



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Diseño del sistema de vacío para el tubo de pruebas Hyper- Tube de Hyperloop UPV

AUTOR: Alberto Martínez Higuera

TUTOR: Pedro L. Iglesias Rey

COTUTOR: Salvador García Todolí

Curso Académico: 2018-19

Resumen

Hyperloop es una nueva tecnología en desarrollo que aspira a convertirse en el quinto medio de transporte. Su auge en los últimos años se debe fundamentalmente a la acción de la empresa estadounidense SpaceX, cuyo cofundador es Elon Musk.

La tecnología Hyperloop consiste en la generación de vacío en el interior de un tubo a través del cual una cabina se desplaza levitando a alta velocidad. El vacío en el interior del tubo elimina la fricción del vehículo con el aire y la levitación elimina la fricción con el suelo. De esta forma, se evitan las mayores fuerzas de resistencia al avance que tienen otros medios de transporte como trenes o coches.

Hyperloop UPV es un equipo de estudiantes que desarrolla prototipos demostradores de esta tecnología para participar en la SpaceX Hyperloop Pod Competition que se celebra cada año en la sede de SpaceX. Ante la necesidad de poder probar el prototipo en vacío antes de participar en las pruebas finales de la competición se ha puesto en marcha la fabricación de un tubo en cuyo interior se pueda generar una presión de 10 mbar, que cumplirá con las exigencias requeridas en la competición.

Este Trabajo Final de Grado expone el diseño de los sistemas de vacío necesarios para poder generar el vacío en el interior del Hyper-Tube y extraer información del comportamiento de distintos componentes a baja presión.

El proceso en cuestión finaliza con la validación del funcionamiento de todo el sistema y las pruebas del prototipo TURIAN del equipo Hyperloop UPV antes de la "2019 SpaceX Hyperloop Pod Competition".

Resum

Hyperloop és una nova tecnologia en desenvolupament que aspira a convertir-se en el quint mitjà de transport. El seu auge en els últims anys es deu fonamentalment a l'acció de l'empresa nord-americana SpaceX, de la qual és cofundador Elon Musk.

La tecnologia Hyperloop consisteix en la generació de buit en l'interior d'un tub a través del qual una cabina es desplaça levitant a alta velocitat. El buit a l'interior del tub elimina la fricció del vehicle amb l'aire i la levitació elimina la fricció amb el sòl. D'aquesta manera, s'eviten les majors forces de resistència a l'avanç que tenen altres mitjans de transport com a trens o cotxes.

Hyperloop UPV és un equip d'estudiants que desenvolupa prototips demostradors d'aquesta tecnologia per a participar en la SpaceX Hyperloop Pod Competition que se celebra cada any en la seu de SpaceX. Davant de la necessitat de poder provar el prototip en buit abans de participar en les proves finals de la competició s'ha posat en marxa la fabricació d'un tub en l'interior de la qual es puga generar una pressió de 10 mbar, que complirà amb les exigències requerides en la competició.

Este Treball Final de Grau exposa el disseny dels sistemes de buit necessari per a poder generar el buit en l'interior del Hyper-Tube i extraure informació del comportament de diversos components a baixa pressió.

El procés en qüestió finalitza amb la validació del funcionament de tot el sistema i les proves del prototip TURIAN de l'equip Hyperloop UPV abans de la "2019 SpaceX Hyperloop Pod Competition".

Abstract

Hyperloop is a new technology under development that aims to become the fifth mean of transport. Its boom in recent years is mainly due to the action of the American company SpaceX, whose co-founder is Elon Musk.

Hyperloop technology consists of generating vacuum inside a tube through which a cabin moves levitating at high speed. The vacuum inside the tube eliminates the friction of the vehicle with the air and the levitation eliminates the friction with the ground. In this way, the greater forces of resistance to the advance that other means of transport such as trains or cars have are avoided.

Hyperloop UPV is a team of students that develops prototype demonstrators of this technology to participate in the SpaceX Hyperloop Pod Competition, held each year at the headquarters of SpaceX. Faced with the need to be able to test the prototype in vacuum conditions before participating in the final tests of the Competition, the Team has begun the manufacture of a tube inside which a pressure of 10 mbar can be generated. This meets the requirements of the competition.

This Final Degree Paper presents the design of the vacuum systems necessary to generate the vacuum inside the Hyper-Tube and extract information of the behaviour of different components at low pressure.

The process in question ends with the validation of the functioning of the entire system and the testing of the TURIAN prototype of the Hyperloop UPV team before the 2019 SpaceX Hyperloop Pod Competition.

*A toda mi familia, gracias a quienes soy quien
soy y por su confianza y apoyo incondicional*

*A los miembros de Hyperloop UPV, por la
oportunidad de entrar en un proyecto
así y por ser como una familia*

*A mis amigos, por cada experiencia y cada risa
que hacen que todo merezca la pena*

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. HISTORIA. ¿QUÉ ES HYPERLOOP?	15
1.2. HYPERLOOP UPV EN LA “SPACE X HYPERLOOP POD COMPETITION”	18
1.3. PROYECTO TURIAN	20
1.3. OBJETO DE PROYECTO	22
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	23
2.1. INTRODUCCIÓN: DATOS SOBRE EL POTENCIAL DE HYPERLOOP	23
2.2. PARTES DEL HYPERLOOP	24
2.2. CONSTRUCCIÓN DEL HYPER-TUBE	25
2.3. VACÍO EN HYPERLOOP	26
2.3.1. Tecnología en vacío	26
2.3.2. Normativas actuales	27
2.4. ESTACIONES DE HYPERLOOP	27
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE VACÍO DEL HYPER-TUBE	29
3.1. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	29
3.2. DISEÑO DE CONCEPTO	29
3.2.1. Cubiertas	30
3.2.2. Mecanismo de apertura de la puerta	31
3.2.3. Bombas de vacío	32
3.2.4. Conexiones con el interior	33
3.2.5. Sellado de la cámara	35
3.3. DISEÑO DE DETALLE	38
3.3.1. Análisis del sistema de vacío	38
3.3.2. Simulaciones estructurales	40
3.3.3. Diseño y análisis del mecanismo de movimiento de la bisagra	59
CAPÍTULO 4. FABRICACIÓN, MONTAJE Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE VACÍO DEL HYPER-TUBE	61
4.1. FABRICACIÓN DE PIEZAS	61
4.2. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL HYPER-TUBE	63
4.2.1. Proceso de montaje	63
4.2.2. Soldadura de piezas	65
4.3. TESTS DE FUNCIONAMIENTO DEL HYPER-TUBE	66
4.3.1. Detección y caracterización de fugas	66
4.3.2. Medición de tiempos de vaciado y llenado reales	68

CAPÍTULO 5. PRUEBAS EN VACÍO DEL PROTOTIPO TURIAN DEL EQUIPO HYPERLOOP UPV ...	71
5.1. PRUEBAS EN VACÍO DE LOS DIFERENTES SUBSISTEMAS.....	71
5.1.1. Ensayo de compatibilidad en vacío de las baterías de los motores de TURIAN	71
5.1.2. Ensayo de compatibilidad en vacío de las baterías de la aviónica de TURIAN	75
5.2. PRUEBA EN VACÍO DEL PROTOTIPO TURIAN COMPLETO	77
5.2.1. Introducción	77
5.2.2. Metodología	77
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	79
CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA.....	81
ANEXO I: PLANOS	83
ANEXO II: PRESUPUESTO.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1. Inauguración de la estación de Holdorn [Fuente: LondonReconnections]	16
Figura 2. Diseño del tubo neumático de Alfred Ely Beach. (Fuente: The Bowery Boys)	16
Figura 3. Shangai Maglev (Fuente: Maglev NET).....	17
Figura 4. SC Maglev (Fuente: Flickr)	17
Figura 5. Propuesta Hyperloop Alpha (Fuente: SpaceX).....	18
Figura 6. Tubo de 1,5 km en Hawthorne, Los Ángeles (Fuente: The Business Journals)	19
Figura 7. Diseño desarrollado por Zeleros. (Fuente: Zeleros)	19
Figura 8. Prototipos Atlantic II y Valentia (Fuente: Hyperloop UPV).....	20
Figura 9. Carenado del prototipo TURIAN (Fuente: Hyperloop UPV)	20
Figura 10. Componentes del interior del prototipo TURIAN (Fuente: Hyperloop UPV).....	21
Figura 11. Equipo Hyperloop UPV 2018-2019 (Fuente: Hyperloop UPV)	22
Figura 12. Comparación temporal de medios de transporte (Fuente: Hyperloop One)	23
Figura 13. Partes de la cabina de Hyperloop (Fuente: Hyperloop UPV)	24
Figura 14. Partes de la estructura propuesta por Zeleros (Fuente: Zeleros)	25
Figura 15. Instalación del tubo en 2017 (Fuente: Hyperloop UPV).....	25
Figura 16. Plano del tubo de SpaceX con el raíl en su interior (Fuente: SpaceX).....	26
Figura 17. Bisagra del Tubo de 1,5km de SpaceX (Fuente: Medium).....	31
Figura 18. Sensor PIEZOVAC PV 101 (Fuente: Leybold)	33
Figura 19. Ensamblaje de una conexión ISO KF (Fuente: The Vacuum Projects)	34
Figura 20. Ejemplos de juntas de deformación radial (Fuente: Epidor)	35
Figura 21. Ejemplo de juntas de deformación axial y cajeado rectangular (Fuente: Epidor) ..	36
Figura 22. Ejemplo de cajeado trapezoidal (Fuente: Epidor)	36
Figura 23. Junta colocada en su ranura	37
Figura 24. Bomba SOGEVAC SV 100 B (Fuente: Leybold).....	38
Figura 25. Gráfico de caudal según la presión (Fuente: Leybold)	39
Figura 26. Potencia de la bomba en kW (Fuente: Leybold)	40
Figura 27. Geometría (Tubo)	41
Tabla 1. Propiedades generales (Tubo)	41
Figura 28. Apoyos fijos del tubo	42
Tabla 2. Características del mallado (Tubo).....	42
Figura 29. Deformación (Tubo).....	43

Figura 30. Tensión equivalente (Tubo)	43
Figura 31. Factor de seguridad (Tubo)	44
Tabla 3. Resultados de la simulación (Tubo)	44
Figura 32. Geometría (Compuerta Fija)	45
Tabla 4. Propiedades generales (Compuerta Fija)	45
Tabla 5. Características del mallado (Compuerta Fija)	45
Figura 33. Mallado (Compuerta fija)	46
Figura 34. Deformación (Compuerta Fija)	46
Figura 35. Tensión equivalente (Compuerta Fija)	46
Figura 36. Factor de seguridad (Compuerta Fija)	47
Tabla 6. Resultados de la simulación (Compuerta Fija)	47
Figura 37. Geometría (Compuerta Móvil)	47
Tabla 7. Propiedades generales (Compuerta Móvil)	48
Figura 38. Presión sobre la superficie (Compuerta Móvil)	48
Tabla 8. Características del mallado (Compuerta Móvil)	48
Figura 39. Mallado (Compuerta Móvil)	49
Figura 40. Deformación (Compuerta Móvil)	49
Figura 41. Tensión equivalente (Compuerta Móvil)	49
Figura 42. Factor de seguridad (Compuerta Móvil)	50
Tabla 9. Resultados de la simulación (Compuerta Móvil)	50
Figura 43. Geometría (Bisagra)	51
Tabla 10. Propiedades generales (Bisagra)	51
Tabla 11. Características del mallado (Bisagra)	51
Figura 44. Mallado (Bisagra)	52
Figura 45. Deformación (Bisagra)	52
Figura 46. Tensión equivalente (Bisagra)	52
Figura 47. Factor de seguridad (Bisagra)	53
Tabla 12. Resultados de la simulación (Bisagra)	53
Figura 48. Geometría (Sistema Compuerta Móvil)	54
Tabla 13. Propiedades generales (Sistema Compuerta Móvil)	54
Tabla 14. Características del mallado (Sistema Compuerta Móvil)	55
Figura 49. Mallado (Sistema Compuerta Móvil)	55
Figura 50. Deformación (Sistema Compuerta Móvil)	55

Figura 51. Tensión equivalente (Sistema Compuerta Móvil)	56
Figura 52. Factor de seguridad (Sistema Compuerta Móvil).....	56
Tabla 15. Resultados de la simulación (Sistema Compuerta Móvil)	56
Tabla 16. Propiedades generales (Soporte Rueda)	57
Tabla 17. Características del mallado (Soporte Rueda)	57
Figura 53. Mallado (Soporte Rueda)	57
Figura 54. Deformación (Soporte Rueda)	58
Figura 55. Tensión equivalente (Soporte Rueda)	58
Figura 56. Factor de seguridad (Soporte Rueda).....	58
Tabla 18. Resultados de la simulación (Soporte Rueda).....	58
Figura 57. Detalle de la bisagra tras el montaje.....	59
Figura 58. Corte por chorro de agua. (Fuente: Mecanizadossinc)	61
Figura 59. Corte por láser (Fuente: Sculpteo)	62
Figura 60. Velocidades de corte de los distintos sistemas (Fuente: Flowwaterjet)	62
Figura 61. Plegado de piezas metálicas (Fuente: Lasertek).....	63
Figura 62. Colocación y soldadura de las bridas.	64
Figura 63. Montaje de una de las compuertas.....	65
Figura 64. Trabajos de soldadura en el Hyper-Tube.....	66
Figura 65. Montaje del equipo de ensayo.	67
Figura 66. Defectos detectados en el cordón de soldadura	68
Figura 67. Evolución de la presión durante un ensayo	70
Figura 68. Esquema del test a 18,5 V (Fuente: Hyperloop UPV).....	73
Tabla 19. Resultados de las diferentes descargas. (Fuente: Hyperloop UPV)	73
Figura 69. Voltaje en condiciones de vacío. (Fuente: Hyperloop UPV).....	74
Figura 70. Corriente en condiciones de vacío. (Fuente: Hyperloop UPV)	74
Figura 71. Temperatura en condiciones de vacío. (Fuente: Hyperloop UPV).....	75
Tabla 20. Resultados del test de las celdas Samsung 18650. (Fuente: Hyperloop UPV)	76

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. HISTORIA. ¿QUÉ ES HYPERLOOP?

La tecnología se encuentra en un constante proceso de evolución y mejora que permite la mejora en la calidad de vida de las personas. Sin embargo, existen puntos de inflexión en los que el cambio es tan grande que se habla de revolución. En el mundo del transporte existen varios de estos puntos de inflexión, como la aparición de los coches o el primer transporte de viajeros en avión. En la actualidad, está apareciendo una tecnología que podría revolucionar el mundo del transporte en menos de 20 años. Esta tecnología es conocida como Hyperloop.

El concepto de Hyperloop consiste en cápsulas de transporte que viajan levitando en el interior de un tubo a baja presión. De esta forma, se evitan las dos fuerzas que frenan cualquier vehículo terrestre: el rozamiento con el suelo y la fricción con el aire. Con los primeros cálculos se estima que en un futuro se podrán alcanzar velocidades de 1000 km/h con esta tecnología, permitiendo un transporte limpio, eficiente y rápido entre grandes ciudades.

Como se ha podido observar en la definición del concepto de Hyperloop, existen dos ramas de desarrollo tecnológico que han llevado hasta la idea actual de este medio de transporte: el transporte en vacío y la levitación magnética.

A finales del siglo XIX, se iniciaron proyectos de investigación centrados en el transporte neumático. Realmente estos sistemas no se centraban en el transporte en vacío si no que consistían en impulsar los objetos mediante aire a través de un tubo, idea que se acabó desechando debido a que a gran escala era un método muy costoso y poco eficiente. Estos diseños iniciales fueron de la London Pneumatic Despatch Company (1861) en Europa y de Alfred Ely Beach para el transporte subterráneo de Nueva York en el siglo 1869 en Estados Unidos.

Por un lado, en Londres, se utilizó la propulsión neumática como alternativa a las máquinas de vapor, consolidadas en aquella época pero que eran sucias y ruidosas. La London Pneumatic Despatch Company (figura 1) creó este método de transporte, mediante sus ingenieros Thomas Webster Rammell y J. Latimer Clark, para el transporte de correo por la ciudad de Londres. Su sistema se llegó a instalar y probar, alcanzado velocidades de 48 kilómetros por hora.

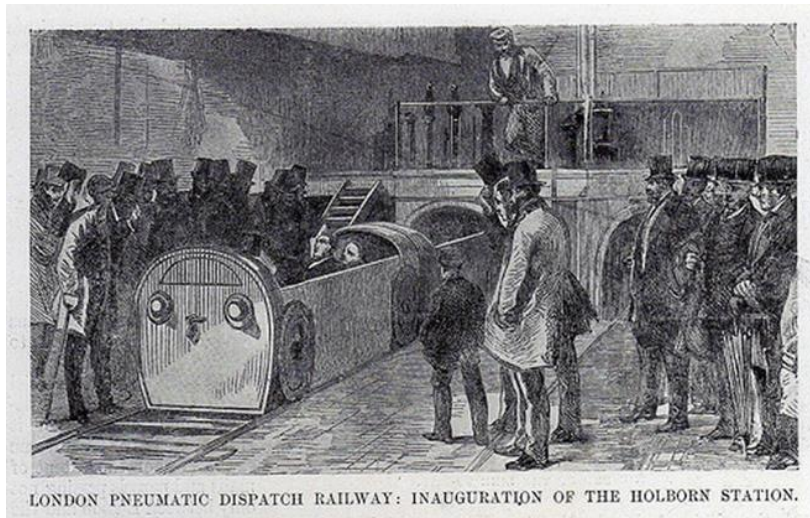


Figura 1. Inauguración de la estación de Holdorn [Fuente: LondonReconnections]

Por otro lado, para solucionar el problema de tráfico en Nueva York, Alfred Ely Beach (figura 2) propuso un sistema subterráneo impulsado por neumática en lugar de por vapor. Su idea, pese a que no se llegó a instalar porque se probó insostenible debido a su elevado peso, era un único vagón en forma de tubo neumático. Los problemas en su diseño y el auge de los trenes con múltiples vagones alimentados mediante sistemas eléctricos frenó el desarrollo de este sistema.

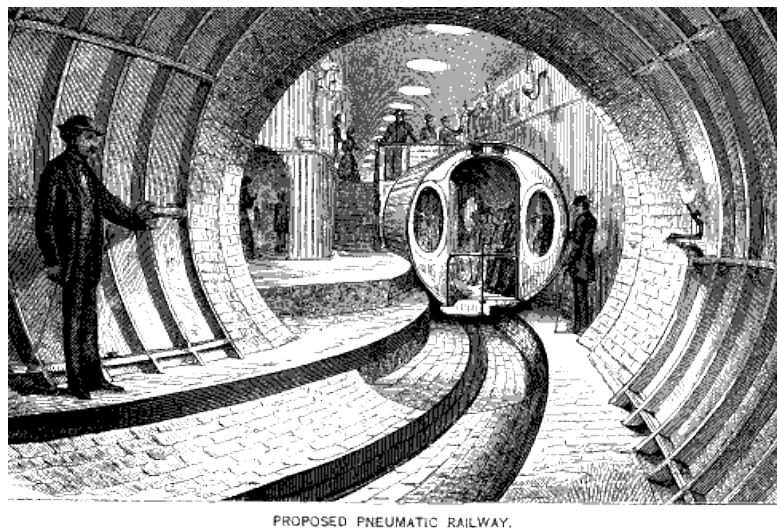


Figura 2. Diseño del tubo neumático de Alfred Ely Beach. (Fuente: The Bowery Boys)

De esta forma, el transporte neumático a gran escala quedó frenado hasta hace pocos años. Pese a esto, sí que se ha desarrollado el transporte neumático en vacío a pequeña escala en la industria para el transporte de granos u otros pequeños componentes de un lugar a otro de una misma fábrica.

En cuanto al transporte magnético, ha tenido un mayor desarrollo a lo largo de la historia en comparación con el transporte en vacío. Comenzó a investigarse en Rusia en 1909 un proyecto que consistía en la levitación y propulsión magnética. Por su parte, Emile Bachelet (un ingeniero francés) desarrolló un prototipo de esta tecnología en 1914 en el que explicaba como se debían

colocar los imanes en el vehículo y en la vía de forma que las fuerzas de repulsión y atracción hacían que el prototipo se impulsara hacia delante. Esta idea es en la que se basan los trenes de levitación magnética (Maglev) existentes en la actualidad y que aparecieron a principios de este siglo. El funcionamiento de estos trenes consiste en la acción de imanes superconductores situados en el vehículo que levantan el tren de 1 a 10 mm. Además, las vías constan de espirales de metal que al ser recorridas por una corriente eléctrica generan un campo magnético que empuja hacia delante el tren. Por tanto, este sistema utiliza el magnetismo para levitar y evitar la fricción con el suelo y para propulsarse (estos trenes no incorporan ningún tipo de motor).



Figura 3. Shanghai Maglev (Fuente: Maglev NET)



Figura 4. SC Maglev (Fuente: Flickr)

Como unión de las tecnologías de vacío y levitación y desde hace menos de 7 años se ha potenciado el desarrollo de Hyperloop. El “boom” de empresas interesadas en desarrollar esta tecnología se debió fundamentalmente a la publicación de un escrito por parte de Elon Musk y SpaceX titulado Hyperloop Alpha. En este documento se explicaba su concepción de un nuevo medio de transporte eficiente y de alta velocidad y se animaba a las empresas privadas a participar en el desarrollo de esta nueva tecnología.

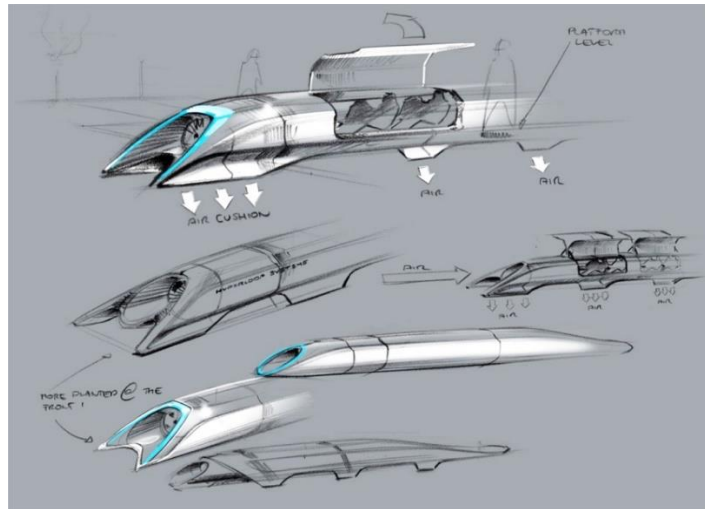


Figura 5. Propuesta Hyperloop Alpha (Fuente: SpaceX)

Debido a la forma en la que surgió la idea de Hyperloop, su desarrollo se está llevando a cabo de una forma conocida como “hardware libre”. Este método de desarrollo surgido a partir de publicaciones sin ánimo de generar patentes permite que cualquier empresa privada pueda llevar a cabo su propio desarrollo de la idea. Por este motivo, algunas de las empresas de Hyperloop están relacionadas directamente con el propio Elon Musk, como TheBoringCompany o SpaceX, pero otras están desarrollando esta tecnología por su cuenta (Zeleros, TransPod o Virgin Hyperloop One).

Por otro lado, existen competiciones de equipos de estudiantes universitarios surgidas con el fin de promover el desarrollo de esta tecnología. En este grupo es donde se encuentra el equipo valenciano Hyperloop UPV, el cual compite anualmente en la competición *SpaceX Hyperloop Pod Competition* junto a otras universidades como la Universidad Técnica de Múnich o la Universidad Tecnológica de Delft.

1.2. HYPERLOOP UPV EN LA “SPACEX HYPERLOOP POD COMPETITION”

La *SpaceX Hyperloop Pod Competition* es una competición de equipos universitarios promovida por SpaceX con el fin de ayudar al desarrollo de la tecnología Hyperloop. En ella participan cada año más de 500 universidades técnicas de todo el mundo de las cuales solo 20 llegan a la fase final y tan solo 3 pueden participar en la prueba final en la que se determina el ganador de la competición.



Figura 6. Tubo de 1,5 km en Hawthorne, Los Ángeles (Fuente: The Business Journals)

En cuanto a la historia de Hyperloop UPV en la competición, cabe destacar que es uno de los únicos 5 equipos que se ha clasificado todos los años de competición para participar en la fase final de la competición. Esta fase final se celebra cada año en Los Ángeles en la sede de SpaceX, una de las empresas fundadas por Elon Musk y que participan en el desarrollo de Hyperloop.

En la actualidad, han tenido lugar 3 competiciones y este julio de 2019 se celebrará la cuarta. La primera competición consistió en la presentación de diseños abstractos de prototipos Hyperloop y fue donde el equipo valenciano alcanzó su mejor puntuación. En aquel momento el equipo se componía únicamente por 5 estudiantes y fue galardonado con los premios al “Mejor sistema de propulsión” y “Mejor diseño de concepto”.

De este primer equipo, nació la empresa valenciana llamada Zeleros que se encuentra actualmente desarrollando su propia idea de Hyperloop. Su diseño se diferenciaba respecto a otros por la levitación por atracción a la parte superior del tubo en lugar de repulsión de la parte inferior y por el uso de un compresor en la parte delantera.

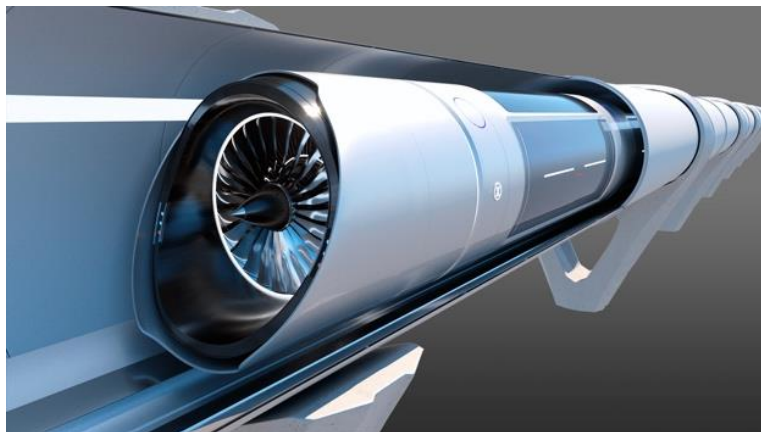


Figura 7. Diseño desarrollado por Zeleros. (Fuente: Zeleros)

Debido al éxito de esta primera competición de diseño, SpaceX decidió dar un paso adelante y organizó una competición de prototipos para el año siguiente, la cual se realiza cada verano actualmente. La competición consta de diversas fases eliminatorias que comienzan en octubre y finalizan en julio del año siguiente que consisten fundamentalmente en la presentación de documentación técnica sobre el prototipo que desarrolla cada equipo. En la primera fase se

debe presentar un diseño preliminar a través de un documento llamado *Preliminary Design Briefing* (PDB) [4]. Más de 500 universidades presentan este documento y tan solo 50 son las elegidas para pasar a la siguiente fase. Tras esto, los equipos clasificados deben desarrollar su idea y presentar su diseño final en un documento mucho más extenso que el anterior llamado *Final Design Package* (FDP) [5]. Este corte lo pasan tan solo una veintena de equipos, los cuales construirán y testearán su prototipo para ir en julio a competir a la sede de SpaceX en Hawthorne, Los Ángeles.

En las dos primeras competiciones, Hyperloop UPV presentó sus prototipos Atlantic II y Valentia quedando entre las 10 mejores universidades del mundo en ambas. En estas ediciones el ganador de la competición fue el equipo WARR Hyperloop de la Universidad Técnica de Múnich. El mejor resultado conseguido hasta ahora fue en julio de 2018, cuando alcanzaron una velocidad máxima de 467 km/h.



Figura 8. Prototipos Atlantic II y Valentia (Fuente: Hyperloop UPV)

1.3. PROYECTO TURIAN

En la actualidad, el equipo se encuentra desarrollando su prototipo TURIAN para competir en la competición de julio de 2019. TURIAN es un prototipo mejorado respecto de sus antecesores diseñado con el objetivo de ganar la competición de 2019.



Figura 9. Carenado del prototipo TURIAN (Fuente: Hyperloop UPV)

Algunos de los aspectos claves de este prototipo son:

- Chasis fabricado completamente de fibra de carbono por su resistencia y ligereza. Esto unido a la propulsión del prototipo le otorgan una relación potencia peso muy elevada al vehículo.

- 2 sistemas de guiado en la parte delantera y trasera del chasis para contrarrestar las desviaciones entre raíles. Cada sistema se compone de 2 ruedas de aluminio colocadas horizontalmente que se unen a ballestas de fibra de vidrio, las cuales amortiguan las desviaciones.
- 12 sistemas de propulsión con motores eléctricos y transmisión directa a la rueda para evitar pérdidas en el sistema de transmisión. Cada sistema incluye también un muelle amortiguador que otorga el pretensado para traccionar contra el raíl y que amortigua las desviaciones verticales de los raíles.
- Sistema eléctrico compuesto 12 packs de 5 baterías LiPo que alimentan los motores de propulsión. Estas baterías se guardan en 6 cajas de fibra de carbono colocadas a ambos lados del chasis.
- Sistema neumático de frenado cuyos actuadores presionan directamente sobre el raíl.
- 4 celdas de baterías de litio que alimentan el sistema electrónico.
- Diseño compacto y modular.
- Comportamiento autónomo mediante su sistema electrónico.
- Velocidad máxima de diseño de 500 km/h.

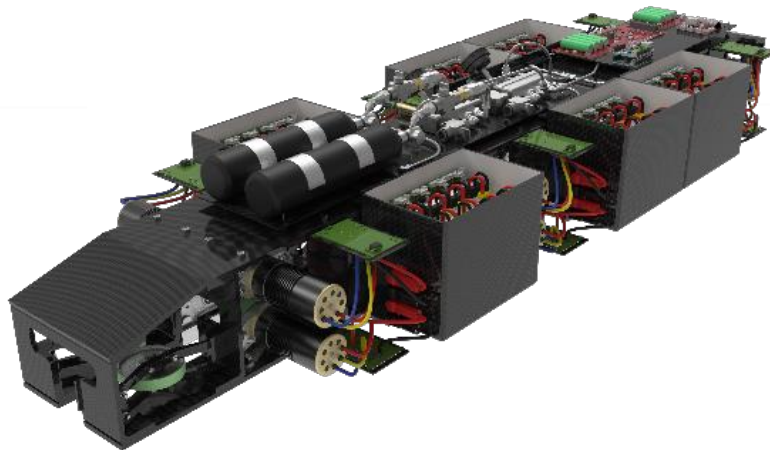


Figura 10. Componentes del interior del prototipo TURIAN (Fuente: Hyperloop UPV)

Sin embargo, pese a que el sistema pueda ser en apariencia correcto, para poder competir y ganar la competición se debe demostrar que es completamente seguro. Por esto, es realmente importante tener unas instalaciones adecuadas para poder probar todos los componentes por separado e incluso el sistema completo antes de la competición.

Con el objetivo de mejorar el resultado en la competición, además de conseguir un prototipo mejorado respecto de otros años, el equipo se ha comprometido a probar todos los componentes de TURIAN antes de la competición y por ello este año se creó un nuevo subequipo específico llamado Testing & Validation, en el que se encuentra el autor de este proyecto, que se encargara de conseguir las instalaciones para poder realizar todos los ensayos necesarios.

Para cumplir su objetivo final, el equipo puso en marcha la instalación de infraestructuras como el Hyper-Tube (instalación de la que se escribe en este proyecto) o el Hyper-Track (pista de pruebas de 150 metros compuesta por un raíl de la misma geometría que el de la competición).



Figura 11. Equipo Hyperloop UPV 2018-2019 (Fuente: Hyperloop UPV)

1.3. OBJETO DE PROYECTO

El objeto básico de este proyecto es el diseño del sistema de vacío para el tubo de pruebas (Hyper-Tube) instalado en el Campus de Vera de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) para que pueda ser utilizado como una cámara de vacío.

Los objetivos que se pretenden abordar en este proyecto son los siguientes:

- En primer lugar, convertir el Hyper-Tube en una cámara de vacío completamente funcional en la que poder hacer ensayos de componentes a baja presión.
- En segundo lugar, realizar las pruebas del funcionamiento en vacío del prototipo TURIAN del equipo Hyperloop UPV antes de la participación en la *“SpaceX Hyperloop Pod Competition 2019.”*

En definitiva, el objetivo es reflejar de forma escrita el proceso desde que se determina la necesidad de tener una cámara de vacío del tamaño del Hyper-Tube en la UPV hasta que se realiza dicha instalación y se procede a las primeras pruebas de prototipos en él.

