



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ROBOT SENSIBLE A LA COLISIÓN: HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR FUERZA-TORSIÓN

Autor: Alejandra Muñoz Ruiz

Director: Dr.-Ing. Sebastian Repetzki

Madrid

Julio de 2019

A Jaime.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DOCUMENTOS PREVIOS	7
Autorización para la digitalización, depósito y divulgación	9
Autorización del Director	11
Portada	15
Resumen	17
<i>Abstract</i> (en inglés)	21
PROYECTO	23
Memoria	25
Introducción	27
Herramienta de Calibración original	31
Herramienta de Calibración nueva	37
Resultados	45
Conclusiones	51
Futuros desarrollos	53
Anejo de datos técnicos de los perfiles ITEM	55
Planos	65
Planos del Robot	67
Planos del Sensor F-T	68
Planos de la Herramienta de Calibración del Sensor F-T	71
Original	73
Nueva	77
Presupuesto	97
Bibliografía	101

DOCUMENTOS PREVIOS

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

La autora Dña. Alejandra Muñoz Ruiz

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: ROBOT SENSIBLE A LA COLISIÓN: HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR FUERZA-TORSIÓN, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma.
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 16 de julio de 2019

ACEPTA



Fdo.: ALEJANDRA MUÑOZ RUIZ

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**ROBOT SENSIBLE A LA COLISIÓN:
HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR FUERZA-TORSIÓN**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2018/2019 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alejandra Muñoz Ruiz

Fecha: 16 / 07 / 2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Dr. -Ing. Sebastian Repetzki

Fecha: 16 / 07 / 2019



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ROBOT SENSIBLE A LA COLISIÓN: HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR FUERZA-TORSIÓN

Autor: Alejandra Muñoz Ruiz

Director: Dr.-Ing. Sebastian Repetzki

Madrid

Julio de 2019

ROBOT SENSIBLE A LA COLISIÓN: HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR FUERZA-TORSIÓN

Autor: Muñoz Ruiz, Alejandra.

Director: Repetzki, Sebastian.

Entidad colaboradora: Management Center Innsbruck, GmbH.

RESUMEN DEL PROYECTO

INTRODUCCIÓN

Se dispone de un robot industrial fabricado por la empresa KUKA® que, mediante una vara táctil, reconoce figuras y las digitaliza en tres dimensiones. Para ello, utiliza un sensor fuerza-torsión desarrollado por la empresa ATI® que recoge en forma de señal de voltaje los esfuerzos que recibe la vara al tocar la superficie del objeto. Tiene seis dimensiones, por lo que las medidas tomadas son una composición de estas. En intervalos regulares de tiempo el sensor necesita ser calibrado. El proceso requiere una estructura compuesta por diferentes barras a la que se le colocan unas pesas de 20kg. Estas ejercen esfuerzos de torsión y flexión en el flanco del sensor durante las diferentes orientaciones que se toman en el proceso de calibrado.

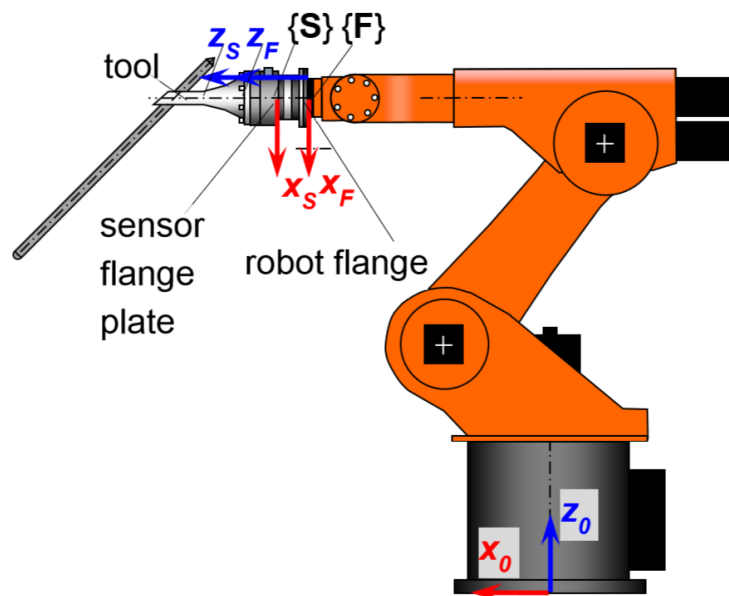


Figura I: Modelo del robot KUKA con vara táctil.

El proceso de calibrado es crítico, pues de él depende directamente la precisión del sensor. Por ello, el objetivo de este proyecto es desarrollar un óptimo rediseño de

esta herramienta de calibración, pues la utilizada hasta ahora era demasiado inestable y su instalación en el robot complicada.

La nueva estructura es más robusta para resistir eficazmente los esfuerzos de flexión y torsión causados por la carga, y así evitar las fuertes vibraciones que ocurrían durante la calibración con la herramienta original. Su diseño es flexible, siempre cumpliendo ciertos requisitos. Además, esta se adapta al flanco del sensor, por lo que se ahorra en “eslabones” intermedios que, inevitablemente, interferían en la medida. De este último punto también se obtiene la ventaja de un montaje manual más sencillo y rápido, por lo que son necesarios menos operarios para llevarlo a cabo.

METODOLOGÍA

En primer lugar, se rediseñó la herramienta de calibración para que aumentara su estabilidad: tomando perfiles más robustos de barras más largas que resisten mejor los esfuerzos de la carga (se utilizaron los disponibles en el almacén del laboratorio, por lo que no fue necesario adquirir nuevos).

Uno de los requisitos de diseño más importantes consistía en que fuera una estructura reconfigurable. El hecho de que las piezas se puedan colocar formando múltiples composiciones da lugar a centros de gravedad en subespacios distintos superpuestos, aumentando la extensión del espacio total de control del sensor y mejorando la precisión en sus seis dimensiones. Para lograrlo, fueron suficientes cuatro configuraciones diferentes (no simétricas entre sí) con estructura tridimensional. Uniendo sus centros de gravedad se formó aproximadamente un tetraedro que abarcaba el volumen de trabajo delante del sensor.

A continuación, se creó la maqueta digital con el software SolidWorks® y se calcularon los centros de gravedad y los tensores de inercia de cada configuración. Es importante mencionar que este modelo CAD ayuda a calcular el centro total de gravedad, pero que medidas más detalladas de la masa de cada componente fueron necesarias para ajustar este modelo al real. Como límites de precisión, el director del proyecto estableció un error de centro de gravedad de $\pm 1\text{mm}$ y $\pm 100\text{g}$ de masa total.

