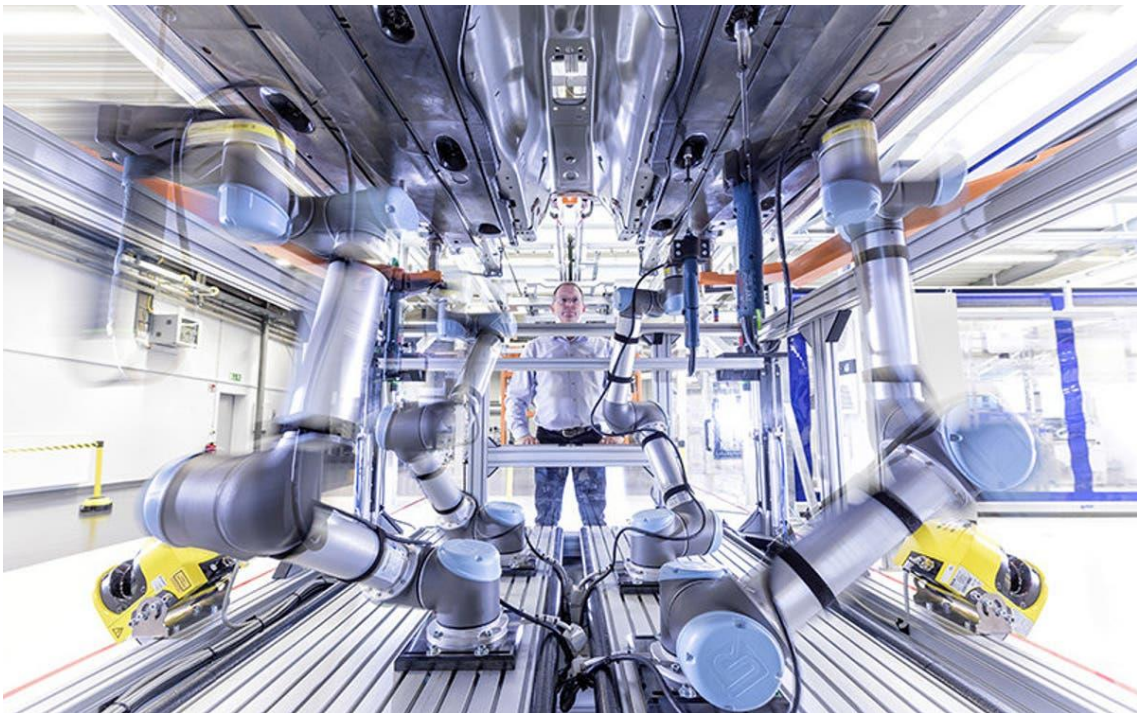


TRABAJO FIN DE GRADO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Escuela de Ingeniería de Vitoria-Gasteiz UPV/EHU

Año académico 2021/2022

Análisis, diseño y montaje de brazo robot para atornillar
inferiormente vehículos



Autor: Cárdenas Grados, Yoel

Directora EUI: Cantera López de Silanes, María Asunción

Fecha: 5/5/2022

Índice de Contenido

Resumen	1
Abstract	1
1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivo	2
1.3. Beneficios	3
1.4. Limitaciones	4
2. ANÁLISIS PREVIO	4
2.1. Lugar de implementación	5
2.2. Funciones	6
2.2.1. Apriete	6
2.2.2. Posicionamiento	8
2.3. Mantenimiento	8
2.3.1. Mantenimiento predictivo	9
2.3.2. Mantenimiento preventivo	9
2.3.3. Mantenimiento correctivo	10
3. PROCESO DE DISEÑO	10
3.1. Software utilizado	10
3.1.1. Siemens NX 12.0	10
3.2. Diseño inicial	11
3.2.1. Tipos de brazos robot	22
3.2.1.1. Robot cartesiano	22
3.2.1.2. Robot cilíndrico	23
3.2.1.3. Robot esférico/polar	23
3.2.1.4. Robot SCARA	24
3.2.1.5. Robot articulado	25

3.2.1.6. Robot paralelo.....	26
3.2.2. Brazo robot seleccionado.....	26
3.3. Cálculos.....	33
3.3.1. Ejes de las ruedas.....	33
3.3.2. Cálculos a fatiga en el brazo robot.....	36
3.3.3. Rodamientos cálculos estáticos	47
3.4. Conclusiones	49
4. ANEXOS	50
4.1. Anexo 1.....	50
4.2. Anexo 2.....	51
4.3. Anexo 3.....	52
5. BIBLIOGRAFÍA.....	53

Índice de Ilustraciones

Figura 1. Sistema de elevación y transporte en línea de montaje “Fuente: Cadena Ser”	5
Figura 2. Tornillo clase b 104-123 Nm “Fuente: Mazda MX-5 Workshop Manual”	7
Figura 3. Carril con forma de prisma.....	11
Figura 4. Carril con cremallera comercial atornillable	11
Figura 5. Plano carril de acople de cremalleras helicoidales	12
Figura 6. Plano carril con forma de prisma	13
Figura 7. Cremallera tipo helicoidal.....	13
Figura 8. Plano rueda dentada “H series” de Apex Dynamics	14
Figura 9. Plano cremallera para la rueda dentada seleccionada	15
Figura 10. Diámetro de apoyo de las ruedas con acanaladura en forma de V	15
Figura 11. Diseño plataforma	16
Figura 12. Vista seccional del montaje de rodamientos	18
Figura 13. Montaje de rodamiento fijo.....	18
Figura 14. Montaje del eje de la rueda dentada en la plataforma	19
Figura 15. Montaje tapa superior con la plataforma	20
Figura 16. Ejemplo sistema de anti enrollado de cables “cable towline”	20
Figura 17. Plano Plataforma.....	21
Figura 18. Ejemplo movimiento de robot cartesiano	22
Figura 19. Sistema de coordenadas cilíndricas en un brazo robot cilíndrico	23
Figura 20. Sistema de coordenadas polar en un brazo robot esférico	24
Figura 21. Brazo robot SCARA	24
Figura 22. Ejemplo brazo robot articulado real por KUKA Roboter GmbH...	25
Figura 23. Ejemplo robot paralelo	26
Figura 24. Brazo robot articulado marca KUKA modelo KR 16.....	27
Figura 25. Dimensiones brazo robot KUKA KR 16.....	28
Figura 26. Modificación tapa superior de la plataforma.....	28
Figura 27. Dimensiones brida de montaje del brazo robot KUKA KR 16	29
Figura 28. Pistola de impacto neumática marca Atlas Copco modelo LTD61 H170-13-RE	30

Figura 29. Montaje de la pistola de impacto neumática en el útil acoplable a la brida de montaje.....	31
Figura 30. Ensamble diseño inicial.....	32
Figura 31. Posición del brazo robot seleccionada.....	37
Figura 32. Variación en el tiempo de la carga vertical que provoca flexión en el brazo robot.	38
Figura 33. Gráfico fuerza en función del tiempo.....	39
Figura 34. Representación gráfica de esfuerzos.....	42
Figura 35. Gráfica S-N	46
Figura 36. Fuerzas en rodamientos (fuente: SKF)	48
Figura 37. Explosión del diseño final.....	50
Figura 38. Plano de fabricación del útil de la brida de montaje	51
Figura 39. Plano de la tapa de los rodamientos	52

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de cabeza de tornillos.....	7
Tabla 2. Datos Rodamiento “SKF 21312 E”	17
Tabla 3. Pesaje de los elementos del conjunto	33
Tabla 4. Características y propiedades mecánicas a la tensión de algunos aceros (Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.).....	35
Tabla 5. Tabla valores a y b para factor de superficie.....	44
Tabla 6. Valores kd para diferentes temperaturas	44
Tabla 7. Tabla para el factor de otras influencias según la confiabilidad	45

Resumen

En este proyecto se realiza el diseño mecánico de la implementación de un brazo robot comercial en una cadena de montaje de vehículos donde por la parte inferior de los mismos se aprietan una serie de tornillos a su par correspondiente.

A lo largo del documento se determinará en primer lugar dónde será implementado el diseño con el fin de descubrir las limitaciones existentes y a continuación se procederá a realizarlo. Posteriormente, se analizarán ciertas partes conflictivas a través de cálculos tanto estáticos como a fatiga de tal forma que se pueda comprobar que es un diseño válido para cumplir el objetivo propuesto.

Debido a que el brazo robot implementado será un modelo comercial y no fabricado a medida, serán examinados varios tipos y se determinará el que mejor se adapte a las funciones a realizar, así como su modelo comercial concreto.

Palabras clave: Diseño mecánico, Brazo robot, Cadena de montaje, Fatiga.

Abstract

In this project, the mechanical design of the implementation of a commercial robot arm in a vehicle assembly line where a set of bolts are torqued to spec from behind the vehicles is done.

Throughout the document, firstly it will be determined where the design is going to be implemented in order to discover the existing limitations and then it will be carried out. Subsequently, certain conflicting parts will be analyzed using both static and fatigue calculations so it can be check that the design is valid to achieve the proposed goal.

Due to the fact that the implemented robot arm will be a commercial model and not custom made, several types will be examined and the one that best suits the functions to be performed will be determined, as well as its specific commercial model.

Keywords: Mechanical design, Robot arm, Assembly line, Fatigue.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Mi nombre es Yoel Cárdenas Grados, estudiante del grado de ingeniería mecánica que imparte la Universidad del País Vasco en Vitoria-Gasteiz. Anteriormente he realizado estudios de Técnico Superior en Automoción y cuento con una dilatada experiencia en cadenas de montaje en la empresa Michelin Vitoria-Gasteiz. Esto me ha motivado a realizar el diseño de un montaje de brazo robot para apriete de tornillos de vehículos en una cadena de montaje ya que me ha parecido una gran oportunidad para poder combinar lo previamente aprendido con la teoría impartida en el grado.

Particularmente gracias a mi experiencia previa en el sector de la producción, he podido aplicar la teoría de diseño de máquinas con una perspectiva más práctica, cuantificando los resultados obtenidos y comprobando que son lógicos como se puede observar en los apartados siguientes.

1.2. Objetivo

El objetivo principal es la realización del diseño de un prototipo acoplable a un brazo robot comercial el cual se encargará del apriete final a un par especificado de una serie de tornillos situados en los bajos de un vehículo. Será implementado en una línea de montaje de vehículos adaptándose a la sección donde estará situado con el fin de no ser necesaria ningún tipo de modificación en la propia línea de montaje.

Además, por el estudio realizado tomando en cuenta la mayor sollicitación de las cargas y poniendo en el mayor compromiso posible el diseño obtenido, se buscará la versatilidad del mismo de tal forma que puedan pasar por la línea donde el brazo robot sea implementado diferentes tipos de vehículos con diferentes tipos de tornillos a apretar.

1.3. Beneficios

Con la implantación de la robótica y automatización industrial se obtienen grandes beneficios [1] especialmente en términos de rentabilidad económica, fiabilidad y productividad.

En este caso, unos de los principales beneficios obtenidos por la implantación de este brazo robot son:

- *Disponibilidad 24/7:* Siempre que se encuentre operativo en pleno estado de funcionamiento va a poder trabajar las horas necesarias en el momento que se necesite.
- *Versatilidad:* Por el diseño del mismo se consigue poder trabajar con prácticamente cualquier tipo de vehículo que pase por la línea.
- *Fiabilidad:* Se consigue una alta repetitividad en las instrucciones para las cuales ha sido previamente programado. El proceso está mejor controlado con mayor precisión.
- *Calidad:* Al realizar el proceso con mayor precisión se obtiene una mayor calidad de las tareas realizadas.
- *Velocidad:* El brazo robot es capaz de trabajar de una forma más precisa y rápida que una persona sin necesitar descansos.
- *Reducción de costes:* Disminuye los costes de producción ya que, entre otros, se dispone de un tiempo de ciclo menor.
- *Seguridad:* Se evitan las lesiones que los operarios puedan llegar a tener mientras trabajan, bien de carácter inmediato como puede ser por un golpe o bien a larga debido a malas posturas por estar trabajando en la parte inferior del vehículo.
- *Mejores condiciones para los trabajadores:* A pesar de que un trabajador sea sustituido por la implantación de la robótica y la automatización, estos sistemas nunca son autónomos al 100%, requieren supervisión y mantenimiento, por lo que dichos operarios podrían ser formados para ello y mejorar sus condiciones de trabajo ya que del trabajo difícil se encargaría el robot.

1.4. Limitaciones

El estudio de este proyecto ha sido realizado con datos aproximados que no corresponden con ninguna línea de montaje real, datos registrados en catálogos comerciales y estimaciones tomadas según la experiencia propia.

Esto es debido a la limitación que se ha tenido al no poder tener la oportunidad de acceso a una línea de montaje de vehículos donde poder realizar los diferentes tipos de mediciones necesarias y conocer datos, en este caso, de que tornillos son aquellos que han de ser sometidos a un par de apriete, que par de apriete en cuestión ha de ser aplicado, con qué tipo de llaves, con qué frecuencia el brazo robot actúa... etc.

Es por ello por lo que, en el caso de tomarlo como ejemplo para la fabricación real del diseño final obtenido, habrá que revisar todos los cálculos realizados con los datos supuestos para que no se produzcan posibles errores por suposiciones que no se ciñan a la realidad.

2. ANÁLISIS PREVIO

Para la implementación del brazo robot en la línea primero se debe realizar un análisis previo del lugar de modo que podamos dar forma inicial al diseño que vayamos a realizar. Como uno de los principales objetivos es poder implementarlo de tal forma que no sea necesario realizar ningún tipo de modificación a las instalaciones existentes, deberemos tomar medidas y adaptarnos.

Con el diseño inicial finalizado, procederemos a hacer los cálculos pertinentes y posteriormente realizar cualquier tipo de modificación en caso de que fuera necesario con el fin de que el prototipo pueda hacer frente a todas las exigencias que se le propongan.

2.1. Lugar de implementación

Las funciones a realizar se hacen por la parte inferior del vehículo, por lo que la primera limitación es la altura libre de la que se dispone para situar el brazo y que pueda trabajar correctamente.

Como se ha mencionado anteriormente, al no disponer del acceso a una línea de montaje de vehículos real donde poder tomar medidas, tomaremos referencias aproximadas. Por lo tanto, la altura máxima de la parte de un vehículo donde se ha de aplicar el par para apretar un tornillo inferiormente se determina que se desplaza sobre el suelo a aproximadamente 2500 milímetros.

Tanto de anchura como de longitud obtenemos una mayor libertad de diseño ya que el vehículo que pasa por la línea estará suspendido en el aire por medio de un sistema de elevación y transporte como el que se muestra en la figura 1.



Figura 1. Sistema de elevación y transporte en línea de montaje "Fuente: Cadena Ser"

Para la anchura tomaremos como referencia el ancho medio de un turismo que es de 1800 milímetros [2] ya que como el brazo únicamente va a trabajar por la parte inferior no será necesario que este tenga que salir de ese margen.

La longitud puede ser determinada en función de si el vehículo se mueve a una velocidad constante y el robot debe acompañarse con esa velocidad o de si llega a la sección donde se van a ejecutar las funciones de apretar los tornillos inferiores y se detiene. Para una mayor precisión y ahorro de espacio, se considerará la opción de que el vehículo se encuentre estacionario en la línea mientras se realizan las funciones de apriete pertinentes y por ello se determina una distancia de 5500 milímetros, algo mayor a la longitud media de un turismo de 4000 mm [2]. De esta forma, en el caso de que la siguiente serie de vehículos que pase por la línea sea de mayor longitud, el diseño realizado seguirá siendo válido.

Por lo tanto, en resumen, obtendremos un espacio libre de 5500x1800x2500 milímetros donde poder implementar el brazo robot.

2.2. Funciones

2.2.1. Apriete

La función básica principal a desempeñar va a ser la de apretar diferentes tipos de tornillos con la mayor precisión posible al par correspondiente determinado según previo estudio.

De tal forma que obtengamos un producto versátil que no solo nos pueda valer para apretar un solo tipo de tornillo sino varios, los resultados del estudio se van a centrar en el apriete de un tornillo que requiera mayor par. Si todo el conjunto es capaz de cumplir su cometido apretando un tornillo más exigente, podrá cumplir la misma función con cualquier otro que lo sea menos.

Además, el estudio de este tornillo se realizará en las diferentes posiciones del brazo robot que resulten más comprometidas, así nos aseguraremos de que sea resistente a las exigencias presentadas. Estas posiciones serán determinadas más adelante con la selección del brazo robot.

Los diferentes tipos de tornillos para los que va a ser diseñado para apretar van a ser desde cualquier tipo de métrica hasta métrica 14 y podrán tener los diferentes tipos de cabezas que aparecen en la tabla 1.

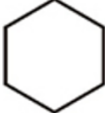



Tipos de tornillos hasta M14	Forma
Cabeza hexagonal	
Cabeza hexagonal interior	
Cabeza tipo torx exterior	
Cabeza tipo torx interior	

Tabla 1. Tipos de cabeza de tornillos

Como base para el estudio se va a tomar como referencia el par de apriete de un tornillo (Figura 2) que soporta y hace las veces de centrador del grupo diferencial trasero de un Mazda MX-5 [3]. Es un tornillo de métrica 14 con cabeza hexagonal que utiliza una llave de vaso hexagonal de 17 milímetros.

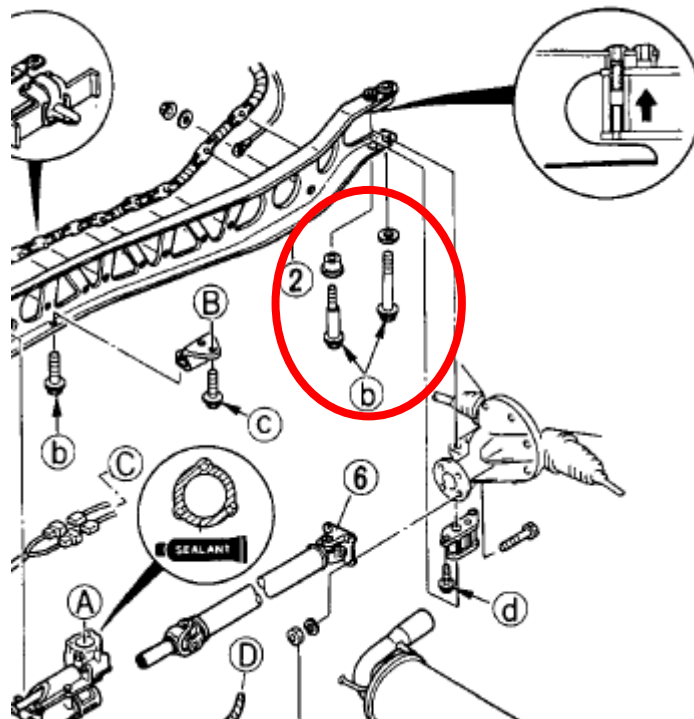


Figura 2. Tornillo clase b 104-123 Nm "Fuente: Mazda MX-5 Workshop Manual"

Se ha seleccionado este tornillo ya que requiere un par de apriete considerable (104-123 Nm) y por experiencia propia, en pocas ocasiones se va a dar el caso de tener que realizar un par mayor de aproximadamente 125 Nm para el apriete de tornillos inferiores de un vehículo. Además, como para posibles cálculos posteriores será considerado un coeficiente de seguridad, existirá un margen en el caso de necesitar superar dicho par de apriete.