Para conseguir estos objetivos generales, se han fijado objetivos específicos que se deben ir cumpliendo para lograr el resultado final esperado. Estos son:

1. Realizar un marco teórico del problema para facilitar su resolución.
2. Fijar unos requerimientos de diseño claros y asequibles que se deban cumplir.
3. Realizar un diseño conceptual de todas las partes que engloban el sistema.
4. Validar de manera teórica (mediante cálculos o simulaciones) que las soluciones adoptadas son adecuadas.
5. Organizar el proceso de fabricación y montaje del sistema.
6. Validar de manera práctica que el funcionamiento del sistema es correcto.
7. Realización de las pruebas necesarias en la cámara de vacío.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN: DATOS SOBRE EL POTENCIAL DE HYPERLOOP

Para comenzar con la presentación científica es interesante la valoración de datos y comparaciones de Hyperloop con otros medios de transporte. Uno de los datos más interesantes para comparar es la velocidad máxima durante el trayecto de los respectivos medios de transporte:

- AVE: 310 km/h [14]
- Boeing 747: 1000 km/h [15]
- SC Maglev: 603 km/h [16]
- Shanghai Maglev: 431 km/h [17]
- Hyperloop: 1000 km/h [25]

Pero en un medio de transporte no solo hay que tener en cuenta la velocidad máxima para calcular el tiempo del desplazamiento. En la siguiente gráfica se realiza la comparación temporal del caso de estudio de viaje entre San Francisco y Los Ángeles.

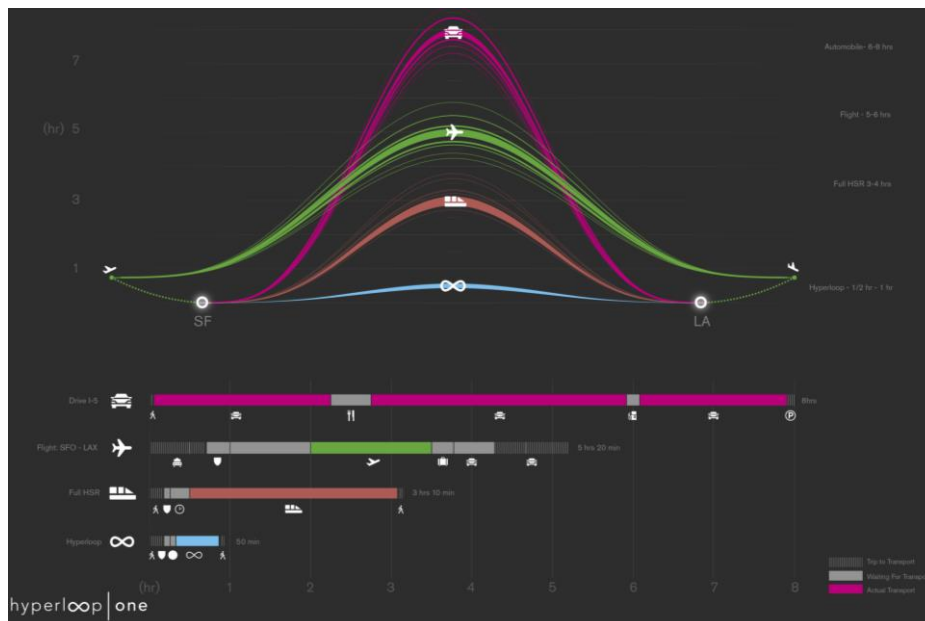


Figura 12. Comparación temporal de medios de transporte (Fuente: Hyperloop One)

Los datos ofrecidos por Hyperloop One, una de las empresas que desarrollan el sistema Hyperloop, indican los siguientes tiempos:

- Hyperloop: 50 minutos
- Tren: 3 horas y 10 minutos
- Avión: 5 horas y 20 minutos
- Automóvil: 8 horas

En la gráfica no se compara solamente la duración del trayecto, la cual es claramente menor en el transporte aéreo y Hyperloop por su mayor velocidad máxima. También se compara el trayecto hasta el lugar del transporte, la espera al transporte y el trayecto hasta el destino final. Es en este apartado donde Hyperloop coge gran ventaja frente a sus competidores ya que se concibe como un transporte de directo de ciudad a ciudad, sin largas esperas como en los aeropuertos y de alta velocidad.

Por todo esto, si se consigue alcanzar las metas de velocidad propuestas, se debe considerar Hyperloop como una alternativa de transporte en el medio plazo que competirá directamente con el tren y la aviación regional.

2.2. PARTES DEL HYPERLOOP

Una vez analizado el potencial de Hyperloop como futuro medio de transporte, es interesante analizar los distintos componentes que componen esta tecnología. Se pueden separar partes claramente diferenciadas en la tecnología Hyperloop: la cabina de transporte y la estructura.

La cabina es quizá el elemento en el que más diferencias se observan según la empresa o equipo de estudiantes que lo haya desarrollado. Un ejemplo sería la siguiente imagen de la tecnología de propuesta por Hyperloop UPV para la primera competición y desarrollada actualmente por Zeleros. En la cabina se integran los sistemas de propulsión y levitación, así como el sistema de alimentación energética que está compuesto por baterías eléctricas.



Figura 13. Partes de la cabina de Hyperloop (Fuente: Hyperloop UPV)

Por otro lado, la estructura consiste en un tubo que se puede instalar tanto de forma subterránea como superficialmente. Este tubo sirve como estructura y también se puede utilizar para la levitación de la cabina mediante imanes si el material del interior del tubo es material magnético.

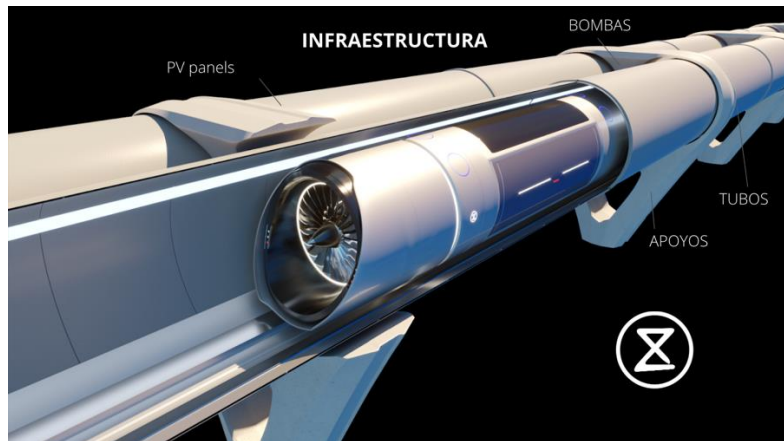


Figura 14. Partes de la estructura propuesta por Zeleros (Fuente: Zeleros)

Los sistemas de generación de vacío se encontrarían integrados en la estructura y se componen de elementos de sellado como son las juntas necesarias en partes móviles del tubo, cualquier compuerta por ejemplo, y bombas de vacío que extraigan el aire del interior del tubo.

2.2. CONSTRUCCIÓN DEL HYPER-TUBE

Anteriormente al proyecto descrito en este documento se procedió a la construcción del tubo de pruebas en la UPV. Las fases fundamentales de este proceso fueron la construcción de la solera y losa de hormigón que soportan el tubo y la fabricación, transporte e instalación del tubo.



Figura 15. Instalación del tubo en 2017 (Fuente: Hyperloop UPV)

El tubo mide 12 metros de largo y tenía exactamente las mismas medidas de diámetro que el de SpaceX cuando se instaló. Con el paso del tiempo, se asentó sobre la estructura y en la actualidad mide unos 1835 mm de diámetro exterior horizontal y 1823 mm de vertical. El material del mismo es acero estructural. La fabricación del tubo se realizó mediante un proceso de soldadura helicoidal SAWH por la empresa Noksel. Este método es el utilizado en la fabricación de tuberías de gran diámetro y longitud para la conducción de agua o gases y tiene la ventaja de que permite una mejor calidad de la soldadura que si se hiciese mediante una soldadura longitudinal. El tubo

reposa sobre 3 soportes de hormigón fabricados por gente del equipo Hyperloop UPV en colaboración con personal de la UPV.

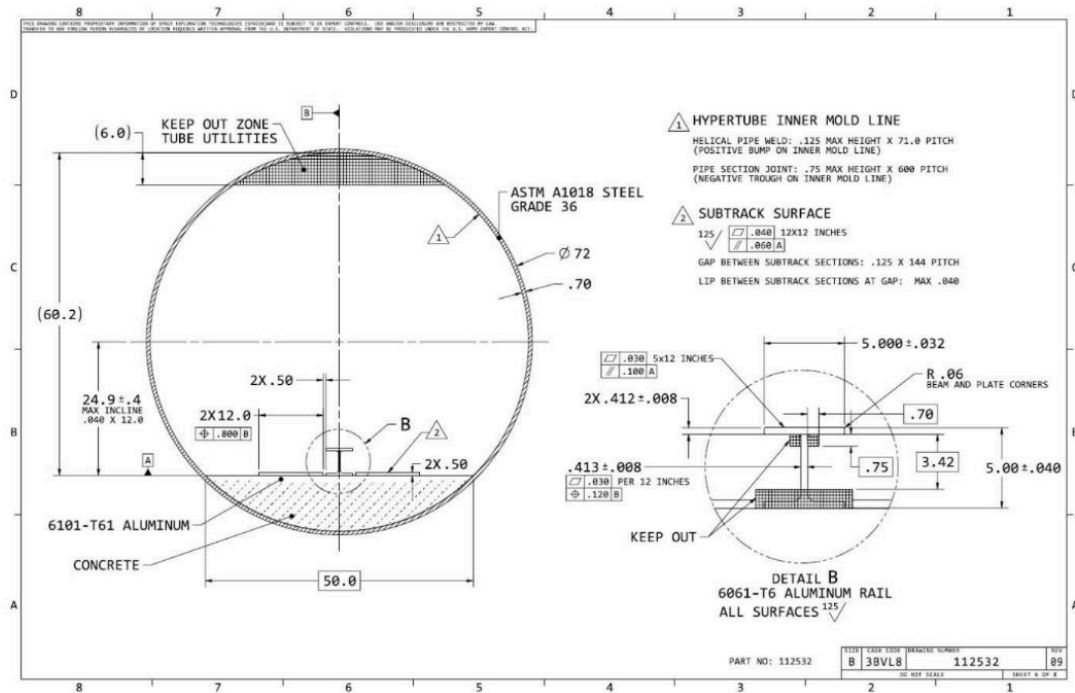


Figura 16. Plano del tubo de SpaceX con el raíl en su interior (Fuente: SpaceX)

Este 2019 se decidió que se debía dar utilidad cuanto antes a dicha instalación por lo que se procedió a poner en marcha su transformación en una cámara de vacío completamente funcional.

2.3. VACÍO EN HYPERLOOP

2.3.1. Tecnología en vacío

En la antigüedad, la mayoría de científicos afirmaban que la naturaleza aborrece el vacío (principio conocido como *horror vacui*). Las corrientes predominantes (postura basada principalmente en Aristóteles) afirmaban que el vacío era un concepto que no tenía sentido. No fue hasta la Edad Moderna que se refutó esta idea de que la naturaleza rechaza el vacío o ausencia de aire.

El descubrimiento del vacío se remonta al 1644 con el barómetro de mercurio de Toricelli. Fue un descubrimiento fortuito ya que el objetivo de su experimento era únicamente analizar los cambios de presión en el aire. El experimento consistía en introducir boca abajo un barómetro de mercurio (compuesto de un tubo con mercurio en su interior y cerrado en un extremo) en un recipiente más grande de mercurio. El mercurio comienza a salir por el lado abierto del tubo pero llega un punto que ya no baja más de nivel debido a la presión atmosférica. De esta forma, se consiguió medir la presión atmosférica y además se obtuvo el vacío por primera vez en un experimento.

Sin embargo, la idea de vacío no fue aceptada directamente con estos experimentos debido a lo arraigada que estaba la posición de los científicos en contra del vacío. Por ejemplo, algunos de ellos explicaban que en esas zonas vacías lo que había era una materia fina. Sin embargo, con la publicación de *Philosophiæ naturalis Principia mathematica* en 1687 por parte de Isaac Newton en la que explicaba su concepción de la física y la gravitación universal terminó por aceptarse la existencia del vacío.

En la actualidad, el vacío es relevante en diversos campos científicos. Por ejemplo, es interesante que algunos experimentos de laboratorio se realicen en un recipiente en vacío para prevenir de cualquier contaminación. Por otro lado, en ciertas industrias como la industria del composite es necesario de un ambiente vacío para facilitar el curado de resinas durante la fabricación de las piezas. Incluso en tecnologías mucho más sofisticadas como los aceleradores de partículas también es esencial el vacío.

En cuanto al transporte, Hyperloop parte con la ventaja de que ya existen sistemas que viajan a baja presión por lo que la tecnología a desarrollar no es completamente nueva. Las cápsulas de Hyperloop, por tanto, serán una fusión de la industria aeroespacial, la ferroviaria y la levitación magnética.

2.3.2. Normativas actuales

En esta sección se hace un repaso de las normas existentes actualmente referentes a cámaras de vacío. Las normativas que se han empleado son:

- ISO 21360-1:2012 Vacuum technology -- Standard methods for measuring vacuum-pump performance -- Part 1: General description [28]
- ISO 3529-1:1981 Vacuum technology — Vocabulary — Part 1: General terms [29]
- ISO 2861:2013 Vacuum technology -- Dimensions of clamped-type quick-release couplings [30]

Entre las normas existentes podemos observar algunas genéricas como la ISO 3529-1:1981 y otras más específicas. La que más interesa en este caso es la ISO 2861:2013 ya que se refiere a las conexiones estándar para cámaras de vacío, algo que se va a utilizar en este proyecto.

2.4. ESTACIONES DE HYPERLOOP

Una de las partes del sistema de transporte Hyperloop que se debe diseñar minuciosamente son las estaciones para la entrada y salida de la cápsula. Al viajar la cápsula dentro de un tubo de baja presión, se debe diseñar un sistema rápido y seguro que permita introducir a los pasajeros en la cabina presurizada.

Para una estación existen 2 posibilidades:

- “Cortar” la sección del tubo de la estación, presurizar esa parte y abrir las puertas de la cabina y el tubo. Esta opción tiene el inconveniente del tiempo de presurizado y despresurizado, que es algo que se va a estudiar en el proyecto del Hyper-Tube.

- Que la cápsula se acople al tubo de una manera hermética conectando la cabina presurizada con el exterior para que se abran las puertas sin necesidad de presurizar una sección del tubo. El inconveniente de esta opción es la complejidad tecnológica de ese sistema móvil que debe aislar la unión de la cabina presurizada y el exterior del tubo del interior del tubo que estará a baja presión.

El tubo de 12 metros puede asemejarse en ciertos aspectos a una estación de Hyperloop. En el proyecto del Hyper-Tube se van a probar elementos que podrían relacionarse con una estación como son el sistema de bombas de vacío, elementos móviles de sellado o la estructura del tubo y compuertas.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE VACÍO DEL HYPER-TUBE

3.1. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Para comenzar con la fase de diseño del sistema se deben fijar los requerimientos necesarios para que el tubo de pruebas funcione como se desea. Los requerimientos de diseño básicos del Hyper-Tube son los siguientes:

- Comportamiento estructural adecuado de las compuertas. Las compuertas van a soportar una carga de presión de 1 bar del exterior al interior del tubo debido a diferencia de presiones. Por ello, deben ser capaces de soportar esa tensión y no deben sufrir grandes deformaciones.
- Conseguir al menos una presión de 13 mbar en el interior (presión a la que se debe probar el prototipo de cara a la competición).
- Tiempos de llenado y vaciado restringidos con el fin de no tener tiempos de ensayo demasiado largos y así poder realizar ensayos con más frecuencia.
- Permitir obtener información sobre el prototipo desde el exterior durante los ensayos. Se desea instalar el mismo sistema de comunicaciones que se utiliza en la competición para comprobar si el prototipo se comunica correctamente.
- Conseguir un sistema para poder desarrollar ensayos con total seguridad. Se debe asegurar la seguridad de las personas y componentes que participan en el ensayo.
- Permitir la introducción de los prototipos en la cámara. La cámara debe tener una parte móvil suficientemente grande para que se puedan introducir los prototipos a la misma.

3.2. DISEÑO DE CONCEPTO

Una vez fijados los requerimientos de diseño se procede al diseño conceptual de los distintos componentes del sistema. En primer lugar, se diseñan las compuertas de cada extremo del tubo (que deben resistir estructuralmente con un factor de seguridad por encima de 2). A continuación, se diseña el sistema de movimiento de la parte móvil que permite introducir componentes en el interior de la cámara. Tras esto, se procede a la selección de los componentes específicos de vacío como son la bomba de vacío, los sensores, conexiones con el interior y los elementos que aseguren el sellado de la misma. Para finalizar, se analizará el comportamiento de todos estos elementos en la parte de diseño de detalle.

3.2.1. Cubiertas

3.2.1.1. Diseño global

El elemento principal de todo el sistema son las compuertas del tubo. En primer lugar, deben ser lo suficientemente resistentes para soportar el esfuerzo de la diferencia de presión entre el exterior y el interior. Existen diversos aspectos que influyen en esto:

- Forma de la cubierta (convexas o planas). Una cubierta convexa distribuye mejor el esfuerzo y por ello se utiliza esta configuración en los camiones cisterna. Sin embargo, darle esta forma a la pieza complica bastante la fabricación de la pieza.
- Material. Las distintas opciones disponibles para la fabricación de las compuertas se analizan al final de este apartado.
- Espesor de la pieza. Para determinar el espesor necesario de la pieza se realizan simulaciones mediante elementos finitos, las cuales se explican en el apartado 3.3.2. Simulaciones estructurales.

Otro aspecto relevante es la unión entre las puertas y el tubo. Basándose en los sistemas utilizados en tuberías de menor tamaño, la solución más sencilla es la soldadura de una brida de apoyo alrededor del tubo a la que se puedan atornillar las compuertas. Para asegurarse que el sistema resiste si fallase la soldadura de la puerta fija o el apoyo de la móvil, se han elegido los tornillos (métrica y número) con un factor de seguridad muy elevado realizando el cálculo a cortante de los mismos.

$$F_t = \frac{\text{Peso compuerta}}{N^{\circ} \text{ tornillos}} = \frac{500 * 9,81}{12} = 408,75 \text{ N}$$

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} * \frac{F_t}{\text{AreaTornillo}} = \frac{4}{3} * \frac{F_t}{\pi r^2} = 3,54 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 6,13 \text{ MPa} \lll f_y(\text{acero}) = 235 \text{ MPa}$$

Por otro lado, se debe decidir si ambos extremos del tubo deben ser móviles o es suficiente con que uno sea. Analizando la función del tubo como cámara de vacío, la función que cumple la movilidad de las compuertas es tan solo para introducir el prototipo al interior. La decisión que se toma, motivada por las cuestiones explicadas a continuación, es que un extremo sea móvil y el otro sea fijo.

- Sencillez de montaje de una compuerta fija respecto de una móvil. Esto ocurre porque se evita la necesidad de todo el mecanismo de apertura de la puerta para una de ellas.
- No hay necesidad de tener ambos extremos del tubo abiertos al mismo tiempo.
- Sellado más efectivo y sencillo para una compuerta fija que una móvil.

Además, el hecho de que una compuerta sea fija permite que las conexiones al tubo se puedan realizar a través de ella sin necesidad de agujerear el tubo por su parte cilíndrica, lo cual es una gran ventaja porque la precisión al realizar un agujero en una superficie curva es mucho menor que al realizarlo en una superficie plana.

Cabe destacar que también existe la posibilidad de diseñar dos tapas fijas con algún agujero grande para introducir el prototipo y que una vez dentro dicho agujero pueda ser cerrado para comenzar el ensayo. Sin embargo, esta opción se descarta porque no ofrece ninguna ventaja clara respecto al de hacer la tapa móvil y tiene el inconveniente de que reduce el tamaño de los prototipos que se podrán introducir en la cámara. El diseño final de ambas compuertas se puede observar en el anexo Planos.

3.2.1.2. Materiales

Por otro lado, durante el proceso de diseño se plantea la posibilidad de realizar las compuertas de diversos materiales, decidiéndose finalmente el acero estructural para las mismas.

Los materiales planteados son fibra de carbono, acero y aluminio.

- Fibra de carbono: la ventaja fundamental de este material es la relación resistencia-peso. Además de esto, la inclusión de este material en la lista se debe también a la colaboración de Hyperloop UPV con empresas de fabricación de fibra de carbono que podrían ayudar al equipo en la fabricación de las piezas. Sin embargo, nos encontramos ante varios inconvenientes como es su coste o dificultades tanto en fabricación como en montaje que provocan que se deba descartar este material.
- Acero: es el material con mayor densidad pero también el de mayor resistencia. Su mayor ventaja es su coste y facilidad de fabricación.
- Aluminio: es menos denso que el acero pero su coste es mucho más elevado.

La decisión que se toma es la de realizarlo en acero por las ventajas que ofrece de resistencia y fabricación aunque aumente el peso de la pieza, ya que esto se puede compensar con un buen sistema de desplazamiento de la puerta móvil.

3.2.2. Mecanismo de apertura de la puerta

Tras definir que una puerta queda fija y la otra móvil se debe diseñar un sistema que permita abrir la puerta con facilidad pese a su tamaño y peso. Para comenzar el proceso de diseño de este sistema, se busca información acerca de soluciones para sistemas similares. El caso más parecido es el del tubo de SpaceX el cuál se compone únicamente de una bisagra.



Figura 17. Bisagra del Tubo de 1,5km de SpaceX (Fuente: Medium)

Una vez tomada la idea original se plantean 2 opciones. Ambas opciones se simularon mediante elementos finitos en Ansys para asegurar su correcto funcionamiento estructural.

Sistema de bisagra

Este sistema es muy similar al de SpaceX y consiste en una bisagra de 2 piezas grandes de acero, una se suelda al tubo y otra a la compuerta, las cuales se unen mediante un cilindro pasador que permite el movimiento relativo de las piezas.

Sistema de bisagra y rueda de apoyo

La segunda opción que se propone es la de añadir una rueda de apoyo para la compuerta, la cual transmite el peso de la compuerta al suelo directamente y reduce considerablemente el esfuerzo sobre la bisagra. Además, al depender de 2 piezas se aumenta la seguridad del sistema ya que no existe el punto crítico de la transmisión del esfuerzo a través de la bisagra y de ella al tubo a través de la soldadura. Esto permite reducir el tamaño de la bisagra, facilitando su fabricación.

3.2.3. Bombas de vacío

Para conseguir el vacío en el interior de una cámara se necesita una máquina que extraiga el aire del interior hasta conseguir reducir la presión a los niveles requeridos. Estas máquinas son las bombas de vacío, las cuales son esenciales para el sistema del Hyper-Tube y se van a tratar durante este apartado.

Existen diversos tipos de bombas de vacío que se ajustan a los requerimientos de cada cámara. En primer lugar, se pueden clasificar las bombas según su función principal en: bombas primarias y bombas secundarias o de refuerzo. Las bombas primarias son las principales de la instalación (como su nombre indica) encargadas de lograr la presión final requerida. Por el contrario, la función principal de las bombas de apoyo es mejorar la velocidad media de bombeo o el nivel de vacío final.

En este proyecto se va a trabajar mediante una única bomba principal por lo que nos centraremos en estas. La primera clasificación que se puede llevar a cabo es [27]:

- Bombas rotatorias de paletas
- Bombas de diafragma
- Bombas secas

Las bombas de paletas son las más comunes debido a su amplio rango de caudales (1,5 a 13000 m³/h) y a que tienen una más que aceptable presión final (entre 0,5 mbar y 1x10⁻⁴ mbar). Estas bombas están selladas por aceite y requieren de escaso mantenimiento. Estas bombas además, se pueden clasificar según sea el modelo de simple o de doble etapa (permitiendo este último tipo alcanzar presiones más bajas). El funcionamiento de la misma es simple: el aire entra a la bomba y queda atrapado en un rotor donde se comprime y finalmente se transfiere a la válvula de escape. Dicha válvula expulsa el gas cuando este excede la presión atmosférica.

Por su parte, las bombas de diafragma son de desplazamiento positivo y no requieren de lubricante. Sus principales características son su robustez y su escaso mantenimiento. Trabajan

en un rango de caudales de 0,6 a 10 m³/h y pueden lograr una presión final de 0,5 mbar). Por todo esto, se suelen utilizar en laboratorios de I+D.

Para finalizar, se encuentran las bombas secas. Este tipo de bombas se utilizan cuando ningún lubricante puede entrar en contacto con el medio de bombeo. De esta forma, se consigue un vacío libre de hidrocarburos. [26]

Los requerimientos para el Hyper-Tube exigían conseguir una presión de 10 mbar, la cual se puede obtener con cualquiera de los tipos explicados anteriormente. Debido a su gran rango de aplicación, que no es necesario evitar el lubricante, el gran volumen de aire a extraer (30 m³) y que son las que tienen un uso más extendido en el mercado, el tipo más adecuado serían las bombas de paletas lubricadas con aceite.

Para finalizar, resaltar que, dentro de un mismo tipo de bomba, estas se clasifican según el caudal de aire que permiten extraer. La elección de la bomba de un caudal u otro depende fundamentalmente del tiempo de vaciado deseado y del presupuesto destinado a este componente, a mayor caudal mayor será el coste del equipo. Esto se analiza en el apartado *3.3.1. Análisis del sistema de vacío.*

3.2.4. Conexiones con el interior

A la hora de poner en funcionamiento la cámara se necesitan diversos componentes para realizar diversas funciones. Por ejemplo, conocer la presión interior de una forma precisa es esencial. Para ello, se necesita de un **sensor de presión** cuyo valor se pueda leer a tiempo real desde el exterior. El seleccionado en este caso es el *PV 101 Piezovac* de Leybold, un sensor piezo-resistivo digital que opera en el rango de 1200 a 0,1 mbar.



Figura 18. Sensor PIEZOVAC PV 101 (Fuente: Leybold)

Por otro lado, es necesario poder pasar ciertos cables desde el exterior al interior del tubo, para conectar equipos de medida, comunicación con el prototipo e iluminación de la cámara. Para ello, existen unos componentes llamados **pasamuros de corriente** que permiten realizar esta función sin perturbar el sellado de la cámara. La selección del pasamuros depende fundamentalmente de 3 aspectos: número de cables a pasar, intensidad que pasa por cada polo y voltaje máximo admisible. En este caso, los cables que interesa conectar son los relacionados con la electrónica del prototipo, la cual se conecta mediante baja tensión. Por ello, se elige el

pasamuros FE 16/9 de Leybold. Este pasamuros consta de 9 pines que admiten una tensión de hasta 50 V y una intensidad de hasta 2 A.

Además, se desea incluir una pequeña **ventana** para poder observar el interior. Esta ventana es de metacrilato porque resiste mejor la presión que el vidrio. Se debe elegir el diámetro de la misma y se elige finalmente la más grande de las disponibles ya que la cámara es bastante grande. Esta mirilla tiene un diámetro de 160 mm.

También es necesario disponer de un elemento que permita conectar la bomba de vacío de una manera sencilla. Esto se hace de una forma simple mediante un tubo de PVC del diámetro de la bomba. Este tubo debe tener un elemento en cada extremo que permita conectarlo de una forma que asegure la estanqueidad.

Para todo esto, se decide usar un **sistemas de bridas** estándar que permita que las conexiones sean intercambiables y sencillas de utilizar. Además, este sistema ofrece la gran ventaja de permitir nuevas conexiones necesarias en un futuro que no se hayan planteado todavía. Todas estas bridas están soldadas a la puerta fija del tubo y mediante un sistema de o-ring y abrazadera (el cual asegura la estanqueidad de estas conexiones) es sencillo conectar los diversos componentes como la bomba de vacío o el sensor de presión a ellas. La estandarización de conexiones a cámaras de vacío se recoge en las normas ISO 2861:2013 (Vacuum technology -- Dimensions of clamped-type quick-release couplings), DIN 28403 y PNEUROP 6606¹. De esta forma, se asegura la interoperabilidad de los componentes de distintos fabricantes.

Una vez elegido el estándar a seguir se deben elegir los componentes concretos a utilizar. La elección por tomar respecto a las bridas es el diámetro de las mismas. Todas las bridas soldables son las ISO-KF 40 a excepción de la ventana que será una ISO-K 160 para tener un campo de visión aceptable. Se elige el tamaño ISO KF-40 ya que existen gran cantidad de componentes que necesitan de este diámetro para la conexión. Además, si alguna conexión necesita un diámetro menor se puede utilizar un reductor de diámetro hasta ISO KF-16. Es más, este es el caso del sensor de presión y del pasamuros de corriente.

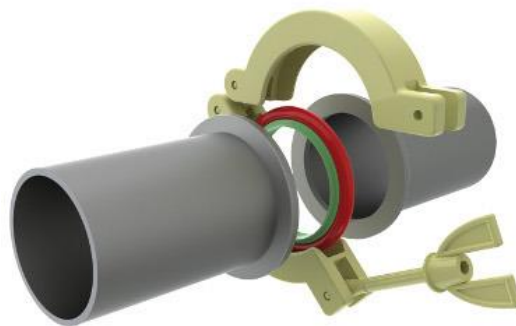


Figura 19. Ensamblaje de una conexión ISO KF (Fuente: The Vacuum Projects)

Por otro lado, cabe destacar que se decide instalar 8 bridas soldables ISO KF-40 aunque solo se utilicen 3 para que si se desean realizar futuras conexiones no sea necesario hacer el agujero a la puerta lo cual sería bastante complicado de realizar sin trasladar la puerta a un centro de mecanizado. Esto sería algo logísticamente inviable de realizar una vez finalizada la instalación

¹ Fuente: web2.vacuumprojects

del tubo. Las bridas que no se utilizan se pueden tapar fácilmente con una tapa metálica que se une mediante el mismo sistema de o-ring más abrazadera que cualquier otra conexión.

3.2.5. Sellado de la cámara

El sellado de la cámara de vacío cobra un papel esencial en este proyecto, ya que de no ser adecuado se aumentaría el tiempo de vaciado, no se podría alcanzar la presión requerida o se necesitarían bombas pequeñas que acompañasen a la principal para compensar las fugas.

Cabe resaltar que el sellado de la cámara es otro de los motivos por los que tan solo una compuerta es móvil ya que es mucho más sencillo sellar perfectamente un elemento que va a quedar siempre fijo. Esto ocurre porque para la compuerta fija se puede utilizar silicona sellante o incluso soldarla directamente a la brida (lo cual asegura su estanqueidad si la calidad del cordón de soldadura es correcta). Algo que evidentemente no es una opción válida si se desea poder abrir la compuerta.

La compuerta móvil necesita de algún elemento de sellado que reduzca al máximo todas las fugas en el contacto entre la compuerta y la brida de apoyo. Aunque el sistema sea móvil, este caso se incluye dentro de los de estanqueidad estática ya que en el momento de generación de vacío no existe ningún movimiento relativo de los componentes en contacto (brida y compuerta).

Para una estanqueidad estática, el sistema de sellado más común es una junta, la cual puede ser tórica o metálica. Los sistemas más habituales son los de **junta tórica**, debido a que tienen un coste mucho menor, pero si se requiere de un nivel de estanqueidad muy elevado se puede optar por una junta metálica.

El funcionamiento de una junta tórica se basa en que debido al material del que se fabrican, son muy elásticas y se acoplan perfectamente a cualquier superficie. De esta forma, sellan todos los posibles canales de fugas de aire. Cabe resaltar que es esencial ser cuidadoso en la instalación de la misma para que su funcionamiento sea correcto y para una mejor adhesión de estos elementos se suele utilizar gel de silicona.

Según la deformación que sufren existen 2 tipos de juntas: radiales o axiales. Para una unión brida-tapa (caso de interés para este proyecto) la deformación es axial mientras que para vástagos, bulones o pistones la deformación sería radial.

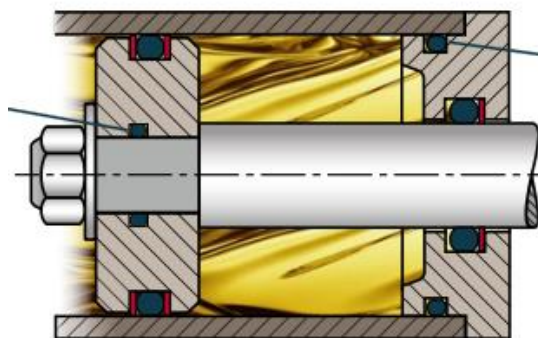


Figura 20. Ejemplos de juntas de deformación radial (Fuente: Epidor)

Además, existen diferencias en la forma del alojamiento de la junta según el sentido de la presión. Es decir, en el caso de una cámara de vacío existe una presión del exterior al interior mientras que, en el caso de una autoclave/cámara presurizada, la presión se ejerce del interior al exterior.

En el caso de vacío, el diámetro de la junta debe ser menor que el diámetro interior de la ranura para que sea necesario dilatarla al colocarla en la ranura y queda bien fijada. De esta forma, se evita que la junta se salga del alojamiento en alguna apertura de la tapa. Esto se puede observar en el siguiente dibujo.