Una vez fabricada la herramienta, se le colocaron las pesas y se instaló directamente en el flanco del sensor del robot.

Por último, se registraron las medidas con cada configuración tomando diversas orientaciones en el espacio. Se observaron las señales del sensor correspondientes evaluando el resultado.

RESULTADOS

Como se ha señalado previamente, el sensor recogió las medidas de fuerza y torsión durante las cuatro configuraciones. Cada una de ellas fue tomando diferentes posiciones en el espacio, así las fuerzas y momentos variaron y progresivamente se logró un registro completo de las seis dimensiones del sensor.

A partir de los datos obtenidos se representaron las gráficas de las señales de las seis dimensiones, observando especialmente el intervalo en el que la estructura absorbía la energía del impacto. Tras apreciar la mejora del rendimiento cualitativo de la herramienta (era evidente que la estructura vibraba en menor medida al aplicarle una perturbación), se comprobó el progreso también cuantitativamente, comparando las medidas del sensor en el caso original y el nuevo: se logró incrementar la frecuencia natural desde 2,8 Hz (con la mejor configuración original) hasta 11,4 Hz (con la menos estable nueva). Además, la amplitud de las vibraciones disminuyó en gran medida y la amortiguación creció hasta el punto de estabilizar absolutamente las señales de todas las dimensiones.

CONCLUSIONES

El éxito de la nueva herramienta de calibración se debe a las distintas mejoras aplicadas: al aumento de la resistencia de toda la estructura, disminuyendo la vibración de esta durante el proceso de calibración; y a su mejorada instalación en el sensor, eliminando elementos intermedios que aportan ruido en la medida. Todo esto se traduce en una calibración de calidad y, consecuentemente, en un sensor F-T más preciso.

Por último, cabe recalcar que el nuevo diseño, al ser más fácilmente instalable, permite que el sensor sea calibrado con mayor frecuencia, más rápidamente y por un solo operador, lo que supone un ahorro de tiempo y trabajo.

REFERENCIAS

[REPE19] Repetzki S., “Project Book Team MA-MECH-18-VZ-2B Collision Sensitive Robot”, Management Center Innsbruck 2019. Documentación interna.

[REPE18] Repetzki S., “Calibration of a Force-Torque-Sensor attached to a KUKA Robot KR60HA at MCP”, Management Center Innsbruck 2018. Documentación interna.

COLLISION SENSITIVE ROBOT: FORCE/TORQUE-SENSOR CALIBRATION TOOL

INTRODUCTION

An industrial KUKA® robot with a tactile cane that recognises and digitalises figures in three dimensions is disposed. It uses a force-torque sensor by company ATI® which collects the efforts that the cane receives when touching the object in a voltage signal shape. It has six dimensions, so the measurements are a composition of them. In regular time intervals the sensor needs to be calibrated. This process requires a fixed structure made of different bars to which is attached 20kg weights. These exert torque and flexion efforts on the sensor while it takes different orientations during the calibration process.

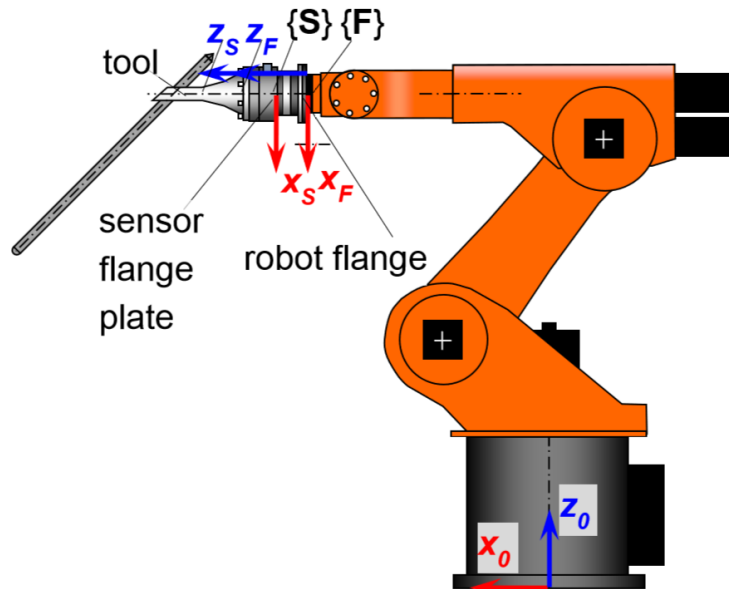


Figure I: Robot model with tactile cane.

The calibration process is critical, as the sensor's accuracy depends directly from it. This is the reason why the aim of this project is to develop an optimal redesign of this calibration tool, as the one used until now was too unstable and its attachment to the robot, complex.

The new structure is more robust so it can efficiently resist the flexion efforts and torques caused by the load, and then avoid the strong vibrations that occur while calibrating with the original tool. Its design is not fixed but some requirements must be fulfilled. Furthermore, the tool is adapted to the sensor flange, so the intermediate discs are no longer necessary, and they do not interfere in the measurements anymore. As a bonus from this last point, an easier and quicker manual installation of the tool is achieved, so less workers are required to develop it.

METHODOLOGY

In the first place the calibration tool was redesigned so its stability was augmented: more robust profiles and longer bars were used, so they could resist more the cargo's efforts (taken from the available in the laboratory, so it was not necessary to acquire new material).

One of the most important design requirements consisted of a reconfigurable tool. The fact that the parts can compose multiple structures leads to centres of mass in different overlapped subspaces, increasing the extension of the control space of the sensor and improving the accuracy in its six dimensions. To achieve this, four different non-symmetrical configurations with three-dimensional structures were enough. The tetrahedron-shaped working volume in front of the sensor was obtained by linking the centres of mass.

Afterwards the digital model was created with SolidWorks® software and the centres of mass and inertia tensors were calculated for each of the four configurations. It is important to mention that this CAD-model is helpful to calculate the total centre of mass, but detailed measurement of each component's mass was needed to adjust it to reality. The Director of the project established the admissible error of $\pm 1\text{mm}$ and $\pm 100\text{g}$ for the calculated centres of mass.

Once the tool was built, the weights were attached and the whole structure was directly installed in the sensor flange of the robot.

By last, each configuration's measurements were registered while taking diverse orientations in the space. The corresponding sensor signals were observed, evaluating the result.