2.2.2. Posicionamiento

Por otro lado, a parte de la función principal de apretar, también debe ser capaz de posicionarse con precisión en la ubicación del tornillo y para ello será de gran importancia disponer de los grados de libertad necesarios además de los medios para poder saber dónde se encuentra exactamente en todo momento.

Como mínimo, el diseño deberá permitir el posicionamiento en el plano debajo del vehículo y la altura a la que colocar la herramienta para apretar los tornillos verticalmente.

2.3. Mantenimiento

Como cualquier otra máquina sea como sea su diseño, será necesario realizar mantenimiento de modo que todo funcione a la perfección.

No realizar el correcto mantenimiento puede llevar consecuencias muy graves desde el propio desgaste prematuro de la máquina hasta fallos en sus funciones principales. En este caso, un ejemplo de un fallo con consecuencias podría ser: no es lubricado correctamente el cabezal del brazo robot que aprieta los tornillos por lo que se requiere una mayor fuerza de apriete que la programada para llegar al par especificado, quedando flojo el tornillo y pudiéndose soltar en un futuro provocando un accidente.

En este diseño será necesario aplicar 3 tipos de mantenimientos, el predictivo, el preventivo y el correctivo.

2.3.1. Mantenimiento predictivo

Este tipo de mantenimiento se aplica constante en el tiempo mientras el prototipo se encuentra funcionando, aunque no haya dado fallo y funcione correctamente. Tratará de poder saber cuándo es probable que ocurra un fallo y así poder anticiparnos a él.

Para poder aplicarlo, será necesario la realización de mediciones previas con el fin de tener unas referencias y evitar posibles averías si los datos registrados en el funcionamiento normal se salen de ellas.

En nuestro caso, las observaciones y mediciones realizadas mientras el brazo robot se encuentre funcionando serán:

- Prestar atención a puntos donde se produzca mayor temperatura de lo normal por cualquier tipo de fricción.
- Consumos excesivos en la alimentación eléctrica que se le suministra.
- Ruidos y vibraciones extrañas que no debieran de ocurrir.
- Cualquier otro tipo de anomalías perceptibles.

2.3.2. Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo trata de intervenir en el prototipo en sus puntos vulnerables, aunque este aun no haya presentado fallo alguno. Se realiza periódicamente, deteniendo el funcionamiento del mismo y tratará de cumplir una serie de intervenciones.

Por esta razón tendremos que tener en cuenta que el prototipo debe ser accesible en todos sus componentes para poder intervenir sobre ellos.

Las funciones a cumplir en la intervención serán tales como limpieza, engrasado y sustitución de elementos sometidos a desgaste o que hayan cumplido su vida útil considerada antes del fallo por estudios de fatiga.

2.3.3. Mantenimiento correctivo

Este tipo de mantenimiento es el que se realiza cuando se ha producido un fallo en cualquier elemento que componga la máquina.

Se trata de evitar mediante los dos mantenimientos mencionados previamente, pero en ocasiones es inevitable.

Por este motivo, se considera de gran importancia para el diseño que los elementos incorporados sean lo más genéricos posibles a fin de que si se da el caso de la realización de un mantenimiento correctivo, los elementos sean fáciles de conseguir y con el mínimo coste posible.

3. PROCESO DE DISEÑO

3.1. Software utilizado

Para la ayuda de la realización de un correcto diseño de todo el conjunto pieza a pieza y su montaje mecánico se ha utilizado el programa de Siemens NX 12.0.

3.1.1. Siemens NX 12.0

Siemens NX es un paquete de software CAD el cual ha sido desarrollado por Siemens PLM Software [4]. Sirve de gran ayuda para diseñar en 3D y analizar cualquier tipo de pieza.

Se ha seleccionado este software para realizar todo el diseño por CAD ya que es un programa cómodo, sin demasiada complejidad de utilización y que además de permitirnos el diseño y análisis de piezas, también nos permite realizar ensamblajes de conjuntos de piezas y planos 2D de las mismas para su posterior fabricación.

En el grado de ingeniería mecánica se nos ha formado con este software debido a que empresas de gran impacto socioeconómico tales como Mercedes-Benz lo utilizan para sus trabajos.

3.2. Diseño inicial

Tras el análisis previo realizado, teniendo en cuenta cómo es el espacio del que disponemos para la implementación y qué tipo de funciones se deben abordar, se realiza un primer diseño tomando decisiones aproximadas basadas en estudios y experiencias previas con maquinaria similar. En el caso de ser necesario realizar cambios a posteriori, se harán con datos que demuestren que la decisión tomada en el diseño inicial no es la óptima.

Comenzando desde cota cero, como la distancia longitudinal a abordar de 5500 milímetros es bastante considerable, se dispondrán dos carriles paralelos y alineados con dicha medida longitudinal separados a una distancia de 1800 milímetros sobre los que será capaz de desplazarse el prototipo diseñado.

Las necesidades en cuanto al desplazamiento longitudinal del prototipo son:

- Movimiento de posicionamiento inicial en línea recta.
- Control preciso y constante de la posición longitudinal.

Debido a estas necesidades, un carril tendrá forma de prisma (Figura 3) de tal modo que apoyen sobre él dos ruedas con acanaladura en forma de V y se consiga el movimiento en línea recta, y el otro carril estará diseñado para instalar sobre él cremalleras atornillables comerciales (Figura 4) sobre las que irán otras dos ruedas dentadas acopladas a un motor eléctrico pudiendo proporcionar así la tracción y el control que necesita el prototipo para desplazarse con precisión.

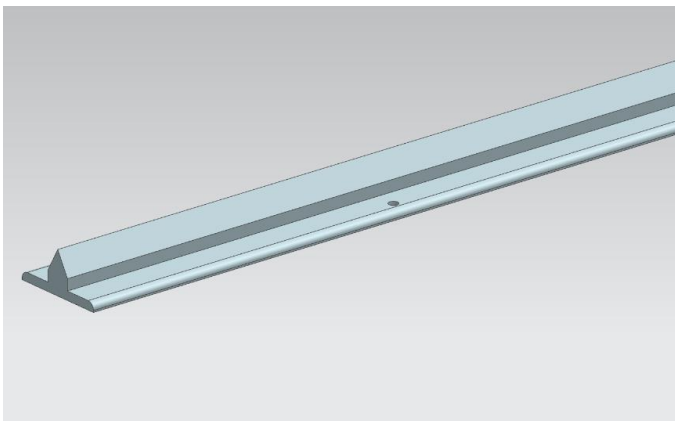


Figura 3. Carril con forma de prisma

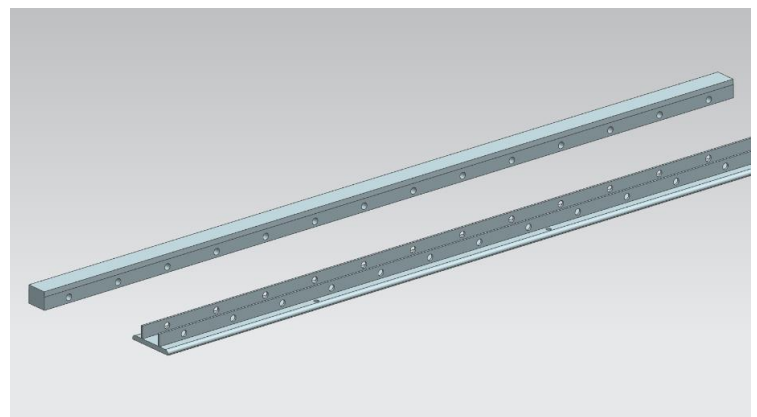


Figura 4. Carril con cremallera comercial atornillable

Más adelante, habiendo obtenido el diseño final, cuando se deba seleccionar el tipo de motor eléctrico que vayamos a acoplar a las ruedas dentadas, será conveniente tener en cuenta que la mejor opción sería la de acoplar únicamente un solo motor, evitando los problemas de sincronización que existirían entre motores debido al posible arrastre de un motor sobre otro. La selección del motor se deberá realizar al final ya que, debido a la variación de peso de un tipo de diseño a otro, no seremos capaces de conocer que par será necesario aplicar para mover el conjunto diseñado a la velocidad que determinemos.

Cada carril estará atornillado al suelo mediante 18 tornillos de anclaje controlado por par tipo camisa de métrica 10 y se respetarán las medidas de los planos de fabricación (Figura 5-6).

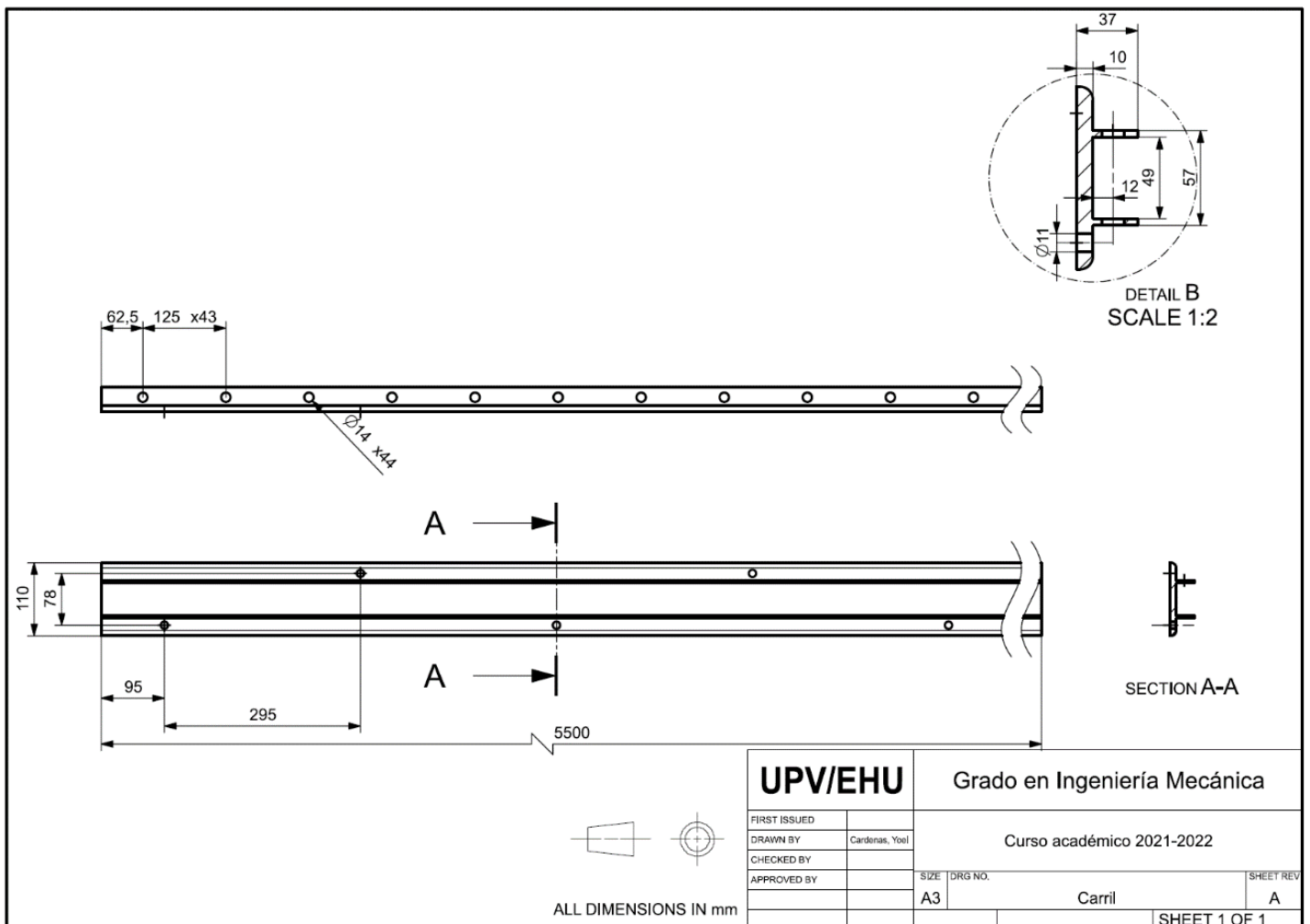


Figura 5. Plano carril de acople de cremalleras helicoidales

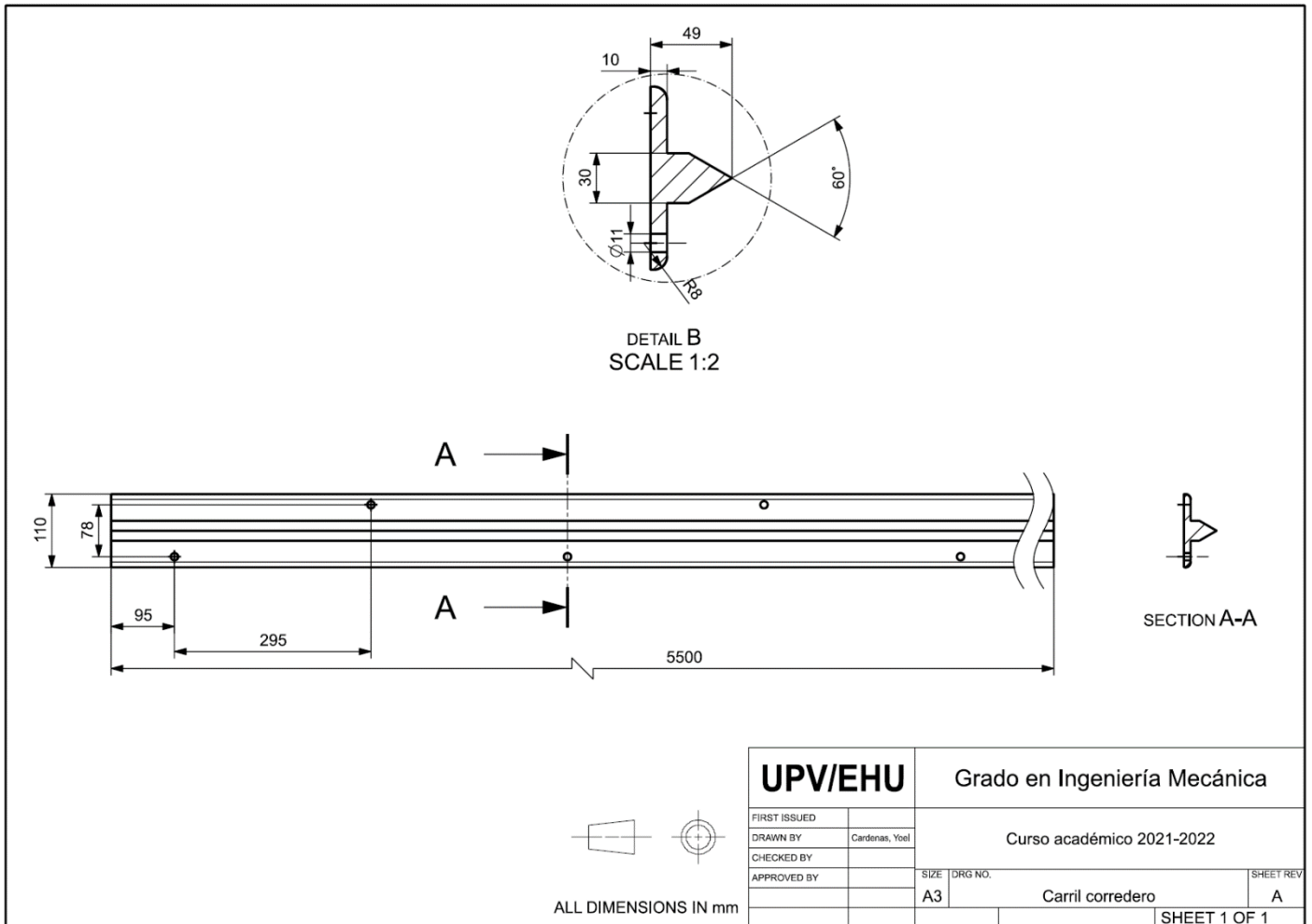


Figura 6. Plano carril con forma de prisma

El carril en el cual se instalarán las cremalleras comerciales dispondrá de tres secciones de cremalleras, las cuales irán atornilladas lateralmente por medio de tornillos de métrica 12.

Existen varios tipos diferentes de cremalleras según la función que se quiera cumplir. En este caso, con el fin de obtener la máxima precisión y suavidad, se seleccionan cremalleras de tipo helicoidal (Figura 7).



Figura 7. Cremallera tipo helicoidal

Se ha escogido este sistema de cremalleras desmontables con el fin de abaratar costes en caso de desgaste o avería. Si alguno de los dientes de las cremalleras fallara o por mantenimiento habría que sustituir alguna sección, en vez de tener que solicitar de nuevo otra fabricación de un carril completo, se reemplazará directamente la sección de cremallera que esté deteriorada desatornillándola y atornillando una nueva. En concreto, se dispondrán de dos secciones de cremallera helicoidal de 1750 milímetros en los extremos y una de 2000 milímetros en el centro, medidas estándar para minimizar aún más el precio final del diseño.

Para decidir tanto el tipo específico de rueda dentada como la cremallera, se toma el catálogo de “Apex Dynamics. Inc.” como referencia [5]. En primera instancia se selecciona una rueda dentada helicoidal de su modelo “H series” (Figura 8) y la cremallera correspondiente para que exista un correcto engranaje entre ambos (Figura 9).

Se conoce qué cremallera es la que engrana correctamente con la rueda dentada prestando atención al módulo, el cual debe ser el mismo para ambos (condición de engrane). En este caso, el módulo es 5.

Normal module	Mn	5
Number of teeth	z	15T
Normal pressure angle	α_n	20°
Helix angle	b	19°31'42"LH
Pitch circle diameter	d	79.578
Working pitch diameter	dw	84.578
Addendum modification factor	x	0.5
Root diameter	dr	72.078
Gear quality		DIN 5

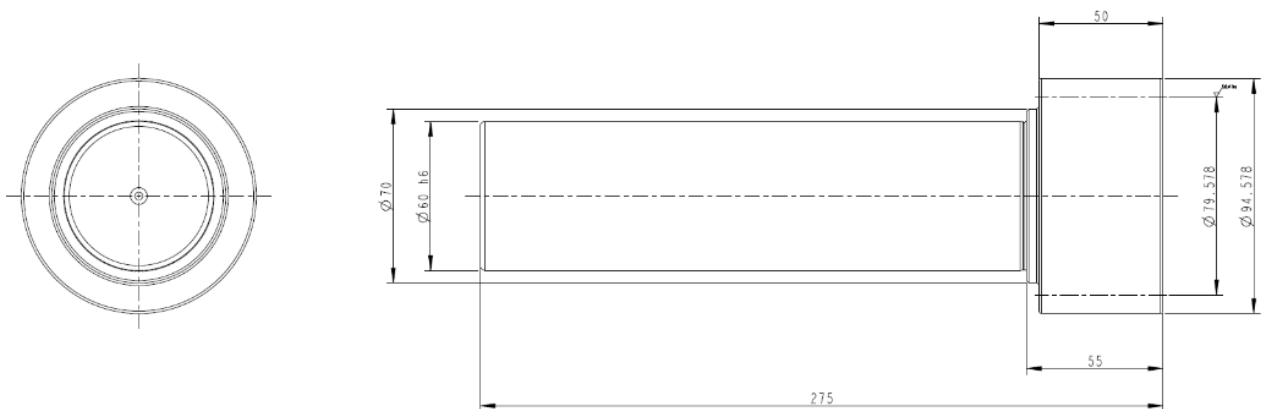
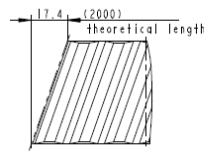


Figura 8. Plano rueda dentada “H series” de Apex Dynamics

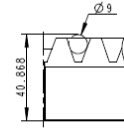


APEX DYNAMICS, INC.