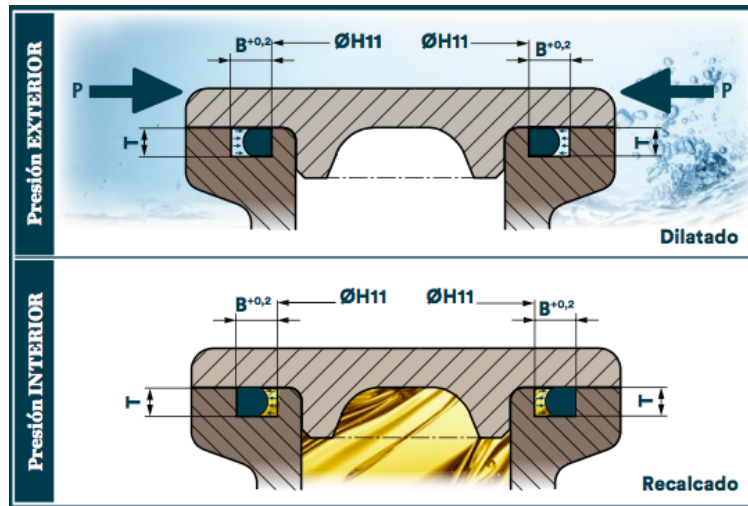


Figura 21. Ejemplo de juntas de deformación axial y cajeado rectangular (Fuente: Epidor)

Para un sistema de deformación axial se pueden utilizar 2 formas de alojamiento. El cajeado rectangular es el básico y más utilizado mientras que el cajeado trapezoidal es una mejor solución ya que retiene perfectamente la junta evitando que esta pueda salir del alojamiento. Sin embargo, este cajeado trapezoidal para una pieza de 2 metros requiere de un mecanizado muy complejo y costoso con un torno de 5 ejes continuo y de ese tamaño. Por ello, se tuvo que optar por el cajeado rectangular.

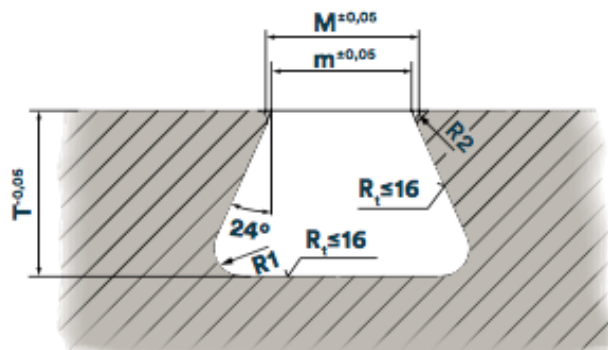


Figura 22. Ejemplo de cajeado trapezoidal (Fuente: Epidor)

Conociendo las dimensiones de la brida y siguiendo el catálogo del fabricante se puede definir las dimensiones del alojamiento rectangular y de la junta tórica. El diámetro de hilo de la junta recomendado por el fabricante para el tamaño requerido de la instalación es de 8 mm. Para este

tamaño de junta, las dimensiones del alojamiento recomendadas son $6,24 \pm 0,10 \times 9,02 (0,+0,2)$ y se pueden observar en el plano número 3 de la pieza *Brida 20 mm Alojamiento rectangular*.



Figura 23. Junta colocada en su ranura

Para un vacío tan elevado, el fabricante recomienda la dilatación de la junta durante su instalación para asegurar el confinamiento de la misma en el alojamiento. Es decir, se debe expandir la junta al colocarla en su alojamiento para que quede fijada en esa posición y no se salga del alojamiento. Además, dicha dilatación tiene un límite máximo del 6% para evitar daños a la junta durante la instalación. Para conseguir la dilatación, la junta debe ser más pequeña que el alojamiento por ello para un alojamiento de 1870 mm de diámetro interior se elige la junta tórica de 1813,9 mm de diámetro para que tenga una dilatación del 3%.

En cuanto al material de la junta, el fabricante recomendó uno dentro de la gran variedad de posibilidades para las condiciones de servicio que se le indicó. Estas condiciones son:

- Ambiente: exterior
- Temperatura de funcionamiento: 20 °C
- Fluido: aire
- Material de las caras en contacto: acero estructural

Por todo esto, el material recomendado fue el FKM (caucho de fluorocarbono), el cual destaca por su elevada densidad dentro de la familia de elástomeros, su resistencia al envejecimiento y su flexibilidad.

Para finalizar, destacar que el catálogo del fabricante también determina las rugosidades superficiales necesarias tanto en el alojamiento como en la tapa (superficie antagonista) para un correcto sellado. Estas rugosidades superficiales son de $Ra=0,2 - 0,6 \mu\text{m}$ para la parte de la tapa en contacto con la brida y de $Ra=1,0 - 4,0 \mu\text{m}$ para el alojamiento de la junta en la brida.

3.3. DISEÑO DE DETALLE

3.3.1. Análisis del sistema de vacío

En este apartado se realiza un análisis teórico completo del sistema de vacío, en el que se determinarán los tiempos de llenado y vaciado de la cámara y la energía consumida por la bomba para ello.²

El primer parámetro necesario para poder calcular estos tiempos es el volumen del interior del tubo. Se calcula rápidamente de la siguiente forma:

$$Volumen = Longitud \times \text{Área} = L \times \pi r^2 = 12 \times \pi \times 0,9^2 = 30,536 \text{ m}^3$$

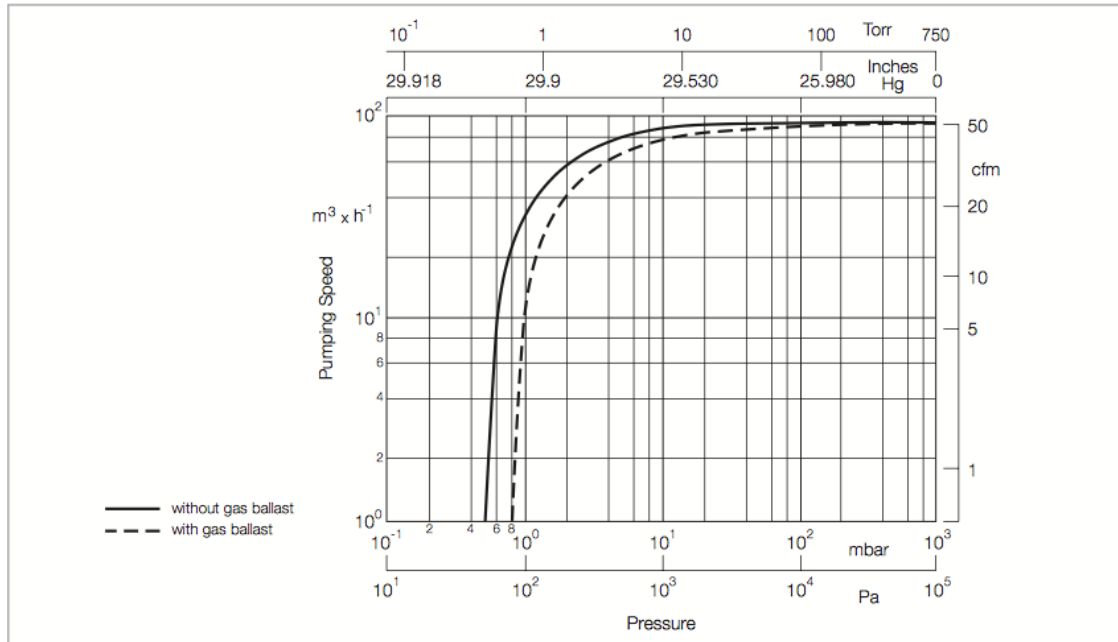
Dentro del tipo de bomba escogido, se puede elegir una o otra según su velocidad de bombeo. Para realizar esta elección, se debe definir el tiempo de vaciado del volumen de aire en el interior del tubo con cada bomba. Por recomendación del fabricante, se debía probar en primer lugar con la bomba SOGEVAC SV 100 (caudal máximo de 100 m³/h) por lo que los cálculos que se explican a continuación corresponden a esta bomba en concreto. Esta bomba es una rotatoria de paletas lubricada con aceite (tipos de bombas explicados en el apartado 3.2.3. *Bombas de vacío*).



Figura 24. Bomba SOGEVAC SV 100 B (Fuente: Leybold)

Según las gráficas de las bombas, el caudal de la bomba depende de la presión. Es decir, según bajamos la presión el caudal se va reduciendo. Sin embargo, como podemos observar en el rango de presiones requerido, esta variación es de tan solo 10 m³/h.

² Toda la información referente a la bomba de vacío ha sido proporcionada por Leybold Hispánica, S.A. (empresa colaboradora del equipo Hyperloop UPV). Los datos de cálculo de bombeo están recogidos en el anexo de fichas técnicas.



Pumping speed characteristics of the SOGEVAC SV 100 B at 50 Hz
(60 Hz curves at the end of the chapter)

Figura 25. Gráfico de caudal según la presión (Fuente: Leybold)

Por otro lado, para estos cálculos se debe tener en cuenta que el sistema no será perfecto y tendrá un cierto porcentaje de fugas, el cual se podría estimar en un 10% del caudal de aire extraído por la bomba. Es complejo realizar a priori una estimación precisa de esas fugas ya que dependerá fundamentalmente de que pueda surgir alguna complicación durante el proceso de montaje. Por ejemplo, la deformación de algún componente durante la soldadura o la calidad del cordón de soldadura podrían comprometer el sellado de la cámara.

A continuación, se explican los cálculos teóricos del tiempo de vaciado de la cámara a partir de la gráfica proporcionada por el fabricante.

$$t = \text{Volumen Total} \times \ln\left(\frac{\text{Presión inicial absoluta}}{\text{Presión final absoluta}}\right) \times \frac{1}{\text{Capacidad de bombeo eficaz}}$$

$$t = 30 \text{ m}^3 \times \ln\left(\frac{1013 \text{ mbar}}{10 \text{ mbar}}\right) \times \frac{1}{87,5 \text{ m}^3 / \text{h} \times 0,9} = 1,76 \text{ h}$$

Por tanto, la cámara de vacío tardará aproximadamente 1 hora y 46 minutos en alcanzar una presión de 10 mbar.

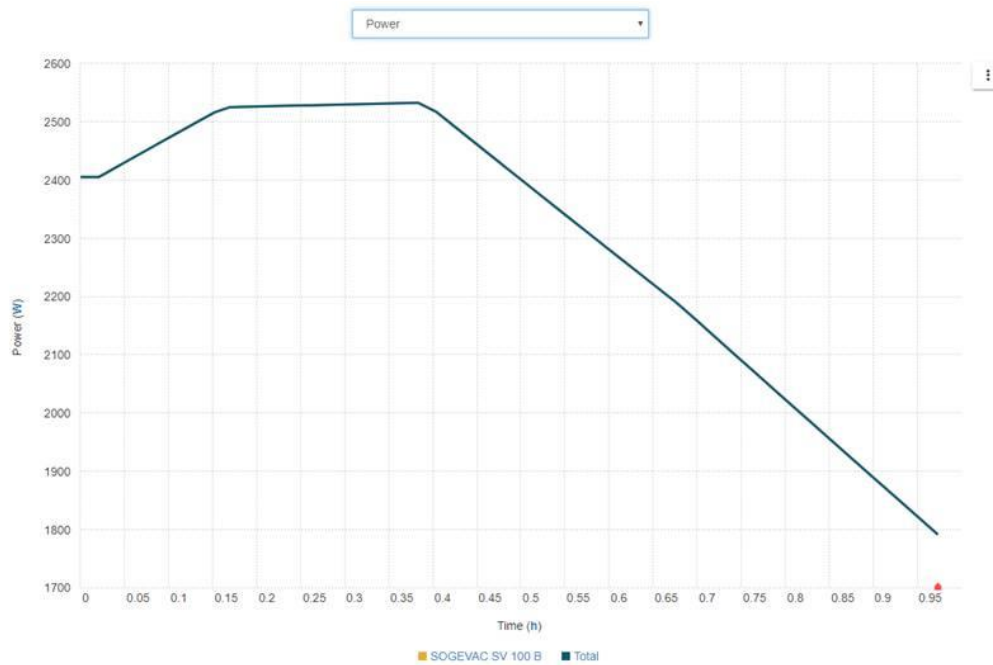


Figura 26. Potencia de la bomba en kW (Fuente: Leybold)

Una vez elegida la bomba y conocida su potencia media, es importante calcular también el consumo energético de la misma durante cada ensayo. Este cálculo es bastante sencillo:

$$Energia = Potencia \times Tiempo = 2,2 \text{ KW} \times 2h = 4,4 \text{ KWh}$$

Realizando una estimación ajustada del precio del KWh

$$Precio = Energia \times Coste = 4,4 \text{ KWh} \times 0,1 \frac{\text{€}}{\text{KWh}} = 0,44 \text{ €/ensayo}$$

3.3.2. Simulaciones estructurales

Con el objetivo de determinar el tamaño de ciertas piezas (el espesor de las puertas, por ejemplo) y de asegurar que la estructura se comporta adecuadamente se han realizado análisis estáticos por el método de elementos finitos de algunas piezas y conjuntos. El problema estructural se ha subdividido en problemas más pequeños para facilitar la resolución de los mismos. Es decir, las simulaciones realizadas son de piezas sueltas o conjuntos de pocas piezas para evitar una excesiva complejidad en las simulaciones. Estos análisis se han realizado mediante el software Ansys Workbench de Ansys, Inc. En este capítulo se incluyen los informes finales de dichas simulaciones siguiendo todos una misma estructura: introducción al problema, análisis del sistema, condiciones de contorno, materiales, mallado y resultados.

3.3.2.1. Explicación general básica de las condiciones de contorno utilizadas

Se desea resumir rápidamente en este apartado lo que significa cada una de las condiciones de contorno utilizadas en las simulaciones de Ansys.

- Frictionless contact/support: apoyo en la dirección normal a la cara que se aplica. Es decir, el objeto no se podrá desplazar en la dirección normal a la cara donde se

aplique esta condición pero será libre de hacerlo en la dirección tangencial. Esta condición de contorno se ha utilizado para las caras en contacto como en la bisagra o en el conjunto brida-puerta.

- Fixed contact/support: restricción del movimiento en todas las direcciones. Se puede fijar un punto, una cara, un eje o incluso todo el objeto. Esta condición se ha utilizado para las uniones atornilladas de las compuertas y para el contacto de la rueda al suelo.
- Pressure: esta condición de contorno permite aplicar una presión a una cara de un objeto. Esto sirve en este caso para representar la diferencia de presiones entre el interior y el exterior de la cámara durante un ensayo.

3.3.2.2. Tubo

Planteamiento

En primer lugar, se debe analizar si el tubo ya construido es capaz de soportar las cargas a las que estará sometido. El objetivo es observar el comportamiento de la estructura en el momento en el que hay una presión interior muy baja en el interior. También se evaluará al mismo tiempo el efecto de colocar compuertas de aproximadamente 500 kg en los extremos del tubo.

Análisis del sistema

El tubo tiene una forma y unas propiedades generales que se pueden observar en la figura 27 y la tabla 1.

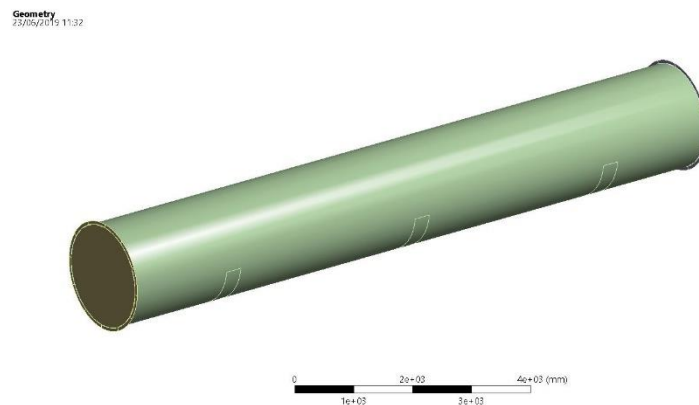


Figura 27. Geometría (Tubo)

Material	Acero estructural
Masa	9827,2 kg
Volumen	1,25e+009 mm ³

Tabla 1. Propiedades generales (Tubo)

Condiciones de contorno

Para esta simulación se usaron las siguientes condiciones de contorno:

- “Fixed support” para el contacto con los apoyos de hormigón que soportan el tubo.

- La carga será una presión sobre la superficie de las puertas y del tubo igual a la diferencia de presiones entre el vacío interior y la presión atmosférica del exterior. El valor introducido es 0,098 MPa (0,98 bar) lo cual equivale a un vacío interior de 20 mbar.

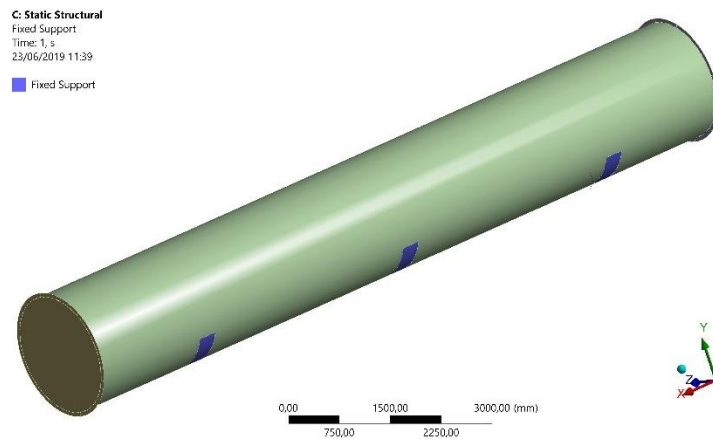


Figura 28. Apoyos fijos del tubo

Mallado

La configuración de la malla fue la siguiente:

Método de mallado	Hex Dominant (All Quad)
Número de nodos	31152
Número de elementos	30619
Tamaño del elemento	50 mm

Tabla 2. Características del mallado (Tubo)

Resultados

Los resultados de la simulación se resumen en las siguientes figuras y la tabla resumen. Las imágenes corresponden a las características más relevantes al analizar estructuras metálicas: la deformación, la tensión equivalente de Von Mises y el factor de seguridad que ofrece la estructura.

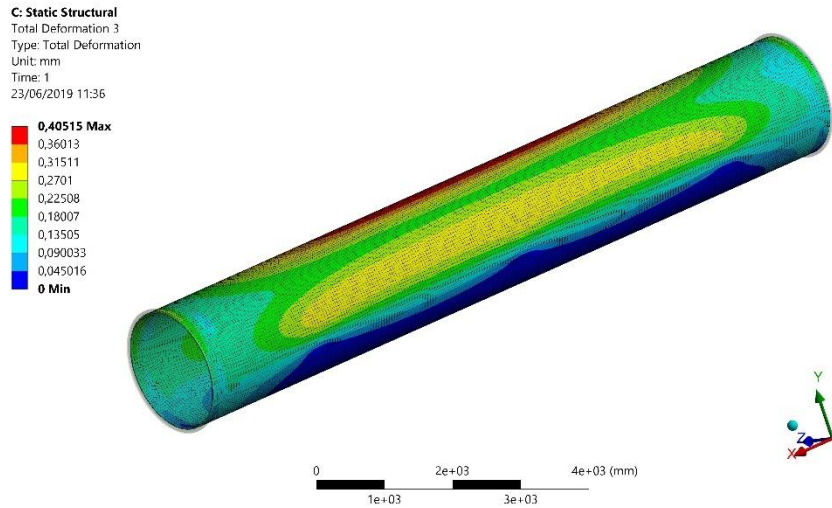


Figura 29. Deformación (Tubo)

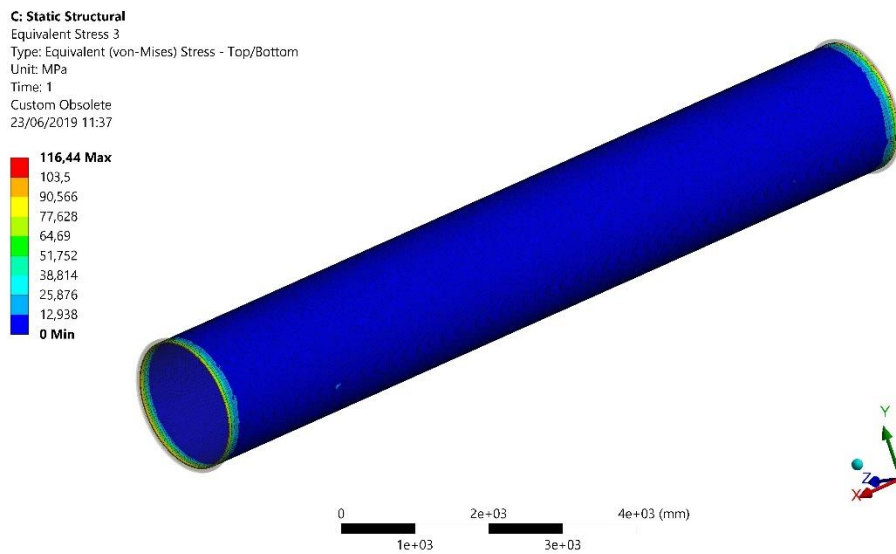


Figura 30. Tensión equivalente (Tubo)

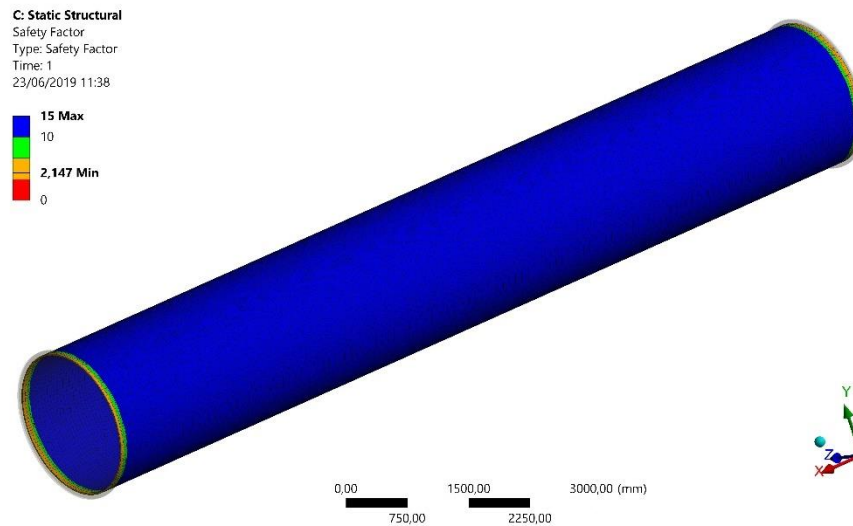


Figura 31. Factor de seguridad (Tubo)

En resumen, los resultados de la simulación son:

Deformación máxima	0,4 mm
Tensión máxima	116,44 Mpa
Factor de seguridad	2,147

Tabla 3. Resultados de la simulación (Tubo)

Por todo esto, se puede afirmar que el tubo resiste estructuralmente el peso de las compuertas y la presión exterior durante los ensayos de vacío.

3.3.2.3. Compuerta fija

Planteamiento

El objetivo de esta simulación era determinar los espesores necesarios de las compuertas del tubo para asegurar su correcto comportamiento. El momento más crítico para las compuertas al igual que para el tubo es cuando se está realizando un ensayo y la presión en el interior es muy baja. Por ello, mediante la simulación se analiza este caso. Se diferencia entre la compuerta fija y la compuerta móvil únicamente en que la fija tiene diversos agujeros para las conexiones al tubo y, por tanto, tendrá una menor resistencia.

Análisis del sistema

La compuerta tiene una forma y unas propiedades generales que son las siguientes:

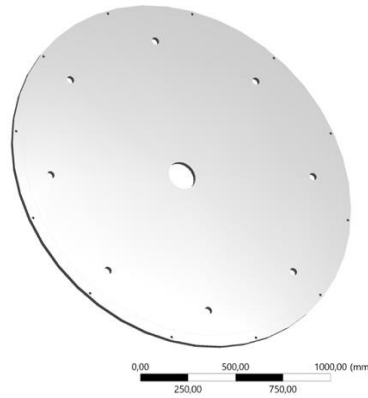


Figura 32. Geometría (Compuerta Fija)

Material	Acero estructural S355
Masa	583,6 kg
Volumen	7,4344e+007 mm ³
Espesor pieza	25 mm

Tabla 4. Propiedades generales (Compuerta Fija)

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en este análisis fueron:

- “Fixed support” para los agujeros en los que se alojan los tornillos ya que en el momento de hacer el ensayo estas zonas son completamente fijas.
- Se restringe el desplazamiento en el eje Y de la zona de la puerta que entra en contacto con el tubo y la brida.
- La carga será una presión sobre la superficie de la puerta igual a la diferencia de presiones entre el vacío interior y la presión atmosférica del exterior. El valor introducido es 0,098 MPa (0,98 bar) lo cual equivale a un vacío interior de 20 mbar.

Mallado

La configuración del mallado fue la siguiente:

Método de mallado	Hex Dominant (All Quad)
Número de nodos	509616
Número de elementos	117647
Tamaño del elemento	10 mm

Tabla 5. Características del mallado (Compuerta Fija)

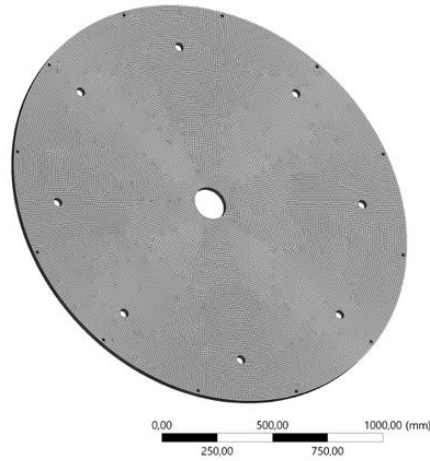


Figura 33. Mallado (Compuerta fija)

Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos de la simulación se pueden observar en las siguientes imágenes y se resumen en la tabla final.

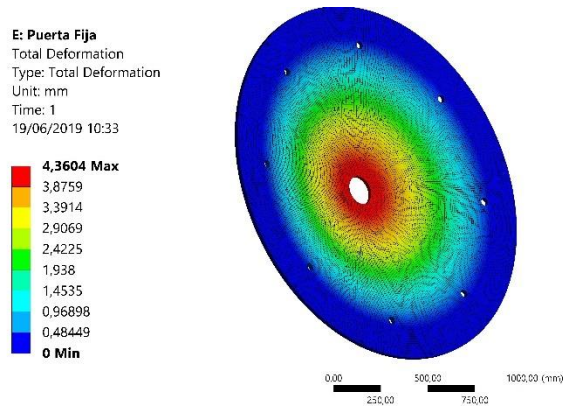


Figura 34. Deformación (Compuerta Fija)

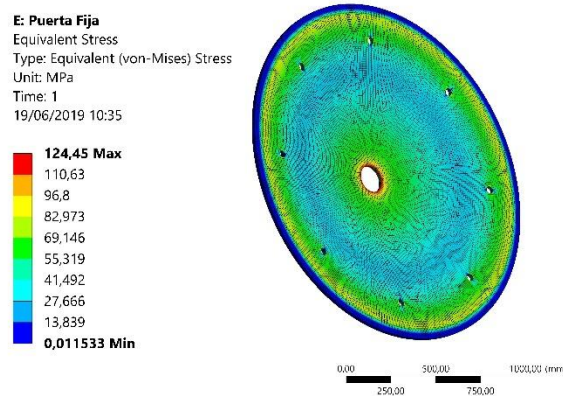


Figura 35. Tensión equivalente (Compuerta Fija)

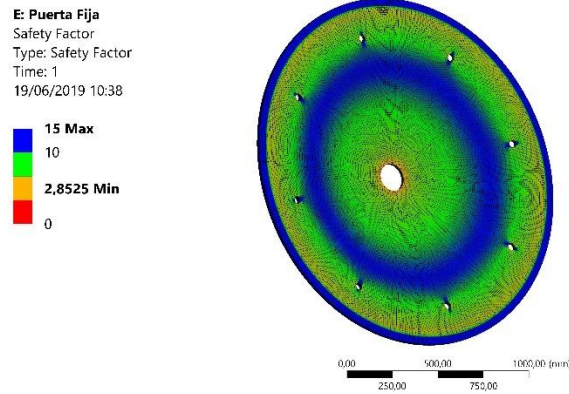


Figura 36. Factor de seguridad (Compuerta Fija)

Deformación máxima	4,3604 mm
Tensión máxima	124,45 MPa
Factor de seguridad	2,8525

Tabla 6. Resultados de la simulación (Compuerta Fija)

Por tanto, como la pieza tiene un factor de seguridad por encima de 2 y casi en 3 se puede dar como válido el espesor de 25 mm para su fabricación.

3.3.2.4. Compuerta móvil

Planteamiento

El objetivo de esta simulación era determinar los espesores necesarios de las compuertas del tubo para asegurar su correcto comportamiento. El momento más crítico para las compuertas al igual que para el tubo es cuando se está realizando un ensayo y la presión en el interior es muy baja. Por ello, mediante la simulación se analiza este caso. Se diferencia entre la compuerta fija y la compuerta móvil únicamente en que la fija tiene diversos agujeros para las conexiones al tubo y, por tanto, tendrá una menor resistencia.

Análisis del sistema

La compuerta tiene una forma y unas propiedades generales que son las siguientes:

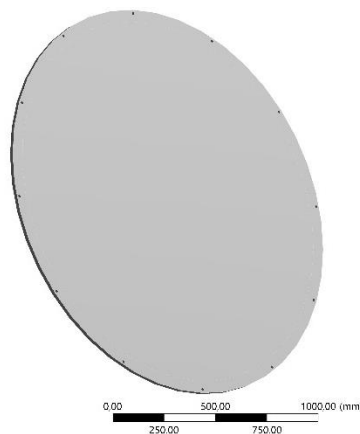


Figura 37. Geometría (Compuerta Móvil)

Material	Acero estructural S355
Masa	466,23 kg
Volumen	5,9392e+007 mm ³
Espesor pieza	20 mm

Tabla 7. Propiedades generales (Compuerta Móvil)

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en este análisis fueron:

- “Fixed support” para los agujeros en los que se alojan los tornillos ya que en el momento de hacer el ensayo estas zonas son completamente fijas.
- Se restringe el desplazamiento en el eje X de la zona de la puerta que entra en contacto con el tubo y la brida.
- La carga será una presión sobre la superficie de la puerta igual a la diferencia de presiones entre el vacío interior y la presión atmosférica del exterior. El valor introducido es 0,098 MPa (0,98 bar) lo cual equivale a un vacío interior de 20 mbar.

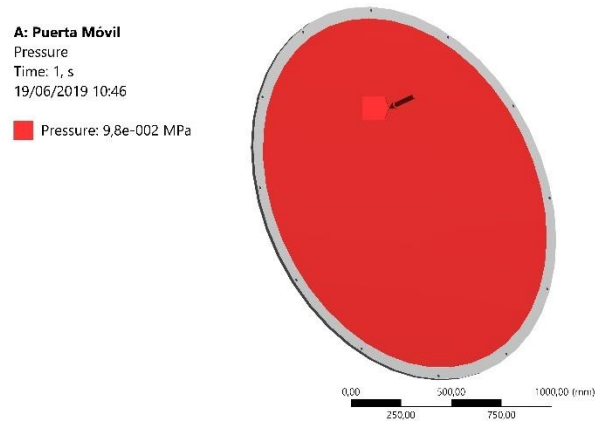


Figura 38. Presión sobre la superficie (Compuerta Móvil)

Mallado

La configuración del mallado fue la siguiente:

Método de mallado	Hex Dominant (All Quad)
Número de nodos	456265
Número de elementos	118739
Tamaño del elemento	10 mm

Tabla 8. Características del mallado (Compuerta Móvil)

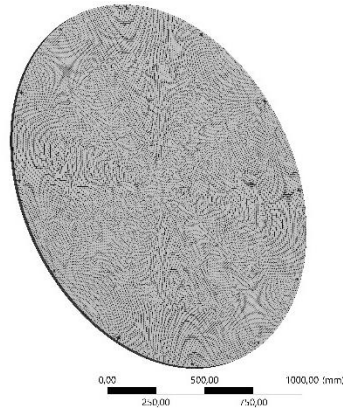


Figura 39. Mallado (Compuerta Móvil)

Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos de la simulación se pueden observar en las siguientes imágenes y se resumen en la tabla final.