RESULTS

As previously mentioned, the sensor collected force and torque measurements during the four configurations. Each of them took different positions in space so forces and moments varied, and a more complete register was achieved in the six dimensions of the sensor.

The plots of the signals of the sensor's six dimensions were represented from the obtained data, focusing specially on the impact energy absorption interval. After qualitatively observing the improved tool's performance (the stabilisation of the structure was obvious after a perturbation), the qualitative progress was also checked comparing the new signals to the original ones: an incrementation of the eigenfrequency from 2,8 Hz (with the best original configuration) to 11,4 Hz (with the most unstable new one). In addition, the amplitude of the vibrations was enormously reduced, and all dimensions' signals were completely stabilised due to the increased damping.

CONCLUSIONS

The success of the new calibration tool is due to the multiple applied improvements: the increased resistance, lowering the vibration of the structure during the calibration process; and its improved installation in the sensor, removing intermediate elements which caused noise in the signal. All this was translated into a higher quality calibration and, consequently, into a more accurate F/T-sensor.

Finally, it's important to mention the easier installation of the tool in the robot achieved, what led to a more frequent and faster calibration which requires only one operator, and therefore to savings in work and time.

REFERENCES

- [REPE19] Repetzki S., "Project Book Team MA-MECH-18-VZ-2B Collision Sensitive Robot", Management Center Innsbruck 2019. Internal Documentation.
- [REPE18] Repetzki S., "Calibration of a Force-Torque-Sensor attached to a KUKA Robot KR60HA at MCI", Management Center Innsbruck 2018. Internal Documentation.

PROYECTO

MEMORIA

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, en pleno comienzo de la Cuarta Revolución Industrial (también conocida como Industria 4.0), tecnologías que son capaces de hacer a un robot razonar o tomar decisiones desplazan otras más básicas, previamente consideradas Inteligencia Artificial, a tecnología común. Por ejemplo, el reconocimiento sensitivo de objetos, que ahora forma parte de la base sobre la que se construye la Inteligencia Artificial.

De esta forma, el perfecto funcionamiento de las máquinas es un factor básico y cualidades como la precisión pasan de ser características distintivas a fundamentales, de un *plus* a un *must*.

Tomando nota de su importancia, la precisión es el factor de estudio de este proyecto: se persigue una calibración del sensor del robot de máxima calidad, así este recogerá unas medidas lo más exactas posible y, por tanto, los resultados serán fiables.

El robot industrial KR60 del que se dispone está fabricado por la empresa KUKA Inc. y consiste en un brazo articulado de seis ejes que, con ayuda de una vara, reconoce táctilmente figuras en su volumen de trabajo y las representa en tres dimensiones. La misma empresa ha desarrollado el controlador KRC2 que presenta el robot. Por otro lado, utiliza un sensor fuerza-torsión ATI Omega 160 de seis dimensiones que recoge las medidas de los esfuerzos que recibe la vara al tocar el objeto. Además, al añadir movimiento al contacto, se obtienen datos sobre fricción en la superficie. El hecho de que se registren detalles del objeto de esta forma tan minuciosa sitúa el reconocimiento táctil por delante de otros también sensitivos, por ejemplo, el visual. A continuación, se muestra el esquema del robot:

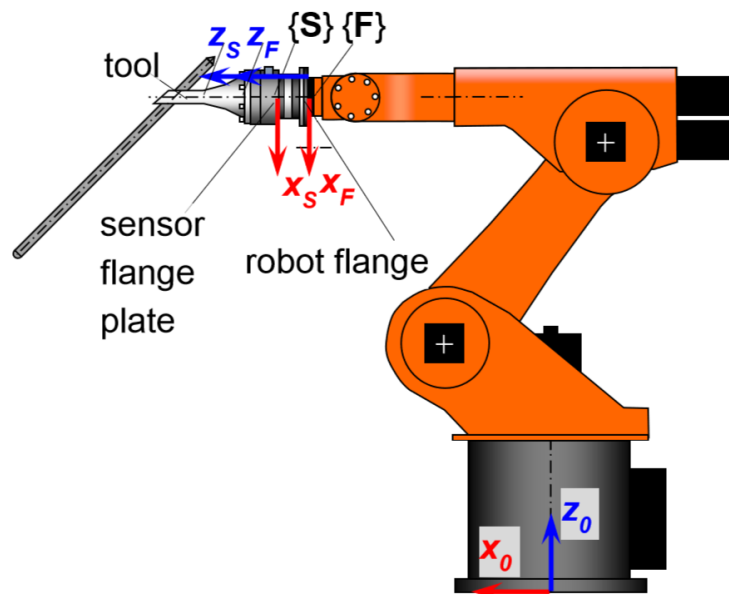


Figura 1.1: Esquema del robot.

En el siguiente esquema se representa la simulación simplificada del reconocimiento de un objeto por parte del robot. Primeramente, el robot es dirigido por medio de un control remoto hasta el objeto; cuando la vara toma contacto, el sensor mide los esfuerzos que recibe esta. Después, por medio de un software desarrollado por KUKA y MathWorks se recogen los datos y se interpretan para construir la figura.