Ordering code	0506R200C10
Module	5
Number of Teeth	120
Pressure angle	20°
Helix angle	19.528°RH
Quality	06
Total Pitch Error (um)	GTf 45



SCALE 4:1



SCALE 4:1

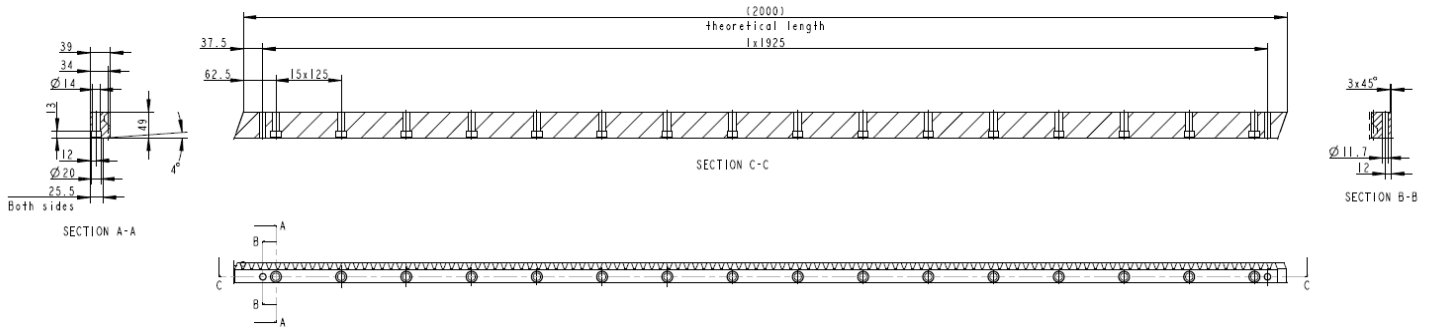


Figura 9. Plano cremallera para la rueda dentada seleccionada

Debido a que en un lado del prototipo irán dos ruedas dentadas y en el otro lado irán otras dos ruedas con acanaladura en forma de V, para que el conjunto no este descompensado y vaya nivelado, se diseñará el diámetro del apoyo de las ruedas con acanaladura en forma de V en el carril con forma de prisma con el mismo valor diametral que el diámetro primitivo de las ruedas dentadas (Figura 10). Además, aprovechando que será necesaria la fabricación a medida, se les añadirá el mismo eje que tienen las ruedas dentadas comerciales con las mismas medidas y tolerancia para simplificar el diseño y que haya el menor número de piezas diferentes posibles.

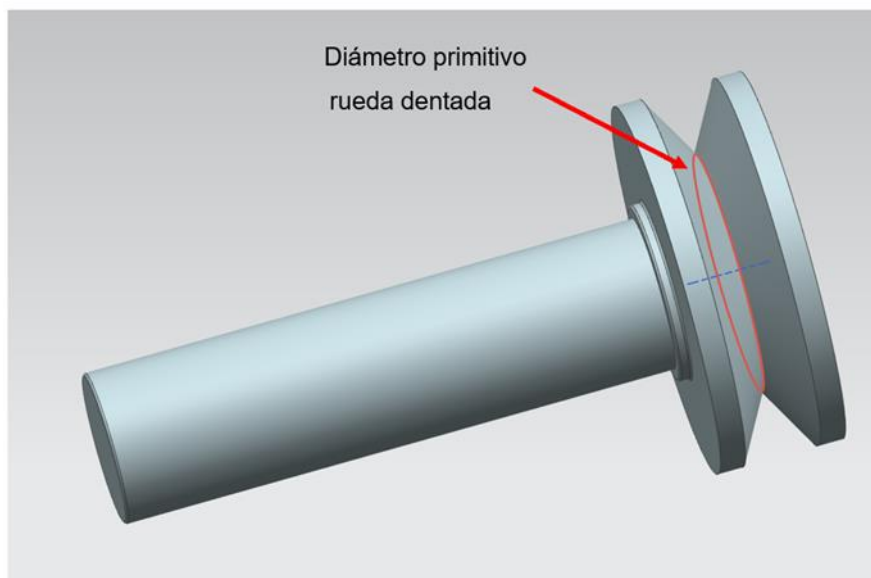


Figura 10. Diámetro de apoyo de las ruedas con acanaladura en forma de V

Se debe tener en cuenta que todo el peso del prototipo va a ser aguantado por los ejes de las ruedas, por lo que han de ser robustos tanto en sí mismos como en la forma de conexión a la plataforma del prototipo.

La plataforma será de forma cúbica y el interior estará hueco, de tal forma que servirá para alojar el hardware necesario como por ejemplo el cableado del brazo robot o el motor eléctrico mencionado para el desplazamiento longitudinal. Se podrá acceder a este hueco interior para cuestiones de mantenimiento o cualquier tipo de reparación ya que la parte superior de la plataforma será desmontable (Figura 11).

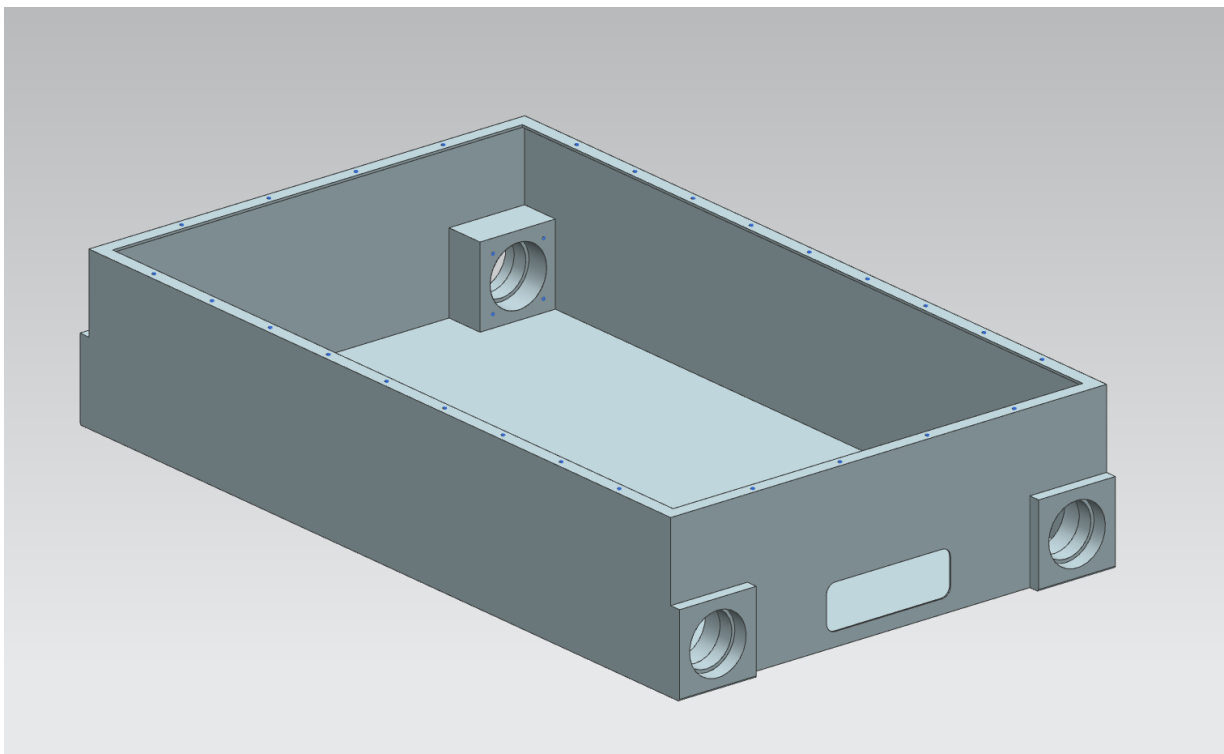
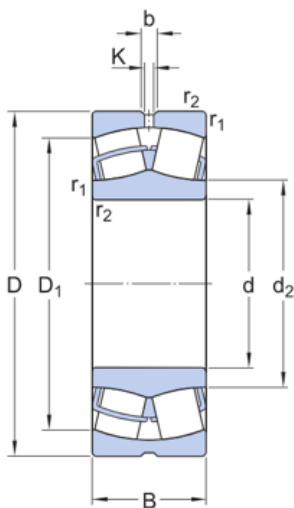


Figura 11. Diseño plataforma

En cada esquina de la plataforma se incorporarán alojamientos para rodamientos en los que irán introducidos los ejes de las ruedas. A la hora de seleccionar el tipo de rodamiento que vamos a usar debemos tener en cuenta aspectos como las revoluciones a las que va a girar el rodamiento y que tipo de cargas va a tener que soportar. Como las ruedas no van a girar a muchas revoluciones y existirán cargas axiales y radiales, se selecciona el rodamiento de tipo “rodillos a rótula” el cual es capaz de soportar estas cargas. El modelo específico del rodamiento será “Rodamiento de rodillos a rótula SKF 21312 E” [6] y su forma y dimensiones son las que se indican en la tabla 2, necesarias para el diseño de la plataforma. Se instalarán dos rodamientos por cada eje, es decir, un total de 8 rodamientos.



DIMENSIONES

d	60 mm	Diámetro del agujero
D	130 mm	Diámetro exterior
B	31 mm	Ancho
d ₂	≈ 87.8 mm	Diámetro del resalte del aro interior
D ₁	≈ 115 mm	Diámetro del resalte/rebaje del aro exterior
b	6 mm	Ancho de la ranura anular de lubricación en el aro exterior
K	3 mm	Diámetro del agujero de lubricación (aro exterior)
r _{1,2}	min. 2.1 mm	Dimensión del chaflán del aro exterior

Tabla 2. Datos Rodamiento “SKF 21312 E”

Al poder existir dilataciones o contracciones debidas a cambios de temperatura en los ejes que soportan los rodamientos, en el montaje de los dos rodamientos en el alojamiento de la plataforma, uno quedará fijado y el otro libre, de tal forma que este último pueda amortiguar dichos cambios sin someter al diseño a ningún compromiso (Figura 12).

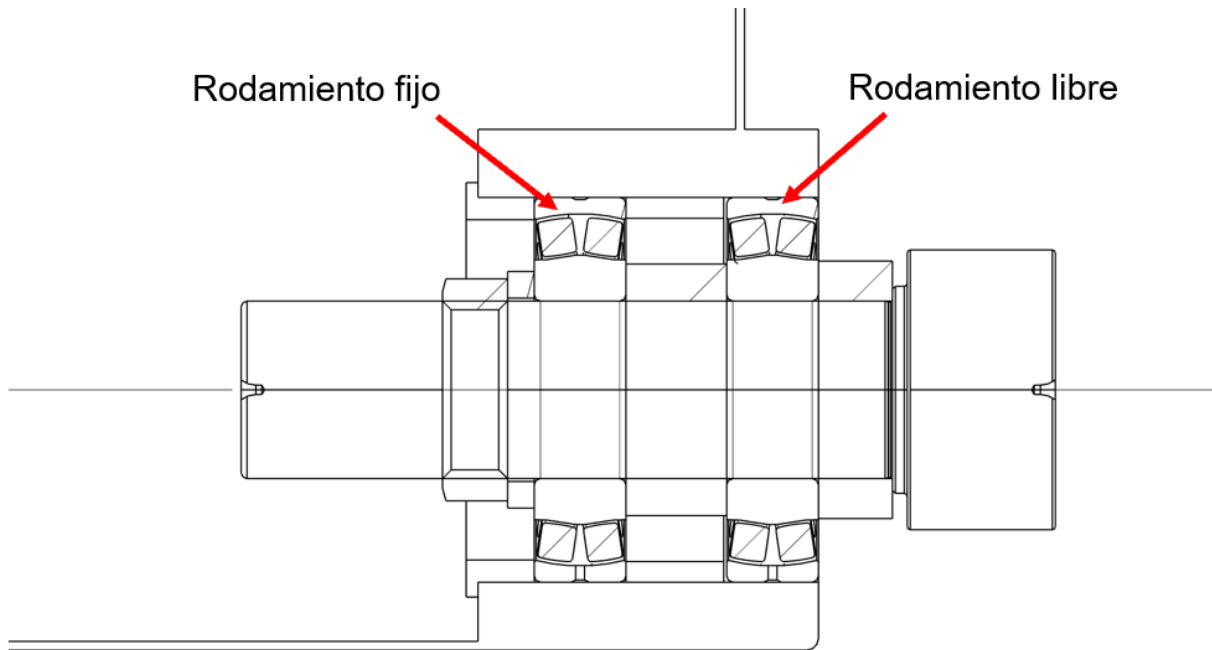


Figura 12. Vista seccional del montaje de rodamientos

La fijación del rodamiento fijo se realizará por medio de una tapa que empujará el aro externo del rodamiento contra un rebaje interior en la plataforma dejándolo inmóvil (Figura 13). Cada tapa irá atornillada a la plataforma por medio de 4 tornillos de métrica 6.

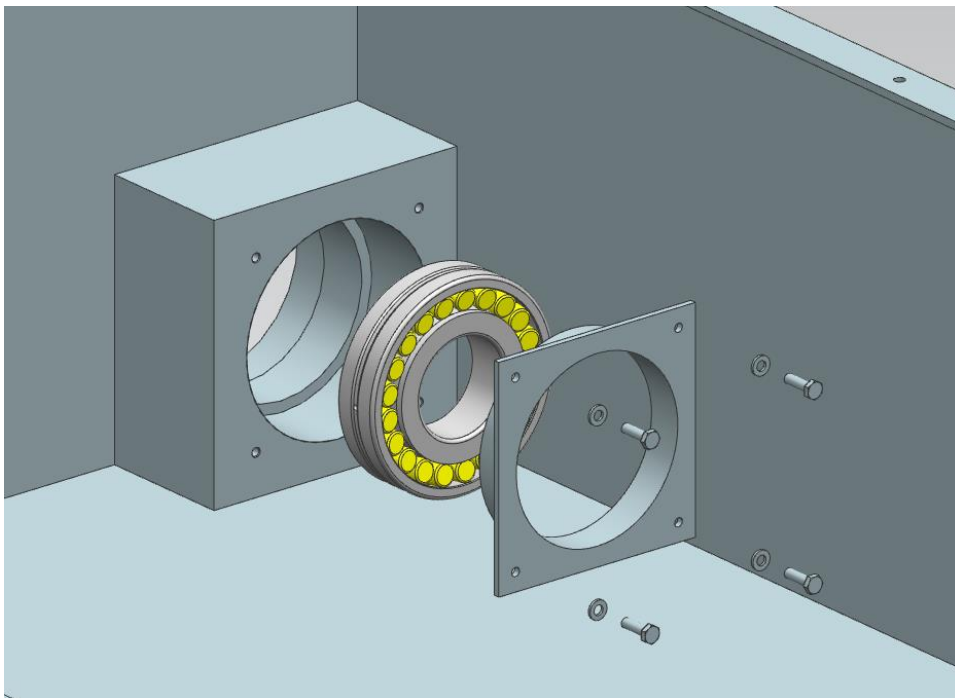


Figura 13. Montaje de rodamiento fijo

La instalación de los rodamientos en su alojamiento en la plataforma irá con juego para así facilitar el montaje y el desplazamiento del rodamiento que absorbe dilataciones y contracciones. Por ello, la medida diametral de 130 milímetros donde se introduce el rodamiento en la plataforma recibirá una tolerancia dimensional H7, la cual es una tolerancia preferible determinada según la norma ISO 286.

El eje de las ruedas será introducido en los rodamientos con apriete evitando así la laminación del aro interno. La tolerancia de este último será h6, la cual vendrá dada de fábrica en las ruedas dentadas comerciales y habrá que requerirla para las ruedas con acanaladura en forma de V hechas a medida.

Para que el eje de cada rueda no se desplace axialmente y fije entre sí todo el conjunto rodante será necesario el mecanizado de una rosca de 100 milímetros de profundidad al final de cada eje en la que podamos introducir una tuerca y provocar un apriete. Se deberá introducir en todos los ejes y entre medias de los dos rodamientos un separador a medida de tal forma que el apriete no fuerce los rodamientos axialmente (Figura 14).

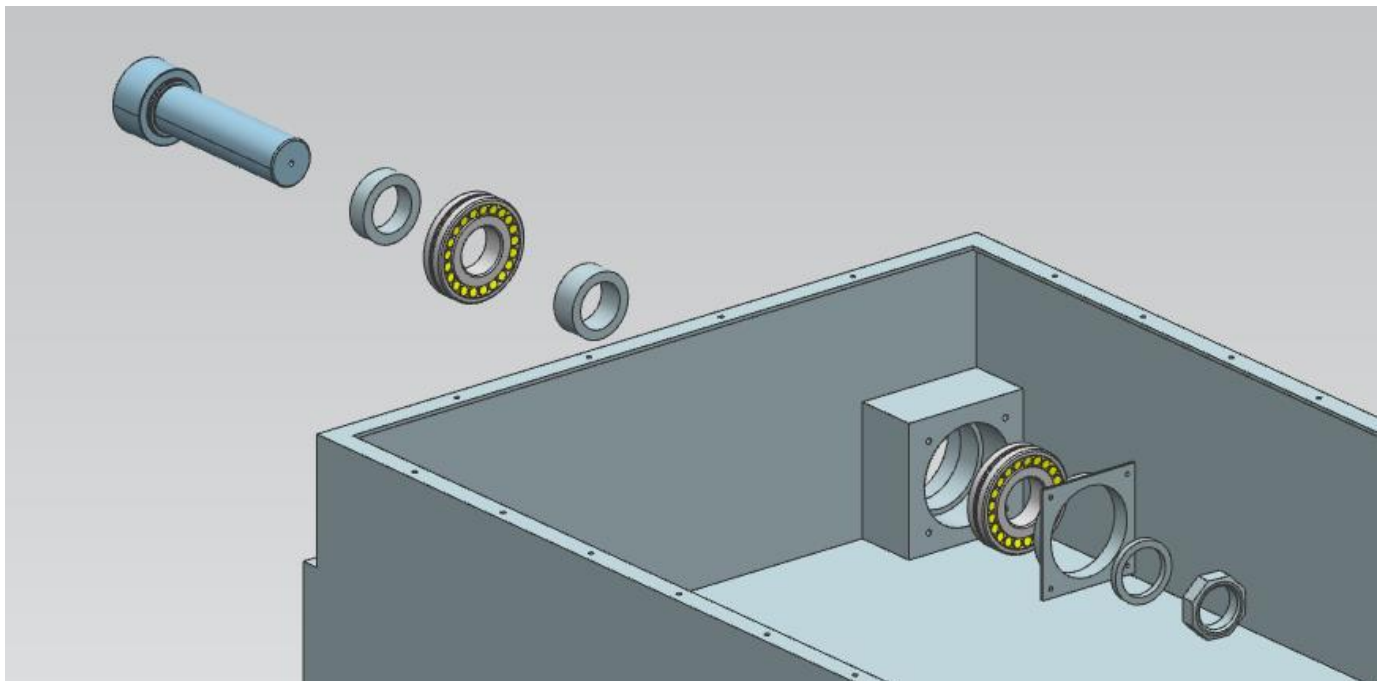


Figura 14. Montaje del eje de la rueda dentada en la plataforma

Como en la parte superior de la plataforma será donde deba ir atornillado el robot, se dispondrá de una tapa robusta de 5 milímetros de espesor que irá atornillada por medio de 26 tornillos de métrica 8 a la parte inferior (Figura 15).