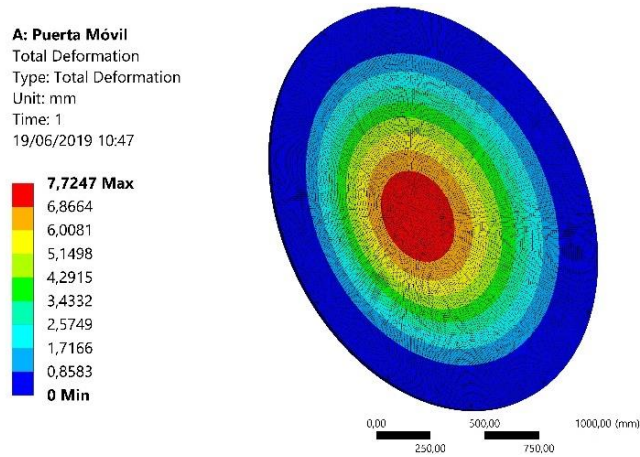


Figura 40. Deformación (Compuerta Móvil)

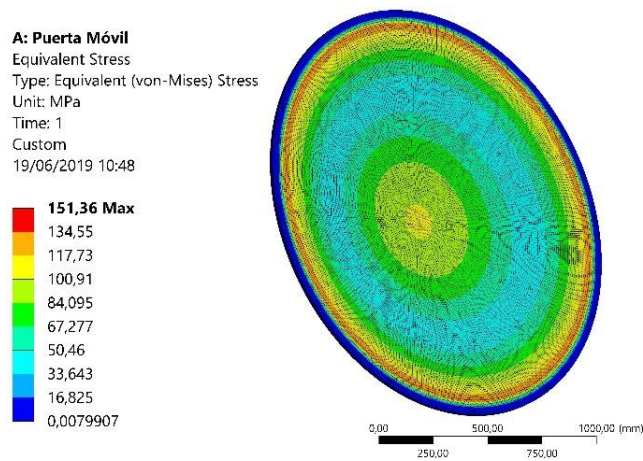


Figura 41. Tensión equivalente (Compuerta Móvil)

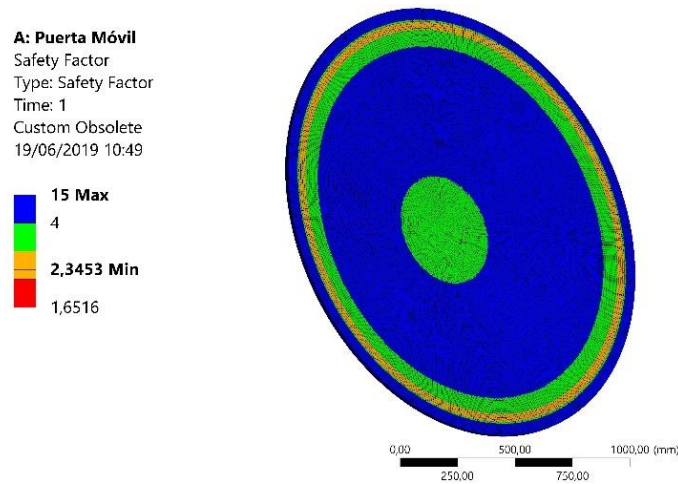


Figura 42. Factor de seguridad (Compuerta Móvil)

Deformación máxima	7,7 mm
Tensión máxima	151,36 MPa
Factor de seguridad	2,3453

Tabla 9. Resultados de la simulación (Compuerta Móvil)

Por tanto, como la pieza tiene un factor de seguridad por encima de 2 se puede dar como válido el espesor de 20 mm para su fabricación. No se busca aumentar más el factor de seguridad aumentando el peso porque se desea mantener el peso de esta compuerta lo más bajo posible para facilitar la apertura de la misma.

3.3.2.5. Sistema de movimiento de la compuerta móvil (bisagra únicamente)

Planteamiento

Con esta simulación se desea obtener el espesor necesario de las piezas de la bisagra en el caso de no incluir la rueda en el sistema.

Análisis del sistema

La bisagra está compuesta por 2 piezas, que tienen una forma y propiedades generales que son las siguientes. Además, se ha añadido una masa puntual de 470 kg en el centro de gravedad teórico de la compuerta para simular su efecto sobre la bisagra. La colocación de la bisagra corresponde a cuando estuviese abierta a 180º respecto de la posición de cierra. Se ha elegido esta configuración para la simulación ya que es el momento en el que el centro de gravedad del conjunto está más alejado de la unión de la bisagra al tubo.

Geometry
19/06/2019 11:20

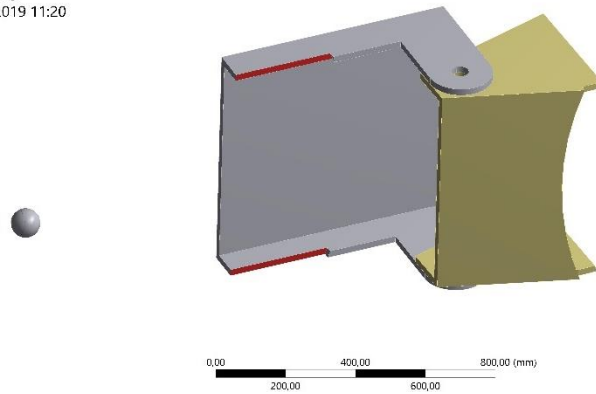


Figura 43. Geometría (Bisagra)

Pieza	Unión bisagra al Tubo
Material	Acero estructural
Masa	73,106 kg
Volumen	9,3129+006 mm ³
Espesor pieza	20 mm
Pieza	Unión bisagra a la compuerta
Material	Acero estructural
Masa	466,23 kg
Volumen	1,4185e+007 mm ³
Espesor pieza	20 mm

Tabla 10. Propiedades generales (Bisagra)

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en este análisis fueron:

- “Fixed support” para la zona de la pieza que se suelda al tubo directamente.
- Conexión fija entre las 2 piezas en el agujero por el que pasa el cilindro de la bisagra.
- Conexión “frictionless” para las caras en contacto de las 2 piezas.
- Conexión de la masa puntual de 500 kg a la zona de la pieza que se suelda a la puerta.

Mallado

La configuración del mallado fue la siguiente:

Método de mallado	Hex Dominant (All Quad)
Número de nodos	257115
Número de elementos	50960
Tamaño del elemento	10 mm

Tabla 11. Características del mallado (Bisagra)

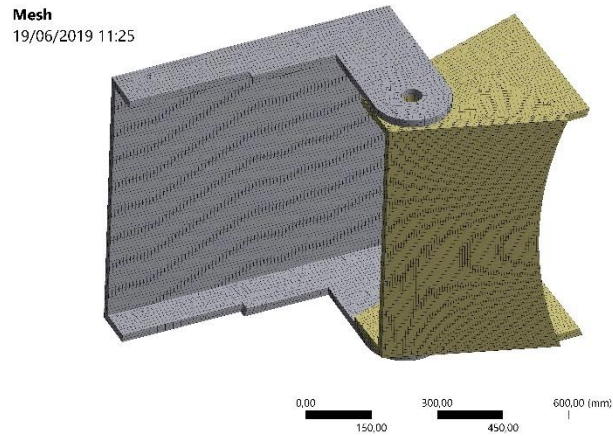


Figura 44. Mallado (Bisagra)

Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos de la simulación se pueden observar en las siguientes imágenes y se resumen en la tabla final.

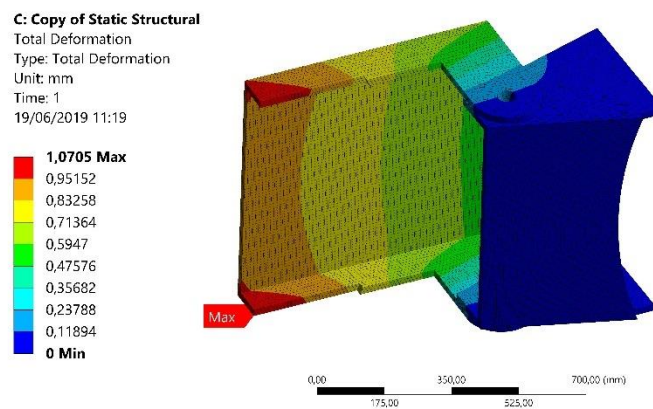


Figura 45. Deformación (Bisagra)

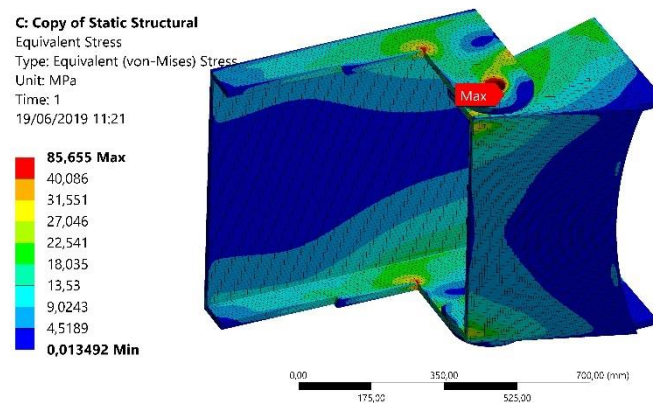


Figura 46. Tensión equivalente (Bisagra)

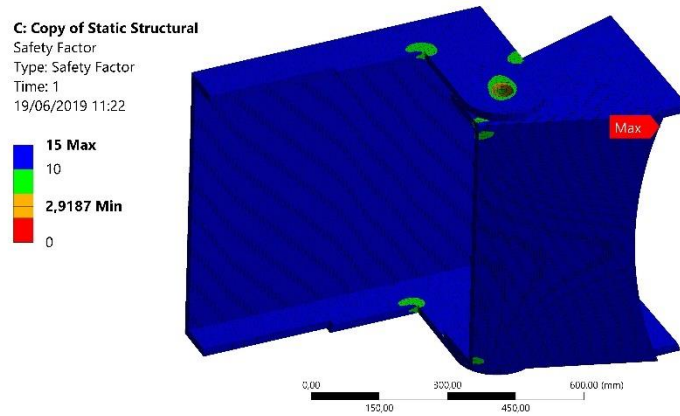


Figura 47. Factor de seguridad (Bisagra)

Deformación máxima	1,07 mm
Tensión máxima	85,655 MPa
Factor de seguridad	2,9187

Tabla 12. Resultados de la simulación (Bisagra)

Como se ha podido observar, el conjunto de la bisagra con un espesor de 20mm en las piezas resiste el peso de la compuerta. Además, en la simulación no se han incluido los cilindros por no complicar la simulación y esos componentes mejoran el comportamiento estructural del conjunto.

3.3.2.6. Sistema de movimiento de la compuerta móvil (bisagra y pletina rueda)

Planteamiento

Esta simulación es bastante similar a la anterior con la diferencia de que en esta se incluye el apoyo de la rueda. Por ello, su objetivo principal será asegurar que la pletina en la que se apoya la rueda resiste el esfuerzo y demostrar que al incluir la rueda se libera de carga a la bisagra, permitiendo reducir su espesor.

Análisis del sistema

Para llevar a cabo esta simulación se han incluido las 2 piezas de la bisagra, la compuerta y el apoyo para la rueda.

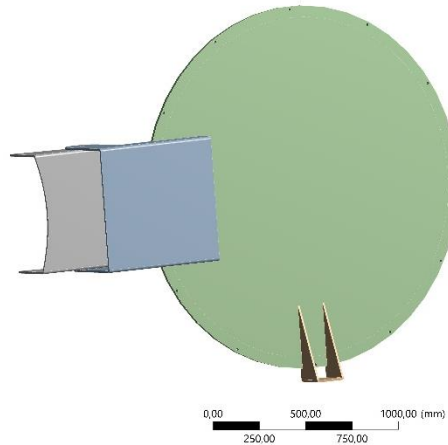


Figura 48. Geometría (Sistema Compuerta Móvil)

Pieza	Unión bisagra al Tubo
Material	Acero estructural
Masa	68,21 kg
Volumen	8,69e+006 mm ³
Espesor pieza	10 mm
Pieza	Unión bisagra a la compuerta
Material	Acero estructural
Masa	41,32 kg
Volumen	5,2637e+006 mm ³
Espesor pieza	10 mm
Pieza	Apoyo de la rueda
Material	Acero estructural
Masa	6,8827 kg
Volumen	8,77e+005 mm ³
Espesor pieza	10 mm
Pieza	Compuerta
Material	Acero estructural
Masa	471,6 kg
Volumen	6,01e+007 mm ³
Espesor pieza	20 mm

Tabla 13. Propiedades generales (Sistema Compuerta Móvil)

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en este análisis fueron:

- “Fixed support” para la zona de la pieza que se suelda al tubo directamente y para la unión atornillada a la rueda de la pieza de apoyo.
- Conexión fija entre las 2 piezas en el agujero por el que pasa el cilindro de la bisagra.
- Conexión “frictionless” para las caras en contacto de las 2 piezas.
- Conexión fija de las piezas a la compuerta por la zona de la pieza en la que está el cordón de soldadura.

Mallado

La configuración del mallado fue la siguiente:

Método de mallado	Hex Dominant (All Quad)
Número de nodos	177926
Número de elementos	34399
Tamaño del elemento	10-20 mm

Tabla 14. Características del mallado (Sistema Compuerta Móvil)

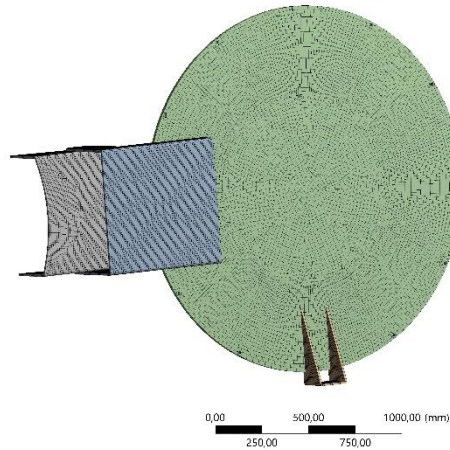


Figura 49. Mallado (Sistema Compuerta Móvil)

Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos de la simulación se pueden observar en las siguientes imágenes y se resumen en la tabla final.

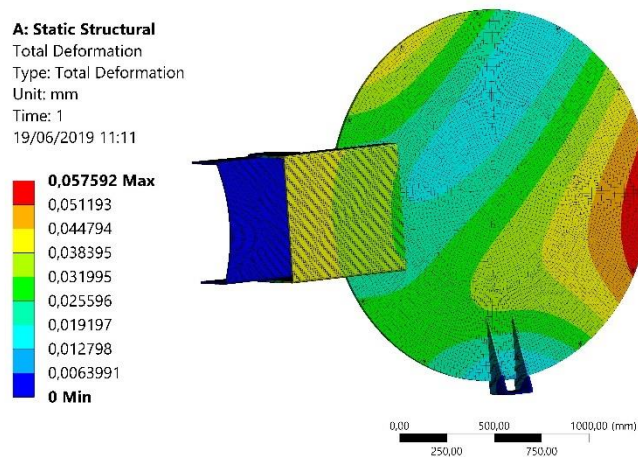


Figura 50. Deformación (Sistema Compuerta Móvil)

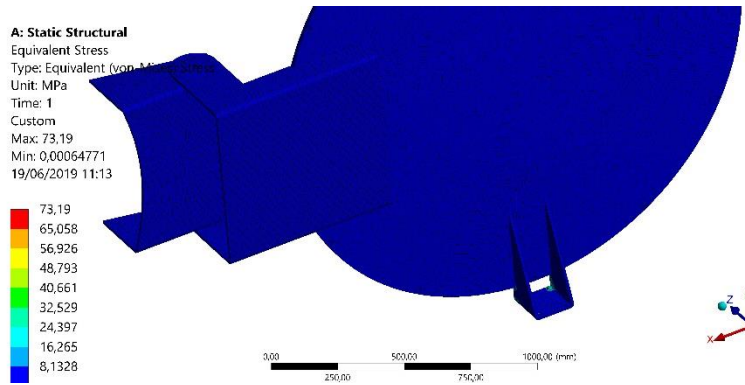


Figura 51. Tensión equivalente (Sistema Compuerta Móvil)

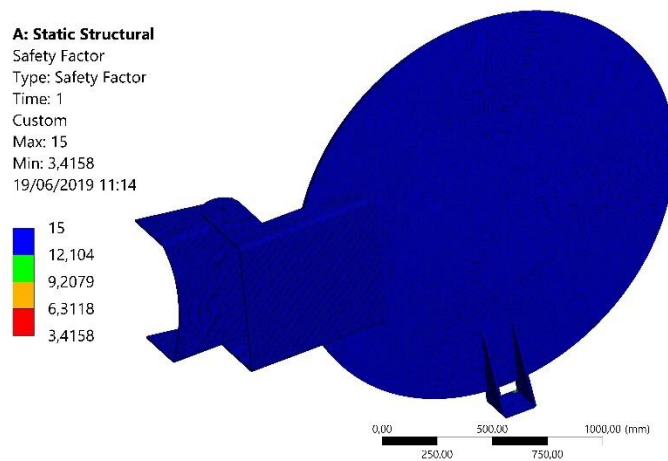


Figura 52. Factor de seguridad (Sistema Compuerta Móvil)

Deformación máxima	0,05 mm
Tensión máxima	73,19 MPa
Factor de seguridad	3,41

Tabla 15. Resultados de la simulación (Sistema Compuerta Móvil)

Como se ha podido observar, el conjunto de la bisagra ya no soporta casi cargas ya que se transmiten directamente al suelo a través de la rueda. Es por todo esto que se decide elegir este sistema que incorpora la rueda aunque la bisagra con un espesor de 20 mm pueda resistir la carga.

3.3.2.7. Soporte rueda

Planteamiento

Con esta simulación se desea comprobar el comportamiento de la pieza que conecta la compuerta y la rueda.

Análisis del sistema

Esta pieza se suelda directamente a la compuerta del tubo y se apoya sobre la rueda, atornillándola a la rueda mediante 4 tornillos M12. Se ha colocado una masa puntual de 500kg en el centro de gravedad teórico de la compuerta para simular su efecto sobre esta pieza.

Material	Acero estructural
Masa	6,8827 kg
Volumen	8,7678e+005 mm ³
Espesor pieza	10 mm

Tabla 16. Propiedades generales (Soporte Rueda)

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en este análisis fueron:

- “Fixed support” para las uniones atornilladas de esta pieza a la rueda.
- Desplazamiento restringido en el eje vertical para la cara plana que apoya con la rueda.
- Conexión de la masa puntual de 500 kg a la zona de la pieza que se suelda a la puerta.

Mallado

La configuración del mallado fue la siguiente:

Método de mallado	Hex Dominant (All Quad)
Número de nodos	527072
Número de elementos	115369
Tamaño del elemento	2 mm

Tabla 17. Características del mallado (Soporte Rueda)

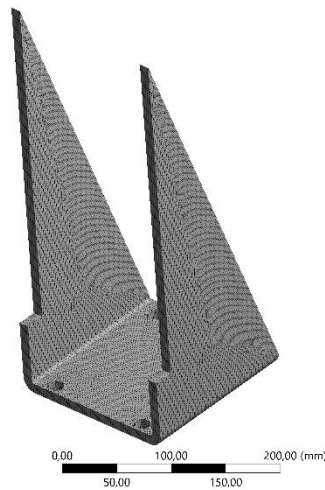


Figura 53. Mallado (Soporte Rueda)

Resultados

Los resultados más relevantes obtenidos de la simulación se pueden observar en las siguientes imágenes y se resumen en la tabla final.

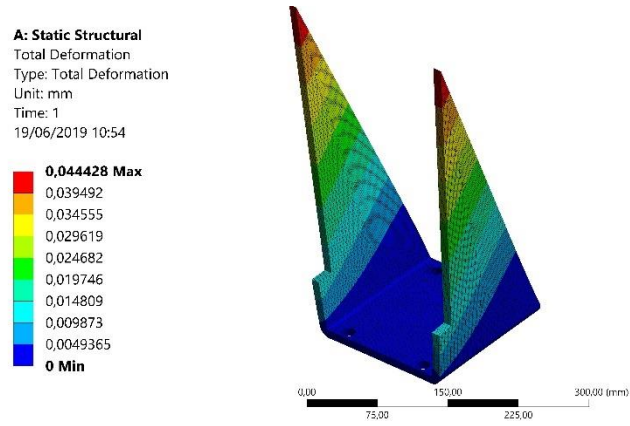


Figura 54. Deformación (Soporte Rueda)

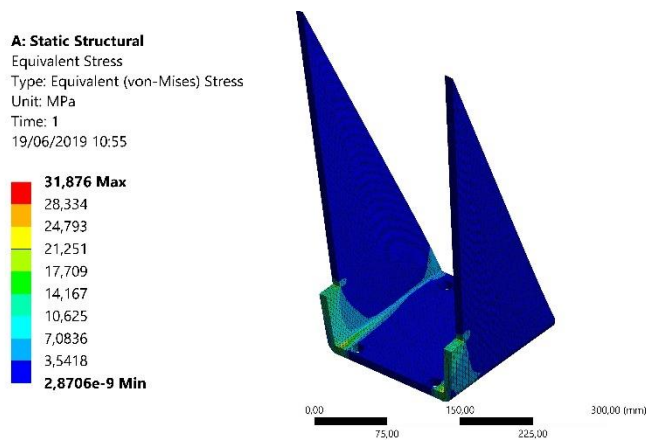


Figura 55. Tensión equivalente (Soporte Rueda)

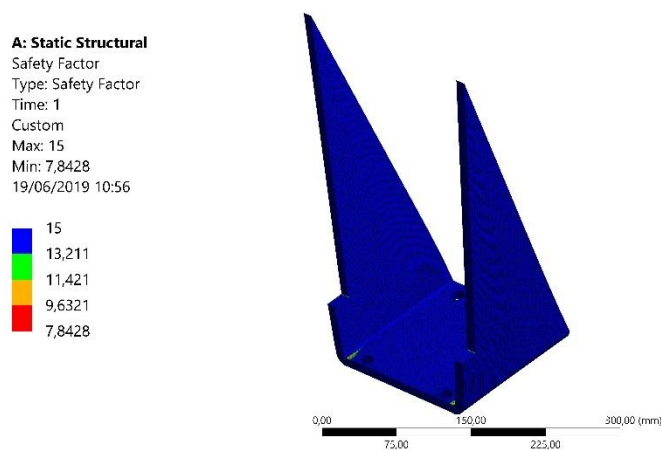


Figura 56. Factor de seguridad (Soporte Rueda)

Deformación máxima	0,0444 mm
Tensión máxima	31,876 MPa
Factor de seguridad	7,8428

Tabla 18. Resultados de la simulación (Soporte Rueda)

Como se ha podido observar, esta pieza resiste holgadamente la transmisión del esfuerzo del peso de la compuerta hacia la rueda y el suelo.

3.3.3. Diseño y análisis del mecanismo de movimiento de la bisagra.

Una vez definidas las dos piezas principales de la bisagra y comprobado su comportamiento estructural, se debe terminar de diseñar este conjunto de manera que permita abrir la compuerta con el mínimo esfuerzo físico. Para ello, se debe evitar el rozamiento entre las dos piezas principales y esto se consigue mediante el uso de cojinetes de bronce. Los cojinetes seleccionados se pueden observar en el anexo de planos (al igual que todo el resto de piezas que componen el conjunto) y su colocación en el montaje de la bisagra se observa en el plano de conjunto de la bisagra.



Figura 57. Detalle de la bisagra tras el montaje

Por otro lado, destacar que la elección del diámetro del cilindro pasador se toma del lado de la seguridad y calculando el esfuerzo que sufre en el caso más grave que es en el que no hay rueda de apoyo en la puerta. Estos cálculos son los siguientes:

El momento que genera el peso de la puerta sobre el eje de la bisagra viene determinado por la distancia del centro de gravedad de la misma al eje (aproximadamente 1,25 metros).

$$M = \text{Peso} \times 1,25 = 500 \text{ kg} \times 9,81 \times 1,25 \text{ m} = 6131,25 \text{ Nm}$$

Este momento genera una fuerza cortante sobre el cilindro pasador que depende de su longitud.

$$M = Ft \times \text{Longitud} \quad Ft = 6131,25 \text{ Nm} \div 0,5 \text{ m} = 12,26 \text{ KN}$$

Dicha fuerza genera una tensión cortante, que para un objeto cilíndrico de diámetro 30 mm se calcula como:

$$\tau = \frac{4}{3} \times \frac{Ft}{A} = \frac{4}{3} \times \frac{12260}{\pi \times 30^2} = 5,78 \text{ MPa}$$

Este cortante supone una tensión equivalente de $\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 10,01 \text{ MPa}$, la cual está muy por debajo del límite elástico del acero. Por tanto, el eje de la bisagra también resiste

perfectamente el esfuerzo. Destacar además que el eje de la bisagra está roscado en sus extremos para permitir su fijación a una de las piezas de la bisagra mediante 2 tuercas.

Por otro lado, con el objetivo de rigidizar el conjunto y darle mayor seguridad, se añade al conjunto de la bisagra un cilindro hueco que será atravesado por el cilindro pasador que rota y permite el movimiento. Este cilindro además protege al eje de la bisagra.

Por esto y por las simulaciones estructurales explicadas en el apartado “3.3.2. Simulaciones estructurales” es posible afirmar que el conjunto tendrá un comportamiento estructural adecuado y seguro.

CAPÍTULO 4. FABRICACIÓN, MONTAJE Y VALIDACIÓN DEL SISTEMA DE VACÍO DEL HYPER-TUBE

4.1. FABRICACIÓN DE PIEZAS

Se incluye este apartado de fabricación de piezas porque es relevante a la hora de determinar el tamaño de algunas piezas e incluso de algún conjunto de piezas como el mecanismo de apertura de la puerta móvil.

Para la fabricación de las piezas planas y grandes se debe analizar que método de corte se debe utilizar. Dentro de los métodos de corte disponibles se diferencia entre los de corte mecánico y los térmicos.

Los principales procesos de corte mecánico son el chorro de agua y el punzonado. El chorro de agua tiene la ventaja de que realiza el corte en frío por lo que se utiliza para materiales como el plástico que se deforman con el calor. Por su parte, el punzonado se ha visto superado por el corte láser para cortes continuos pero se sigue utilizando en algunas aplicaciones específicas como el roscado.



Figura 58. Corte por chorro de agua. (Fuente: Mecanizadossinc)

En cuanto a los procesos térmicos destacan el oxicorte, el corte por láser y el corte por plasma.

El oxicorte se utiliza principalmente para el corte de chapas de espesor considerable (mayor de 75 mm) y para la preparación de los bordes de dos piezas que se desean soldar por la unión de esos bordes.

El corte láser es una técnica de producción digitalizada, rápida y eficiente en la que se concentra la energía a través del láser (haz de luz que circula a través de espejos de gran precisión). Esto

permite cortar la chapa de una manera fina sin entrar en contacto directo la máquina de corte y la pieza. Este sistema de corte supera ampliamente a otros en cuanto a eficiencia y velocidad. Se utiliza para corte de piezas entre 5 y 20 mm de espesor, ya que para mayores espesores pierde calidad de corte.



Figura 59. Corte por láser (Fuente: Sculpteo)

El corte por plasma es un proceso en el que se hace circular un gas ionizado a alta velocidad y temperatura por una boquilla obteniendo un haz que genera un arco de plasma y permite cortar secciones de metales. Este proceso es más adecuado que el láser para espesores gruesos, siendo una mejor opción a partir de los 20-25 mm.

En la siguiente figura se puede observar la velocidad de corte (eje X) respecto del espesor de la pieza (eje Y). La gráfica se muestra en pulgadas por lo que es interesante recordar que 1 pulgada son 25,4 mm.

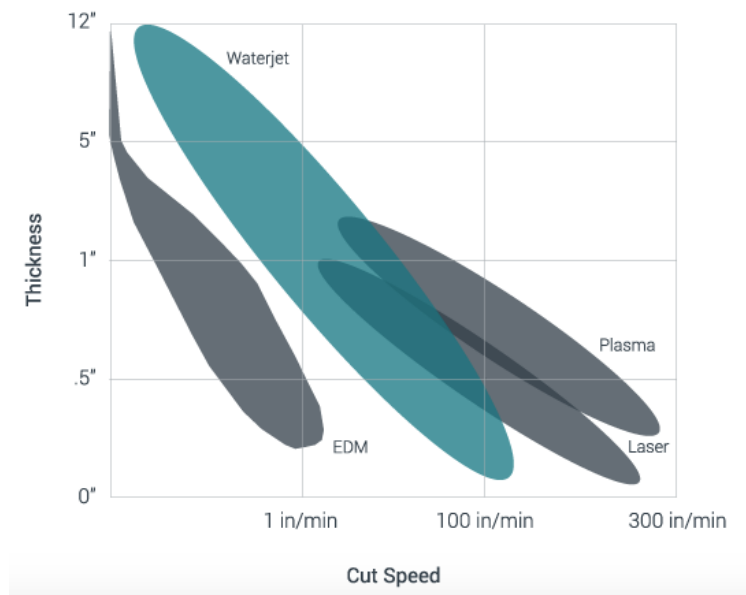


Figura 60. Velocidades de corte de los distintos sistemas (Fuente: Flowwaterjet)

Por todo esto, para cada pieza se utilizará el método más eficiente según el espesor. Para las piezas de 20 mm (brida y puerta móvil) se utilizará el corte por láser. Mientras que para las piezas de 25mm (brida y puerta fija) se utilizará el corte por plasma.

También se realizará por corte láser las 2 piezas de chapa de la bisagra y la pletina de la rueda aunque estas se someterán a un proceso de plegado tras el corte. Este proceso de fabricación (plegado) ha sido relevante en el diseño ya que el fabricante indicó que para plegado no se podía utilizar una chapa de 20 mm si no que el espesor máximo óptimo estaba entre 10-12 mm. Por ello, si se hubiese elegido el sistema de bisagra única (en el que las piezas requieran un espesor de 20mm) se habría necesitado utilizar la soldadura para fabricar estas piezas, encareciendo el coste y dificultando la fabricación.

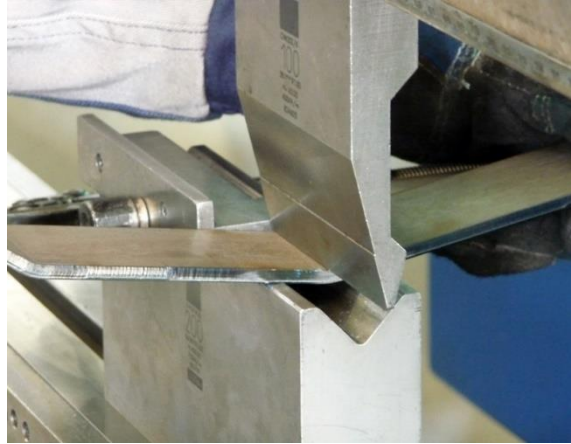


Figura 61. Plegado de piezas metálicas (Fuente: Lasertek)

El resto de piezas que hay que fabricar son las correspondientes a la bisagra. Todas estas piezas se realizarán en un centro de mecanizado y son: el cilindro macizo roscado, el cilindro hueco de soporte y los cojinetes de bronce. Cabe destacar que el cilindro hueco que se había diseñado como una única pieza se debe rediseñar tras el *feedback* de una de las empresa de mecanizado que colaboran con Hyperloop UPV. Esta pieza se divide, por tanto, en 3 piezas que acaban formando un conjunto equivalente al diseño inicial para que así sea posible su mecanizado ya que es complicado realizar un agujero de $\varnothing=30$ mm y profundidad 500mm.

4.2. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL HYPER-TUBE

4.2.1. Proceso de montaje

Una vez se hayan fabricado toda las piezas diseñadas y comprado todos los elementos comerciales necesarios se procede al montaje del sistema en el tubo. Se va a explicar a continuación el proceso de montaje que se debe seguir para una correcta instalación.

1. Preparación de las superficies de soldaduras mediante una radial con su disco de lija. Se debe retirar cualquier elemento de suciedad u óxido tanto de las piezas como del tubo para que la soldadura sea eficaz. Se elimina unos 20-30 mm de pintura y óxido desde el extremo del tubo.
2. Colocación de las bridas de 20 y 25 mm en cada extremo del tubo y fijación de las mismas mediante sargentos.



Figura 62. Colocación y soldadura de las bridas.

3. Soldadura de las bridas al tubo.
4. Colocación de la junta tórica en su alojamiento en una de las 2 bridas. Como hemos destacado en el apartado 3.2.5. *Sellado de la cámara* es esencial para el sistema que la instalación de la junta sea correcta. Para este punto es interesante aplicar grasa de silicona en el alojamiento de la junta para protegerla y para su fijación. Además, se deben seguir las siguientes recomendaciones:
 - Asegurarse que no queden residuos del mecanizado en la ranura.
 - Evitar que se tuerza al instalarla.
 - Evitar aristas vivas que puedan dañar la junta.
 - Ir metiendo la junta en el alojamiento poco a poco de forma simétrica a izquierda y derecha.
5. Soldadura de las bridas soldables a la compuerta fija.
6. Colocación de las puertas usando alguna máquina de apoyo (una carretilla elevadora Fenwick por ejemplo) para poder levantarlas. Una vez levantadas se centran los agujeros de la puerta con los de la brida y se atornillan.





Figura 63. Montaje de una de las compuertas.

7. Soldadura exterior de la puerta fija a la brida por el exterior para que quede sellado.
8. Sellado interior de la puerta fija por el interior utilizando soldadura o alguna silicona sellante.
9. Montaje completo de la bisagra antes de proceder a soldarla.
10. Soldadura de las piezas de la bisagra (una a la compuerta y la otra al tubo). Es importante que este conjunto quede perfectamente colocado respecto del suelo para que el giro de la compuerta sea correcto.
11. Fijación mediante tornillos de la rueda a la pletina que la une a la puerta.
12. Colocación y soldadura del conjunto de la rueda a la compuerta.
13. Colocación y soldadura del asa para abrir la compuerta móvil.
14. Pintura para proteger frente a corrosión de todas aquellas piezas que lo necesiten.
15. Conexión de la bomba y el resto de elementos a las bridas ISO K.
16. Instalación de la conexión eléctrica de la bomba.

Cabe resaltar que una vez haya concluido la instalación es recomendable proteger a las piezas de acero frente a la oxidación. Para ello, una de las mejores opciones sería pintarlas al igual que está pintado el tubo.

4.2.2. Soldadura de piezas

En este apartado se va a explicar el método de soldadura utilizado y se va a comparar con otros tipos de soldadura.