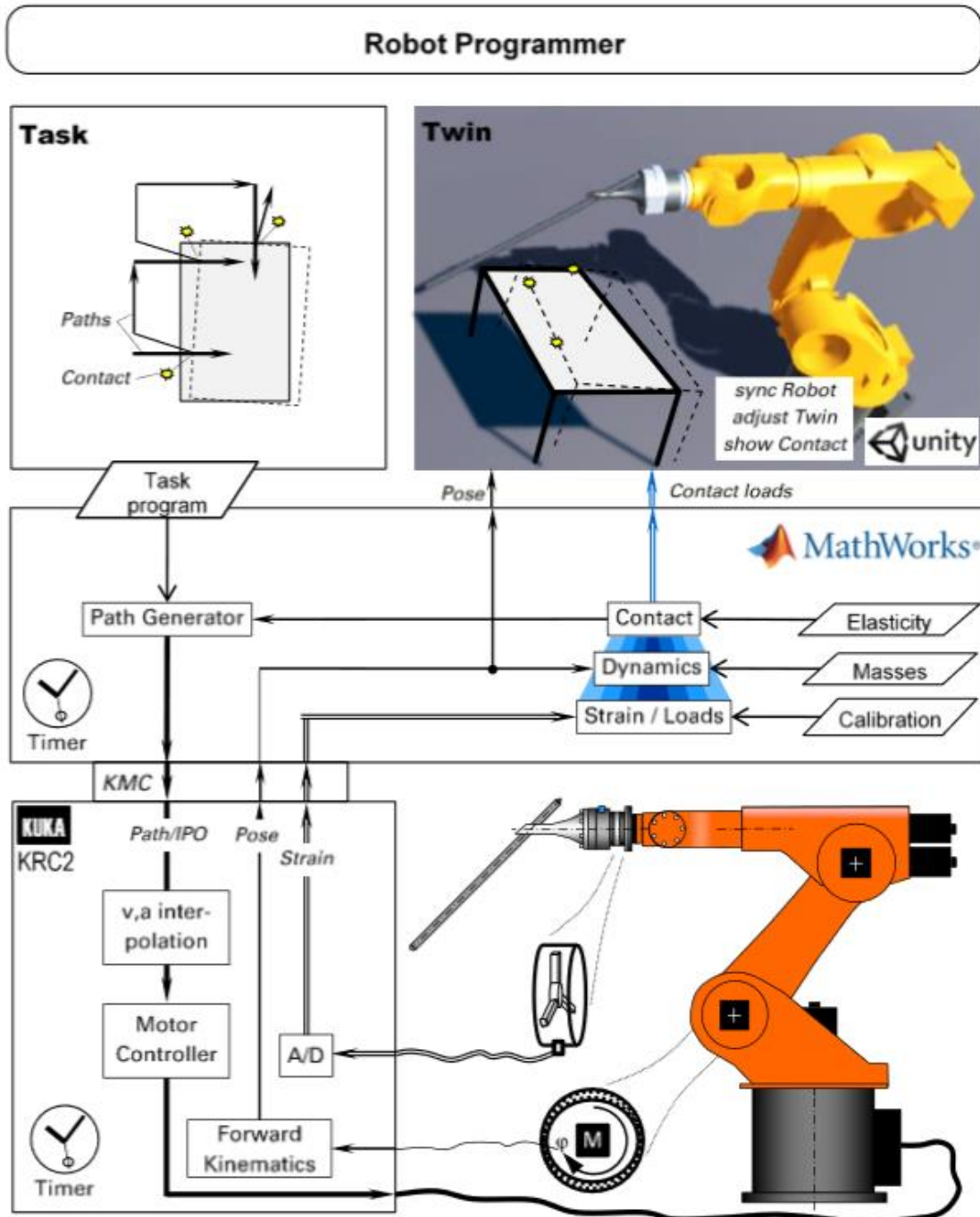


Figura 1.2: Esquema del sistema.

El sensor, tras su uso continuado, pierde precisión, por lo que necesita ser calibrado manualmente. Para ello se dispone de una herramienta de calibración, que consiste en una estructura formada por barras de aluminio a la que se instalan unas pesas. Estas ejercen unos esfuerzos de torsión y flexión en la estructura que son recogidos por el sensor. Analizando las frecuencias de las medidas se observa cómo, finalmente, ha disminuido el error.

La herramienta de calibración del sensor F-T utilizada hasta el presente proyecto presenta, tras su evaluación, inestabilidad durante el proceso de calibración, lo que deriva en una calibración de baja calidad e, inevitablemente, en un sensor impreciso.

El proyecto, entonces, consiste en un rediseño de esta herramienta de calibración, con la que el sensor toma medidas más precisas y se obtienen resultados óptimos. En los siguientes puntos se explica detalladamente el proceso de análisis y desarrollo llevado a cabo para conseguir el objetivo.

HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR F-T ORIGINAL

Como previamente se ha introducido, la herramienta de calibración actual presenta una importante inestabilidad mientras dura el proceso de calibración. Principalmente se debe a la baja robustez de los perfiles de las barras que configuran la estructura, que soporta una carga de 20kg.

La figura 2.1 muestra la estructura de la herramienta de calibración original y su sistema de referencia:

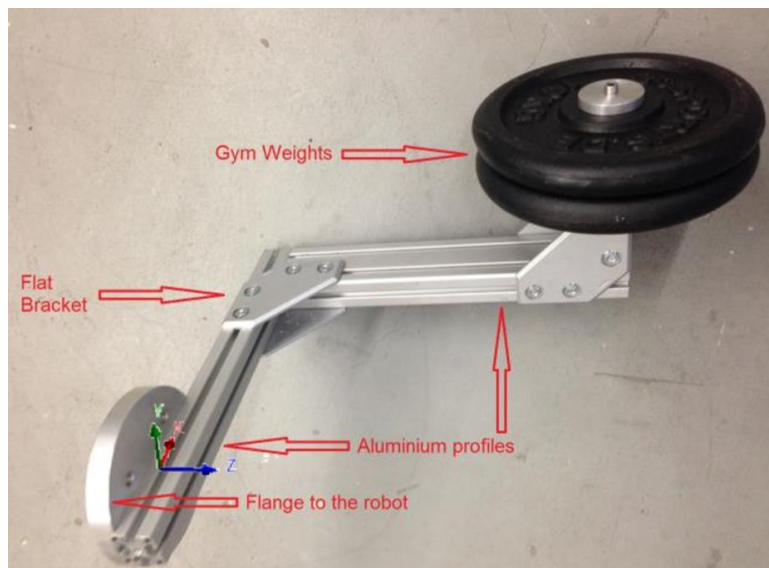


Figura 2.1: Herramienta de calibración original.

Como se puede observar en las siguientes figuras, los perfiles presentan áreas reducidas (40x40 y 80x40mm) que fácilmente se someten a flexión y torsión ante una carga tan pesada.

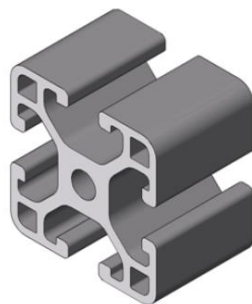


Figura 2.2: Perfil posterior.

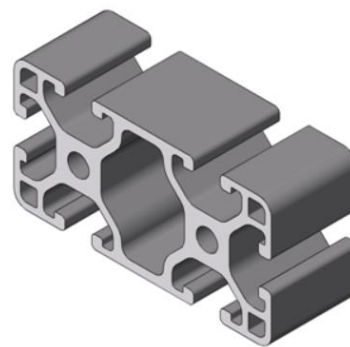


Figura 2.3: Perfil anterior.