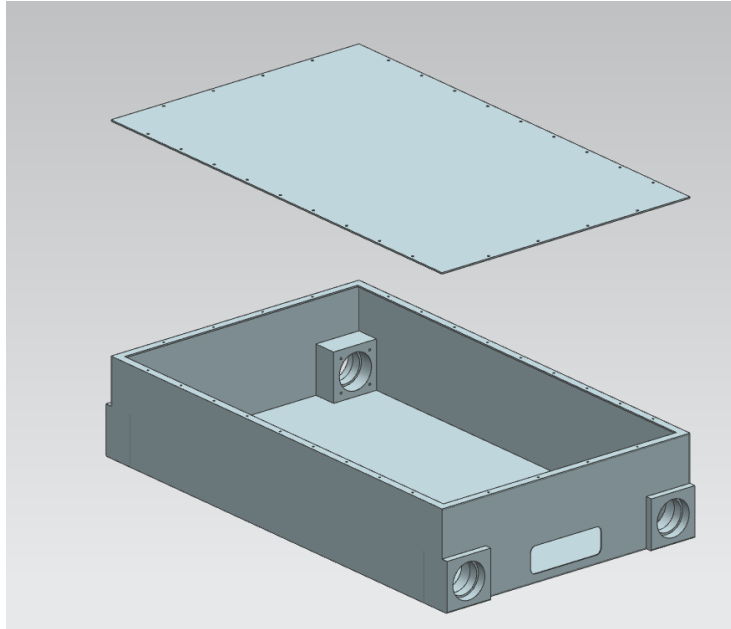


Figura 15. Montaje tapa superior con la plataforma

La alimentación eléctrica necesaria para el funcionamiento del conjunto será introducida a través de cables por un agujero lateral existente en la plataforma y se evitará el enrollado de los mismos por medio del sistema “cable towline” (Figura 16).



Figura 16. Ejemplo sistema de anti enrollado de cables “cable towline”

En el siguiente plano de fabricación podemos ver en detalle el diseño inicial de la plataforma con sus medidas (Figura 17).

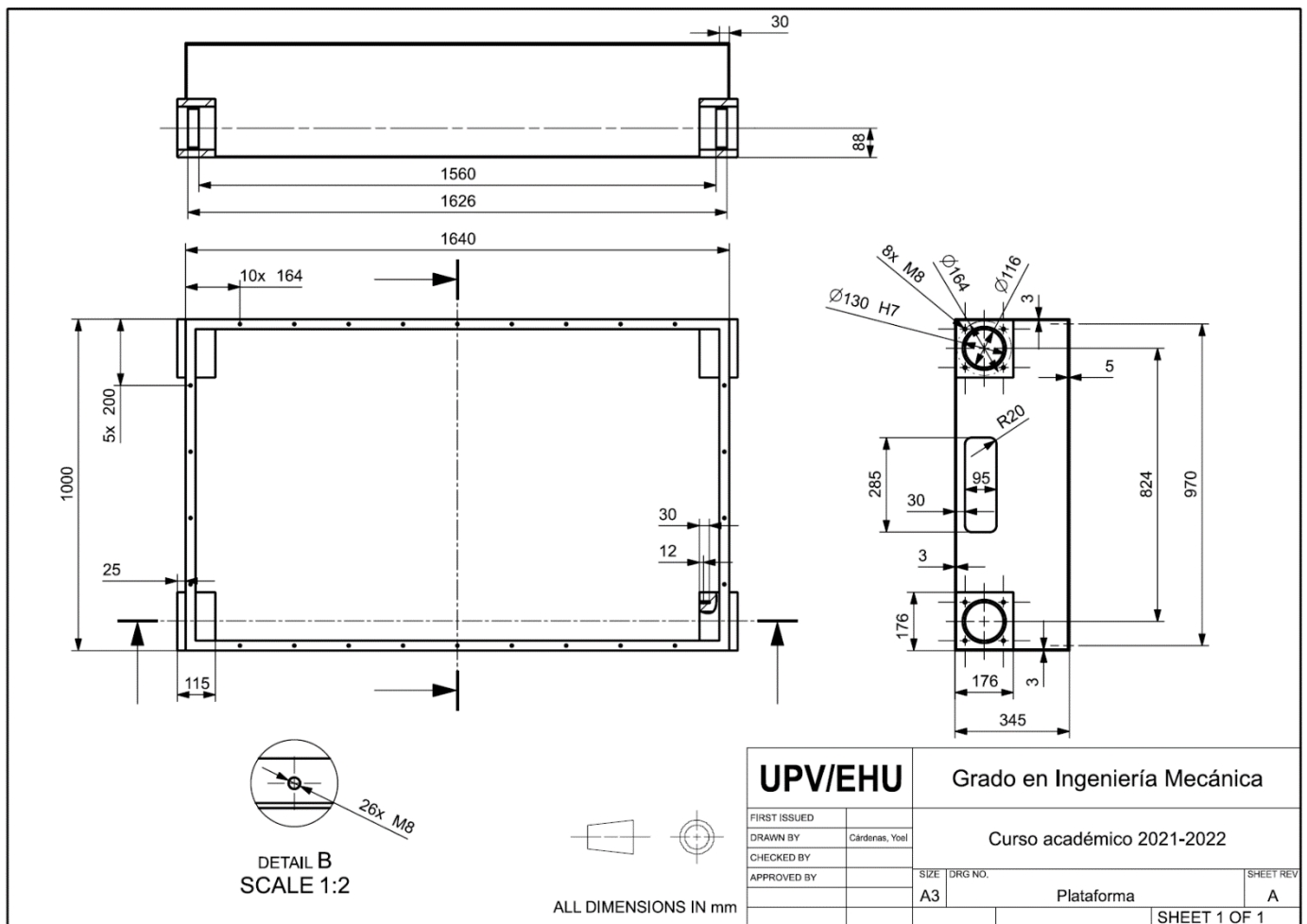


Figura 17. Plano Plataforma

El último paso para finalizar el diseño inicial y comenzar a realizar cálculos es el de seleccionar un tipo de brazo robot entre los existentes en el mercado. Para ello tendremos que tener en cuenta las necesidades y funciones mencionadas anteriormente además de la altura libre de la que disponemos desde la tapa superior de la plataforma que es donde irá atornillado, la cual es de 2142 milímetros.

3.2.1. Tipos de brazos robot

Hoy en día existen varios tipos de brazos robot que sirven para realizar diversas tareas, pero básicamente todos los tipos se traducen en un conjunto mecánico el cual es programable y capaz de realizar movimientos rotacionales y traslacionales con gran precisión y velocidad gracias a los actuadores y a las articulaciones que lo componen.

A continuación, se comentan brevemente una serie de los tipos de brazos robot más comunes [7] y posteriormente se seleccionará el que se considere que mejor pueda cumplir su función respecto a nuestro objetivo, siendo compatible con las condiciones existentes.

3.2.1.1. Robot cartesiano

Por su configuración es un robot muy sencillo, preciso y fácil de programar, pero tiene ciertas limitaciones en cuanto rapidez de movimiento. Se caracteriza por sus tres ejes de control, los cuales son lineales, forman ángulos rectos entre sí y coinciden con los ejes cartesianos (Figura 18).

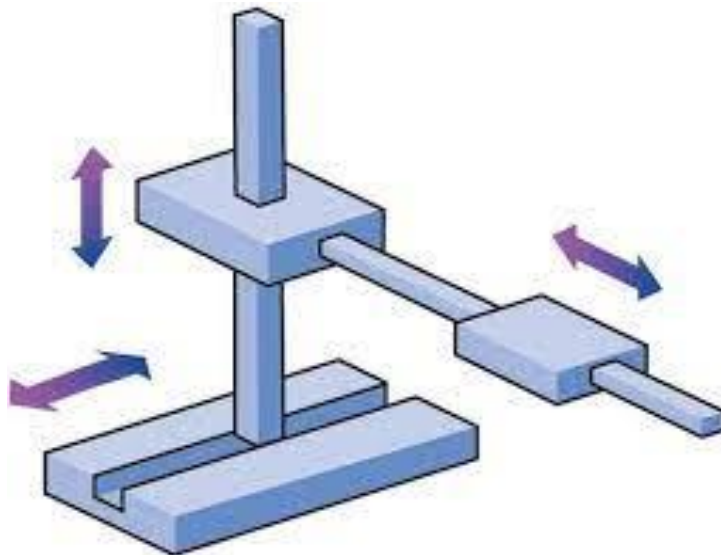


Figura 18. Ejemplo movimiento de robot cartesiano

3.2.1.2. Robot cilíndrico

Se caracteriza porque sus ejes forman un sistema de coordenadas cilíndricas (Figura 19). Dispone de una articulación que se encarga del movimiento giratorio proporcionando la libertad rotacional y de una articulación prismática la cual permite la libertad de movimiento vertical y horizontal.

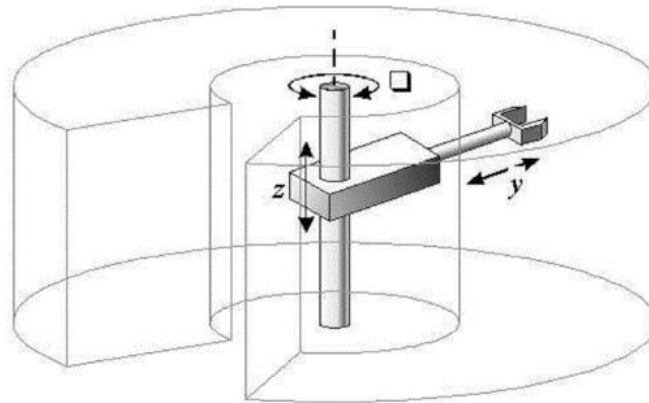


Figura 19. Sistema de coordenadas cilíndricas en un brazo robot cilíndrico

Este tipo de brazo robot es muy rápido para desplazarse a las coordenadas programadas, pero tiene cierta dificultad para ser programado debido al sistema de coordenadas cilíndricas y es algo menos preciso [8].

3.2.1.3. Robot esférico/polar

Es semejante a un brazo robot cilíndrico pero su gran diferencia es que este tipo de robot dispone de una articulación rotacional extra, formando un sistema polar de coordenadas, es decir, tiene la capacidad de acceder a una zona esférica (Figura 20).

Tiene una mayor accesibilidad que los anteriores tipos de brazos robot mencionados, pero sigue teniendo un sistema de control complicado. Además, hemos de tener en cuenta que este tipo de robot posee una zona muerta la cual será delimitada por la longitud del brazo extensor, que según que uso le vayamos a dar puede llegar a ser un problema [9].

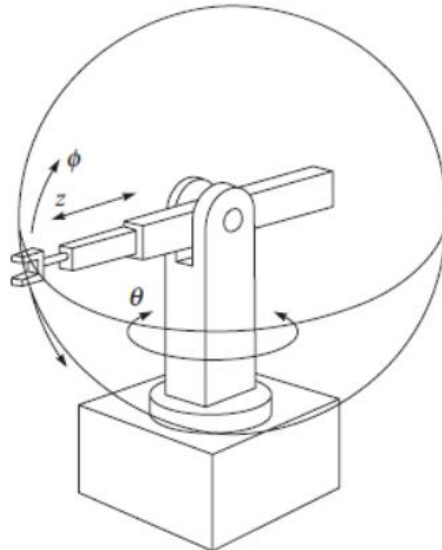


Figura 20. Sistema de coordenadas polar en un brazo robot esférico

3.2.1.4. Robot SCARA

Llamado SCARA por su denominación en inglés “Selective Compliance Assembly Robot Arm”, es un tipo de robot rápido, sencillo y preciso que tiene cuatro grados de libertad. Dispone de dos articulaciones rotatorias paralelas de tal forma que se obtiene una gran accesibilidad en un plano paralelo a las mismas, pero está limitado en el eje Z. Únicamente podrá desplazarse en ese eje por su extremo final [10] (Figura 21).

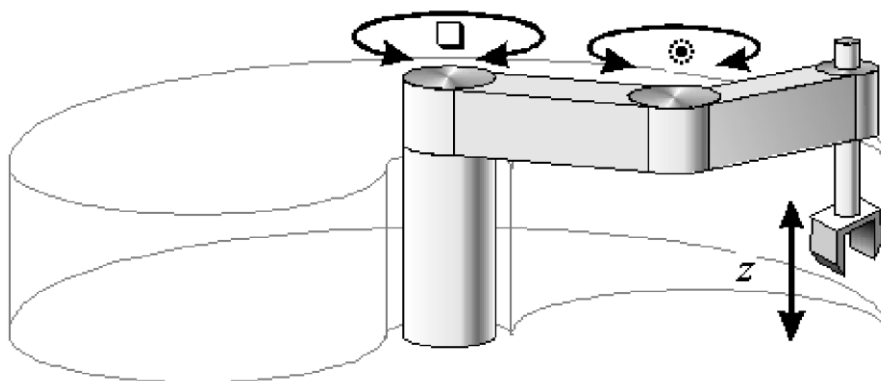


Figura 21. Brazo robot SCARA

3.2.1.5. Robot articulado

Este tipo de robot como mínimo dispone de tres articulaciones rotatorias. Por su configuración es un robot que se caracteriza por ser muy versátil, pudiendo realizar gran variedad de tareas simples y complejas con rapidez y precisión.

En el extremo del mismo se suele incluir la posibilidad de acoplar desde, por ejemplo, herramienta básica para apriete/desapriete de tornillos, hasta pinzas o pistolas de soldadura, lo que amplía aún más la capacidad de tipos de operaciones que puede realizar [11].



Figura 22. Ejemplo brazo robot articulado real por KUKA Roboter GmbH

3.2.1.6. Robot paralelo

Dispone de dos plataformas, una fija y otra móvil, que se encuentran vinculadas por al menos dos cadenas cinemáticas, las cuales reciben el nombre de piernas (Figura 23). Es un robot rápido y su ventaja principal es la capacidad de distribuir las cargas aplicadas entre las piernas mencionadas [12].



Figura 23. Ejemplo robot paralelo

3.2.2. Brazo robot seleccionado

Como en nuestro caso necesitamos básicamente el apriete de un tornillo a un par determinado en una posición concreta, con las limitaciones existentes, podemos tener en mente sobre todo dos tipos de brazos robot: El brazo robot cartesiano y el brazo robot articulado.

Como este diseño va a ir instalado en una cadena de montaje de vehículos donde debido a temas de producción el tiempo es un factor muy a tener en cuenta, nos conviene que aparte de que el robot realice correctamente su trabajo con buena precisión, lo realice lo más rápido posible. Es por ello por lo que considerar como primera opción de diseño el robot articulado es preferible ya que este es más rápido que el robot cartesiano.

Para seleccionar un robot articulado nos centraremos en la marca KUKA. Es una empresa de automatización presencial la cual fabrica brazos robots articulados industriales [13]. A través de sus catálogos [14] podremos encontrar todos los tipos de brazos robot articulados que fabrica con sus características, contrastarlos unos con otros y seleccionar el que mejor nos convenga.

Tras un análisis de los modelos disponibles, se llega a la conclusión de que, para un primer diseño, el robot marca KUKA modelo KR 16 fabricado en Alemania (Figura 24) es el que puede cumplir con todas nuestras exigencias [15]. Es un brazo robot articulado de 6 ejes, muy preciso, versátil y flexible, apto para casi cualquier aplicación tal como soldadura, almacenaje, montaje.... Etc. Se puede instalar en cualquier posición y prácticamente en cualquier lugar debido a su gran resistencia a los agentes externos. Además, no requiere un gran mantenimiento por lo que lo hace idóneo para una línea de montaje en la cual no se dispone de gran libertad para la detención de la misma.



Figura 24. Brazo robot articulado marca KUKA modelo KR 16

Debido a sus dimensiones (Figura 25), será necesario modificar la tapa superior de la plataforma ya que no sería capaz de llegar a la distancia de 2500 milímetros de altura. Se realizará una elevación en la mitad de la tapa (Figura 26) con paredes del mismo grosor que la tapa original y con tres agujeros pasantes en la parte superior donde se atornillará el brazo robot por medio de tres tornillos de métrica 18 y tuercas autoblocantes.