La soldadura utilizada en este caso es la soldadura MIG (Metal Inert Gas), dicho gas suele ser el argón). La soldadura MIG es un método de soldadura de arco eléctrico en el que el hilo de metal de aportación se funde bajo un gas de protección para unir las piezas correspondientes. Las características principales de este tipo de soldadura son: capaz de soldar gran variedad de materiales, rapidez de soldadura, capaz de depositar metales en cualquier lugar a gran velocidad ,bajo coste y es una de las más sencillas de utilizar. Además, el acabado estético es bastante bueno y no se necesita una limpieza posterior de la escoria.

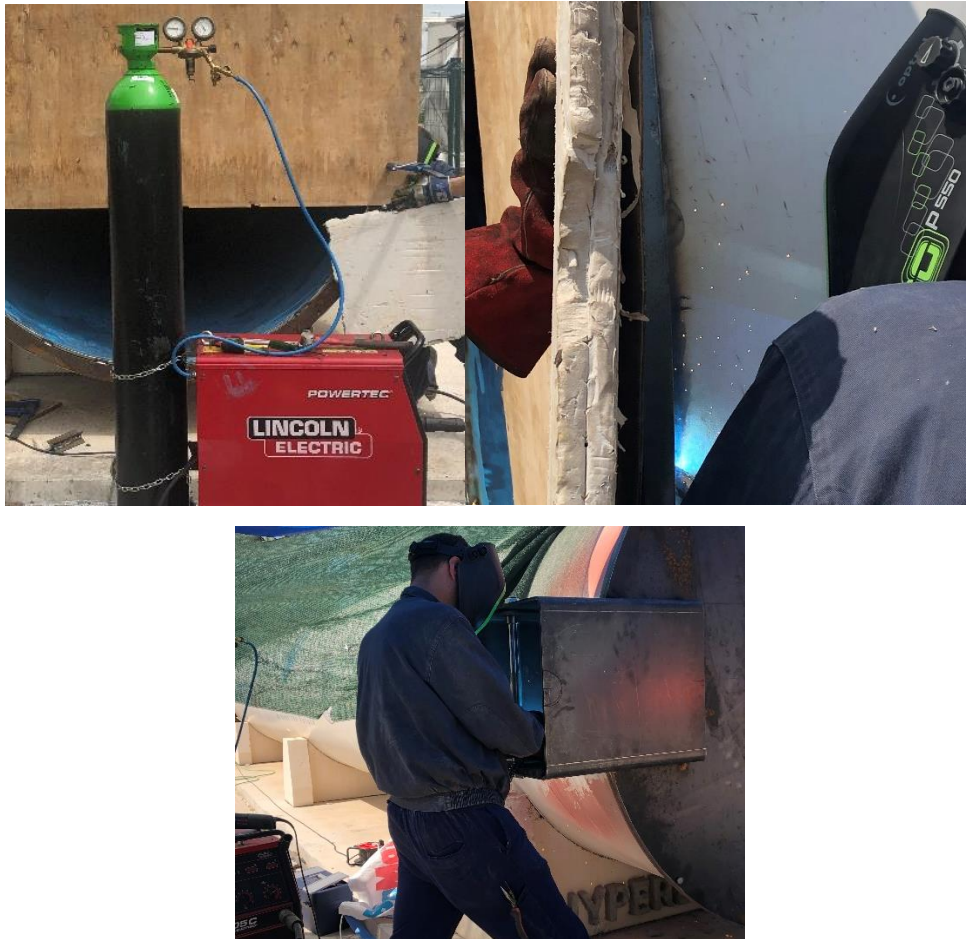


Figura 64. Trabajos de soldadura en el Hyper-Tube.

Se elige este tipo de soldadura principalmente por su rapidez y buen acabado pese a que no sea la más indicada para exteriores por necesitar la aplicación de un gas. El uso de esta soldadura en exterior se complica por la acción del viento, que retira el gas de protección del punto de aplicación y empeora el acabado del cordón. Por ejemplo, la soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) presenta una mejor resistencia y calidad final pero requiere de un tiempo de soldadura mucho mayor y es más compleja de utilizar. Por ello, la soldadura TIG se utiliza para trabajos más delicados.

4.3. TESTS DE FUNCIONAMIENTO DEL HYPER-TUBE

4.3.1. Detección y caracterización de fugas

4.3.1.1. Introducción

Debido a la complejidad de la instalación, es necesario realizar un proceso de detección de fugas con el objetivo de encontrar los puntos críticos del sistema y mejorar su rendimiento si se consigue tapar dichas fugas. Los principales puntos a analizar con esta prueba son los cordones de soldadura, la junta tórica de la puerta móvil, las conexiones al interior mediante bridas

soldables y las uniones atornilladas. Este ensayo se realizará con la ayuda de una empresa colaboradora del equipo Hyperloop UPV, que además proporciona el equipo necesario para el test.

Para la detección de fugas lo más pequeñas posibles (de hasta $1,5 \cdot 10^{-3}$ mbarL/s) la detección se realiza mediante gas helio. Este ensayo consiste en aplicar pequeñas cantidades de helio por el exterior de la cámara en puntos donde se presupone que puede haber fugas. Si el helio entra al interior de la cámara por alguna junta o poro es detectado por el equipo de detección y esto permite ir localizando los puntos críticos de fugas. Además, el equipo es capaz de medir la cantidad de helio de manera que permite caracterizar el tamaño de las fugas.



Figura XX. Equipo de detección de fugas

4.3.1.2. Metodología

Los componentes necesarios para realizar este tipo de ensayo son:

- Cámara de vacío Hyper-Tube completamente instalada.
- Bomba de vacío de apoyo durante el test
- Detector de fugas
- Bombona de gas helio con pistola de precisión



Figura 65. Montaje del equipo de ensayo.

Por otro lado, el procedimiento para realizar el ensayo es:

1. Conexión de la bomba auxiliar y el detector en una de las bridas ISO-KF sobrantes.
2. Encendido de ambas bombas y el equipo de medida.
3. Bajar a una presión por debajo de 20 mbar para permitir la detección de fugas pequeñas.
4. Aplicar pequeñas cantidades de helio por los posibles puntos de fugas.
5. Marcar todos los puntos con fugas para intentar corregirlas posteriormente. Ir solucionando las fugas al momento si es posible.

4.3.1.3. Resultados y conclusiones

A continuación, se exponen los resultados y conclusiones del ensayo. En primer lugar, al analizar el lado fijo, se obtuvieron diversos puntos de fuga grandes (hasta $5 \cdot 10^{-4}$ mbarL/s). Estos puntos críticos fueron los agujeros para atornillar la puerta a la brida durante el montaje y una gran cantidad de poros en el cordón de soldadura (tanto en el de la compuerta como en los de las bridas soldables). Todas estas fugas se corrigieron al momento con un gel comercial sustituto universal de juntas hasta conseguir que no hubiese ninguna fuga mayor a 5×10^{-4} mbarL/s.



Figura 66. Defectos detectados en el cordón de soldadura

Por el contrario, al analizar el lado de la puerta móvil no se detectaron fugas mayores de $2,4 \cdot 10^{-3}$ mbarL/s. Esto supone que la junta tórica está funcionando correctamente y que el cordón de soldadura de ese lado tiene una mejor calidad.

Como conclusión, resaltar que durante la detección de fugas y una vez se corrigieron los mayores puntos de fuga se consiguió alcanzar una presión mínima de 0,5 mbar la cual es mucho menor que la presión requerida para la competición de SpaceX que es de 13,33 mbar.

4.3.2. Medición de tiempos de vaciado y llenado reales

Una prueba sencilla pero efectiva para comprobar el funcionamiento del sistema es medir el tiempo que se tarda en llegar al nivel máximo de vacío requerido. También es interesante comprobar el nivel de vacío que se consigue alcanzar. Para realizar esta prueba tan solo necesitamos el sensor de presión y un cronómetro. Es interesante medir la presión cada 5 minutos para poder obtener una gráfica detallada de la evolución de la presión durante un ensayo.

El ensayo completo duró 135 minutos y la evolución de la presión fue la siguiente:

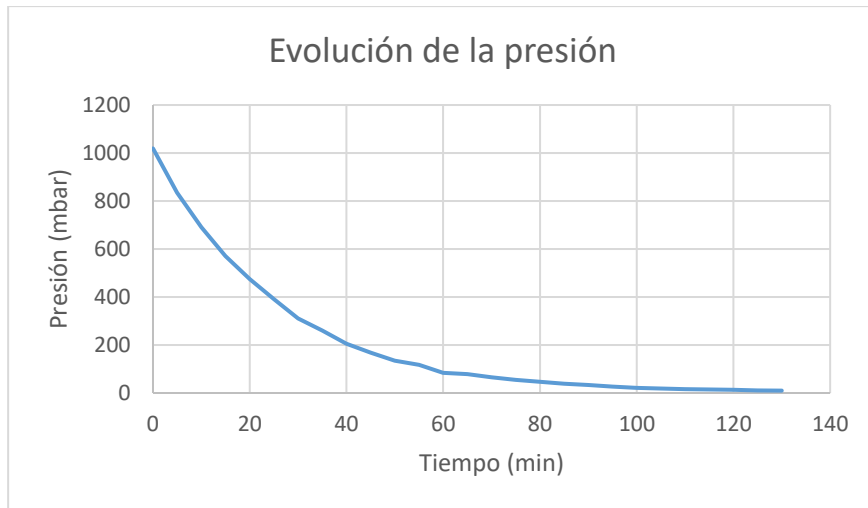


Figura 67. Evolución de la presión durante un ensayo

En la figura 67 se puede observar que conforme la presión se reduce a la bomba le cuesta más extraer el aire lo que aumenta el tiempo de ensayo. Sin embargo, se puede decir que el comportamiento del sistema es el esperado ya que en los cálculos teóricos se había estimado una duración de casi 2 horas para conseguir 10 mbar y en la realidad se tarda 2 horas y 10 minutos. Además es destacable resaltar que se pueden lograr presiones más bajas en la cámara de vacío si fuese necesario pero esto aumenta mucho el tiempo de ensayo ya que la evolución de la gráfica se asemeja a una exponencial.

CAPÍTULO 5. PRUEBAS EN VACÍO DEL PROTOTIPO TURIAN DEL EQUIPO HYPERLOOP UPV

5.1. PRUEBAS EN VACÍO DE LOS DIFERENTES SUBSISTEMAS

Los ensayos realizados en el Hyper-Tube de cara a la competición de 2019 sirven al equipo Hyperloop UPV de 2 maneras distintas. En primer lugar, son útiles para comprobar si el prototipo TURIAN será capaz de pasar dicha prueba o no. Además, si no lo fuese permite al equipo intentar corregir el error antes de la competición. Por otro lado, es útil también para practicar los procedimientos de ensayo que se deben seguir en la competición ya que los ensayos se realizarán exactamente de la misma forma a la que se sigue allí.

Antes de poder probar el prototipo en su totalidad a baja presión se deben testear los diferentes subsistemas por separado para asegurarse que se comportan correctamente. Además, es más sencillo identificar algún punto de fallo de esta forma que con todo el prototipo ensamblado.

5.1.1. Ensayo de compatibilidad en vacío de las baterías de los motores de TURIAN

5.1.1.1. *Introducción*

El sistema energético del prototipo se compone de 12 packs de 5 baterías LiPo conectadas en serie que alimentan 12 motores. Los requerimientos de alimentación de cada pack de baterías son: 85 V, 185 A y 15 kW. Este ensayo pretende explicar la descarga del pack completo de las baterías que alimentan a los motores del sistema de propulsión de TURIAN en condiciones de baja presión. Antes de este ensayo, se ha comprobado el funcionamiento de las mismas en condiciones atmosféricas.

Con todo esto, los objetivos del test son:

- Obtener la curva de descarga real de las baterías ThunderPower 2070 mAh en condiciones de baja presión.

- Comprobar que las baterías resisten en vacío cuando están descargando a máxima capacidad.
- Comparación de los resultados con el test en condiciones atmosféricas.
- Estudio térmico del circuito en condiciones de vacío.
- Comprobar que la expansión de las baterías está dentro de unos límites razonables.

5.1.1.2. Metodología

Material utilizado

Los elementos necesarios para la realización de esta prueba son:

Baterías:

- ThunderPower Rampage 2070 mAh 5S.

Conexión:

- Conectores XT90
- 8 cables AWG
- 10 cables AWG

Protección:

- Fusible Littelfuse JLLN-200:200 A.
- MOSFET de potencia 150 V 310 A.

Carga:

- Resistencias eléctricas 1 Ω – 1 kW.

Equipo de medida:

- Multímetro
- Ammeter
- Thermocouple
- Cámara Térmica

Instalación de vacío:

- Cámara de vacío.
- Bomba de vacío.
- Sensor de presión.

Procedimiento

Para la realización del ensayo se ha creado un procedimiento de seguridad a seguir que se explica con la siguiente lista:

- Ensamblaje del equipamiento de ensayo. Se deben revisar que todas las conexiones son correctas una por una.
- El personal encargado debe llevar guantes de asilamiento y gafas de seguridad durante el ensayo.

- Se activa la señal de baja tensión y se mide la continuidad para asegurarse que el MOSFET funciona correctamente. Tras esto se desactiva la señal.
- Revisión del correcto funcionamiento de todos los sensores y de que están guardando los datos del ensayo.
- Conexión de las baterías al bus de potencia.
- Revisión del voltímetro para asegurarse que las baterías tienen una tensión adecuada.
- Sellado de la cámara y reducción de la presión hasta alcanzar 60 mbar.
- Activación de la señal de alimentación del MOSFET y las baterías comienzan a descargar.
- Una vez completada la descarga, se desactiva la señal y se presuriza la cámara. Un miembro especializado desconecta las baterías y las deja en una bolsa a prueba de fuego.
- Medición de la expansión de las baterías tras el ensayo.

Las medidas tomadas para obtener la información necesaria del ensayo fueron:

- Corriente de descarga usando una pinza amperimétrica.
- Tensión en los terminales usando un multímetro.
- Temperatura de las baterías usando un multímetro y un termopar.
- Temperatura después del ensayo mediante una cámara térmica.
- Presión en el interior de la cámara de vacío.

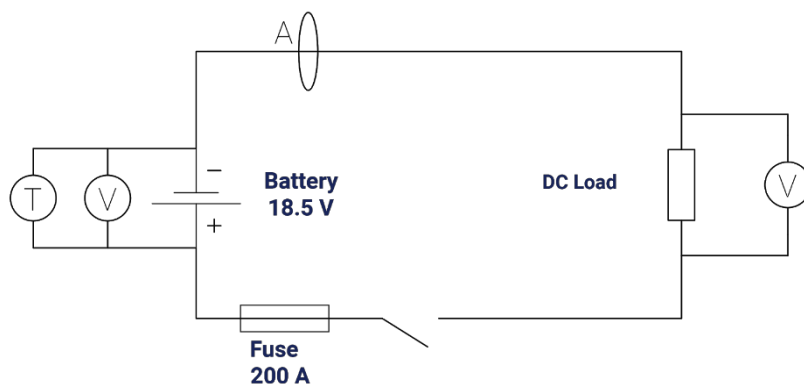


Figura 68. Esquema del test a 18,5 V (Fuente: Hyperloop UPV)

5.1.1.3. Resultados y conclusiones

Se consiguió realizar 4 descargas, cuyos datos se recogen en la siguiente tabla:

	Resistencia (Ohmios)	Tensión Inicial (V)	Tensión Nominal (V)	Corriente Nominal (A)	Temperatura Máxima (K)	Duración (s)
38 C	0,167	21	16,421	101,3	321	21
57 C	0,1	20,994	14,175	151,5	323	21
63 C	0,091	20,987	16,036	164,9	326	13
69 C	0,083	21,025	15,916	185,8	330	23

Tabla 19. Resultados de las diferentes descargas. (Fuente: Hyperloop UPV)

En las figuras 12 y 13 se muestran la tensión y la corriente de las baterías. La tensión fue medida directamente en cada celda mientras que la corriente se midió a través de los pasamuros de alta corriente.

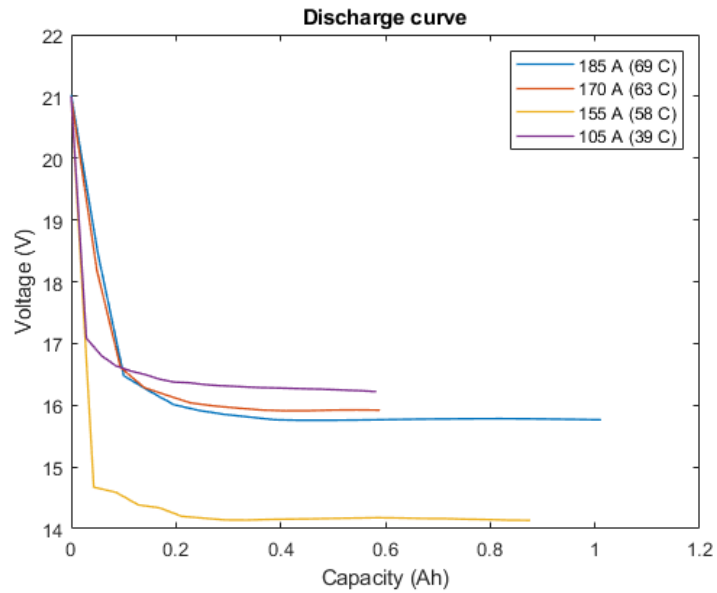


Figura 69. Voltaje en condiciones de vacío. (Fuente: Hyperloop UPV)

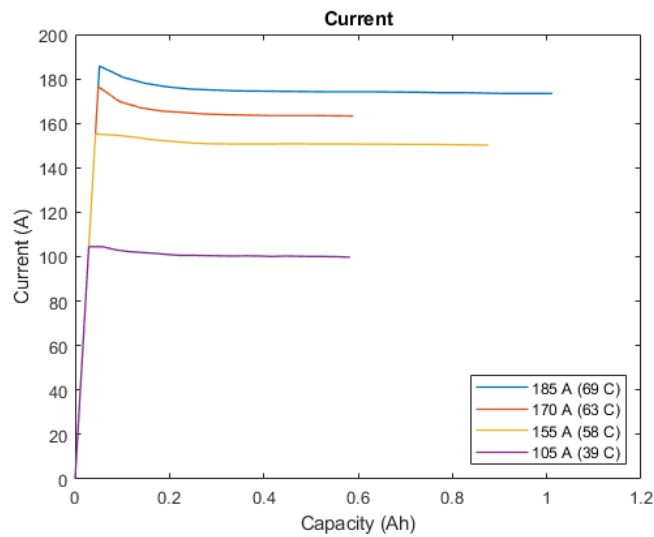


Figura 70. Corriente en condiciones de vacío. (Fuente: Hyperloop UPV)

También se obtuvo la gráfica de la evolución de la temperatura en cada ensayo.

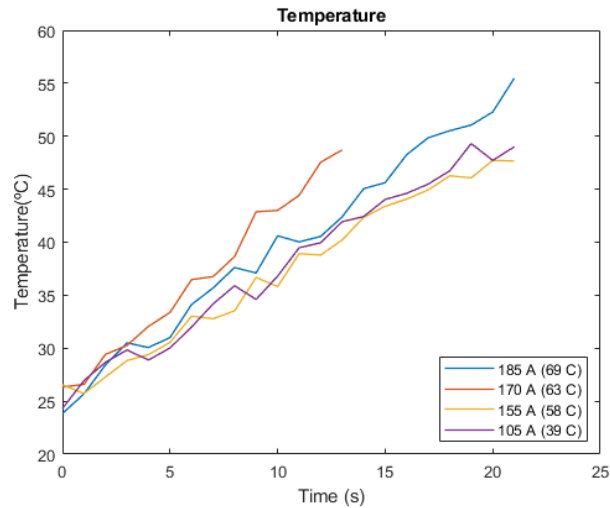


Figura 71. Temperatura en condiciones de vacío. (Fuente: Hyperloop UPV)

Con todo esto, se pueden resaltar las siguientes conclusiones:

- Las baterías soportan perfectamente las condiciones de baja presión con una curva de descarga adecuada.
- La máxima temperatura obtenida fue de 57 °C, por debajo de la máxima recomendada por el fabricante que es de 70 °C.
- La máxima expansión de las baterías no superó 1 mm en ningún caso.

5.1.2. Ensayo de compatibilidad en vacío de las baterías de la aviónica de TURIAN

5.1.2.1. Introducción

A parte de las baterías de los motores, el prototipo TURIAN tiene otro pack de baterías para alimentar todo el sistema electrónico que controla el prototipo. Este sistema se compone de 4 celdas Samsung 18650 que alimentan con 12 V, 3 A_{pico} y 36 W_{pico}. Estas baterías se han usado en los dos prototipos anteriores de Hyperloop UPV con buenos resultados, por lo que se decidió volverlas a utilizar para TURIAN.

Este ensayo se realiza para demostrar el correcto funcionamiento de estas baterías en condiciones de baja presión, así como para obtener información de las mismas durante su descarga.

5.1.2.2. Resultados y conclusiones

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de las baterías de la electrónica.

Tiempo (min)	Corriente (A)	Tensión (V)	Temperatura (K)
0	71	60.83	303.15 (30°C)

0.333	70.6	60.6	303.15 (30°C)
0.666	70.4	60.42	303.15 (30°C)
0.999	70.2	60.25	303.4 (30.25°C)
1.332	70.1	60.1	303.95 (30.8°C)
1.665	70	59.95	303.95 (30.8°C)
1.998	70	59.8	303.95 (30.8°C)
2.331	70	59.65	303.95 (30.8°C)
2.664	70	59.5	303.95 (30.8°C)
2.997	70	59.35	304.05 (30.9°C)
3.33	70	59.2	304.15 (31°C)
3.663	70	59.1	304.15 (31°C)
3.996	70	58.98	304.35 (31.2°C)
4.329	70	58.85	304.45 (31.3°C)
4.662	70	58.77	304.45 (31.3°C)
4.995	70	58.77	304.55 (31.4°C)
5.328	70	58.56	304.75 (31.6°C)
5.661	70.1	58.41	304.85 (31.7°C)
5.994	70	58.25	305.05 (31.9°C)
6.327	70	58.12	305.15 (32°C)
6.66	70	57.88	305.15 (32°C)
6.993	70	57.7	305.65 (32.5°C)
7.326	70	57.6	306.15 (33°C)
7.659	69.9	57.51	306.65 (33.5°C)
7.992	69.9	57.4	307.15 (34°C)
8.325	69.9	57.27	307.15 (34°C)
8.658	70	57.13	307.15 (34°C)
8.991	70	57	307.15 (34°C)

Tabla 20. Resultados del test de las celdas Samsung 18650. (Fuente: Hyperloop UPV)

Por ello, las conclusiones de este ensayo son:

- Las baterías soportan perfectamente las condiciones de baja presión con una curva de descarga adecuada.

La información de estos ensayos se debe entregar a SpaceX para la competición por lo que se recoge en el Safety Briefing de Hyperloop UPV [6].

5.2. PRUEBA EN VACÍO DEL PROTOTIPO TURIAN COMPLETO

5.2.1. Introducción

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de los diferentes subsistemas, es el momento de la prueba en vacío del prototipo en su totalidad. Esta prueba es una de las finales de la “SpaceX Hyperloop Pod Competition” por lo que pasarla antes de llevar el prototipo permite a Hyperloop UPV ir a la competición con gran seguridad de obtener un buen resultado.

5.2.2. Metodología

El procedimiento a seguir durante el test es el indicado en la normativa de la competición y se realiza siguiendo una *checklist* elaborada por el equipo que se debe ir completando paso por paso. Este procedimiento asegura la seguridad de los miembros del equipo que participan en el ensayo.

Procedimiento de ensayo		Check	Detalles
1	Transporte del Pod a la cámara de vacío		Siguiendo el documento de Pod Transport Procedure
2	Se introduce el Pod en la cámara y se cierra la compuerta de la misma		<i>Siguiendo el documento Vacuum Chamber Loading Plan</i>
3	Comprobación de la telemetría del vehículo		
4	Realización del Pod Health Check		El Pod Health Check es un procedimiento en el que se comprueba que todos los datos recibidos de los sensores del vehículo son correctos
5	Despresurización de la cámara de vacío		
6	Ensayo completo en vacío del prototipo		
6.1.	Encendido de las baterías de los motores		
6.2.	Comprobación del funcionamiento del diagrama de estados del vehículo		La presión final será de unos 15 mbar
6.3.	Descarga de las baterías a máxima carga		
7	Presurización de la cámara		
8	Realización del Pod Health Check		Following the <i>Pod Health Check</i>

9	Apertura de la compuerta y extracción del Pod		Siguiendo el documento <i>Vacuum Chamber Unloading Plan</i>
---	---	--	---

El ensayo no se pudo realizar porque el prototipo no estaba listo para el mismo antes del envío a EEUU. Pese a esto, los subsistemas sí que se han analizado por separado de manera satisfactoria por lo que que no se haya podido probar no quiere decir que el prototipo no sea capaz de ser funcional a baja presión.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Para concluir con el proyecto, se debe estudiar de que forma se han logrado los objetivos expuestos en la introducción del proyecto. En primer lugar, es destacable mencionar que el objetivo de conseguir una cámara de vacío de gran tamaño completamente funcional en la UPV se ha logrado con creces. Esto se puede comprobar ya que tras la instalación del sistema de vacío diseñado se han hecho pruebas del funcionamiento de la misma y han sido satisfactorias. De esta forma, se demuestra que tanto la parte estructural como la del sistema de vacío funcionan correctamente.

Sin embargo, debido a los plazos tan ajustados que el equipo Hyperloop UPV tiene de cara a la competición internacional, el prototipo se ha tenido que enviar con antelación a EEUU y no ha estado listo para la prueba en el Hyper-Tube.

Pese a esto, cabe destacar que una vez la cámara de vacío ya está instalada va a permitir que el equipo pueda realizar pruebas importantes en el desarrollo de la tecnología de Hyperloop durante los próximos años. Para esto, se podrían incluir algunas mejoras para la cámara de vacío si se tuviese la capacidad de hacerlo. Estas serían, por ejemplo, el conseguir una bomba de apoyo para reducir el tiempo de vaciado que en la actualidad se sitúa sobre 2 horas para llegar a 10 mbar. También sería interesante incluir una válvula de regulación que permita mantener la presión constante una vez se llegue al valor deseado.

Para conseguir los objetivos genéricos se han ido cumpliendo los objetivos específicos por separado, lo cual ha sido esencial para facilitar la resolución de un proyecto como este, que abarca diversos campos de la ingeniería.

En primer lugar, se ha realizado el diseño conceptual de la estructura, el cual se ha simulado después para asegurar su correcto comportamiento y se ha comprobado en los ensayos prácticos posteriores que resiste las cargas del ensayo. Esta estructura se divide en dos partes claramente diferenciadas. La primera son las compuertas y la segunda el sistema de apertura de una compuerta. Para las compuertas se opta porque una sea fija e incorpore todas las conexiones necesarias a la cámara y la otra sea móvil para introducir los prototipos al interior. Para la apertura de esta compuerta móvil de unos 500 kg se ha diseñado un sistema de bisagra y rueda completamente funcional y seguro.

Por otro lado, se ha realizado la selección de componentes específicos de cámaras de vacío que permitan alcanzar la presión deseada de 10 mbar, como son la bomba de vacío o la junta tórica para el sellado de la compuerta móvil. Además, se ha definido todo el sistema de conexiones desde el exterior al interior de la bomba siguiendo normas ISO.

También se ha definido como debía ser todo el proceso de montaje y se ha ajustado el diseño de piezas propias a lo que la tecnología permite fabricar a un coste razonable. Esta parte

correspondiente al presupuesto es una parte relevante del proyecto ya que el equipo Hyperloop UPV consigue la financiación necesaria para sus proyectos gracias a la universidad y patrocinadores pero gran parte de la misma es necesaria para desarrollar los prototipos de la competición. Por esto, el proyecto se debía a ajustar a lo máximo posible al presupuesto prefijado para ello.

Para finalizar, se han realizado pruebas de validación de todo el sistema para asegurar que su funcionamiento es adecuado y estas han sido satisfactorias. Por todo esto, se puede afirmar que el proyecto ha sido un éxito y la cámara de vacío Hyper-Tube puede ser una gran ventaja para el equipo Hyperloop UPV de cara a los próximos años.

CAPÍTULO 7. BIBLIOGRAFÍA

LITERATURA

- [1] Ribas, A. (1999). En los límites de la realidad: el vacío. *Revista Mundo Científico - La Recherche*, 202, 41-45.
- [2] Jousten, K. (2008). *Handbook of Vacuum Technology*. Weinheim, Wiley-VCH.
- [3] Hoffman, Dorothy M.; Singh, Bawa; Thomas, John H. (1998). *Handbook of vacuum science and technology*. San Diego, CA. Academic Press.
- [4] Hyperloop UPV (2019). *Preliminary Design Briefing*. Valencia
- [5] Hyperloop UPV (2019). *Final Design Package*. Valencia
- [6] Hyperloop UPV (2019). *Safety Briefing*. Valencia
- [7] SpaceX (2013). *Hyperloop Alpha*. Los Angeles.
- [8] SpaceX (2019). *2019 SpaceX Hyperloop Pod Competition. Rules & Requirements*. Los Angeles.
- [9] Leybold S.A. (2016). *Fundamentals of Vacuum Technology*. Cologne, Germany.

BIBLIOGRAFÍA WEB

- [10] London Reconnections. (2015). *The SECOND Oldest Tube: London's Lost Pneumatic Railway*. <https://www.londonreconnections.com/2015/londons-lost-pneumatic-railway-the-worlds-2nd-oldest-underground/>
- [11] Boys, B. (2007). *The Short-Lived Thrill of the Windy Subway - The Bowery Boys: New York City History*. The Bowery Boys: New York City History. <http://www.boweryboyshistory.com/2007/08/short-lived-life-of-windy-subway.html>
- [12] Maglev.net. (2013). *Shanghai Maglev – All You Need to Know*. <https://www.maglev.net/shanghai-maglev>
- [13] Bizjournals.com. (2018). <https://www.bizjournals.com/losangeles/news/2018/07/23/spacex-hyperloop-winner-breaks-speed-record.html>
- [14] Eurail. *Tren de alta velocidad AVE*. <https://www.eurail.com/es/inspirese/trenes-en-europa/trenes-de-alta-velocidad/ave>
- [15] Boeing.es. *Boeing: Boeing España - 747-8*. <https://www.boeing.es/productos-y-servicios/commercial-airplanes/747-8.page>
- [16] Japan Rail Pass Blog. (2018). *Maglev, el Tren Bala más rápido del mundo - Japan Rail Pass*. https://www.jrailpass.com/blog/es/maglev-tren-bala/Velocidad_maxima_del_Maglev_2018

- [17] Disfrutashanghai.com. *Monumentos y atracciones turísticas de Shanghái - Visitas esenciales*. <https://www.disfrutashanghai.com/monumentos-atracciones>
- [18] Medium. (2017). *Inside the 2nd SpaceX Hyperloop Pod Competition - WARR Hyperloop TUM - Medium*. https://medium.com/@WARR_Hyperloop/inside-the-2nd-spacex-hyperloop-pod-competition-2ea8699c0742
- [19] Projects, A. (2016). *Algunos consejos sobre el sistema ISO KF | The Vacuum Projects*. Web2.vacuum-projects.net. <http://web2.vacuum-projects.net/algunos-consejos-sobre-el-sistema-iso-kf/>
- [20] Epidor.com. <https://epidor.com/documentos/08-Epidor-Seals-and-Rubber-Technology-Catalogo-Juntas-Toricas.pdf>
- [21] Sculpteo.com. *Acero Inoxidable Corte por Laser*. <https://www.sculpteo.com/es/corte-por-laser/materiales-corte-por-laser/materiale-acero-inoxidable/>
- [22] Flowwaterjet.es. (2019). *Comparativa de cortes, comparación de bordes, intervalo de velocidades de corte - Flow Waterjet*. <https://www.flowwaterjet.es/Aprender/Corte-Comparativo-es.aspx#range>
- [23] Mecanizados Sinc. (2019). *El corte por chorro de agua para mecanizar - Mecanizados Sinc*. <https://www.mecanizadossinc.com/corte-chorro-de-agua-mecanizar/>
- [24] Lasertek.es. (2016). *Plegado de piezas metálicas Lasertek – LASERTEK*. https://lasertek.es/plegado-de-chapa/plegado_carrusel_03/
- [25] Zeleros. *Home - Zeleros* <https://zeleros.com/>
- [26] Leybold Hispánica – *Leybold* <https://www.leybold.com/es/es/>
- [27] Teratorr.com *Tipos de bombas de vacío más comunes | TeraTorr Technologies*. <https://www.teratorr.com/11-tipos-de-bombas-de-vacio/>

NORMATIVAS

- [28] ISO 21360-1:2012 Vacuum technology -- Standard methods for measuring vacuum-pump performance -- Part 1: General description
- [29] ISO 3529-1:1981 Vacuum technology — Vocabulary — Part 1: General terms
- [30] ISO 2861:2013 Vacuum technology -- Dimensions of clamped-type quick-release couplings

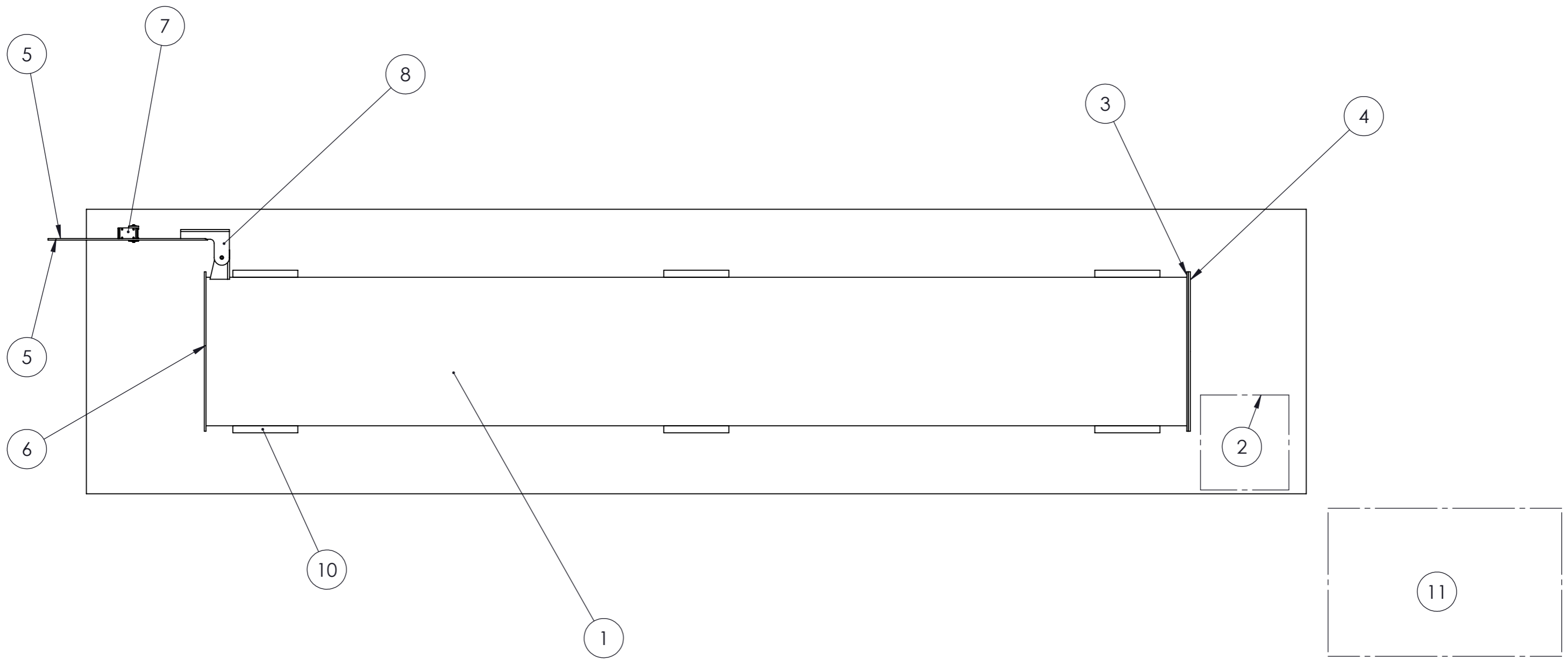
ANEXO I: PLANOS

Objetivo del documento

El objetivo del documento anexo *Planos* es servir como complemento a la Memoria de este proyecto y facilitar la comprensión de este. Para ello, los planos irán de lo general al detalle y definirán completamente todas las piezas que deban ser fabricadas para este proyecto en particular. Todos los planos se han realizado en formato de hoja A3 y siguiendo el sistema europeo de vistas.