Otro factor importante que explica la vibración durante el proceso de calibración es la instalación al flanco del sensor por medio de discos adaptadores intermedios. Estos son necesarios ya que el plato de la herramienta tiene cuatro agujeros y el del flanco seis. Estos elementos intermedios, como es de esperar, interfieren en la señal del sensor aumentando el ruido. Además, son muy pesados, lo que hace de la instalación un proceso complejo en el que se necesitan varios operarios para llevarlo a cabo con seguridad.

Para calibrar de forma óptima es necesario maximizar la extensión del espacio total de control del sensor y así aumentar la precisión de sus seis dimensiones. Esto se consigue mediante una herramienta de calibración reconfigurable: las piezas forman distintas composiciones dando lugar a centros de gravedad en subespacios distintos que se superponen.

En la siguiente figura se muestran las cuatro configuraciones de la herramienta original con estructura tridimensional. El volumen de trabajo está abarcado por el aproximado tetraedro delante del sensor que forman los centros de gravedad de cada configuración unidos entre sí. La base del tetraedro estaría formada por los centros de gravedad de las tres primeras configuraciones y la cúspide por la cuarta, que es la que otorga la tridimensionalidad al sistema. Es necesario mencionar la perjudicial simetría entre la primera y la segunda configuración, que afecta a la independencia de los centros de gravedad.

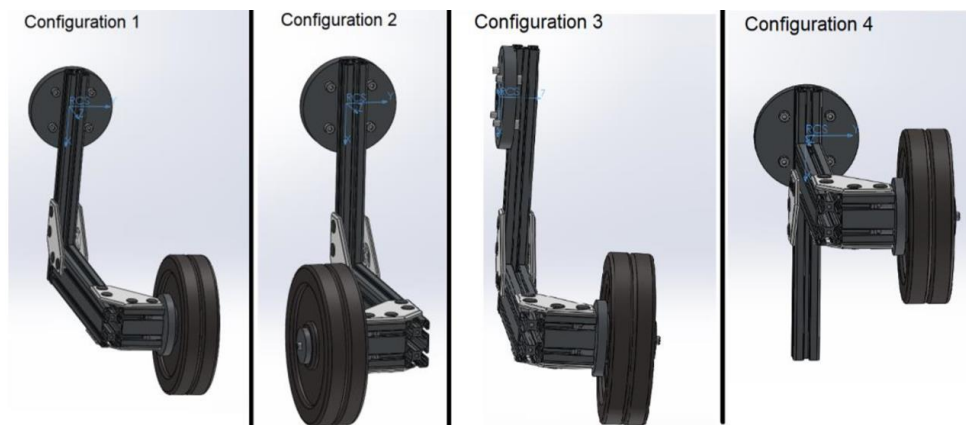
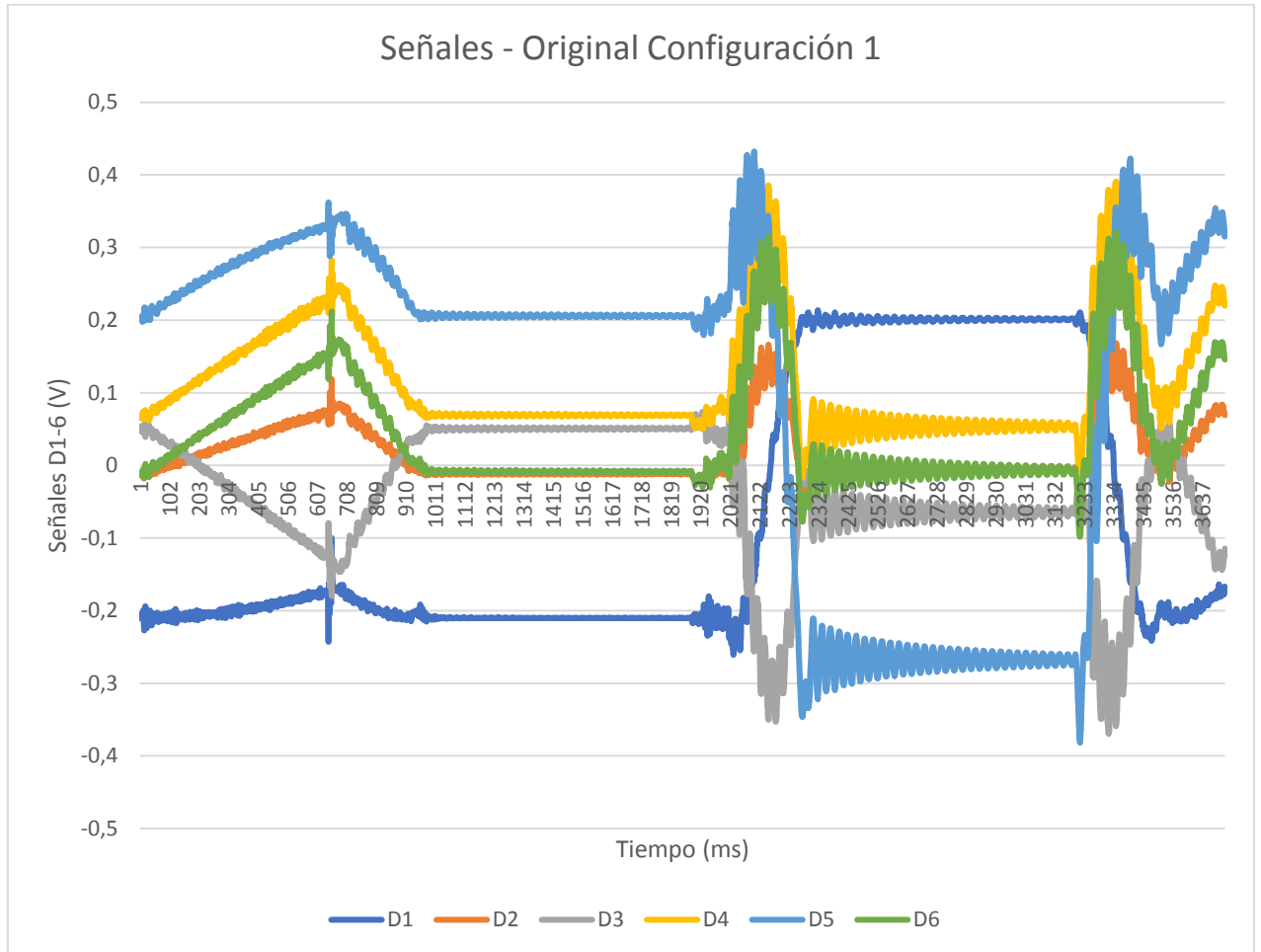


Figura 2.4: Configuraciones de la herramienta original.