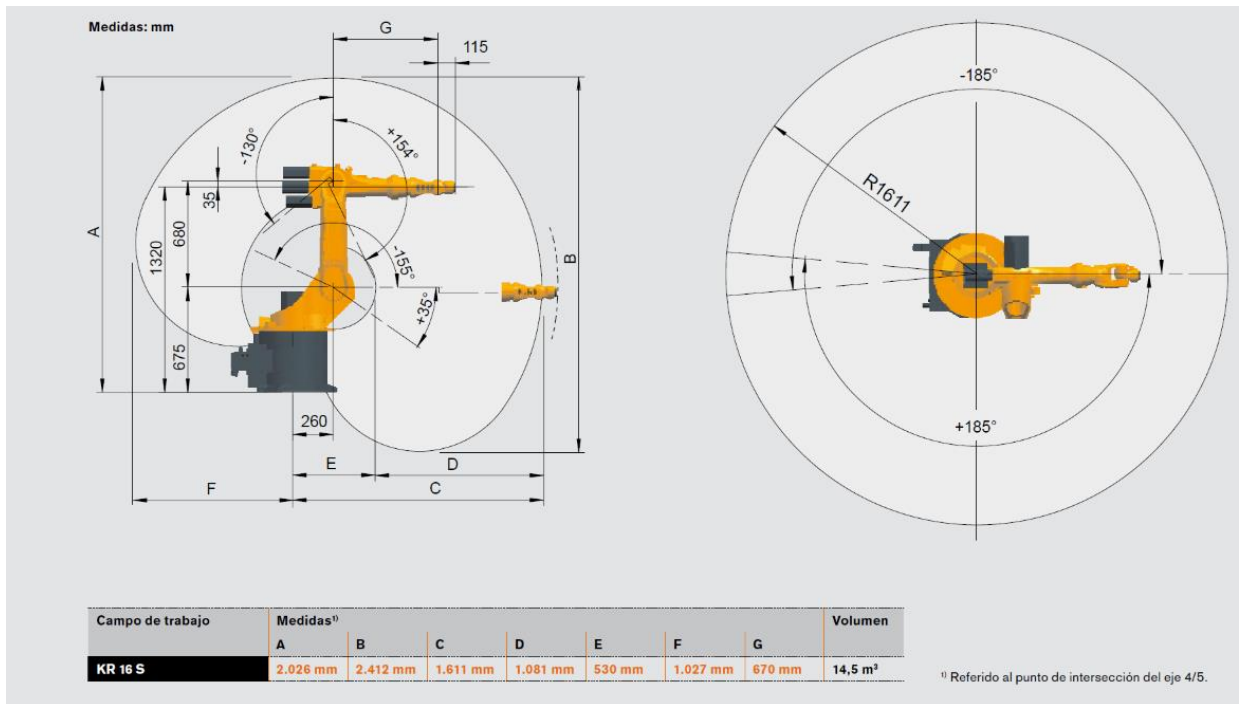


Figura 25. Dimensiones brazo robot KUKA KR 16

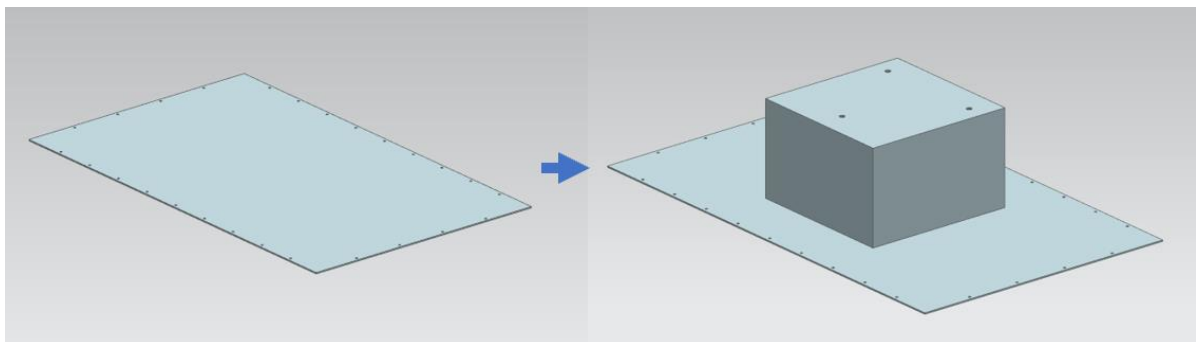
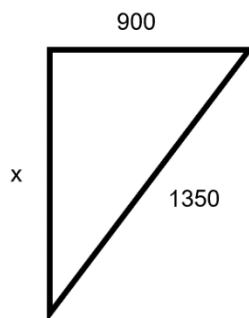


Figura 26. Modificación tapa superior de la plataforma

Para calcular la elevación necesaria a realizar, tenemos en cuenta que el brazo estirado por completo mide 1350 mm desde su articulación fija de 675 mm y que debe llegar hasta los laterales del vehículo los cuales tienen una anchura media de 1800 mm. Como el robot está situado en el centro deberá poder desplazarse la mitad, es decir, 900 mm. Aplicamos el teorema de Pitágoras con estos datos y obtenemos:



$$h^2 = c^2 + c^2 \rightarrow 1350^2 = 900^2 + x^2 \rightarrow x = 1006,23 \sim 1005 \text{ mm}$$

Por lo tanto, la base donde se atornilla el brazo deberá estar a $1005+675=1680$ mm por debajo del tornillo más alto el cual se encontraría a una altura de 2500 mm sobre el suelo. Entonces, la extensión necesaria a elevar en la tapa superior de la plataforma será de 461 mm.

Debido a que no se dispone de la capacidad para controlar el par de giro de la muñeca del brazo robot, no se podrán atornillar los tornillos al par específico a través de ella. Por ello, deberemos diseñar un útil atornillable a la brida de montaje de la que dispone el extremo de la muñeca en el que podamos acoplar una pistola de impacto capaz de controlar el par de apriete a aplicar. En dicha pistola de impacto es donde se colocarán a su vez los diferentes tipos de llaves de vaso para apretar los diferentes tipos de tornillos.

Las dimensiones de la brida de montaje en el extremo de la muñeca vienen indicadas en el catálogo del brazo robot (Figura 27).

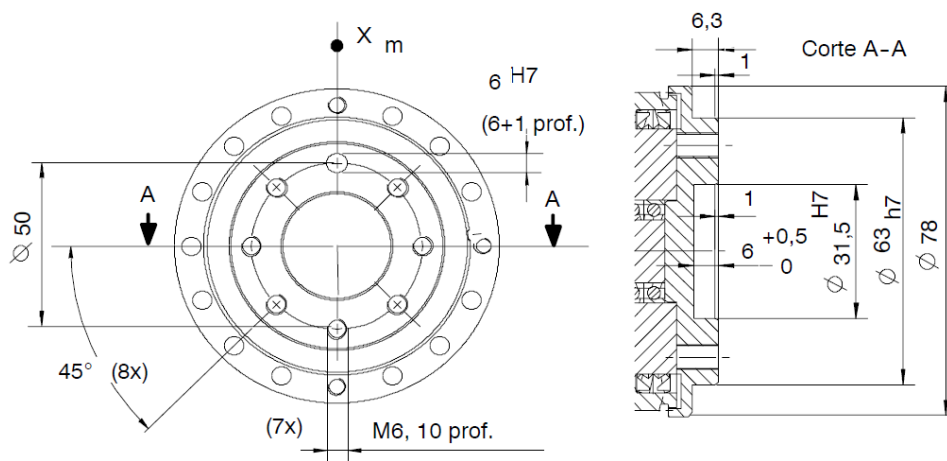


Figura 27. Dimensiones brida de montaje del brazo robot KUKA KR 16

Tanto para la selección de la pistola de impacto como para el diseño del útil adaptador a la brida de montaje de la muñeca, tendremos que tener en cuenta que este modelo de robot dispone de una carga útil nominal de 16 kilogramos, lo cual significa que 16 kilogramos son la cantidad máxima de peso que puede llevar el brazo robot en la brida de montaje a velocidad máxima manteniendo la precisión nominal. El brazo puede cargar con mayor peso a una menor velocidad manteniendo la precisión nominal, pero como en nuestro caso lo que nos interesa es que se realicen las operaciones lo más rápido posible, intentaremos respetar dicha carga útil nominal.

Seleccionaremos una pistola de impacto neumática de la marca Atlas Copco, empresa industrial multinacional sueca especializada en industrias automotrices y aeroespaciales [16]. Concretamente seleccionaremos el modelo LTD61 H170-13-RE ya que se puede regular el par aplicado desde 70 Nm hasta 170 Nm y tiene un peso de 3 kilogramos, dejándonos bastante margen de peso para el diseño del útil [17].

La forma de la pistola, así como sus medidas, se pueden observar en el plano proporcionado por el fabricante [18] (Figura 28). Utiliza vasos de $\frac{1}{2}$ ", medida estándar por lo que no habrá problema para comprar vasos comerciales compatibles con pistolas de impacto para diferentes tipos de cabezas de tornillos.

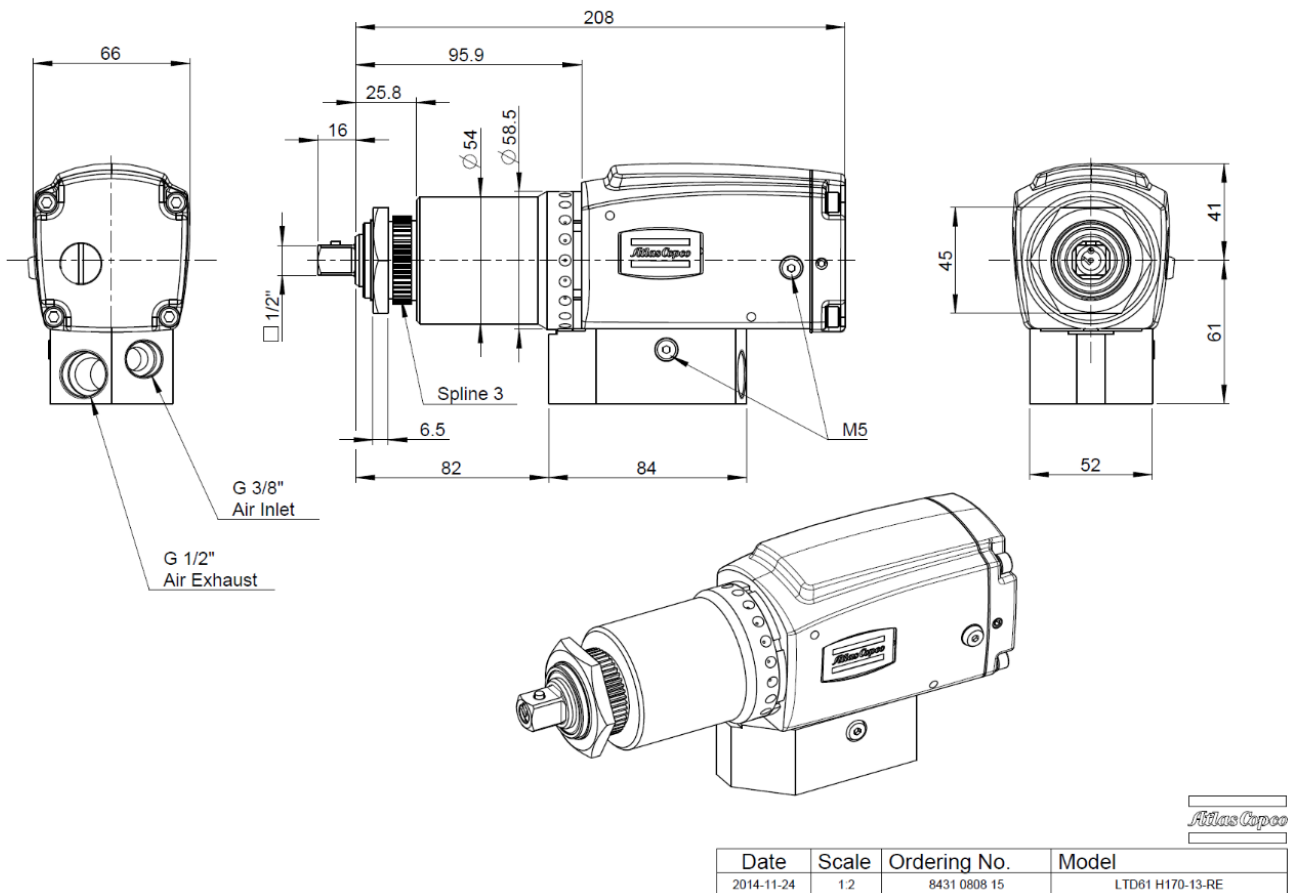


Figura 28. Pistola de impacto neumática marca Atlas Copco modelo LTD61 H170-13-RE

Deberemos tener en cuenta que debido a que el mecanismo interior funciona neumáticamente, habrá que llevar a través del brazo robot una manguera neumática hasta la pistola.

El adaptador donde irá la pistola de impacto y que se atornillará a la brida de montaje del extremo de la muñeca aprovechará los cuatro tornillos de métrica 5 de las carcasas de la pistola para dejarla completamente fija. La apertura de la que dispondrá en la parte inferior será necesaria ya que debido a que es una pistola de impacto neumática, necesitará la alimentación de aire a través de una manguera (Figura 29).

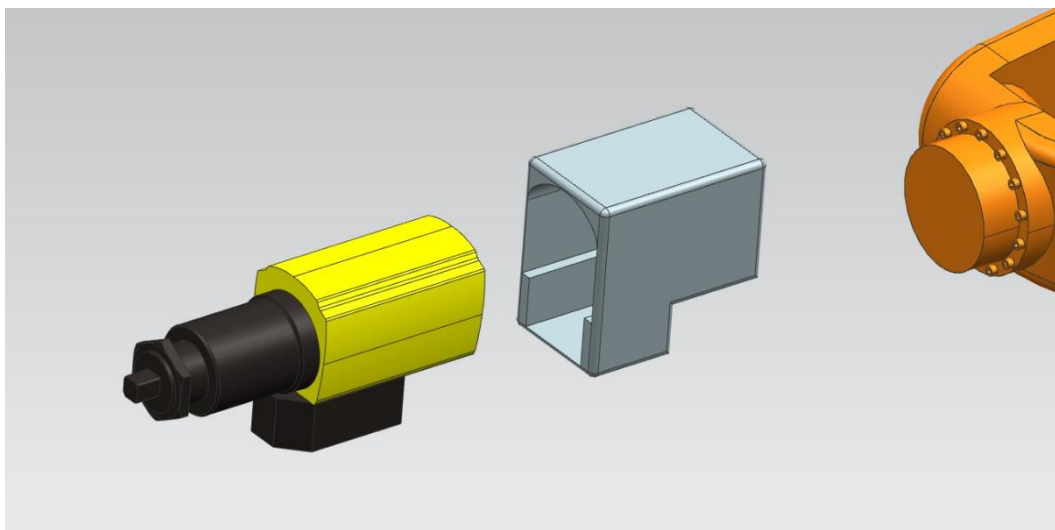


Figura 29. Montaje de la pistola de impacto neumática en el útil acoplable a la brida de montaje

El peso del útil fabricado en acero será de 1,78 kg, lo cual sumado al peso de la pistola de impacto hace un total de 4,78 kg por lo que no existirá ningún tipo de problema para utilizar el robot a su máxima velocidad ya que no sobrepasamos la carga útil nominal de 16 kg.

Por lo tanto, con todos los elementos analizados por el momento, el diseño inicial tendría la forma de la figura 30 una vez ensamblado.

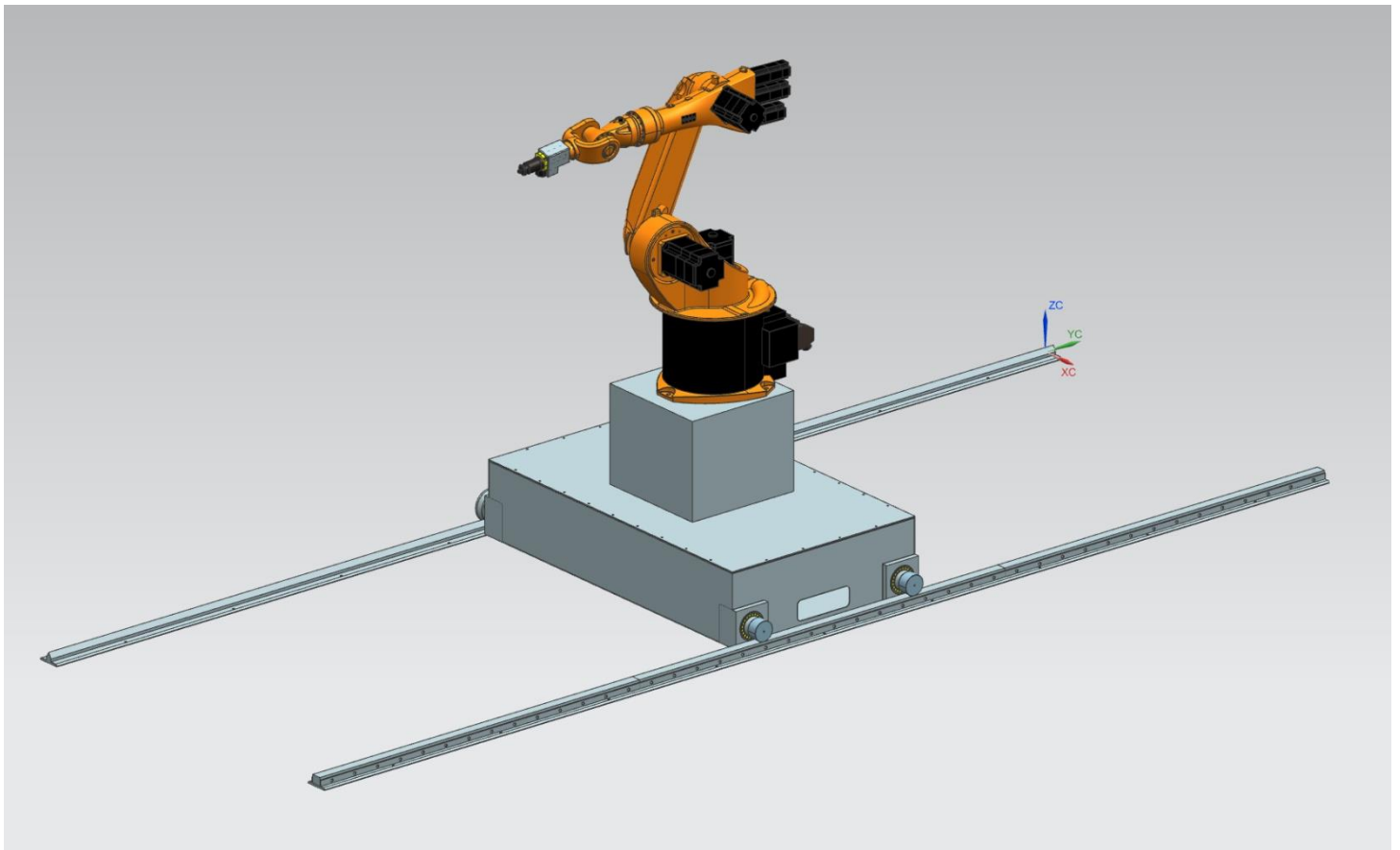


Figura 30. Ensamble diseño inicial

Todo el material utilizado para la realización de las piezas que no se puedan comprar directamente de un fabricante y haya que mandarlas fabricar a medida será de acero, el cual tiene una densidad media de 7829 kg/m^3 (Fuente: asignación de materiales en NX 12.0). Este dato será de gran importancia ya que será el que se tenga en cuenta para la realización de los cálculos puesto que cada pieza tendrá su peso propio.

En la tabla 3 podemos ver el pesaje aproximado de cada pieza que forma diseño inicial obtenido. El pesaje de las piezas no comerciales necesarias de fabricar a medida se ha obtenido gracias al software de NX 12.

Pieza	Peso (Kg/ud)	Total (Kg)
Cremallera 1750	25,23	50,47
Cremallera 2000	28,84	28,84
Carril	54,92	54,92
Carril con forma de prisma	79,64	79,64
Ruedas	10,38	41,52
Rodamientos	1,15	9,2
Separador exterior	0,61	2,44
Separador rodamientos	0,76	3,03
Tuercas M60	0,39	1,55
Arandelas para M60	0,14	0,57
Tapas interiores	0,71	2,86
Plataforma	143,52	143,52
Tapa plataforma	103,8	103,8
Adaptador pistola	1,78	1,78
Pistola neumática	3	3
Tornillería suspendida (aprox.)	0,1	5,0
Robot KUKA KR 16	235	235

Tabla 3. Pesaje de los elementos del conjunto

3.3. Cálculos

En esta sección se realizarán varios ejemplos de cálculos en ciertas partes del diseño que se han considerado que pueden llegar a ser conflictivas, ya que en el caso de que las dimensiones de las mismas, así como el material utilizado no cumplan los requisitos básicos para que el diseño sea sólido y funcional, podría fallar todo el conjunto suponiendo gastos extras en cuanto a rediseño y solicitud de más material.

En primer lugar, comenzaremos analizando si los ejes de las ruedas que se van a instalar son capaces de soportar todo el peso del conjunto en reposo, luego haremos un estudio a fatiga en un caso de flexión del brazo robot y finalmente comprobaremos si los rodamientos pueden soportar las cargas existentes incluso cuando se realiza el apriete al máximo par determinado de 125 Nm.