Estructura del documento (índice de planos)

1. Hyper-Tube (Plano en planta de la parcela).....	1
2. Brida 25 mm	2
3. Compuerta fija 25mm	2
4. Compuerta móvil 20mm	3
5. Brida 20 mm Alojamiento Rectangular	3
6. Sistema de apertura de la puerta móvil.....	
1. Dibujo de Subconjunto: Plano planta radio apertura	4
2. Pieza Plegado Soporte Rueda.....	5
3. Dibujo de Subconjunto: Conjunto Bisagra	6
i. Bisagra Plegado Tubo	7
ii. Bisagra Plegado Puerta	8
iii. Cilindro Pasador Roscado.....	9
iv. Cojinete con Valona	9
v. Cilindro Hueco Medio	9
vi. Cilindro Hueco Extremo	9
4. Asa de apertura	10



Nº ELEMENTO	NOMBRE PIEZA	CANTIDAD	MATERIAL
1	Tubo	1	Acero
2	Bomba de vacío	1	-
3	Brida P. Fija	1	Acero S355 JR
4	Puerta Fija	1	Acero S355 JR
5	Puerta Móvil	1	Acero S355 JR
6	Brida P. Móvil	1	Acero S355 JR
7	Soporte Rueda	1	Acero
8	Bisagra	1	Conjunto de piezas
9	Asa de apertura	1	Conjunto de piezas
10	Apoyo Tubo	3	Hormigón Armado
11	Toma a red eléctrica	1	-

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIEROS INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto: Diseño de sistemas de vacío para tubo de pruebas (Hyper-Tube) de Hyperloop UPV

Plano: Hyper-Tube (distribución en planta)

Fecha: Junio 2019

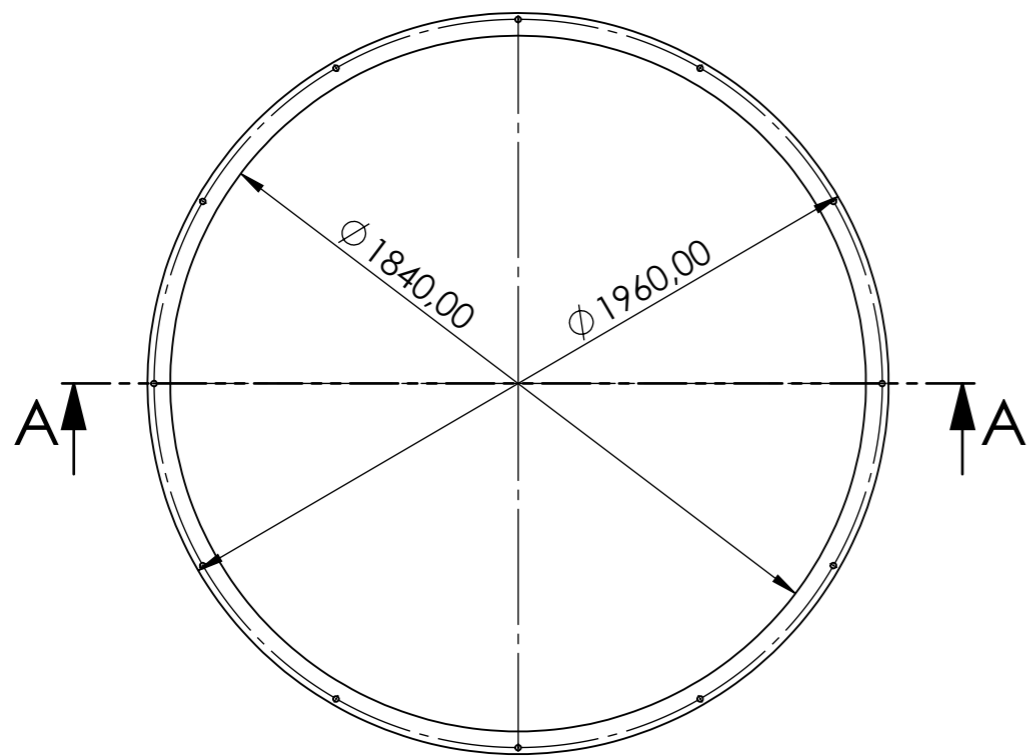
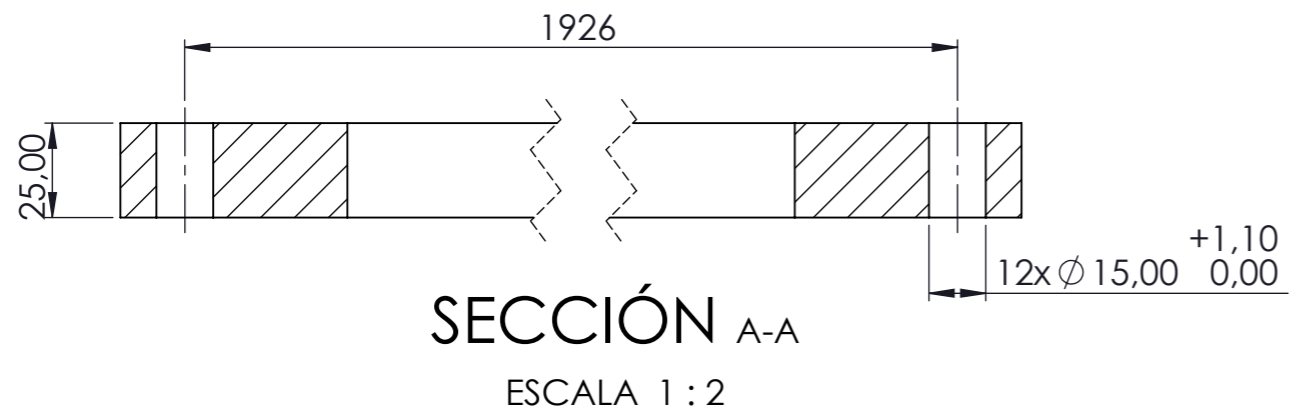
Nº Plano:

Autor: Alberto Martínez Higuera

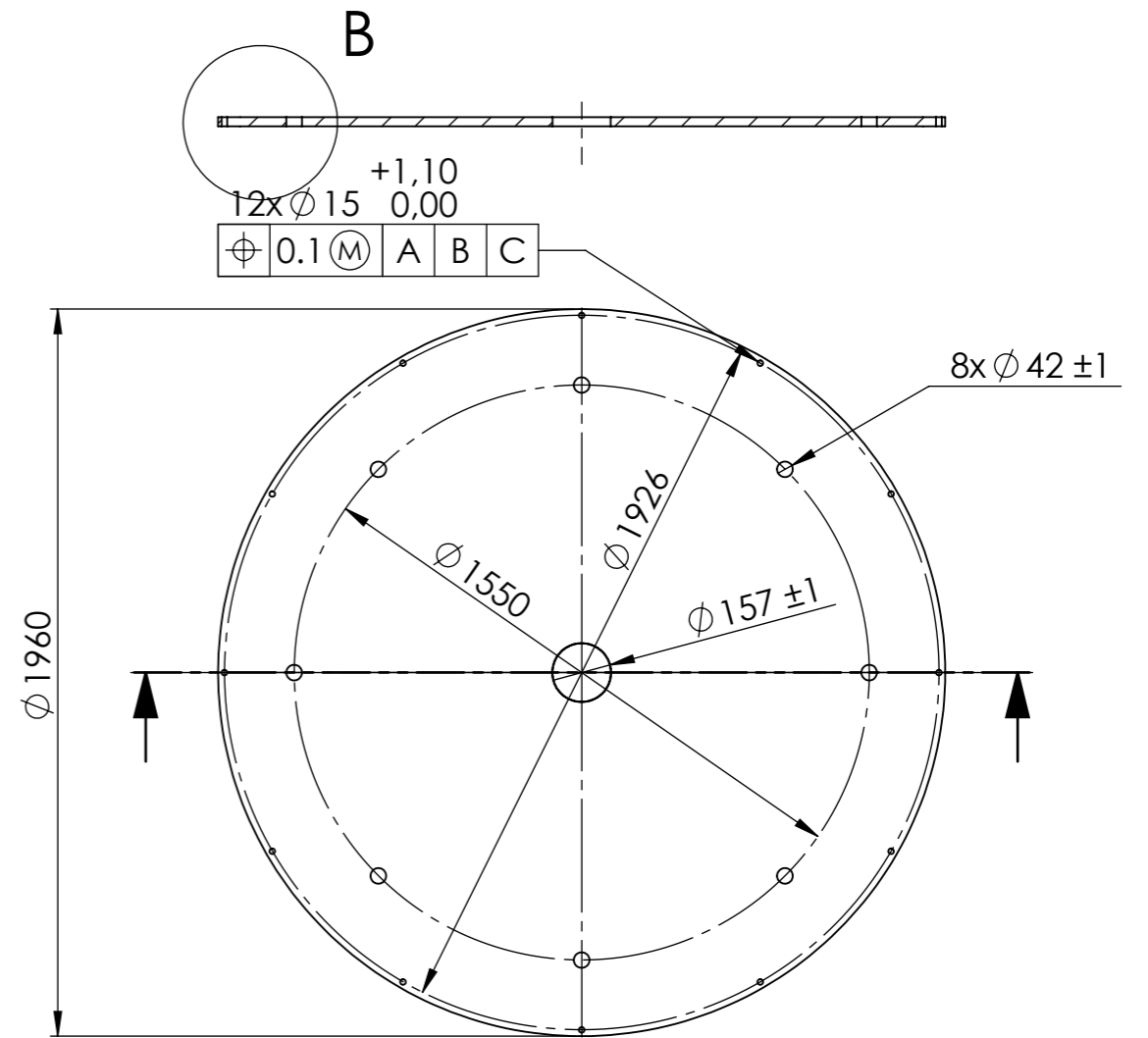
Escala: 1:50

1

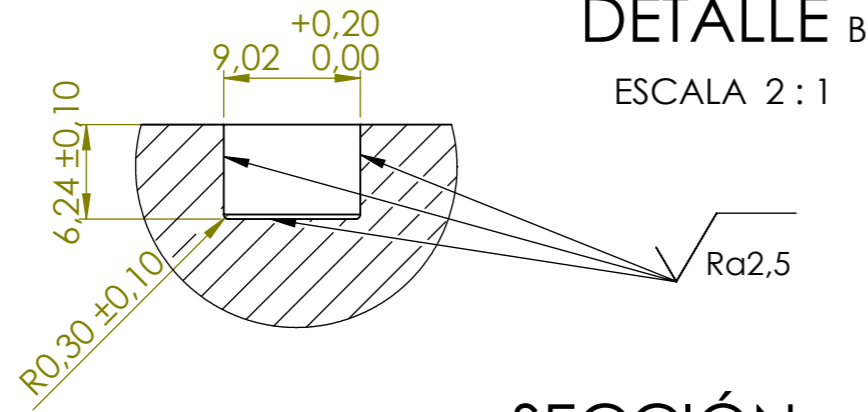
3



4

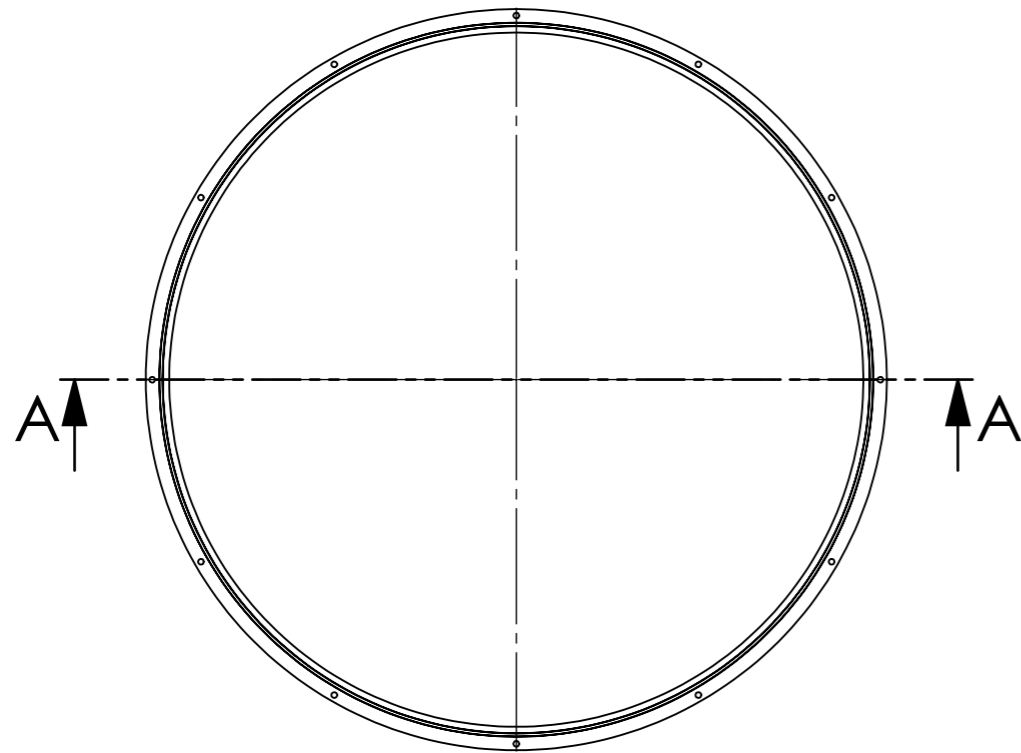
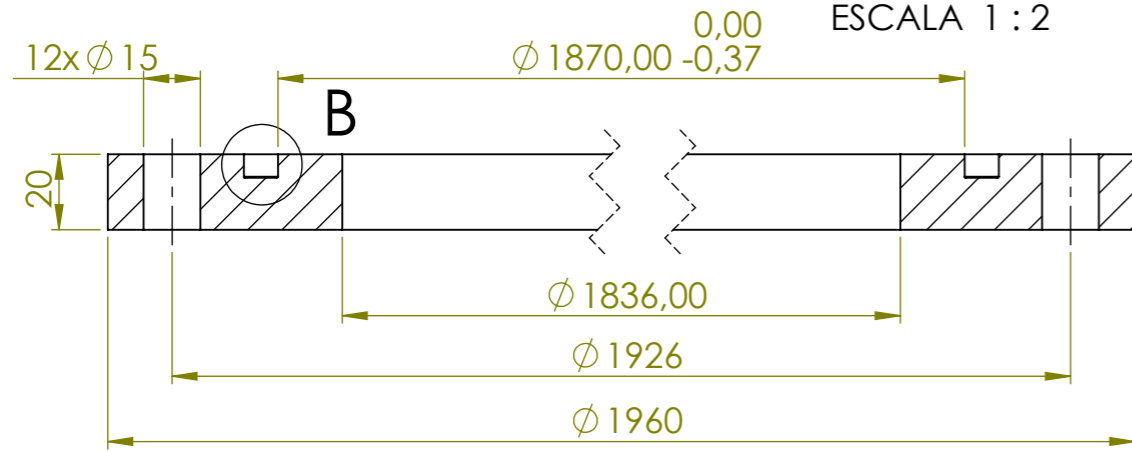


6



SECCIÓN A-A

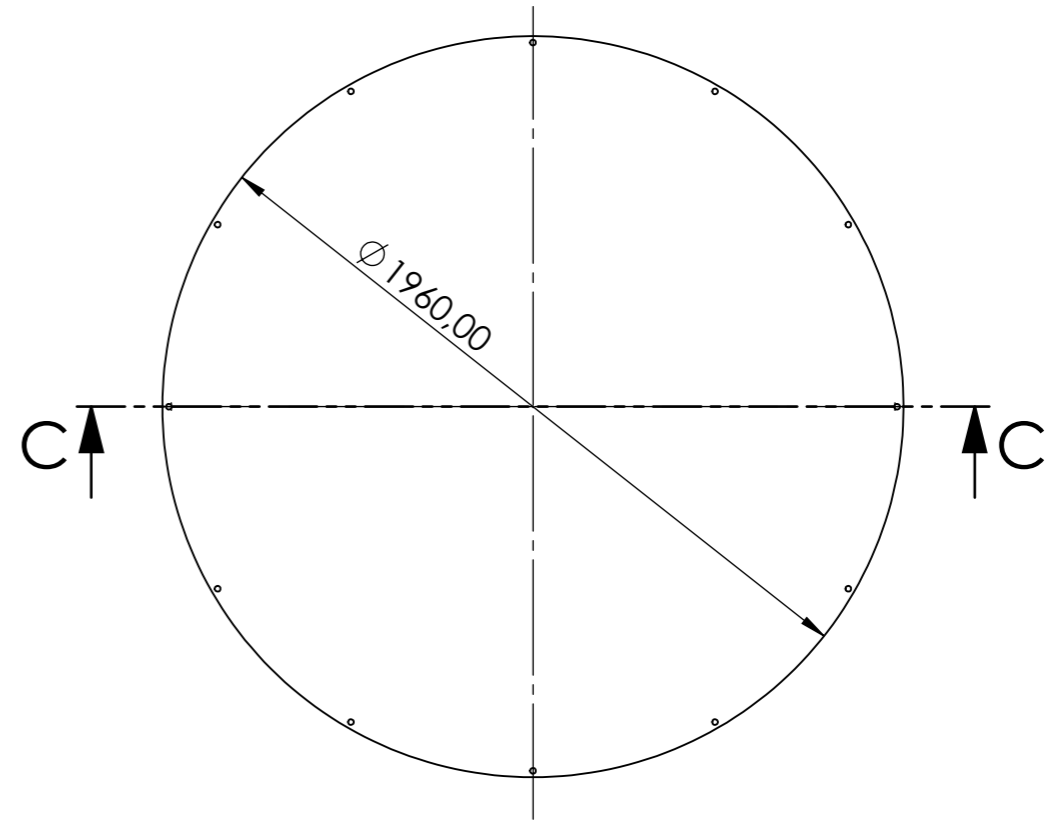
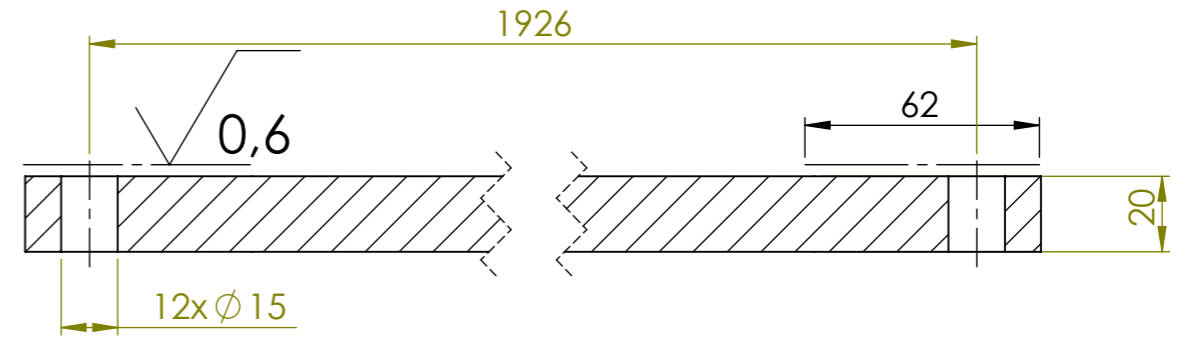
ESCALA 1:2

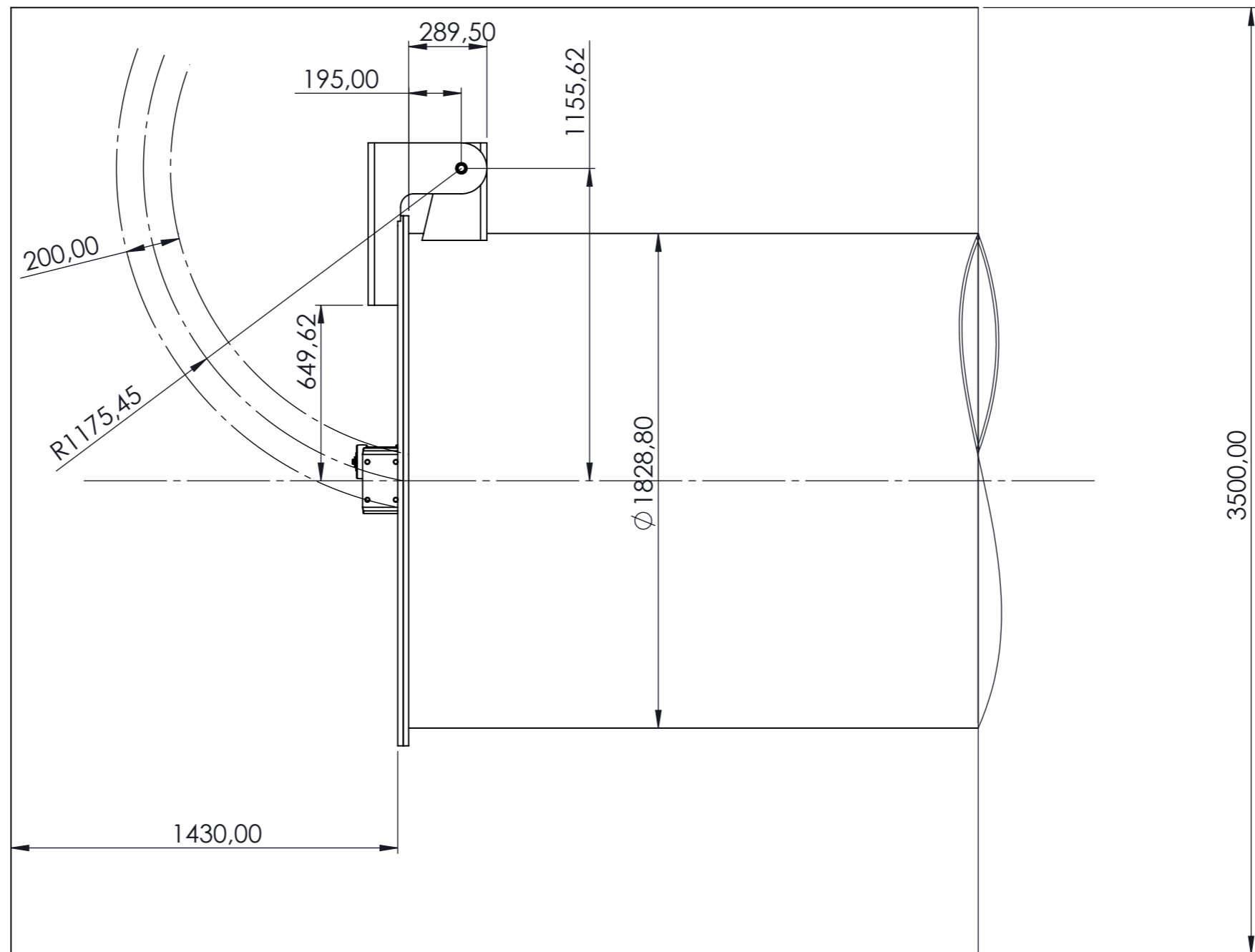


5

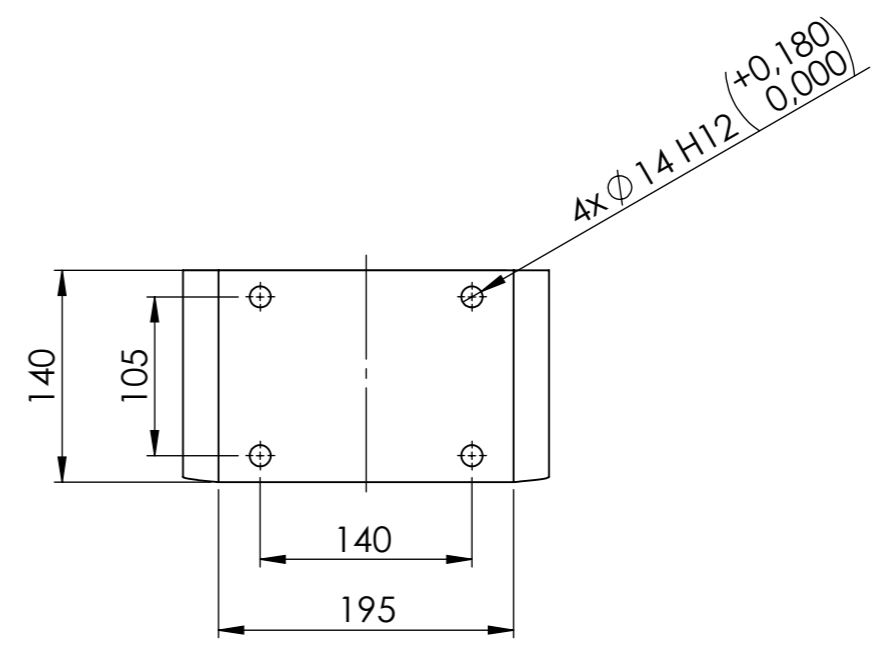
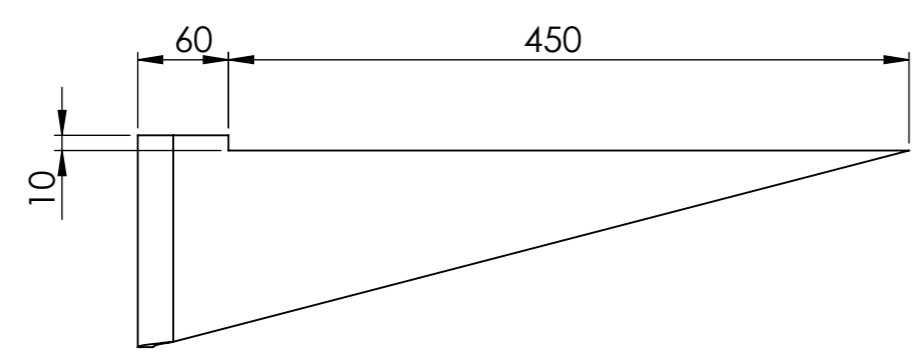
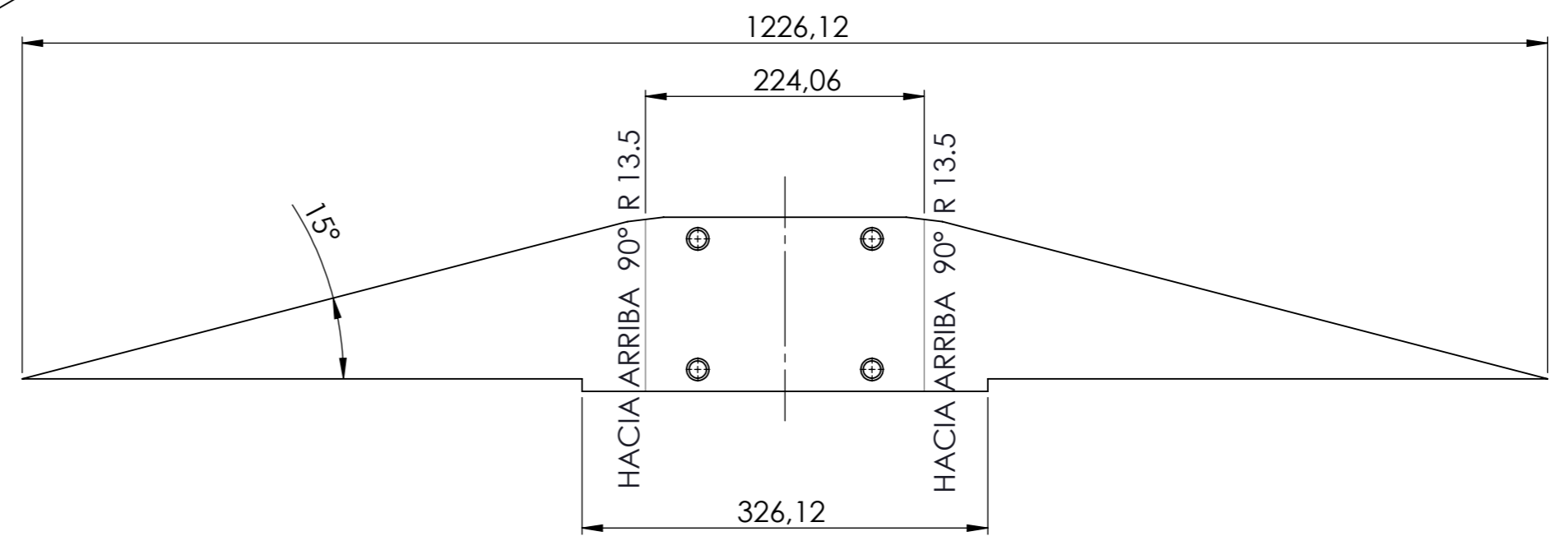
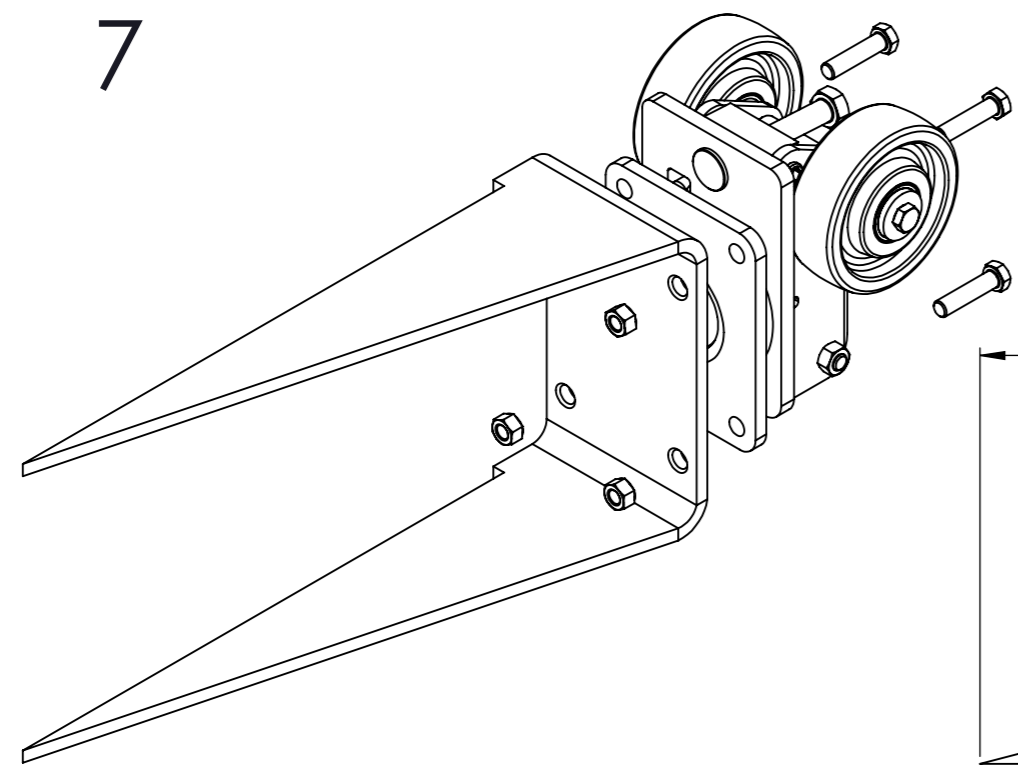
SECCIÓN C-C