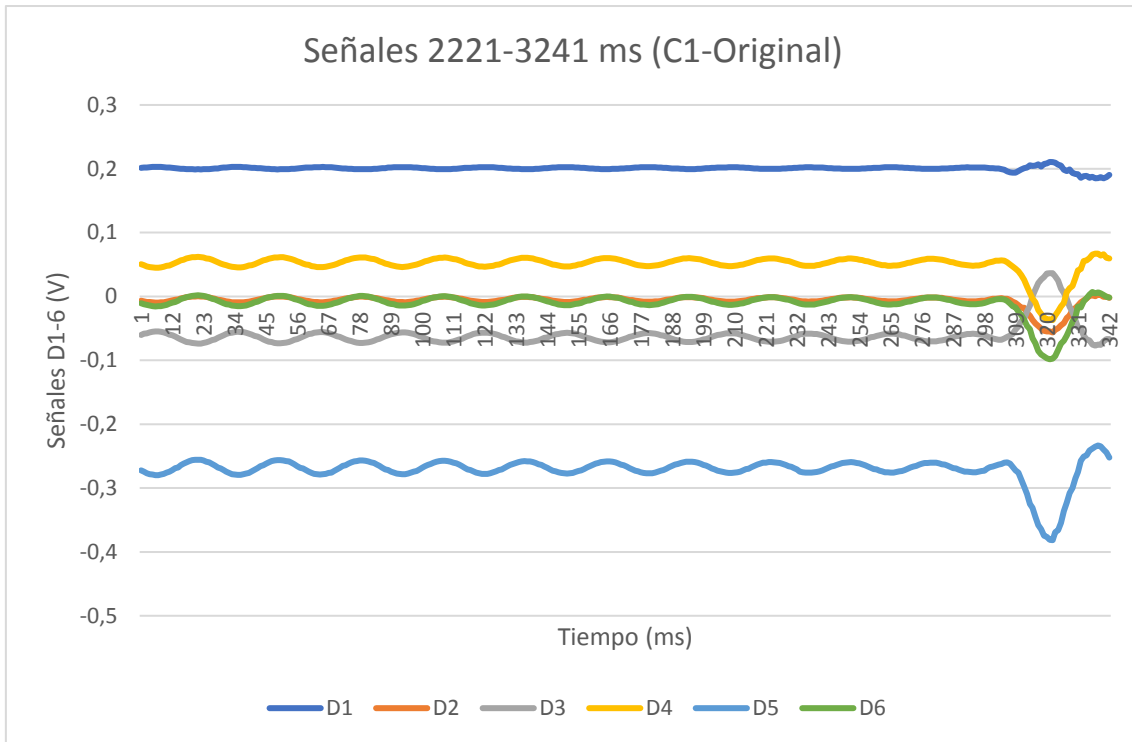
Instalando esta herramienta de calibración en el sensor, se probaron las distintas configuraciones, observándose que, incluso en el caso más estable (configuración 1), la estructura vibraba sin llegar a estabilizarse cuando se detenía su movimiento tomando una posición determinada. En la siguiente gráfica se muestran las señales de las seis dimensiones del sensor desde 0 hasta 3,65 s cuando la herramienta de calibración toma la posición vertical en $t=1929$ ms aprox.:



Gráfica 2.1: Registro completo de señales del sensor con la configuración 1 original.

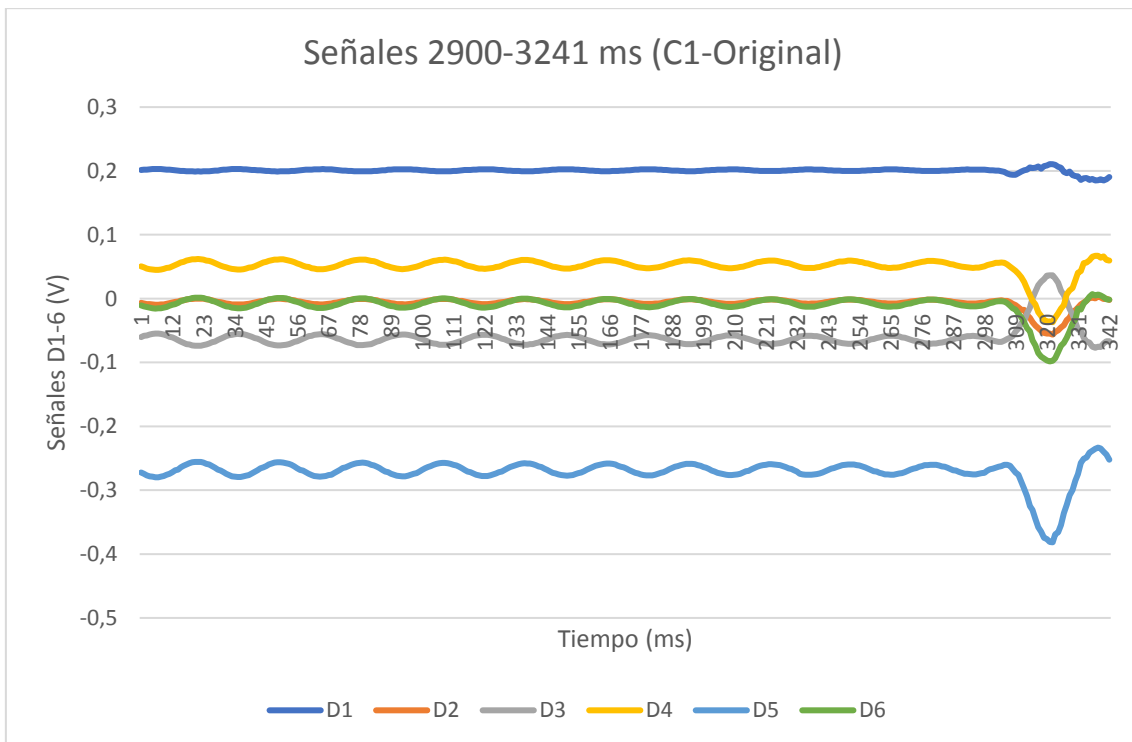
Observando la gráfica anterior se puede comprobar cómo el robot se detiene cerca del segundo 1,9, comenzando la absorción de la energía de este impacto hasta que vuelve a cambiar de posición en $t=3,2$ s aprox. Se deduce, por lo tanto, que el grado de amortiguación que presenta esta estructura es muy bajo.