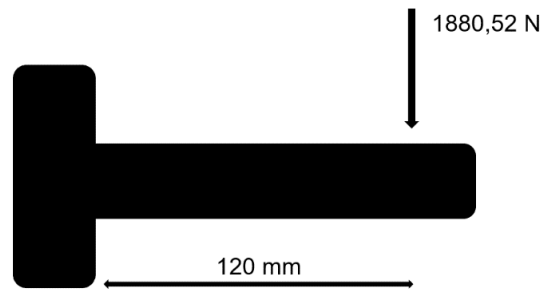
3.3.1. Ejes de las ruedas

Como disponemos del pesaje de todos los elementos que conforman el conjunto, descartamos aquellos que están no suspendidos, es decir, aquellos que soporta el peso de los mismos el suelo, y sumamos el peso de todos los que por el contrario están suspendidos.

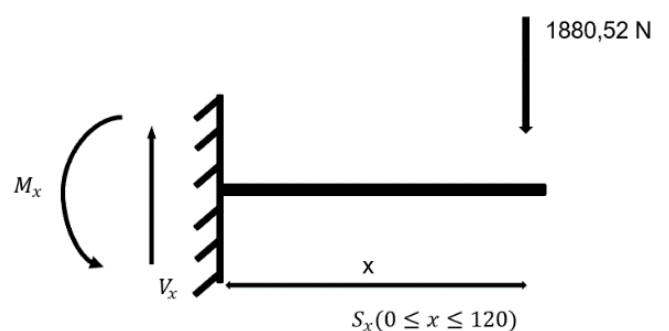
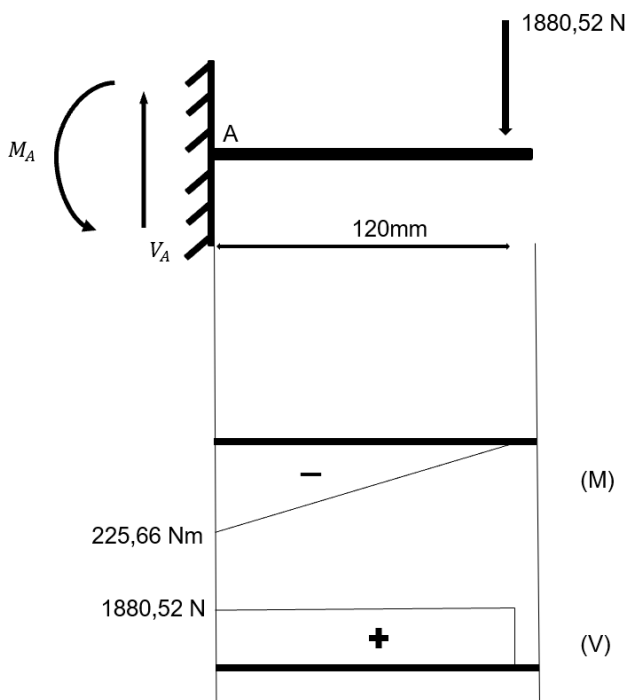
La suma nos da un valor de 511,7 kg, los cuales se han de repartir entre los 4 ejes de las 4 ruedas existentes.

Suponemos que la carga se distribuye uniformemente por lo que $511,7/4=127,93$ kg soportaría cada eje que multiplicado por un coeficiente de seguridad de 1,5 por compensación de efectos dinámicos nos quedaría un peso de 191,89 kg, es decir, $191,89 \text{ (kg)} * 9,8 \text{ (N/kg)} = 1880,52 \text{ N}$

En cada eje existen dos rodamientos en los cuales se repartiría dicha carga, pero con el fin de realizar un cálculo más exigente, supondremos que toda la carga estará aplicada en el rodamiento que más alejado está del cambio de sección de la rueda ya que será el que mayor momento aplique porque la distancia será mayor y quizás pueda producir la falla de la pieza.



Aplico la estática y simplifico el diagrama ya que se conoce que la sección donde se produciría la falla es en el cambio de sección de la rueda al eje (A).



$$M_x = 1880,52x$$

$$\text{Para } x = 0: M = 0 \text{ Nm}$$

$$\text{Para } x = 120: M = 225,66 \text{ Nm}$$

$$V_x = 1880,52 \text{ N}$$

Una vez realizado los diagramas de momento y cortante, sabemos cuáles son los valores máximos que se van a producir. Aplico a continuación el criterio de Tresca para para ejes en diseño con cargas estáticas, el cual nos indica que un material sometido a una combinación cualquiera de cargas fallará por fluencia plástica siempre que la máxima tensión tangencial en la pieza sobrepase la tensión tangencial límite del material.

$$d = \left[\frac{32 * c. s.}{\pi * S_{yp}} * (M^2 + T^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Para S_{yp} , debido al desconocimiento del material de los ejes de las ruedas, supondremos que están hechos de un acero AISI 1040 rolado en caliente donde la resistencia de fluencia es de 290 MPa (Tabla 4).

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS No.	SAE and/or AISI No.	Processing	Tensile Strength, MPa (kpsi)	Yield Strength, MPa (kpsi)	Elongation in 2 in, %	Reduction in Area, %	Brinell Hardness
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Tabla 4. Características y propiedades mecánicas a la tensión de algunos aceros (Fuente: 1986 SAE Handbook, p. 2.15.)

Para el coeficiente de seguridad, se aplica un coeficiente de 2,5 ya que es un material dúctil de calidad media y se encuentra en condiciones de trabajo no muy exigentes ni agresivas.

El resto de variables son conocidas por lo que el resultado del diámetro mínimo que deben tener los ejes nos da:

$$d = \left[\frac{32 * 2,5}{\pi * 29 * 10^7} * (225,66^2 + 0^2)^{1/2} \right]^{1/3} = 27,06mm$$

Es decir, el eje que hemos determinado en el diseño inicial está sobredimensionado ya que es de 60 mm de diámetro cuando el diámetro necesario es de 27 mm. Para que el resultado fueran 60 mm, deberíamos estar utilizando un coeficiente de seguridad de:

$$0,06 = \left[\frac{32 * c.s}{\pi * 29 * 10^7} * (225,66^2 + 0^2)^{1/2} \right]^{1/3}$$
$$c.s. = 27,25$$

Hay mucho margen de rediseño para hacer el eje más fino, pero debido a que es el diámetro estándar que se adquiere al comprar las ruedas dentadas no es necesario realizar la modificación.

3.3.2. Cálculos a fatiga en el brazo robot

Debido a secreto profesional de la marca de la que hemos seleccionado el brazo robot, no conocemos ni el material del que se encuentra hecho ni como es su estructura interior (maciza, hueca, con nervios...) por lo que todos los cálculos realizados en este apartado serán basados en hipótesis realizadas.

Para realizar un estudio a fatiga, debemos saber que para que exista fatiga en un componente se han de aplicar cargas variables en el tiempo las cuales pueden provocar la falla de la pieza tras un número de ciclos si se dan las condiciones a pesar de que sean cargas menores que la carga necesaria que produciría la rotura de inmediato.

A modo de ejemplo de realización de cálculos a fatiga, se va a estudiar un caso en concreto en el que el brazo robot, en una posición determinada, realiza la acción de introducir verticalmente la llave de vaso en la cabeza del tornillo correspondiente previamente abocado.

La posición del robot seleccionada va a ser la que se muestra la figura 31. La parte llamada brazo, que es donde se va a realizar el estudio a fatiga, se encuentra completamente horizontal de tal forma que la distancia perpendicular de la articulación con la parte fija del robot al vector de la fuerza sea la máxima posible. Las partes antebrazo y muñeca se encuentran completamente verticales.

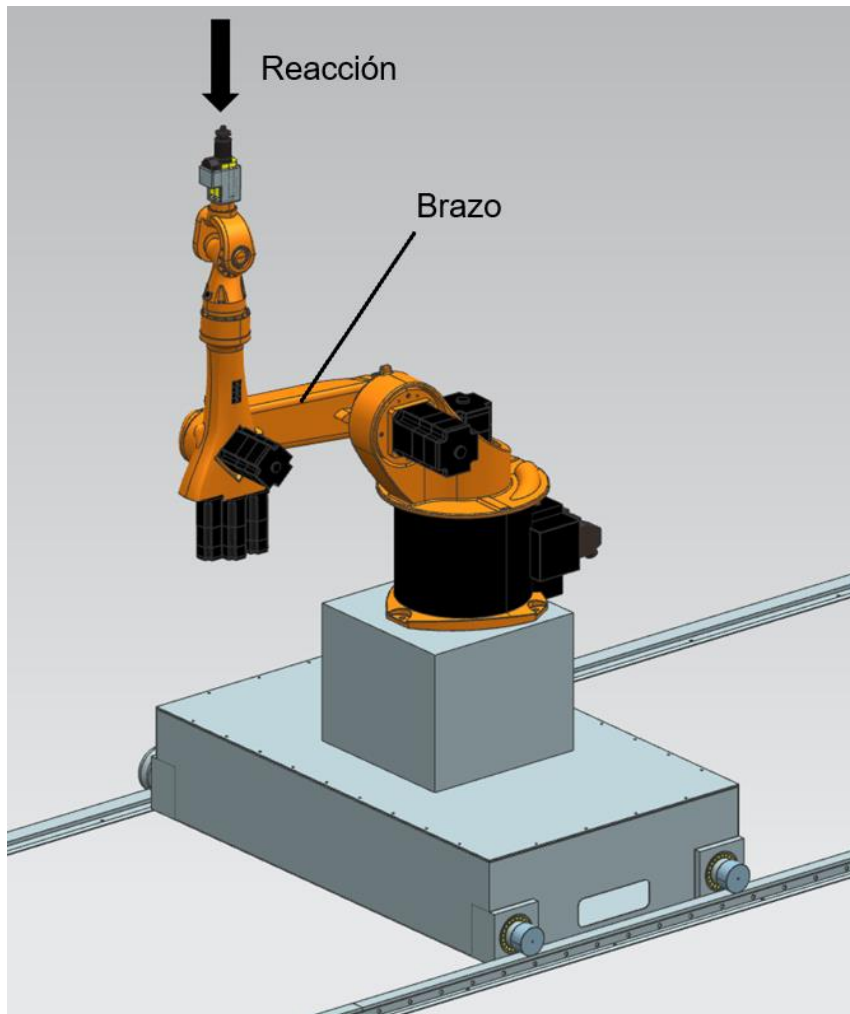


Figura 31. Posición del brazo robot seleccionada

Este caso es de importancia ya que podría existir la falla por fatiga en la parte llamada brazo debido a que para introducir la llave de vaso en la cabeza de cada tornillo se aplicará una fuerza vertical hacia arriba, resultando en una reacción en sentido contrario por parte de los tornillos y por ende existiendo un esfuerzo de flexión variable a medida que se vaya posicionando sobre los tornillos.

Podemos observar la variación de la carga en el tiempo que podría provocar el fallo por fatiga en el brazo en la figura 32. Observamos que tiene una forma sinusoidal, con un máximo de 3332 N y un mínimo de 1764 N.

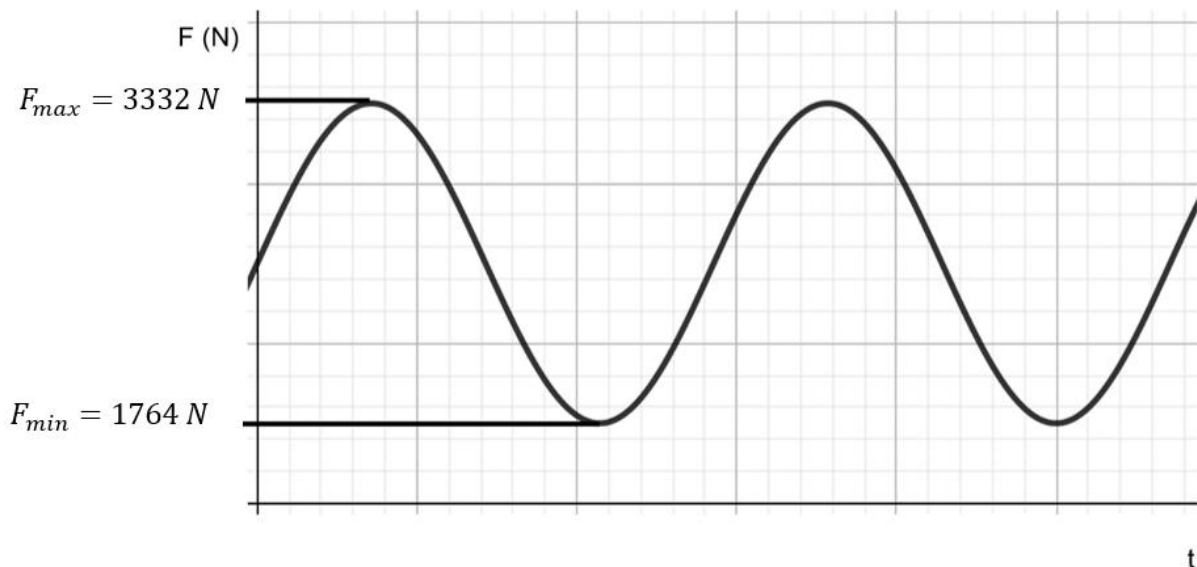


Figura 32. Variación en el tiempo de la carga vertical que provoca flexión en el brazo robot.

- El valor mínimo de 1764 N se ha determinado por una hipótesis del peso del antebrazo, muñeca, adaptador de la pistola, la pistola y mangueras neumáticas. Se ha supuesto que todo el conjunto anterior pesa 120 kg y se ha multiplicado por un coeficiente de seguridad de 1,5 por los efectos dinámicos.
- El valor máximo de 3332 N se ha determinado añadiéndole al peso la fuerza vertical hacia arriba que debe ejercer el robot. Se han supuesto 50 kg en el caso de que aparte de que deba introducir la llave de vaso en la cabeza del tornillo, tenga que empujar alguna pieza como por ejemplo una cuna para aproximarla. Además, se ha multiplicado por un coeficiente de seguridad de 2 debido a la gran variedad de posibilidades de montaje en un mismo modelo de vehículo.

Debido a que la fuerza media no es nula y colabora también al fallo de la pieza, se decide aplicar el criterio de fallo por fatiga de Goodman:

$$\frac{k_f * \sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{c. s.} \quad (2)$$

Este criterio lo deberemos aplicar en una sección del brazo en concreto. Como por simplificación se determina que el brazo es de sección constante de 130mm de alto por 145mm de ancho, lo aplicaremos en aquella sección donde las cargas sean mayores.

En primer lugar, para poder obtener los esfuerzos alternantes y medios de la ecuación de Goodman, debemos calcular la fuerza media y la fuerza alternante:

$$F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} = \frac{3332 + 1764}{2} = 2548 \text{ N}$$

$$F_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} = \frac{3332 - 1764}{2} = 784 \text{ N}$$

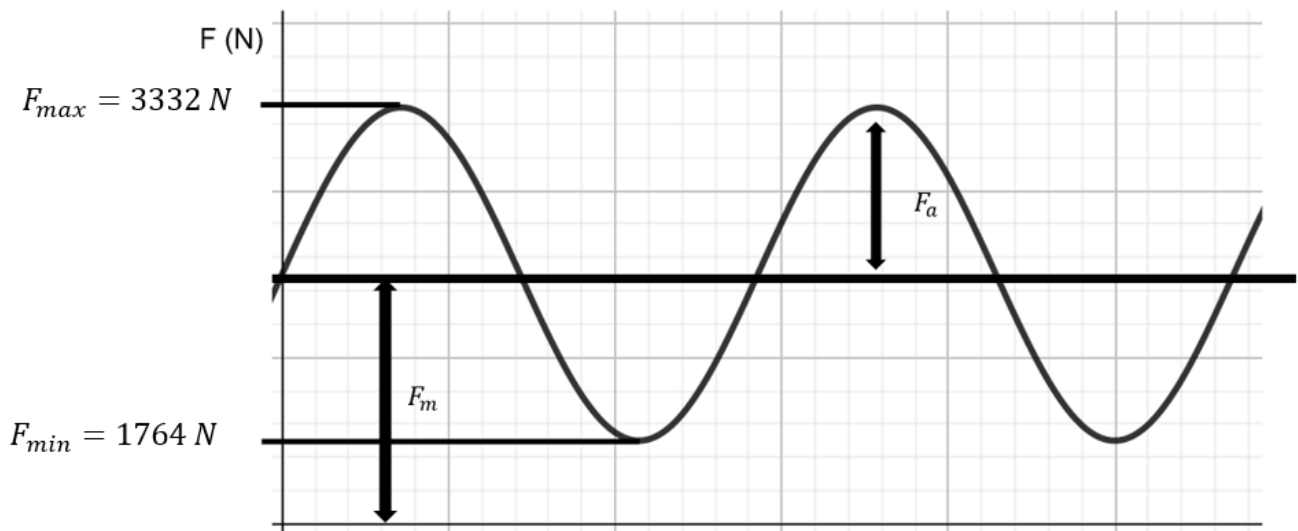
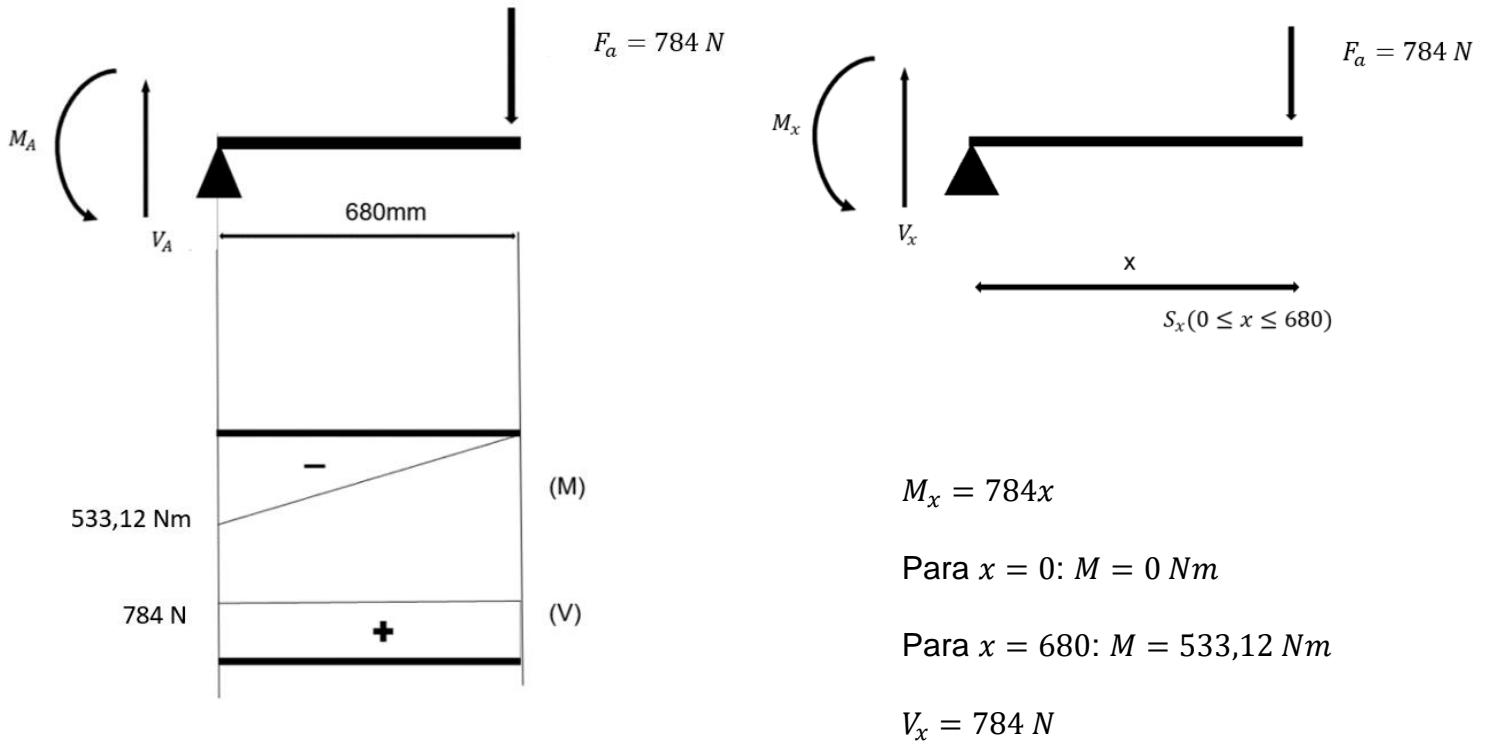