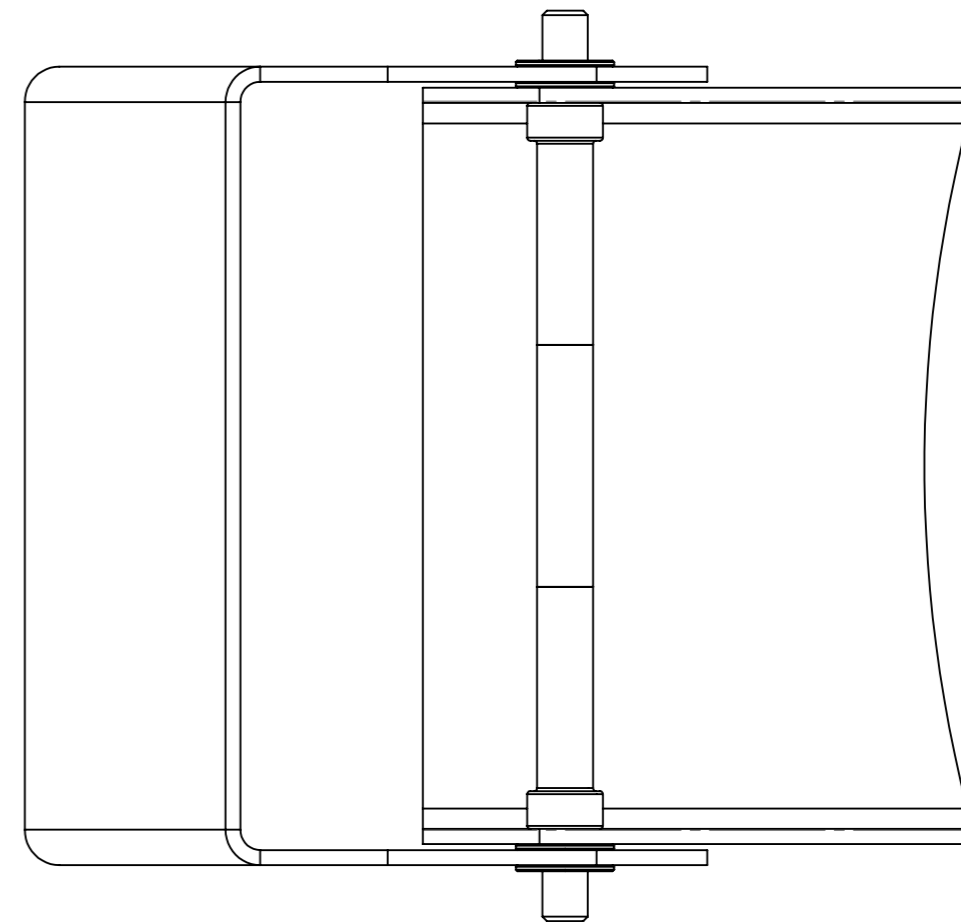
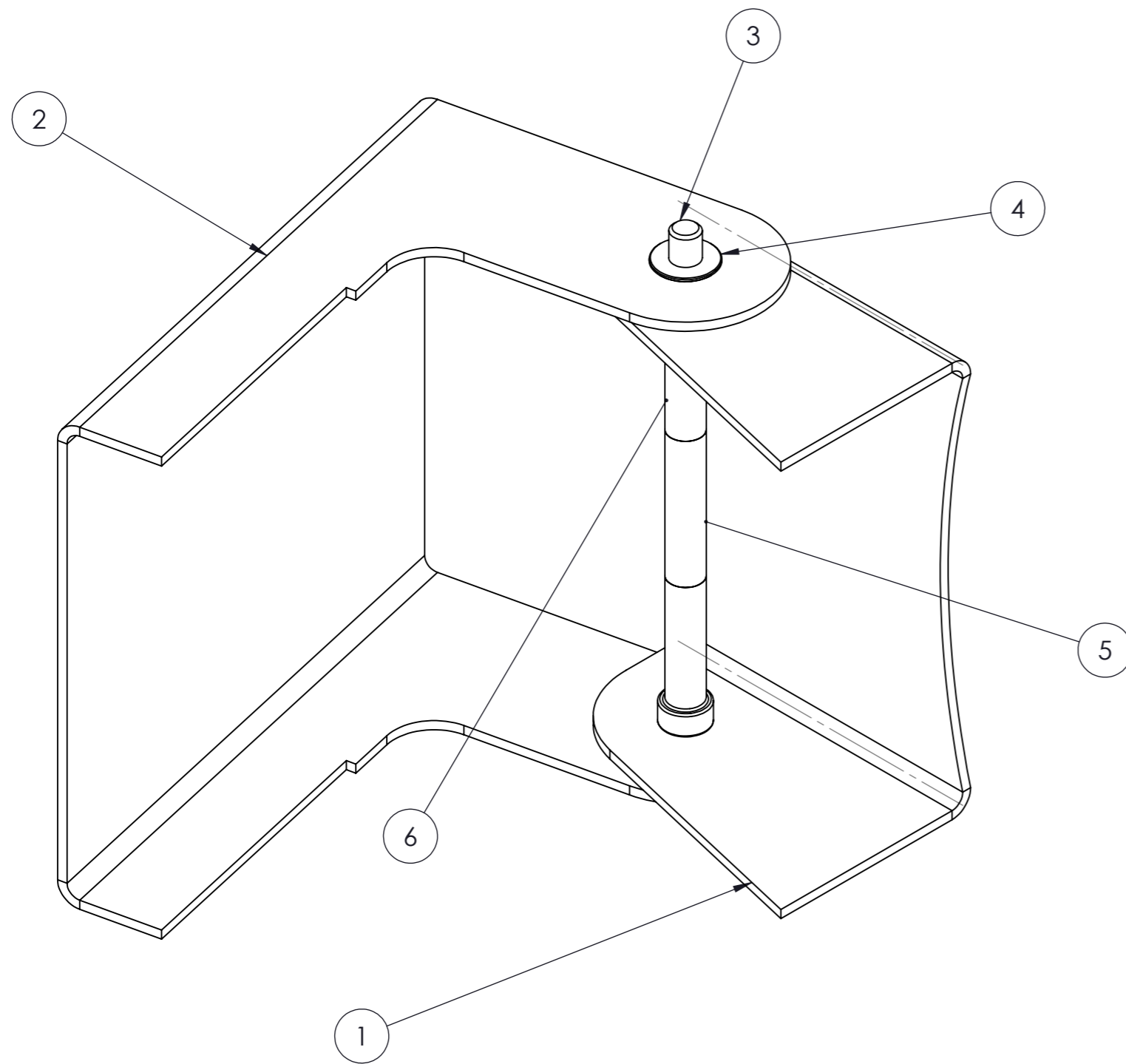
ESCALA 1:2





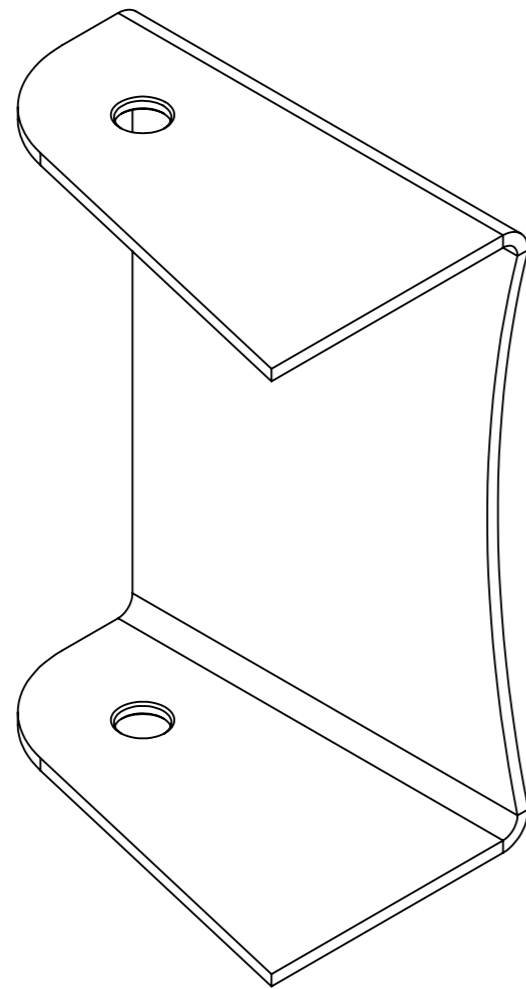
7



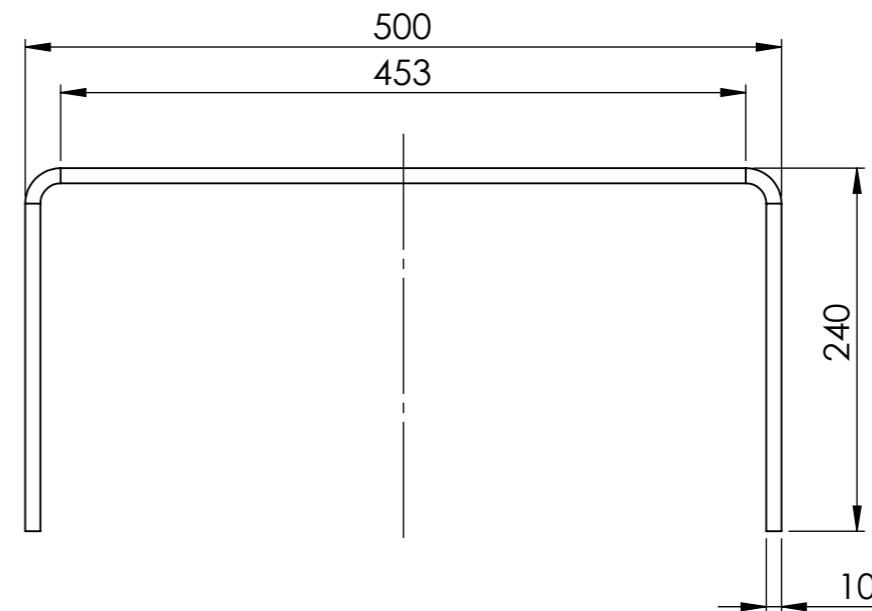
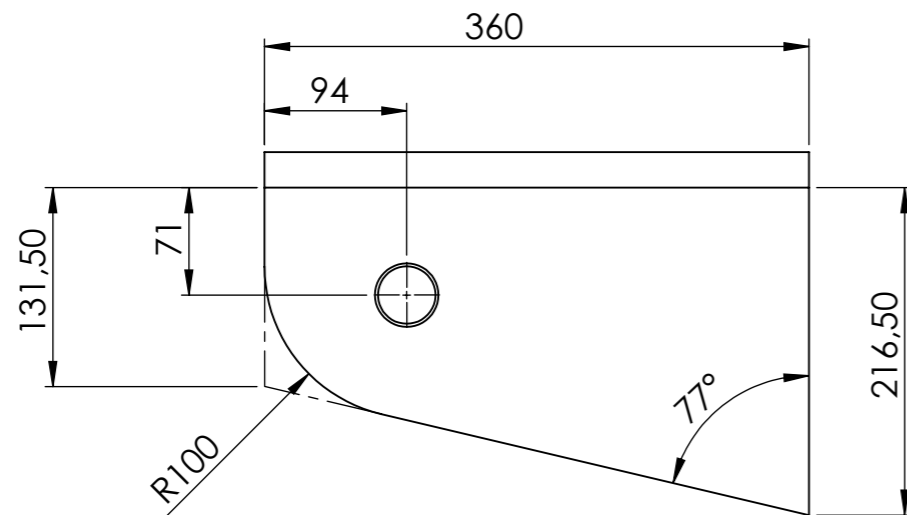
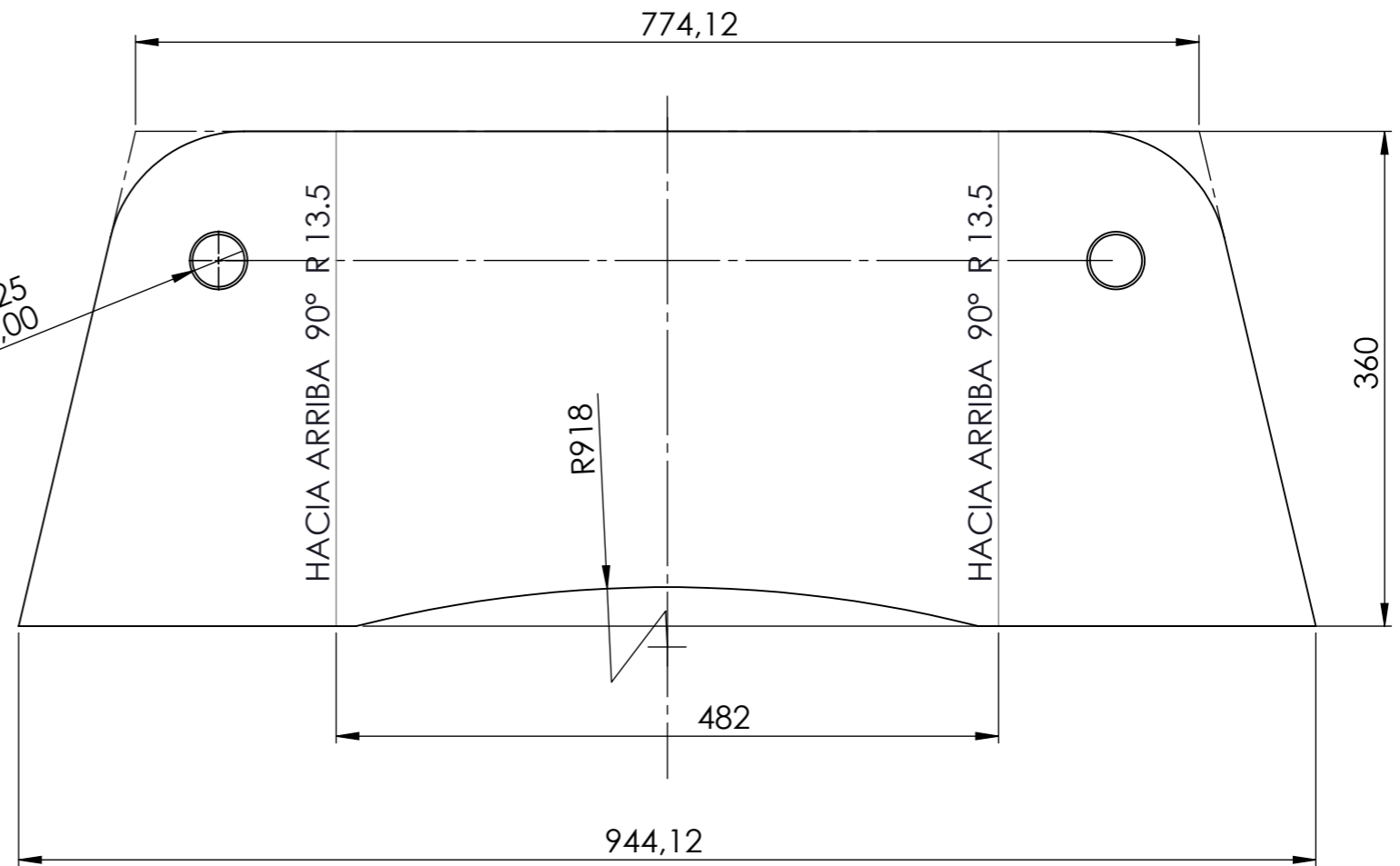


N.º DE ELEMENTO	NOMBRE PIEZA	MATERIAL	CANTIDAD
1	Bisagra Plegado Tubo	Acero S275 JR	1
2	Bisagra Plegado Puerta	Acero S275 JR	1
3	Cilindro Pasador Roscado	Acero	1
4	Cojinete con Valona	Bronce sinterizado	4
5	Cilindro Hueco Medio	Acero	1
6	Cilindro Hueco Extremo	Acero	2

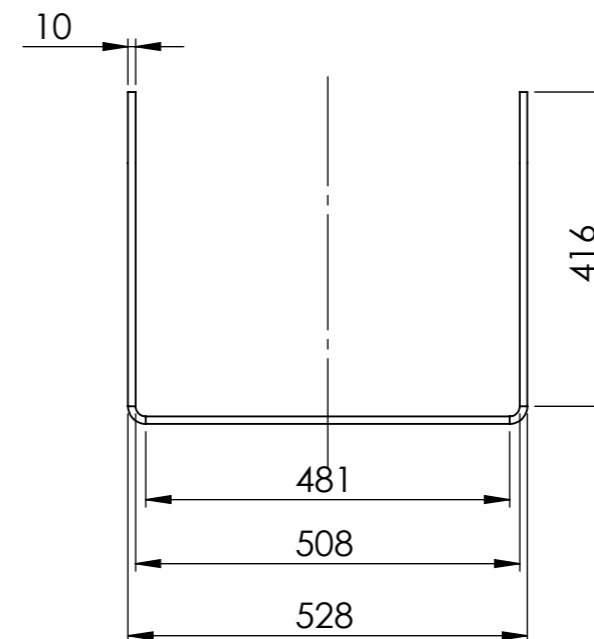
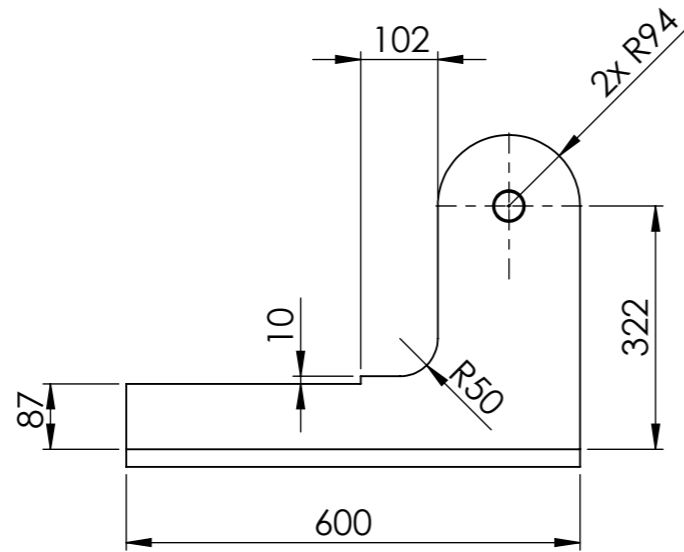
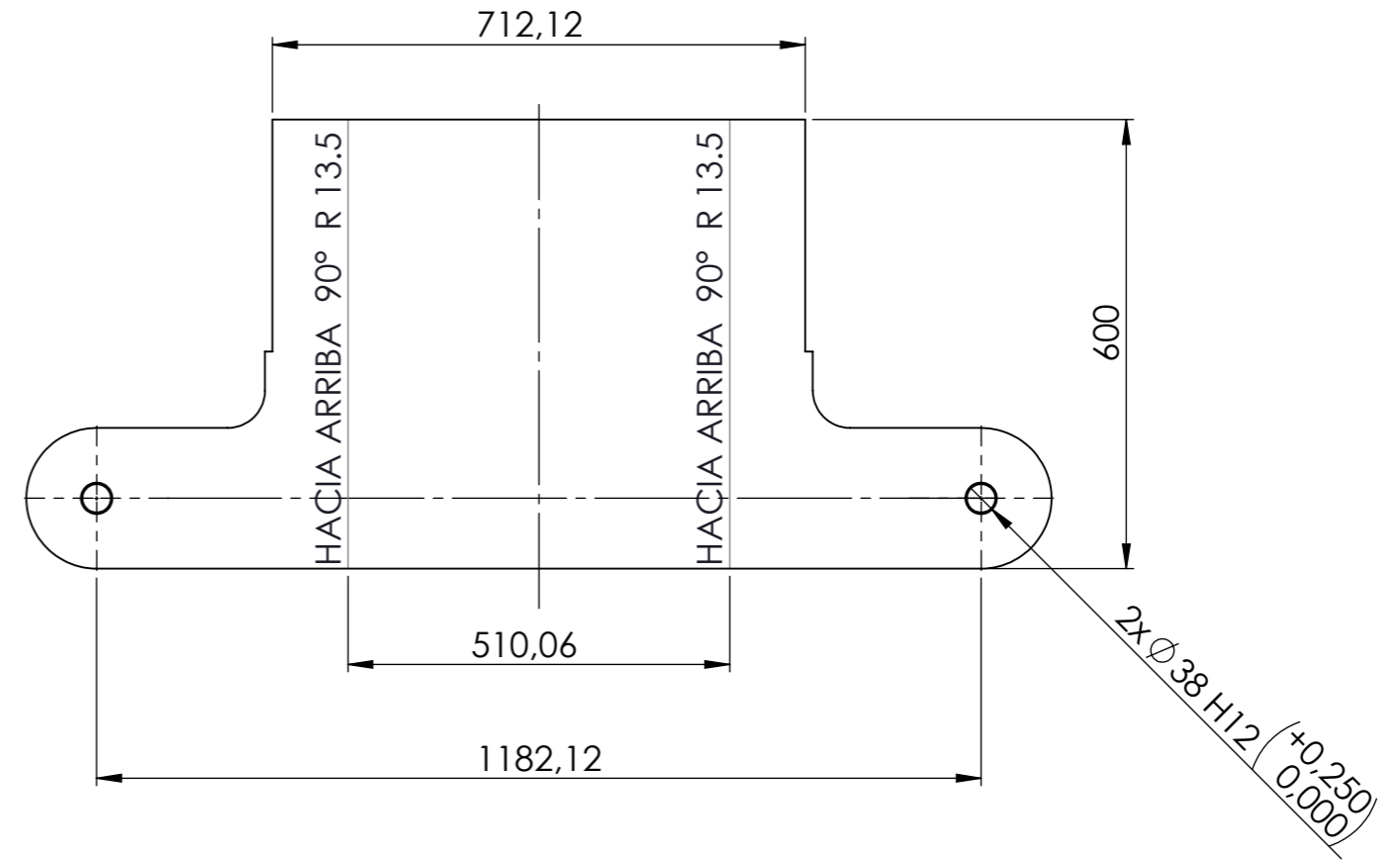
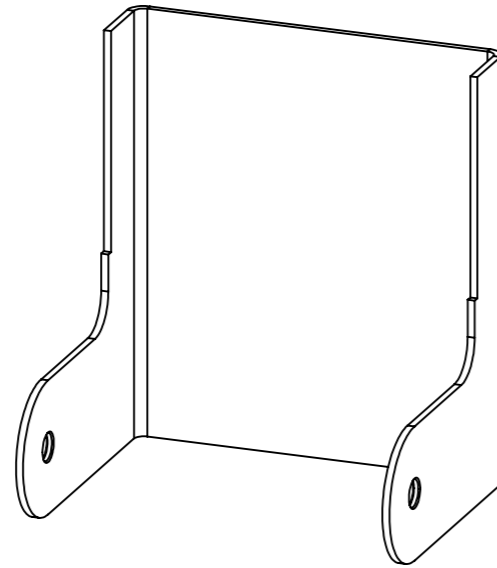
8.1.



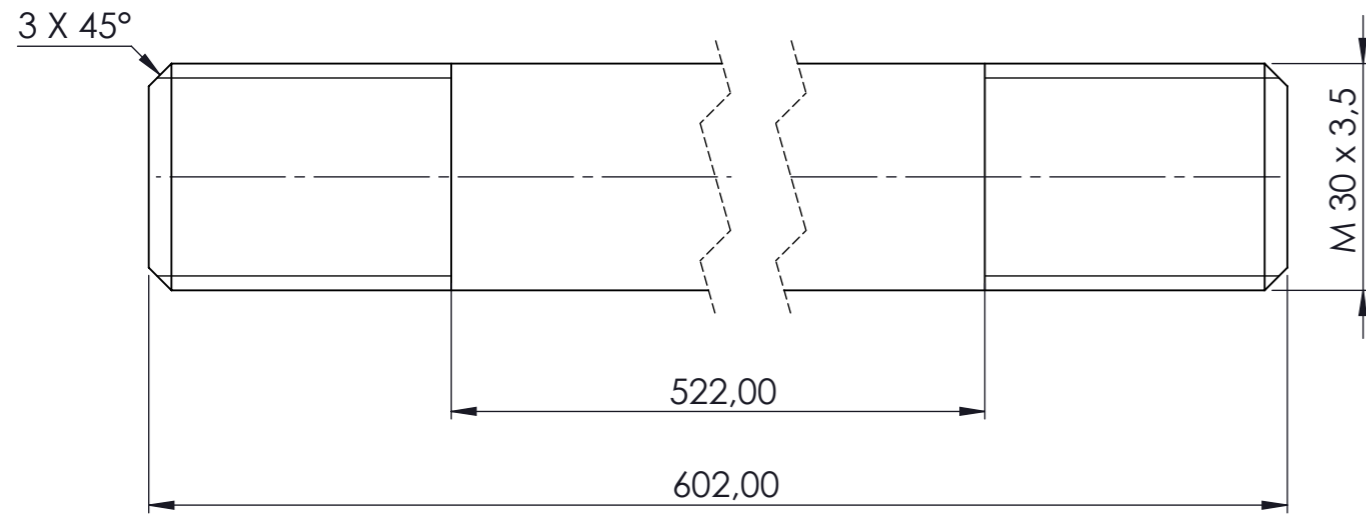
2x $\varnothing 38.00$ H12 +0,25
0,00



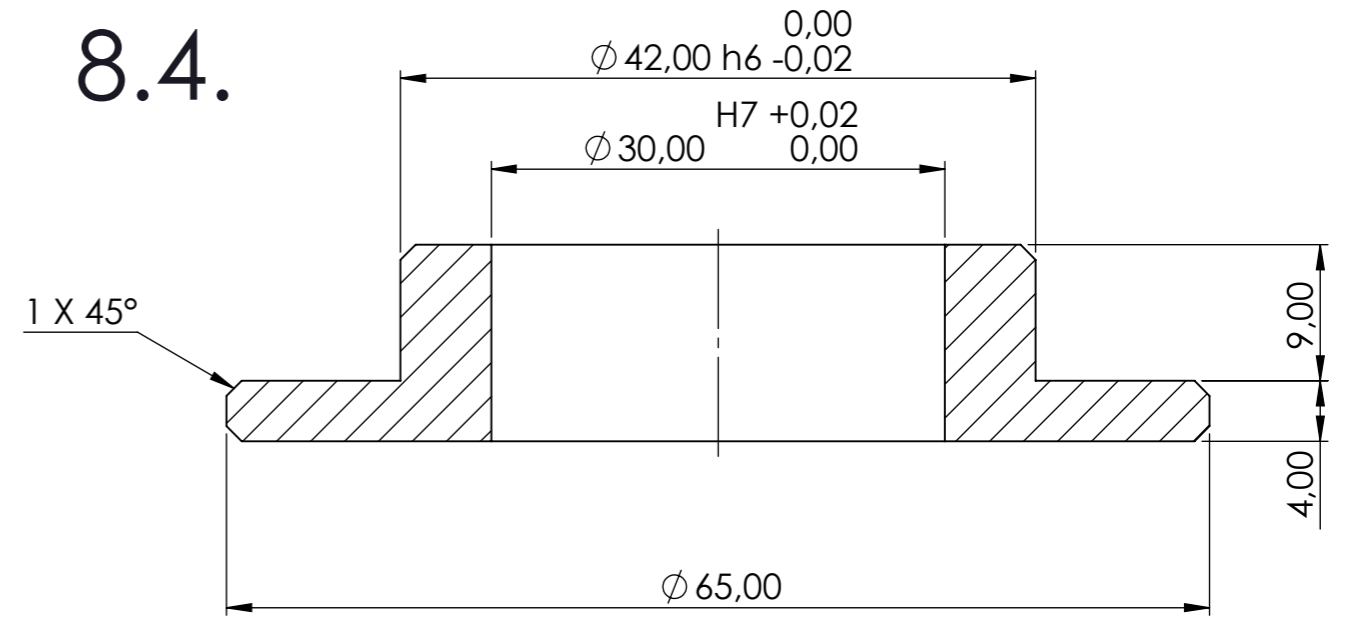
8.2.



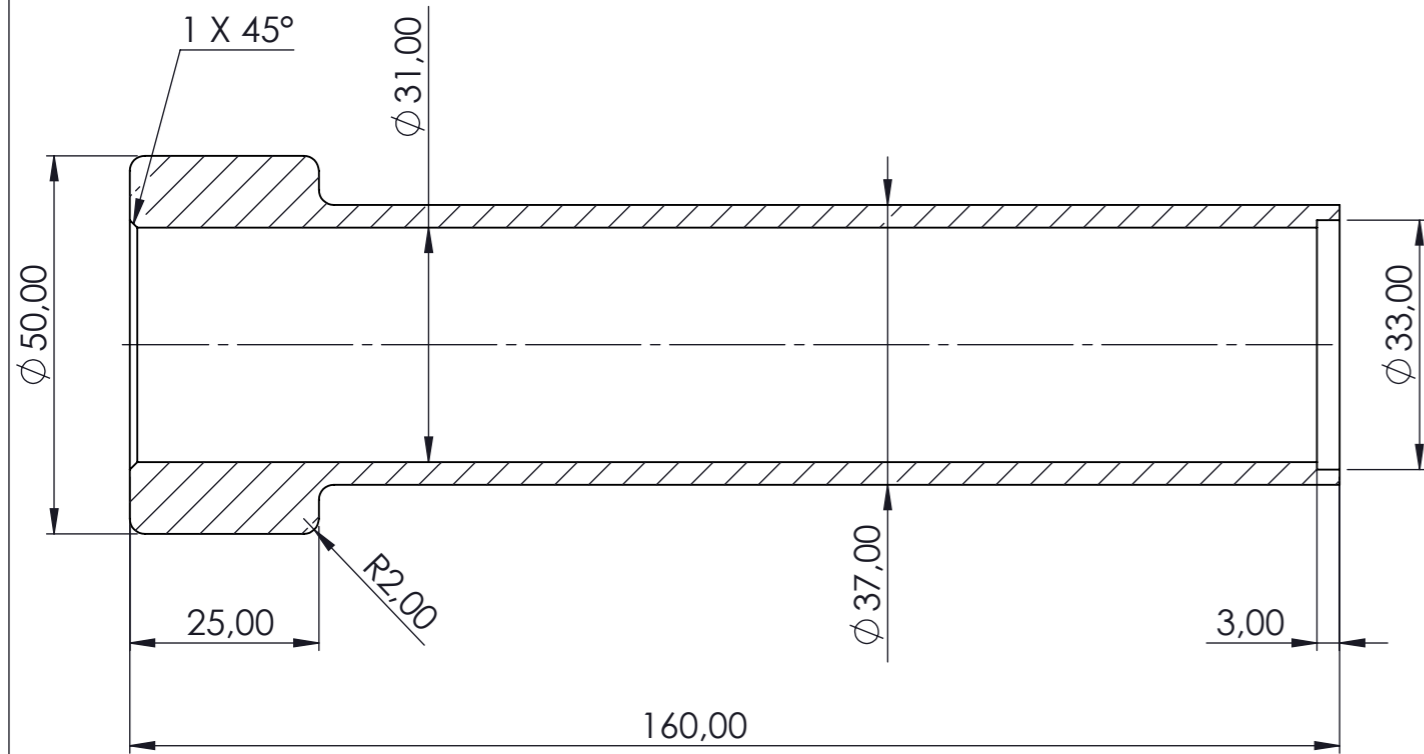
8.3.



