera		
			ToberaSI-1	Edición 1	Hoja 1/1



Diseño de cmassardo	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 28/03/2019
				Tobera
ToberaSI-1				Edición 1
				Hoja 1/1

## Apéndice B

### Anexo II: Cubicación y Gastos

N°	Descripción	Material	Formato	Largo [mm]	Espesor [mm]	Cantidad	Peso Unitario [kg]	Peso Total[kg]
1	Control Gas							0,22
1.01	Regulador presión alta nitrogeno					1		0,00
1.02	Manguera alta presión		ø 1/2"	3000		1		0,00
1.03	Tobera	Acero inoxidable 304	ø 16	140		1	0,223	0,22
1.04	Manguera Silicona	Silicona	ø 3x5 mm	500		1	Marginal	
1.05	Acople manguera silicona	Bronce				1	Marginal	
1.06	Acople regulador manguera					1	Marginal	
1.07	Acople manguera calefactor					1	Marginal	
2	Temperatura							2,10
2.01	Termocupla tipo k	Comercial				1	Marginal	
2.02	Control TCN4S	Comercial				1	0,100	0,10
2.03	Calefactor	Comercial				1	2,000	2,00
2.04	Caja electrica	Acero				1		0,00
2.05	Prensa stopa	Comercial				3	Marginal	
3	Movimiento							18,37
3.01	Husillo eje x					1		0,00
3.02	Husillo eje y					1		0,00
3.03	Husillo ejez					1		0,00
3.04	Ejes x	Acero Inoxidable 304	ø 16	500		2	0,797	1,59
3.05	Ejes y	Acero Inoxidable 304	ø 16	560		2	0,893	1,79
3.06	Ejes Z	Acero Inoxidable 304	ø 16	200		2	0,319	0,64
3.07	SK16 Soporte de aluminio	Comercial	ø 16			12	0,045	0,54
3.08	SC16UU Rodamiento lineal con soporte	Comercial	ø 16			7	0,171	1,20
3.09	KP001 Soporte de pie con rodamiento de bola	Comercial	ø 12			6	0,077	0,46
3.10	Perfil aluminio	Aluminio 6063	Perfil 30x30	500		8	0,982	7,86
3.11	Perfil aluminio soporte calefactor	Aluminio 6063	Perfil 30x30	10		1	0,020	0,02
3.12	Perfil aluminio soporte motor Y	Aluminio 6063	Perfil 30x30	9		1	0,018	0,02
3.13	Perfil alumnio soporte motor z	Aluminio 6063	Perfil 30x30	97		1	0,191	0,19
3.14	Plancha de unión 90 grados (L) para perfil 30x30	Aluminio 6063			4	6	0,040	0,24
3.15	Plancha de unión 90 grados (T) para perfil 30x30	Aluminio 6063			4	4	0,045	0,18
3.16	Angulo union 90 grados para perfil 30x30	Aluminio fundido				2	0,025	0,05
3.17	Motor Nema 1.9 Nm					3	1,200	3,60
3.18	Acople eje motor	Comercial	ø 6,35x8			3		0,00
3.19	Perons	Comercial	M5x10			55		0,00
3.20	Pernos	Comercial	M5x12			26		0,00
3.21	Pernos	Comercial	M5x20			48		0,00
3.22	Pernos	Comercial	M4x10			3		0,00
3.23	Soporte eje z	Aluminio 6063	Plancha 180x320		5	1	Marginal	
3.24	soporte cruz x	Aluminio 6063	Plancha 75x220		5	1	Marginal	
3.25	Soporte cruz z	Aluminio 6063	Plancha 147x300		5	1	Marginal	
3.26	Soporte motor	Aluminio 6063	Plancha 97x110		5	3	Marginal	
3.27	Soporte calefactor	Aluminio 6063	Plancha 74x100		5	1	Marginal	
3.28	Tuerca T M5 (corrediza)	Comercial	M5			81	Marginal	
4	Cabina							50,96
4.01	Patás	ASTM A36	Perfil 30x30	725	2	4	1,220	4,88
4.02	Horizontal Frontal y Trasero	ASTM A36	Perfil 30x30	700	2	4	1,178	4,71
4.03	Horizontal Laterales	ASTM A36	Perfil 30x30	750	2	4	1,263	5,05
4.04	Cuerpo	ASTM A36	Perfil 30x30	930	2	4	1,566	6,26
4.05	Tapa lateral	ASTM A36	Plancha 740x980		1	2	5,700	11,40
4.06	Tapa superior e inferior	ASTM A36	Plancha 690x740		1	2	4,013	8,03
4.07	Tapa frontal y trasera	ASTM A36	Plancha 690x980		1	2	5,315	10,63
4.08	Pernos con tuerca	Comercial	M5x40	40		56	Marginal	
4.09	Golillas	Comercial	M5			112	Marginal	
4.10	Pernos con tuerca	Comercial	M8x40	40		4	Marginal	
4.11	Golillas	Comercial	M8			4	Marginal	
4.12	Acrilico	Acrilico	250x450		5	2	Marginal	

<b>Categoría</b>	<b>Valor [CLP]</b>
Perneria	\$40.191
Ejes y componetes	\$135.004
Husillo y componentes	\$233.190
Motores y drivers	\$271.459
Acero	\$101.337
Aluminio	\$144.685
Control temperatura	\$211.153
Control Gas y Nitrogeno	\$258.210
Otros	\$86.612
<b>Total</b>	<b>\$1.481.841</b>