Figura 33. Gráfico fuerza en función del tiempo

Con la fuerza alternante obtenida, podemos calcular el esfuerzo alternante. Para ello realizamos los diagramas de momento y cortante del brazo aplicando la fuerza alternante:



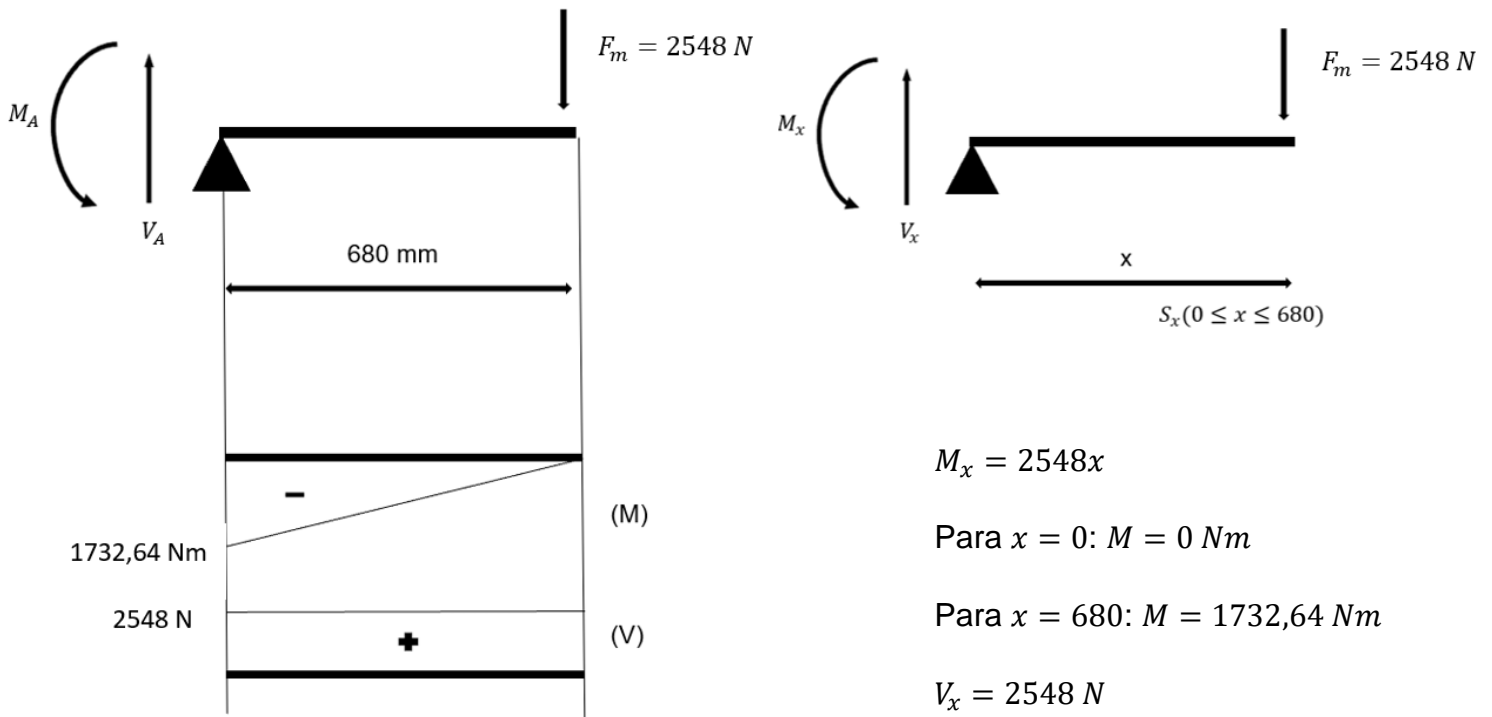
Aplico el termino de Goodman de esfuerzo alternante donde el momento sea máximo, es decir, en el extremo donde se produce el momento de 533,12 Nm. Por lo tanto, el esfuerzo alternante resulta:

$$\sigma_a = \frac{M_a * c}{I} = \frac{533,12 \text{ (Nm)} * 0,065 \text{ (m)}}{26,55 * 10^{-6} \text{ (m}^4\text{)}} = 1305190,2 \text{ N/m}^2 = 1,31 \text{ MPa}$$

$$I = \frac{b * h^3}{12} = \frac{0,145 * 0,13^3}{12} = 26,55 * 10^{-6} \text{ (m}^4\text{)}$$

$c = 0,13/2 = 0,065 \text{ m}$ Distancia al eje neutro de la sección rectangular considerada.

Con la fuerza media obtenida, podemos calcular el esfuerzo medio. Para ello realizamos los diagramas de momento y cortante del brazo aplicando la fuerza media:



Aplico el termino de Goodman de esfuerzo medio donde el momento sea máximo, es decir, en el extremo donde se produce el momento de 1732,64 Nm. Por lo tanto, el esfuerzo medio resulta:

$$\sigma_m = \frac{M_m * c}{I} = \frac{1732,64 \text{ (Nm)} * 0,065 \text{ (m)}}{26,55 * 10^{-6} \text{ (m}^4\text{)}} = 4241868,173 \text{ N/m}^2 = 4,24 \text{ MPa}$$

Con todos los datos de esfuerzos obtenidos, podemos pasar a una representación gráfica de esfuerzos (Figura 34).

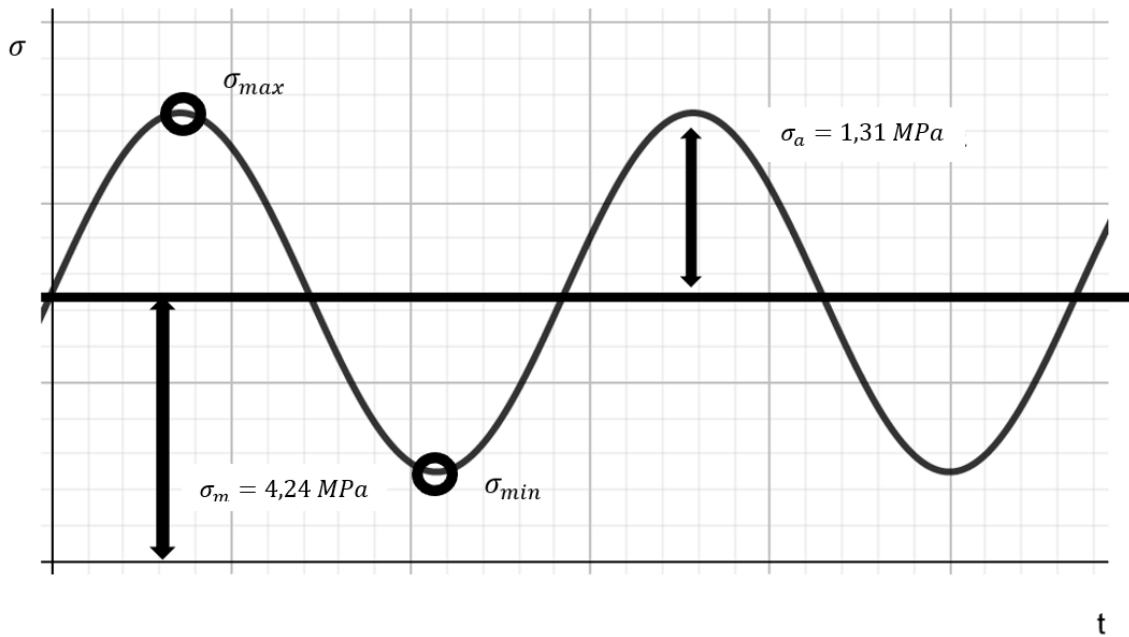


Figura 34. Representación gráfica de esfuerzos

La forma de la gráfica de esfuerzos replica a la de la fuerza, y gracias a ella podemos hallar gráficamente el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a = 4,24 + 1,31 = 5,55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a = 4,24 - 1,31 = 2,93 \text{ MPa}$$

El valor de k_f , factor de concentración de esfuerzos a la fatiga, de la ecuación de Goodman tiene en cuenta aquellos casos en los que existen cambios de sección. Como en este caso no existen cambios de sección ya que por simplificación del problema hemos supuesto que el brazo tiene sección rectangular constante, el factor k_f será igual a 1.

Por lo tanto, observamos que hasta el momento tenemos la ecuación de Goodman (2) de la siguiente manera:

$$\frac{1,31}{S_e} + \frac{4,24}{S_{ut}} = \frac{1}{c.s.}$$

Con ello, antes de seguir realizando cálculos, es de importancia tener en cuenta que:

- Si el esfuerzo alternante es mayor que S_e , la pieza fallará.
- Si el esfuerzo medio es mayor que S_{ut} , la pieza romperá en el primer ciclo de carga.

A continuación, calcularemos los valores del límite de la resistencia a la fatiga real (S_e) y del esfuerzo ultimo a la tensión (S_{ut}), pudiendo obtener finalmente el coeficiente de seguridad.

Para calcular S_e utilizaremos la ecuación de Marín la cual utiliza coeficientes modificativos, empíricamente obtenidos, para cambiar los valores del comportamiento a fatiga de una probeta y adaptarlo al modelo real.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (3)$$

Primero debemos obtener el limite de resistencia a la fatiga de la probeta S'_e . Seleccionamos un acero AISI 1006 estirado en frío cuya resistencia última S_{ut} es de 330 MPa (Tabla 4).

Por la teoría se indica que si $S_{ut} \leq 1400 \text{ MPa}$ entonces $S'_e = 0,5 * S_{ut}$, por lo que nos queda que $S'_e = 0,5 * 330 = 165 \text{ MPa}$.

Seguidamente obtenemos los coeficientes modificativos:

- *Factor de superficie k_a*

Por la teoría conocemos que este factor se calcula por medio de la formula $k_a = a * s_{ut}^b$ donde los valores a y b se obtienen de la tabla 5. Como el acabado superficial es un laminado en frio, $a=4,51 \text{ MPa}$ y $b=-0,265$.

$$k_a = 4,51 * 330^{-0,265} = 0,97$$

ACABADO SUPERFICIAL	Factor a		Exponente b
	Kpsi	Mpa	
Rectificado	1,34	1.58	-0.085
Mecanizado o laminado en frío	2,70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14,4	57.70	-0.718
Forjado	39,9	272.00	-0.995

Tabla 5. Tabla valores a y b para factor de superficie

- *Factor de tamaño k_b*

Como trabaja a flexión, este factor hay que tomarlo en cuenta. Debido a que tenemos una sección rectangular deberemos hallar el diámetro equivalente de nuestra sección real.

$$d_e = 0,808\sqrt{ab} = 0,808\sqrt{130 * 145} = 110,93 \text{ mm}$$

Según la teoría, si $d > 51\text{mm}$, entonces $0,6 < k_b < 0,75$ por lo que, con este diámetro equivalente, optamos por tomar $k_b = 0,75$

- *Factor de tipo de carga k_c*

Según la teoría, como el brazo en este caso trabajará a flexión: $k_c = 1$

- *Factor de temperatura k_d*

El robot trabajará en una cadena de montaje dentro de un pabellón industrial, por lo que hacemos una suposición de que trabajará aproximadamente a 20°C. Por la tabla 6 en donde se nos indican diferentes valores de k_d para diferentes temperaturas de trabajo determinamos que $k_d = 1$

T ° C	k_d	T ° C	k_d
20	1.000	300	0.975
50	1.010	350	0.927
100	1.020	400	0.922
150	1.025	450	0.840
200	1.020	500	0.766
250	1.000	550	0.670
		600	0.546

Tabla 6. Valores k_d para diferentes temperaturas

- *Factor de otras influencias k_e*

Ya que el robot va a trabajar en una cadena de montaje donde el fallo de una pieza podría suponer una gran cantidad de pérdidas, se considera un factor de confiabilidad del 99,9%, por lo que por la tabla 7 donde se consideran los diferentes valores para k_e según la confiabilidad, obtenemos que $k_e = 0,753$.

Confiabilidad	Factor de corrección
0.5	1.000
0.9	0.897
0.95	0.868
0.99	0.814
0.999	0.753

Tabla 7. Tabla para el factor de otras influencias según la confiabilidad

Con todos los términos conocidos aplicamos (3) y obtenemos que:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = 0,97 * 0,75 * 1 * 1 * 0,753 * 165 = 90,39 \text{ MPa}$$

Este valor de S_e junto con el valor de S_{ut} son valores buenos ya que cumplen las condiciones mencionadas anteriormente de que S_e no sea mayor que el esfuerzo alternante y que S_{ut} no sea mayor que el esfuerzo medio. Por lo tanto, la pieza no romperá nunca por fatiga.

Resolviendo la ecuación de Goodman (2) con todos los términos ya conocidos nos queda que:

$$\frac{1,31}{90,39} + \frac{4,24}{330} = \frac{1}{c.s.} \rightarrow c.s. = 36,57$$

Observamos que el coeficiente de seguridad bastante grande, por lo que habría mucho margen de rediseño para poder optimizar el tamaño del brazo o para poder funcionar con cargas mayores.

Podemos conocer rápidamente la vida a fatiga con otras cargas realizando un gráfico S-N. Este grafico contiene 3 zonas: vida a bajo ciclaje, vida a alto ciclaje y vida infinita (Figura 35).

La vida a bajo ciclaje es aquella que dispone de hasta 1.000 ciclos. La vida a alto ciclaje, por el contrario, es aquella que dispone de hasta 1.000.000 y la vida infinita se refiere a que la pieza nunca romperá por fatiga. En cualquier diseño se busca que la vida sea infinita, aunque a veces esto al no ser posible se puede determinar el tiempo de vida útil que puede tener una pieza, y reemplazarla por mantenimiento antes de que falle por fatiga.

Tenemos todos los datos para poder realizar la gráfica excepto el de la vida a 1000 ciclos el cual se puede obtener igual que hemos obtenido S_e , aplicando los mismos coeficientes modificativos y obteniendo previamente la resistencia a la fatiga a bajo ciclo de la probeta:

$$S'_{10^3} = 0,9 * S_{ut} = 0,9 * 330 = 297 \text{ MPa}$$

$$S_{10^3} = k_a k_b k_c k_d k_e S'_{10^3} = 0,97 * 0,75 * 1 * 1 * 0,753 * 297 = 162,7 \text{ MPa}$$

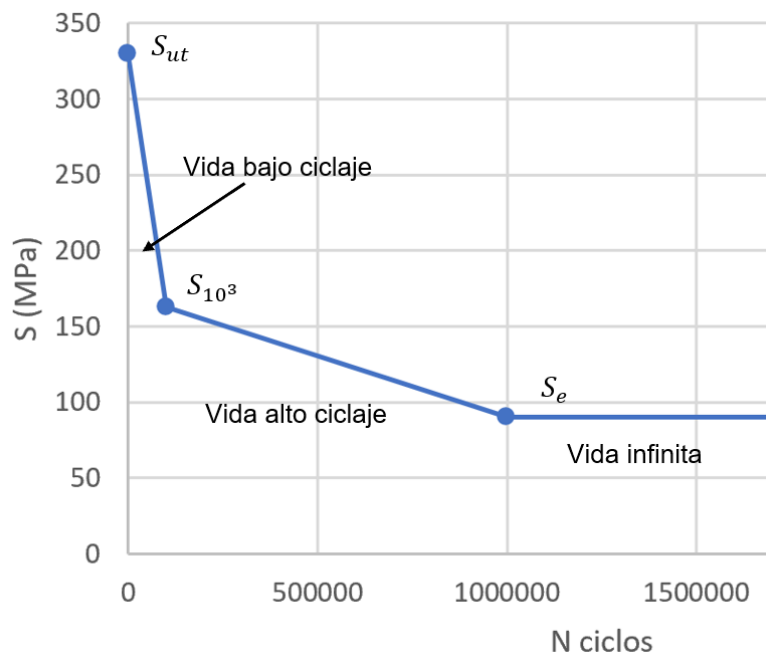


Figura 35. Gráfica S-N

Ubicando cualquier valor de tensión en el eje vertical y trazando por él una línea horizontal, si corta a la gráfica, podremos ver cuál es el número de ciclos de vida que tiene justo en el valor del eje horizontal donde caiga el corte. En el caso de que no corte la gráfica, tendrá vida infinita, es decir, la pieza no romperá por fatiga.

3.3.3. Rodamientos cálculos estáticos

Debido al peso del conjunto además de la carga axial que se producirá al ejercer el par máximo para apretar los tornillos, es conveniente comprobar que los rodamientos que han sido seleccionados para el diseño son capaces de soportar las cargas.

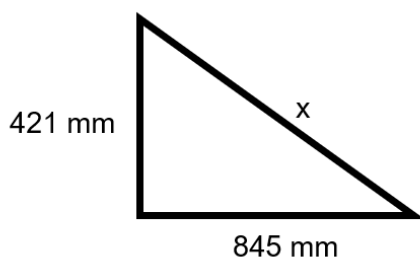
Vamos a suponer el momento en el que la plataforma se encuentra estática mientras que el robot se encuentra apretando un tornillo con el máximo par determinado previamente de 125 Nm.

Para hacer un estudio más exigente, a pesar de que se vayan a instalar 8 rodamientos, dos por cada rueda, vamos a suponer que en cada rueda solo habrá uno, de tal forma que, si uno es capaz de soportar las cargas, dos lo harán sin problema.

En primer lugar, debemos conocer la carga radial que va a soportar cada rodamiento. Para ello tomamos en cuenta el peso suspendido calculado anteriormente en el apartado 3.3.1. el cual es de 511,7 kg a repartir entre los 4 rodamientos.

Como el reparto de esos 511,7 kg (5,01 kN) no será uniforme debido a que dependerá de la posición del robot en la que se encuentre apretando, para hacer el estudio aún mas exigente si cabe, supondremos que todo ese peso irá destinado para un solo rodamiento.