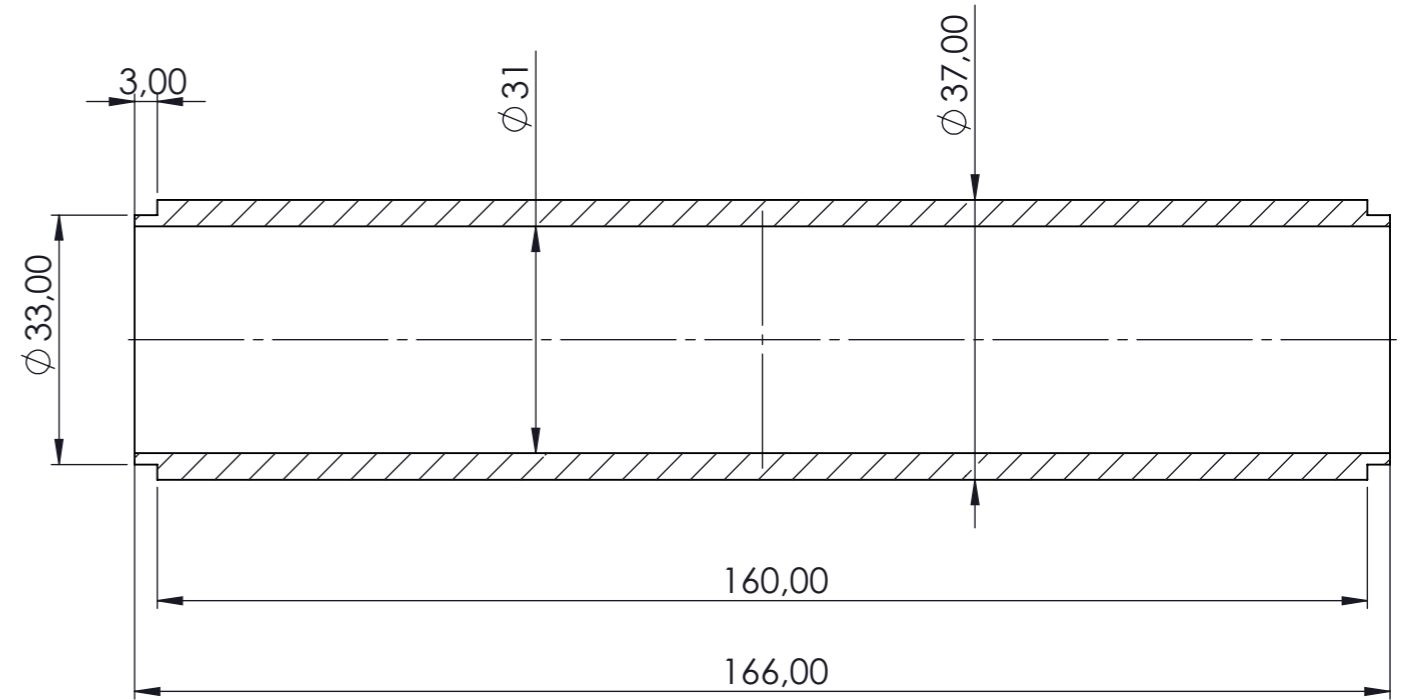
8.4.

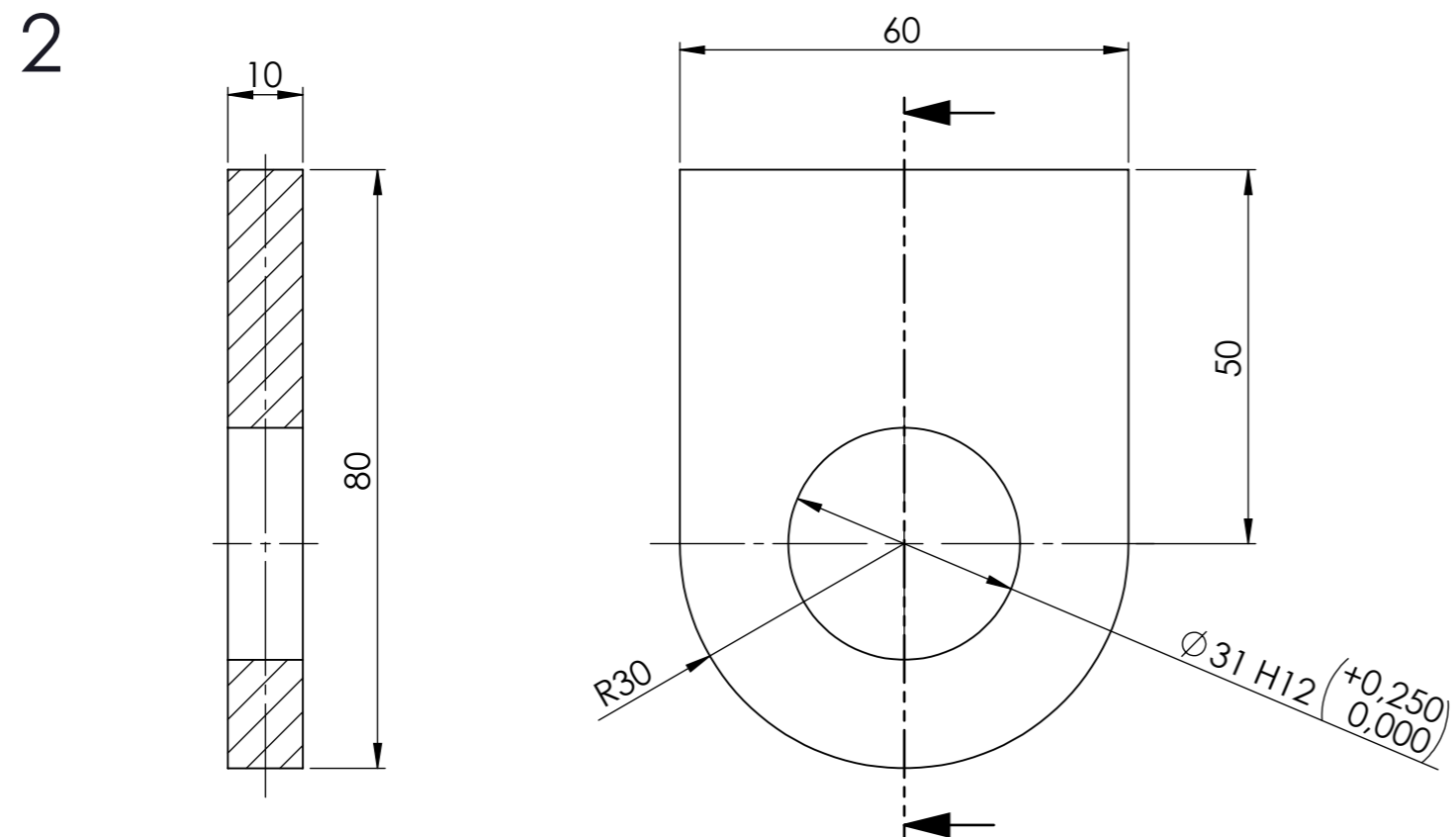
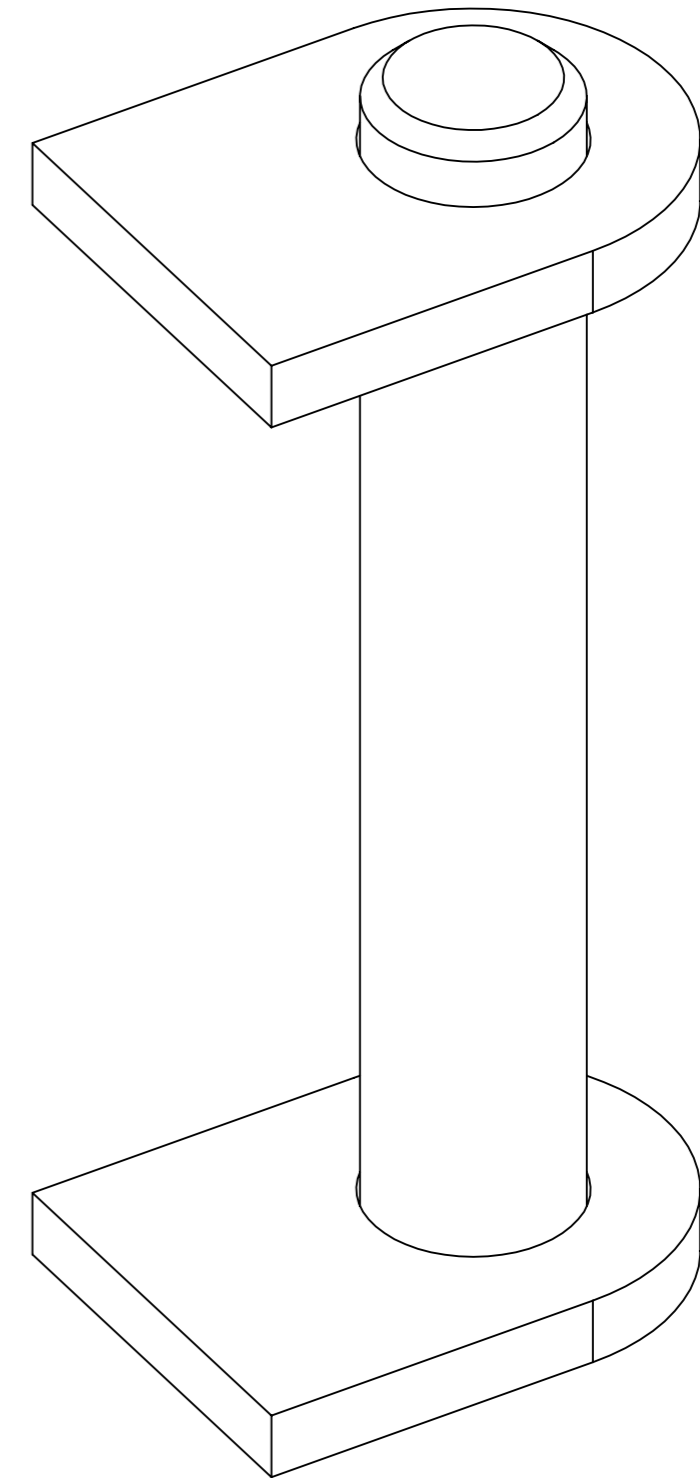
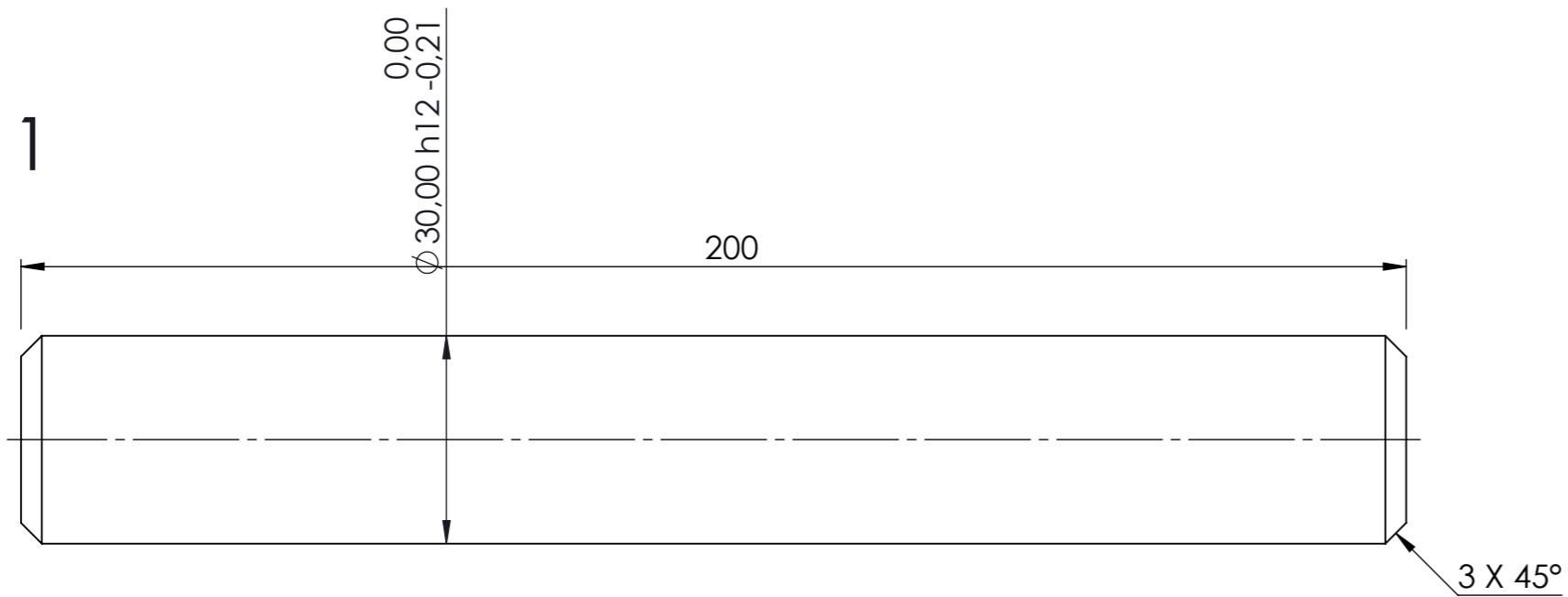


8.6.



8.5.





Nota: La unión de las 2 piezas 2 a la pieza 1 se realiza mediante soldadura

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Proyecto: Diseño de sistemas de vacío para tubo de pruebas (Hyper-Tube) de Hyperloop UPV

Plano: Dibujo de detalle: Asa de apertura

Autor: Alberto Martínez Higuera

Fecha: Junio 2019

Escala: 1:1

Nº Plano:

10

ANEXO II: PRESUPUESTO

Objetivo del documento

El objetivo del documento anexo *Presupuesto* es servir como complemento a la Memoria de este proyecto y facilitar la comprensión de este. En este documento se han realizado todos los cálculos de costes del proyecto para su posterior puesta en marcha. La mayoría de partes se conocen a ciencia cierta debido a la colaboración de Hyperloop UPV con la universidad y empresas colaboradoras, que son quienes han facilitado que este proyecto se pueda hacer realidad. La estructura del documento se muestra a continuación.

Estructura del documento (índice del presupuesto)

1. Cuadro de costes básicos	1
2. Cuadro de costes unitarios.....	3
3. Cuadro de costes descompuestos.....	4
4. Estado de mediciones y Presupuesto final.....	9

CUADRO DE PRECIOS BÁSICOS

MATERIALES			
Código	Unidad	Descripción	Precio Unitario
MA001	kg	Acero laminado S355JR	1,18 €
MA002	kg	Acero laminado S275JR	1,14 €
MA003	kg	Acero laminado S275JR con acabado granollado	1,50 €
MA004	m	Acero S275 en barra circular de diámetro 50 mm	8,00 €
MA005	kg	Acero 500s en barras	0,63 €
MA006		Barra de bronce sinterizado diámetro 70 mm y	
MA007	Ud	longitud 100mm	50,00 €
MA008	m3	Hormigón HA-30/B/20/lia fabricado en central	85,00 €
MA009	m	Bobina de hilo de acero al carbono de 1 mm	1,30 €
MA010	Ud	Tornillo D933 M 14 x 70 (A4-70INOX)	1,67 €
MA011	Ud	Tornillo D933 M 12 x 40 (A4-70INOX)	1,12 €
MA012	Ud	Tuerca D934 M 14 (A4-70INOX)	0,38 €
MA013	Ud	Tuerca D934 M 30 (A4-70INOX)	1,98 €
MA014	Ud	Tuerca D934 M 12 (A4-70INOX)	0,32 €
MA015	Ud	1007 Broca cil corta mango reducido HSS D338N 151007	12,19 €
MA016	Ud	Bombona de gas de protección mezcla Argón+CO2 (15% Argón)	93,45 €
MA017	Ud	Rueda de altura regulable resistente a más de 750 kg	400,20 €
MA018	Ud	Junta tórica 60 FPM	252,36 €
MA019	Ud	Sensor de presión PIEZOVAC PV 101	440,00 €
MA020	Ud	Ventana Metacrilato	363,15 €
MA021	Ud	Tapas metálicas	5,70 €
MA022	Ud	Aro de centraje DN 40	4,01 €
MA023	Ud	Abrazadera, DN 32/40 KF	3,32 €
MA024	Ud	Brida con tubo DN160ISO-K	125,10 €
MA025	Ud	Aro de centraje, DN160ISO-K Al, FPM	32,33 €
MA026	Ud	Grapas, DN63-250ISO-K, 19-27 mm, 4 unid.	20,18 €
MA027	Ud	Reducción, DN 40/16 KF Al	16,95 €
MA028	Ud	Abrazadera, DN 10/16 KF	3,38 €
MA029	Ud	Aro de centraje, DN16KF Al, FPM	3,30 €
MA030	Ud	Brida DN40KF	12,75 €
MA031	Ud	Pasamuros de corriente DN16 9 pines	224,40 €
MA032	Ud	Conector pasamuros lado vacío	90,45 €
MA033	Ud	Conector pasamuros lado atmosférico	103,35 €
MA034	m	Manguera trifásica 5 hilos x 1,5 mm2	1,54 €
MA035	Ud	Contactador	28,00 €
MA036	Ud	Cuadro eléctrico con pulsadores	45,00 €
MA037	Ud	Guardamotor	36,00 €
MA038	m	Tira LED RGB de Alto Voltaje (60 leds/m)	1,98 €
MA039	m	Cable Radiante para comunicación	2,50 €

MANO DE OBRA

Código	Unidad	Descripción	Precio Unitario
MO001	h	Graduado en Ingeniería en Tecnologías Industriales	17,00 €
MO002	h	Técnico especializado corte láser	16,16 €
MO003	h	Técnico de mecanizados	16,58 €
MO004	h	Técnico especializado corte plasma	16,10 €
MO005	h	Ayudante de taller	14,10 €
MO006	h	Soldador/calderero	18,00 €
MO007	h	Ayudante de soldadura	13,00 €
MO008	h	Oficial 1º estructurista	15,77 €
MO009	h	Ayudante estructurista	13,63 €
MO010	h	Oficial 1º electricista	16,58 €
MO011	h	Ayudante electricista	13,18 €

EQUIPO Y MAQUINARIA

Código	Unidad	Descripción	Precio Unitario
MQ001	h	Centro de mecanizado	55,00 €
MQ002	h	Equipo de corte láser especializado	30,00 €
MQ003	h	Equipo de corte plasma especializado	25,00 €
MQ004	h	Equipo de plegado	10,00 €
MQ005	h	Perforadora de hormigón	5,00 €
MQ006	dia	Carretilla elevadora Fenwick	75,00 €
MQ007	dia	Alquiler equipo de soldadura MIG/MAG	35,00 €
MQ008	ud	Taladro 500 W para reparar error en agujeros durante el montaje	35,00 €
MQ010	h	Equipo de soldadura de cables	5,00 €

SOFTWARE UTILIZADO

Código	Unidad	Descripción	Precio Unitario
SO001	año	Ansys Workbench	6.000,00 €
SO002	año	Solidworks PDM Professional	4.500,00 €
SO003	año	Solidworks Premium	13.000,00 €

CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS

UNIDADES DE OBRA			
Código	Unidad	Descripción	Precio Unitario
U001	Ud	Diseño de piezas y planeación del proyecto	3.997,55 €
U002	Ud	Fabricación puerta y brida de apoyo de acero S355JR de 20 mm de espesor	1.529,04 €
U003	Ud	Fabricación puerta y brida de apoyo de acero S355JR de 25 mm de espesor	1.076,80 €
U004	Ud	Fabricación de piezas de la estructura por corte láser+plegado	83,43 €
U005	Ud	Mecanizado de piezas para el sistema de movimiento de la compuerta móvil	246,50 €
U006	Ud	Preparación del suelo para el apoyo de la rueda	914,98 €
U007	Ud	Instalación y soldadura de piezas de la estructura	1.799,64 €
U008	Ud	Instalación de los componentes del sistema de vacío	2.105,06 €
U009	Ud	Instalación eléctrica de la cámara de vacío	390,09 €

CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS

UO 01 mes Diseño de piezas y planeación del proyecto

Tiempo dedicado al diseño de piezas para el proyecto utilizando el programa Solidworks, selección de componentes comerciales, simulación de la estructura mediante el software Ansys Workbench y contacto con empresas para la gestión y planeación del proyecto.

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio	
				Unitario	Importe
1		Software utilizado			
	año	Ansys Workbench	0,0833	6.000 €	499,80 €
	año	Solidworks PDM Proffesional	0,0833	4.500 €	374,85 €
	año	Solidworks Educational	0,0833	- €	- €
	año	Solidworks Premium	0,0833	13.000 €	1.082,90 €
		Subtotal software:			1.957,55 €
2		Mano de obra			
		Graduado en Ingeniería en Tecnologías			
	h	Industriales	120	17,00 €	2.040,00 €
		Subtotal mano de obra:			2.040,00 €
		Costes directos:			3.997,55 €

UO 02 Ud Fabricación puerta y brida de apoyo de acero S355JR de 20 mm de espesor

Fabricación de la compuerta y la brida de la parte móvil de la estructura mediante el corte láser de una chapa de acero S355JR de 20 mm de espesor y la posterior mecanización del alojamiento de la junta en la brida. Ambas piezas se someten a un proceso de fresado posterior para conseguir un

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio	
				Unitario	Importe
1		Materiales			
	kg	Acero laminado S355JR en chapa de 2x2x0,02 m	600	1,18 €	708,00 €
		Subtotal materiales:			708,00 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Centro de mecanizado	6	55,00 €	330,00 €
	h	Equipo de corte láser especializado	6	30,00 €	180,00 €
		Subtotal equipo y maq:			510,00 €
3		Mano de obra			
	h	Técnico especializado corte láser	6	16,16 €	96,96 €
	h	Técnico de mecanizados	6	16,58 €	99,48 €
	h	Ayudante de taller	6	14,10 €	84,60 €
		Subtotal mano de obra:			281,04 €
4		Auxiliares			
	Ud	Transporte de las piezas en camión	0,5	60,00 €	30,00 €
		Subtotal auxiliares:			30,00 €
		Costes directos:			1.529,04 €

UO 03 Ud Fabricación puerta y brida de apoyo de acero S355JR de 25 mm de espesor

Fabricación de la compuerta y la brida de la parte fija de la estructura mediante el corte por plasma de una chapa de acero S355JR de 25 mm de espesor.

Cód.	Ud.	Descripción	Precio		Importe
			Rendimiento	Unitario	
1		Materiales			
	kg	Acero laminado S355JR en chapa de 2x2x0,025 metros	700	1,18 €	826,00 €
					Subtotal materiales: 826,00 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo de corte plasma especializado	4	25,00 €	100,00 €
					Subtotal equipo y maq: 100,00 €
3		Mano de obra			
	h	Técnico especializado corte plasma	4	16,10 €	64,40 €
	h	Ayudante de taller	4	14,10 €	56,40 €
					Subtotal mano de obra: 120,80 €
4		Auxiliares			
	Ud	Transporte de las piezas en camión	0,5	60,00 €	30,00 €
					Subtotal auxiliares: 30,00 €
					Costes directos: 1.076,80 €

UO 04 Ud Fabricación de piezas de la estructura por corte láser+plegado

Fabricación de 2 piezas de la bisagra y de la pieza de unión de la rueda a la puerta por corte láser de una chapa de acero S275JR y posterior plegado de la misma.

Cód.	Ud.	Descripción	Precio		Importe
			Rendimiento	Unitario	
1		Materiales			
	kg	Acero laminado S275JR en chapa de 10 milímetros de espesor	25	1,14 €	28,50 €
					Subtotal materiales: 28,50 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo de corte láser especializado	0,5	30,00 €	15,00 €
	h	Equipo de plegado	0,5	10,00 €	5,00 €
					Subtotal equipo y maq: 20,00 €
3		Mano de obra			
	h	Técnico especializado corte láser	0,5	16,16 €	8,08 €
	h	Ayudante de taller	0,5	14,10 €	7,05 €
					Subtotal mano de obra: 15,13 €
4		Auxiliares			
	Ud	Transporte de las piezas en camión	0,33	60,00 €	19,80 €
					Subtotal auxiliares: 19,80 €
					Costes directos: 83,43 €

UO 05 Ud Mecanizado de piezas para el sistema de movimiento de la compuerta móvil

Fabricación en centro de mecanizado de las piezas CilindroHueco, CilindroRoscado, las 3 piezas del asa de apertura en acero S275JR y fabricación de cojinetes de bronce sinterizado.

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
1		Materiales			
		Barra de bronce sinterizado diámetro 70			
	Ud	mm y longitud 100mm	1	50,00 €	50,00 €
	m	Acero S275 en barra de diámetro 50 mm	3	8,00 €	24,00 €
	kg	Acero S275 laminado chapa de 10 mm	1	1,14 €	1,14 €
		Subtotal materiales:			75,14 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Centro de mecanizado	2	55,00 €	110,00 €
		Subtotal equipo y maq:			110,00 €
3		Mano de obra			
	h	Técnico de mecanizados	2	16,58 €	33,16 €
	h	Ayudante de taller	2	14,10 €	28,20 €
		Subtotal mano de obra:			61,36 €
		Costes directos:			246,50 €

UO 06 Ud Preparación del suelo para el apoyo de la rueda

Instalación de una losa de hormigón HA-30/B/20/IIa armado con barras de acero 500s. Esta losa tiene soldada una pletina de acero granollado de 20 mm de espesor en forma de curva que sigue el recorrido de la rueda y está soldada a las barras del armado.

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
1		Materiales			
		Hormigón HA-30/B/20/IIa, fabricado en			
	m3	central	1,2	85,00 €	102,00 €
	kg	Acero 500s en barras	20	0,63 €	12,60 €
	kg	Acero laminado S275JR con acabado granollado	14	1,50 €	21,00 €
		Subtotal materiales:			135,60 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Perforadora de hormigón	24	5,00 €	120,00 €
		Subtotal equipo y maq:			120,00 €
3		Mano de obra			
	h	Soldador/calderero	2	18,00 €	36,00 €
	h	Ayudante de soldadura	2	13,00 €	26,00 €
	h	Oficial 1º estructurista	16	15,77 €	252,32 €
	h	Ayudante estructurista	24	13,63 €	327,12 €
		Subtotal mano de obra:			641,44 €
4		Medios auxiliares			
	%	Coste medios auxiliares	2	897,04 €	17,94 €
		Costes directos:			914,98 €

UO 07 Ud Instalación y soldadura de piezas de la estructura

Montaje y soldadura de ambas compuertas con sus respectivas bridas así como del sistema de bisagra y rueda utilizando equipo de soldadura MIG/MAG con conexión trifásica e hilo de acero al carbono de 1 mm. Se utiliza una máquina Fenwick para levantar objetos pesados.

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
1	Materiales				
	m	Bobina de hilo de acero al carbono de 1 mm	15	1,30 €	19,50 €
	Ud	Tornillo D933 M 14 x 70 (A4-70INOX)	24	1,67 €	40,08 €
	Ud	Tuerca D934 M 14 (A4-70INOX)	24	0,38 €	9,22 €
	Ud	Tuerca D934 M 30 (A4-70INOX)	2	1,98 €	3,96 €
	Ud	Tornillo D933 M 12 x 40 (A4-70INOX)	4	1,12 €	4,48 €
	Ud	Tuerca D934 M 12 (A4-70INOX)	4	0,32 €	1,28 €
	ud	Bombona de gas de protección mezcla Argón+CO2 (15% Argón)	1	93,45 €	93,45 €
	ud	Rueda de altura regulable resistente a más de 750 kg	1	400,20 €	400,20 €
	Ud	1007 Broca cil corta mango reducido HSS D338N 151007	1	12,19 €	12,19 €
Subtotal materiales:					584,36 €
2	Equipo y maquinaria				
	dia	Carretilla elevadora Fenwick	1	75,00 €	75,00 €
	dia	Alquiler equipo de soldadura Taladro 500 W para reparar error en	4	35,00 €	140,00 €
	ud	agujeros durante el montaje	1	35,00 €	35,00 €
Subtotal equipo y maquinaria:					250,00 €
3	Mano de obra				
	h	Soldador/calderero	30	18,00 €	540,00 €
	h	Ayudante de soldadura	30	13,00 €	390,00 €
Subtotal mano de obra:					930,00 €
4	Medios auxiliares				
	%	Coste medios auxiliares	2	1.764,36 €	35,29 €
Costes directos:					1.799,64 €

UO 08 Ud Instalación de los componentes del sistema de vacío

Instalación de todos los componentes que se unen a las bridas ISO K, las cuales se sueldan a la cámara. Estos incluyen la conexión de la bomba, la mirilla de metacrilato, el sensor de presión o el pasamuros eléctrico.

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
1	Materiales				
	Ud	Junta tórica 60 FPM	1	252,36 €	252,36 €
	Ud	Sensor de presión PIEZOVAC PV 101	1	440,00 €	440,00 €
	Ud	Ventana Metacrilato	1	363,15 €	363,15 €
	Ud	Tapas metálicas	8	5,70 €	45,60 €

Ud	Aro de centraxe DN 40	8	4,01 €	32,09 €
Ud	Abrazadera, DN 32/40 KF	8	3,32 €	26,52 €
Ud	Brida con tubo DN160ISO-K	1	125,10 €	125,10 €
Ud	Aro de centraxe, DN160ISO-K Al, FPM	1	32,33 €	32,33 €
Ud	Grapas, DN63-250ISO-K, 19-27 mm, 4 unid.	1	20,18 €	20,18 €
Ud	Reducción, DN 40/16 KF Al	2	16,95 €	33,90 €
Ud	Abrazadera, DN 10/16 KF	2	3,38 €	6,76 €
Ud	Aro de centraxe, DN16KF Al, FPM	2	3,30 €	6,60 €
Ud	Brida DN40KF	8	12,75 €	102,00 €
Ud	Pasamuros de corriente DN16 9 pines	1	224,40 €	224,40 €
Ud	Conector pasamuros lado vacío	1	90,45 €	90,45 €
Ud	Conector pasamuros lado atmosférico	1	103,35 €	103,35 €
Subtotal materiales:				1.904,79 €

2 Equipo y maquinaria

dia	Alquiler equipo de soldadura MIG/MAG	1	35,00 €	35,00 €
Subtotal equipo y maq:				35,00 €

3 Mano de obra

h	Soldador/calderero	4	18,00 €	72,00 €
h	Ayudante de soldadura	4	13,00 €	52,00 €
Subtotal mano de obra:				124,00 €

4 Medios auxiliares

%	Coste medios auxiliares	2	2.063,79 €	41,28 €
---	-------------------------	---	------------	---------

Costes directos: 2.105,06 €

UO 09 Ud Instalación eléctrica de la cámara de vacío

Instalación de la conexión eléctrica de la bomba de vacío a la red que incluye un cuadro con pulsador y seta de emergencia para el accionamiento y un contactor y guardamor para la etapa de potencia. Instalación de la iluminación interior de la cámara mediante tira de leds y del cable

Cód.	Ud.	Descripción	Rendimiento	Precio Unitario	Importe
1		Materiales			
	m	Manguera trifásica 5 hilos x 1,5 mm2	10	1,54 €	15,40 €
	Ud	Contactor	1	28,00 €	28,00 €
	Ud	Cuadro eléctrico con pulsadores	1	45,00 €	45,00 €
	Ud	Guardamotor	1	36,00 €	36,00 €
	m	Tira LED RGB de Alto Voltaje (60 leds/m)	50	1,98 €	99,00 €
	m	Cable Radiante para comunicación	10	2,50 €	25,00 €
Subtotal materiales:					248,40 €
2		Equipo y maquinaria			
	h	Equipo de soldadura de cables	3	5,00 €	15,00 €
Subtotal equipo y maq:					15,00 €
3		Mano de obra			
	h	Oficial 1º electricista	4	16,58 €	66,32 €
	h	Ayudante electricista	4	13,18 €	52,72 €
Subtotal mano de obra:					119,04 €
4		Costes directos complementarios			
	%	Costes directos complementarios	2	382,44 €	7,65 €
Costes directos:					390,09 €

ESTADO DE MEDICIONES Y PRESUPUESTO FINAL

Código	Ud	Descripción	Rto	Precio Unitario	Importe
U001	mes	Diseño de piezas y planeación del proyecto	3	3.997,55 €	11.992,65 €
U002	Ud	Fabricación puerta y brida de apoyo de acero S355JR de 20 mm de espesor	2	1.529,04 €	3.058,08 €
U003	Ud	Fabricación puerta y brida de apoyo de acero S355JR de 25 mm de espesor	2	1.076,80 €	2.153,60 €
U004	Ud	Fabricación de piezas de la estructura por corte láser+plegado	3	83,43 €	250,29 €
U005	Ud	Mecanizado de piezas para el sistema de movimiento de la compuerta móvil	1	246,50 €	246,50 €
U006	Ud	Preparación del suelo para el apoyo de la rueda	1	914,98 €	914,98 €
U007	Ud	Instalación y soldadura de piezas de la estructura	1	1.799,64 €	1.799,64 €
U008	Ud	Instalación de los componentes del sistema de vacío	1	2.105,06 €	2.105,06 €
U009	Ud	Instalación eléctrica de la cámara de vacío	1	390,09 €	390,09 €
%	Costes Indirectos		2	22.910,90 €	458,22 €
Presupuesto de Ejecución Material (PEM)					23.369,11 €
%	Gastos Generales		13	23.369,11 €	3.037,98 €
%	Beneficio Industrial		6	23.369,11 €	1.402,15 €
Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC)					27.809,24 €
%	Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA)		21	27.809,24 €	5.839,94 €
Presupuesto de Inversión					33.649,19 €

El presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de TREINTA Y TRES MIL SEISCIENTOS CUARENTA Y NUEVE euros con DIECINUEVE céntimos