Haciendo una ampliación de la baja amortiguación que ocurre en el intervalo desde 2324 ms hasta 3233 ms, se obtiene la gráfica 2.2, donde se muestra que la posición en ese momento está representada en mayor medida por las dimensiones 1 y sobre todo, 5.



Gráfica 2.2: Amortiguación señales 2221-3241 ms (C1-Original)

Se puede comprobar que la vibración disminuye progresivamente, pero no llega a estabilizarse. Esto ocurre especialmente en el caso de la dimensión 5. Ampliando las últimas oscilaciones, se obtiene la gráfica 2.3 para analizarla de forma más detallada:



Gráfica 2.3: Amortiguación señales 2900-3241 ms (C1-Original)

Donde se pueden contar 10 periodos en 291 ms aproximadamente en la dimensión 5. Teniendo en cuenta los 12 ms de ciclo del controlador, se obtiene un periodo de 0,355 s y, por tanto, una frecuencia natural de 2,82 Hz. Se trata de una cifra muy pobre que confirma la necesidad de desarrollar una alternativa a esta herramienta de calibración.

Teniendo todos los puntos anteriores en cuenta, se procedió a solucionarlos. El proceso de diseño, fabricación e implantación de la nueva herramienta de calibración se explica detalladamente en el siguiente apartado.

HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN DEL SENSOR F-T NUEVA

Primeramente, se buscaron perfiles con mayor área que resistieran eficazmente los esfuerzos de la carga. En el almacén del laboratorio se encontraron varias piezas interesantes, de entre las que se eligieron las siguientes:

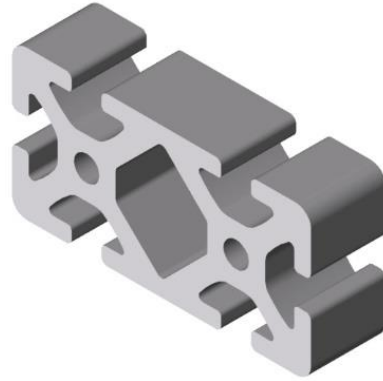


Figura 3.1: Perfil posterior nuevo.

La figura 3.1 se corresponde con el perfil más robusto de dimensiones 80x40mm. Esto se debe a la gran superficie que presenta, así como a la separación entre los dos centros simétricos, que permiten una mayor resistencia a la torsión. Es importante mencionar que se debe tener en cuenta la posición de la barra respecto de la carga, ya que el peso vertical respecto de la orientación de la figura 3.1 causará una flexión mayor que si se girara 90°.

Además, se escogió este tamaño 80x40 para poder reutilizar el plato instalable en el sensor, que presenta una vía en una cara para encajar una barra de ancho 40mm. Se estudió también la opción de colocar una barra más gruesa en el disco ensanchando la vía hasta 80mm, pero se descubrió que se tapanían dos de los seis agujeros de tornillos que instalan la herramienta de calibración en el robot, por lo que se tuvo que descartar esta posibilidad.



Figura 3.2: Perfil anterior nuevo.

La figura 3.2. representa el perfil con mayores dimensiones encontrado en el almacén, de 80x80mm, resultando una elección fue muy acertada para resistir los esfuerzos. Se atornilló perpendicularmente por un extremo a la cara ancha de la anterior barra, para lo que fue necesario agujerear esta de la siguiente forma:



Figura 3.3: Unión barra 80x80 a 80x40.

Se procedió mediante estos agujeros para tornillos M6 en vez de usar la conexión habitual (tuercas insertadas en la vía) porque se trata de una junta más resistente para esta barra de mayor peso.

Más tarde, para cumplir el requisito de tridimensionalidad en todas las configuraciones, se instaló la antigua barra 80x40 perpendicularmente a las anteriores. La unión fue la clásica, mediante las tuercas en la vía reforzada con una placa atornillada a cada lado, también con las tuercas en las vías.

En la siguiente figura se representa la estructura base tridimensional de las cuatro configuraciones, a partir de la cual se colocaron las pesas en diferentes posiciones. Las distancias y dimensiones se encuentran en el documento Planos.



Figura 3.4: Estructura base.

A continuación, se muestra el nuevo disco instalable en el flanco del sensor. Fue posible reutilizar el antiguo (véase los cuatro agujeros centrales y los tres en la vía), añadiéndole seis nuevos y otro más para el pin. Con este último elemento se consiguió una unión sólida, ya que los tornillos permiten cierto movimiento al disponer de un espacio margen para su inserción.

Como se ha mencionado anteriormente, este nuevo diseño permite una instalación directa al flanco del sensor por medio del *tool changer* con la ventaja de no utilizar tornillos, lo que convertía en un proceso tedioso la instalación anterior. Previamente, el *tool changer* no se podía utilizar, ya que los cuatro agujeros del disco los hacían incompatibles. Véase el documento Planos para las dimensiones.



Figura 3.5: Nuevo disco.

En la siguiente figura se muestra el orden de las piezas desde la herramienta de calibración (1) hasta el plato al flanco del sensor (5). Se puede comprobar cómo, a partir de la nueva herramienta, no se necesita atornillar para instalarla, simplemente se fijan manualmente las dos partes 3 y 4 del *tool changer* por medio de la palanca azul. La vara táctil tiene su propia pieza 3 para instalarla en 4 con el mismo sistema.

Anteriormente, antes de cada calibración, la herramienta con el disco 1 se atornillaba directamente al flanco del sensor, por lo que se requería desatornillar las piezas 4 y 5.

De esta forma, se ha simplificado significativamente la instalación y desinstalación de la herramienta de calibración, convirtiendo el proceso en menos pesado y más rápido, necesitando tan solo de un operario para llevarlo a cabo.

Además, se fabricó el anillo 2 con un diseño perfecto para encajar las piezas 1 y 3 de la forma más fija posible, evitando movimientos relativos. Sus dimensiones se encuentran en el documento Planos. El material es aluminio.



Figura 3.6: Conexión al sensor.