En segundo lugar, debemos conocer la carga axial que soportará el rodamiento al estar el brazo robot realizando la función de apriete. Como este apretará a 125 Nm y está anclado en el centro de la plataforma, por medio del teorema de Pitágoras conociendo la distancia que hay desde la ubicación del rodamiento mas desfavorable hasta el centro, podemos calcular la distancia de palanca y posteriormente la fuerza axial buscada, la cual la supondremos toda para un solo rodamiento también.



$$x = \sqrt{845^2 + 412^2} = 940,09$$

$$F_{axial} * 940 * 10^{-3} = 125 (Nm) \rightarrow F_{axial} = 132,98 N$$

Con estos datos obtenidos de carga axial y carga radial obtenemos la carga estática equivalente la cual compararemos con la capacidad de carga estática básica del rodamiento proporcionada por el fabricante cuyo valor en este caso es de 166 kN. En el caso de superar dicho valor, habría que rehacer el diseño con otro rodamiento ya que el existente no sería capaz de cumplir con lo exigido.

Para obtener la carga estática equivalente P_o aplicamos la fórmula que aparece en las especificaciones de SKF:

$$P_o = F_r + Y_o * F_a$$

$$P_o = 5,01 + 2,8 * (132,98 * 10^{-3}) = 5,38 kN$$

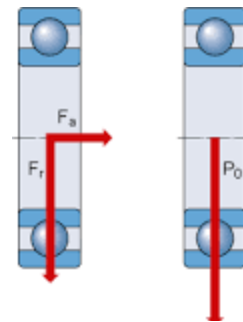


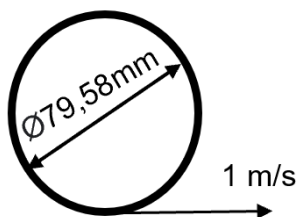
Figura 36. Fuerzas en rodamientos (fuente: SKF)

El factor de carga axial Y_o se obtiene de la tabla de datos de cálculo del rodamiento.

Como la carga estática equivalente no supera la carga estática básica del rodamiento, se puede asegurar que el tipo de rodamiento seleccionado está preparado para poder hacer frente a las cargas existentes y por lo tanto es válido.

También haremos la comprobación de si el rodamiento es capaz de aguantar las revoluciones a las que girará el eje.

Supondremos que la plataforma se desplaza a una velocidad de 1 m/s. Como conocemos el diámetro primitivo de las ruedas dentadas (79,58mm), podremos hallar la velocidad angular del eje y de ahí las revoluciones por minuto a las que se mueve.



$$w = \frac{v}{r} = \frac{1 \left(\frac{m}{s}\right)}{79,58 * 10^{-3}(m)} = 12,57 \left(\frac{1}{s}\right) \rightarrow 78,96 \left(\frac{rad}{s}\right)$$

$$w = 2\pi f \rightarrow f = \frac{w}{2\pi} = \frac{78,96}{2\pi} = 0,08 \left(\frac{rev}{s}\right) \rightarrow 4,77 rpm$$

Como la velocidad límite del rodamiento seleccionado es de 7500 rpm, dato proporcionado por el fabricante, podemos decir que la velocidad de giro a la que nosotros llegaremos no significará ningún tipo de compromiso.

3.4. Conclusiones

Hemos obtenido un diseño el cual, por los cálculos de ejemplo que se han realizado con hipótesis, indica ser válido para el uso definido. En el caso de poder obtener más datos reales con los que poder trabajar de forma menos incierta y realizar con ellos un mayor número de cálculos, podríamos rediseñar el montaje final que hemos obtenido y optimizarlo.

El modelo final al que se ha llegado será capaz de apretar al par de apriete correspondiente gran variedad de tornillos en un margen desde 70 Nm hasta 170 Nm debido a la pistola neumática que se va a instalar en la brida de montaje del robot, a pesar de que se ha comentado que el par máximo al que se tendrán que apretar los tornillos será de 125 Nm. Esto convierte el montaje final en un diseño más versátil capaz de adaptarse a un mayor número de exigencias y por lo tanto siendo de mayor dificultad la obsolescencia por la incorporación de nuevos modelos de vehículos a la línea que necesiten un mayor par de apriete en sus tornillos inferiores.

Al incorporar un robot comercial y no fabricado a medida, en el caso de que por los cálculos realizados se llegue a la conclusión de que es necesaria una optimización en el brazo, tendremos mayor dificultad para modificarlo. Pero ello no significa que no se pueda hacer nada, siempre tendremos la posibilidad de consultar a la empresa responsable del diseño y venta del brazo robot que más opciones son de las que disponen y cual se podría adaptar aún mejor a los resultados obtenidos.

4. ANEXOS

4.1. Anexo 1

En este anexo se muestra en la figura 37 la explosión realizada en el programa de CAD NX 2.0 del montaje del diseño final.

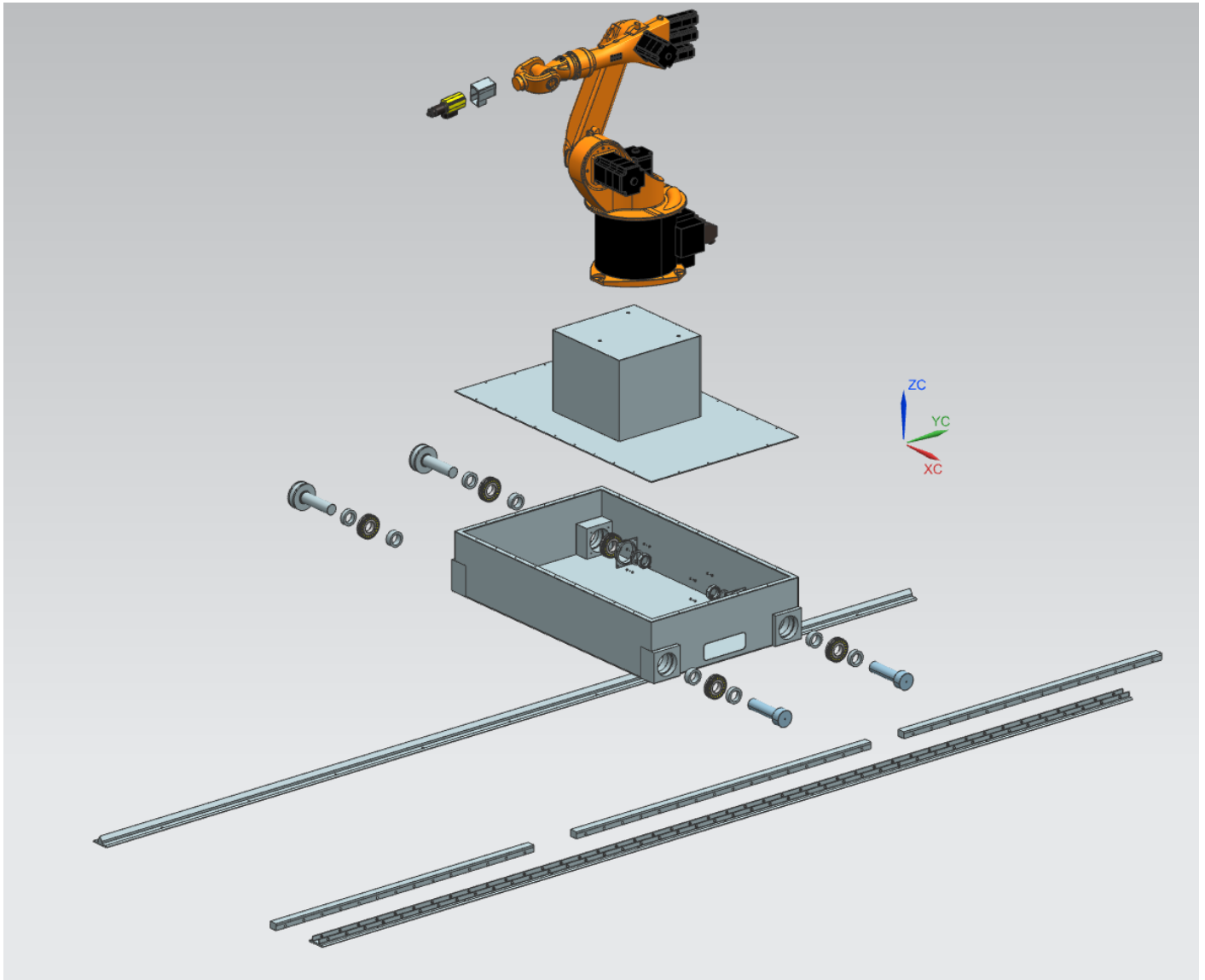


Figura 37. Explosión del diseño final

4.2. Anexo 2

Este anexo muestra el plano de fabricación de la pieza por la que se fija la pistola neumática comercial a la brida de montaje del brazo robot.

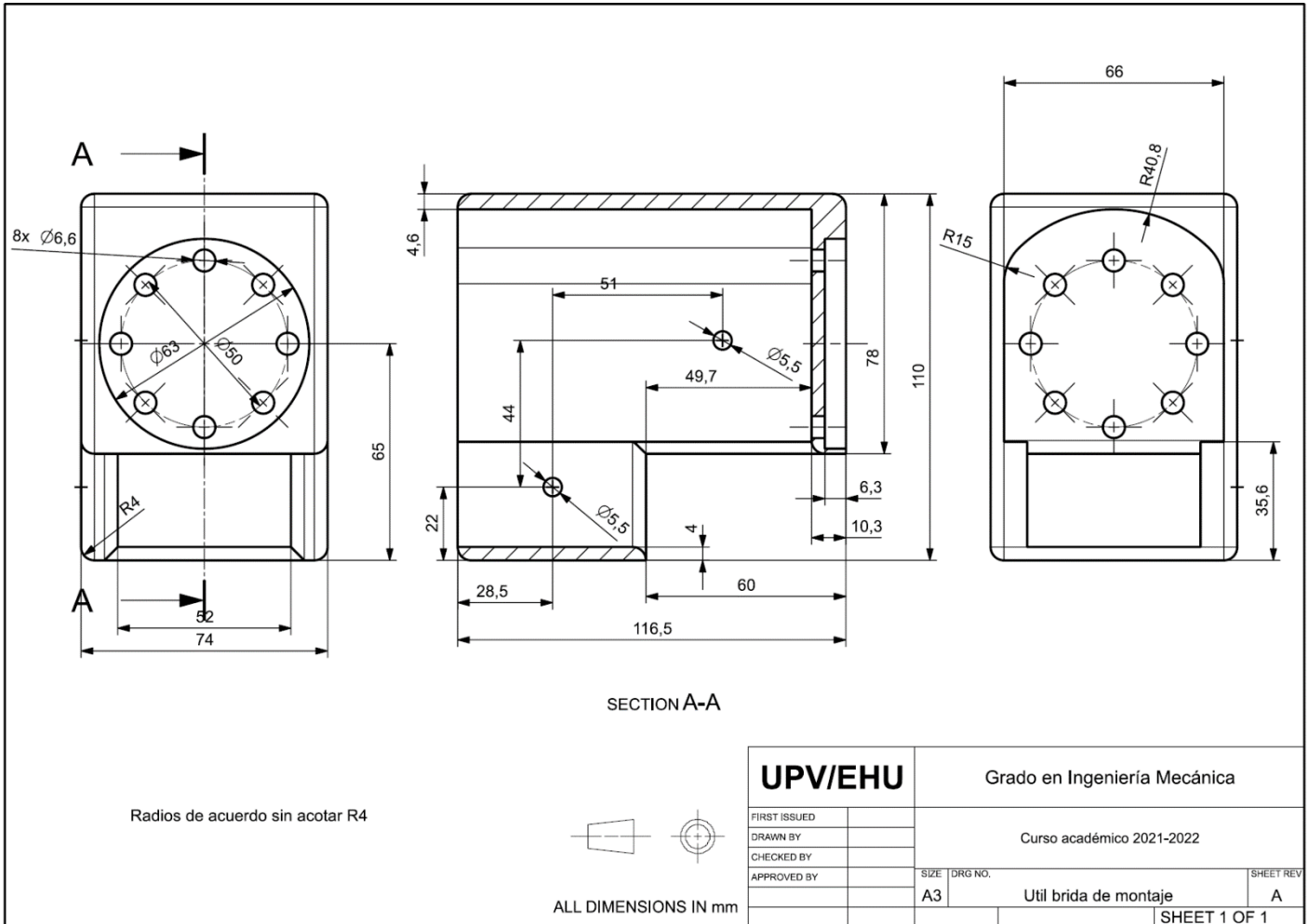


Figura 38. Plano de fabricación del útil de la brida de montaje

4.3. Anexo 3

En este anexo se incluye el plano de fabricación de la tapa que fija axialmente el rodamiento del eje que va en la parte interior de la plataforma.

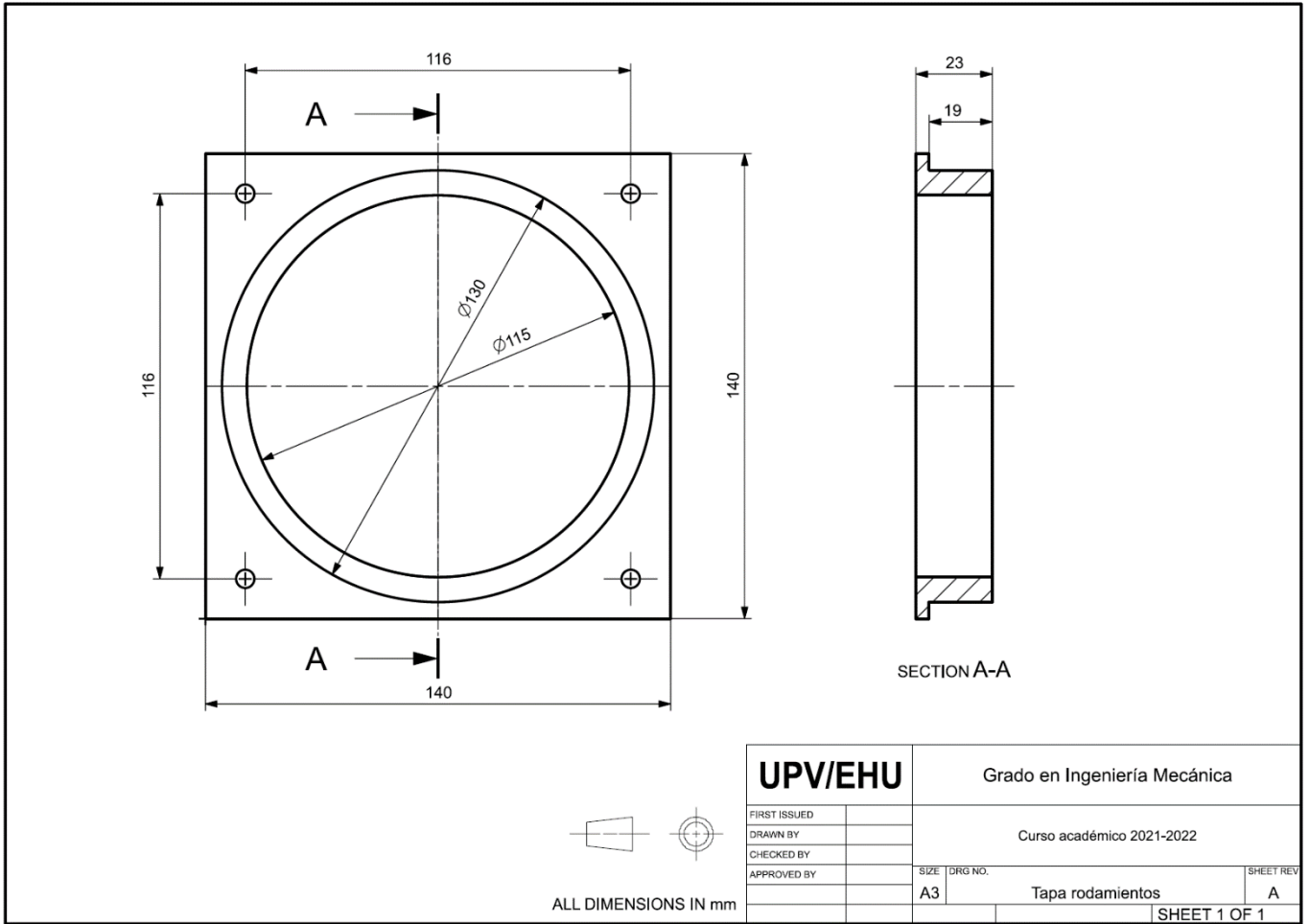


Figura 39. Plano de la tapa de los rodamientos

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] “Las principales ventajas de trabajar con robots”. Artículo de Deloitte: <<https://www2.deloitte.com/es/es/pages/operations/articles/principales-ventajas-trabajar-con-robots.html>>.

[2] “Los nuevos coches ya no caben en un garaje medio”. Noticia publicada en 20minutos por N. Ferragutcasas y A. Larrañeta. <<https://www.20minutos.es/noticia/213471/0/nuevos/coches/garaje/>>.

[3] Datos obtenidos del manual de montaje “Mazda MX-5 Workshop Manual”

[4] Definición de: <[https://es.wikipedia.org/wiki/NX_\(Unigraphics\)](https://es.wikipedia.org/wiki/NX_(Unigraphics))>

[5] Selección de cremalleras y ruedas dentadas comerciales en Tecnopower, Transmisión y Movimiento Lineal, catálogo de “Apex Dynamics”: <<https://www.tecnopower.es/calculo-y-seleccion-de-cremallera-precision>>

[6] Selección de rodamientos de rodillos a rótula por SKF: <<https://www.skf.com/es/products/rolling-bearings/roller-bearings/spherical-roller-bearings/productid-22212%20E>>

[7] Tipos de brazos robot generales: <https://es.wikipedia.org/wiki/Brazo_robot>

[8] Brazo robot tipo cilíndrico: <<https://es.lamdageeks.com/cylindrical-robots/>>

[9] Brazo robot tipo polar: <<https://brazosroboticos.net/esfericos/>>

[10] Brazo robot tipo SCARA: <https://es.wikipedia.org/wiki/Robot_SCARA>

[11] Brazo robot tipo articulado: <<https://www.esneca.com/blog/brazo-robotico-industrias/>>

[12] Miguel Díaz-Rodríguez, Hector Fabio Quintero-Riaza, Luis Adriana Mejía-Calderón, Germán Holguin, Marlon Herrera-López, et al.. Aplicación de los Robots Paralelos. Manipuladores Paralelos: Síntesis, Análisis y Aplicaciones, 2018. fihal-01907282f: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01907282/document>>

[13] Empresa KUKA: <<https://www.kuka.com/es-es>>

[14] Catálogos brazos robot KUKA: <<https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/robot-industrial>>

[15] Brazo robot KUKA KR 16: <https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/pf0035_kr_16_s_es.pdf?rev=634eed17df4f46fda333c8d488b32cd9&hash=B7C1D12CCD7AA59923F3E131FB46E3A1>

[16] Empresa Atlas Copco: <<https://www.atlascopco.com/es-es>>

[17] Especificaciones pistola modelo LTD61 H170-13-RE de Atlas Copco: <<https://www.traceparts.com/es/product/atlas-copco-ltd61-h17013re-with-square-drive-12-inch?Product=10-04052020-062720&PartNumber=8431080815>>

[18] Plano de la pistola proporcionado por el fabricante: <<https://webbox.atlascopco.com/webbox/dimdrw/index.html?8431080815>>