Finalmente, habiendo encontrado, fabricado y modificado todas las piezas necesarias para construir la nueva herramienta de calibración, el sistema en todas las configuraciones tendría los siguientes componentes:

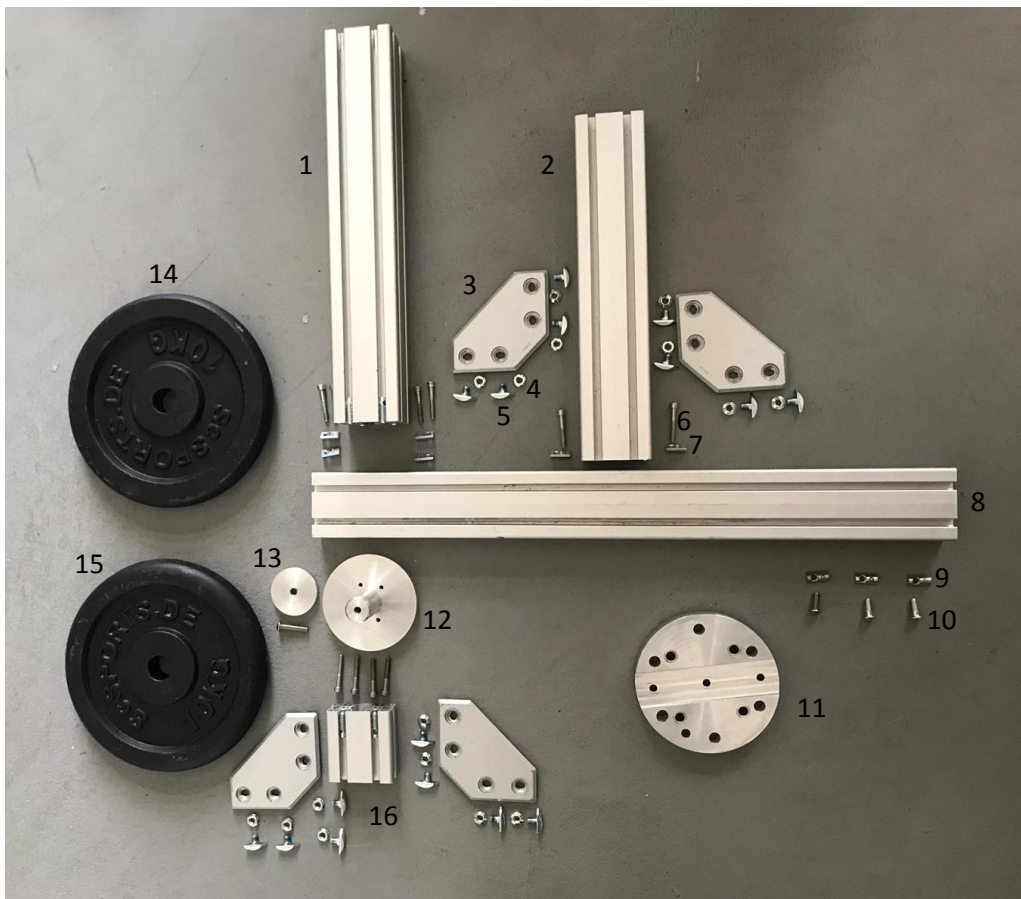


Figura 3.7: Componentes de la herramienta.

Para calcular el peso de toda la estructura se recogió el peso individual de cada componente en la siguiente tabla:

Nº	Nombre	Cantidad	g/total	g/unidad
1	Barra 80x80	1	2440	2440
2	Barra 80x40 (reutilizada)	1	1240	1240
3	Placa junta	4	726	185
4	Tuerca placa	16	174,6	10,9125
5	Tornillo vía	16	68,7	4,29375
6	Tornillo largo junta	10	103,8	10,38
7	Tuerca pequeña junta	6	62,2	10,366
8	Barra 80x40 (nueva)	1	3238	3238
9	Tuerca grande junta	3	28,5	9,5
10	Tornillo corto	4	36,8	9,2
11	Plato al sensor	1	988	988
12	Soporte pesas	1	590	590
13	Disco soporte pesas	1	78	78
14	Pesa 1	1	9932	9932
15	Pesa 2	1	10116	10116
16	Barra soporte pesas	1	306	306

Tabla 3.1: Componentes herramienta figura 3.7.

Además, se añadió a la suma los siguientes elementos que no aparecen en la figura 3.7 porque no pertenecen estrictamente a la herramienta de calibración:

Nombre	Cantidad	g/total	g/unidad
Tornillo plato	6	232	38,33
<i>Tool changer-to the tool</i>	1	1954	1954
Anillo	1	82	82
Tornillo figura 3.3	4	94	24

Tabla 3.2: Componentes herramienta extra.

Sumando los pesos de todos los elementos excepto las pesas, los tornillos del plato y el *tool changer*, se obtiene un total de 12,400 kg.

Con la balanza, el peso se corresponde con 12,442 kg, valor muy cercano a la suma. No se trata de la misma cifra debido a los pocos decimales obtenidos al medir las piezas más pesadas.

A continuación, se procedió a montar las configuraciones:

La primera configuración es la más estable, pues durante el proceso, al proporcionarle un leve impacto, se observó que se trataba de la estructura que menos vibraba. Esto se debe a la posición de las pesas en el extremo de la sólida barra instalada en el plato, además de en la cara más grande, por lo que la flexión es reducida. Otro factor estabilizador fue la colocación de las pesas lo más lejos posible del sensor. Como se ha mencionado anteriormente, esta barra tiene dos centros de simetría, por lo que la torsión también se reduce.

Por otra parte, se puede observar en la siguiente figura que representa su montaje en el sensor, la tridimensionalidad de la herramienta con esta configuración: la barra 80x80 y las pesas salen del plano formado por las otras.



Figura 3.8: Configuración 1.

Seguidamente se montó la segunda configuración colocando las pesas en el extremo de la barra opuesto a la anterior, orientadas de la misma manera.

De nuevo, la barra 80x80 y las pesas crean la tridimensionalidad en la estructura. También esta estructura fue resistente a golpes, vibrando de forma mínima, pues la carga está montada sobre la misma barra que en el caso anterior. Sin embargo, no es tan robusta como la primera configuración ya que las pesas se encuentran muy cerca del sensor. Con este montaje se obtuvo el segundo vértice de la base del tetraedro de centros de gravedad.

Es importante mencionar que, al diseñar la base de las configuraciones, se tuvo en cuenta el hecho de no hacerla simétrica respecto del sensor. De esta forma, la primera y la segunda configuración no son simétricas entre sí, como ocurría en el caso de la herramienta de calibración original. Por tanto, los centros de gravedad tampoco son simétricos y resultan independientes al formar la base del tetraedro que crea el espacio de trabajo.

La segunda configuración de la herramienta es la siguiente:

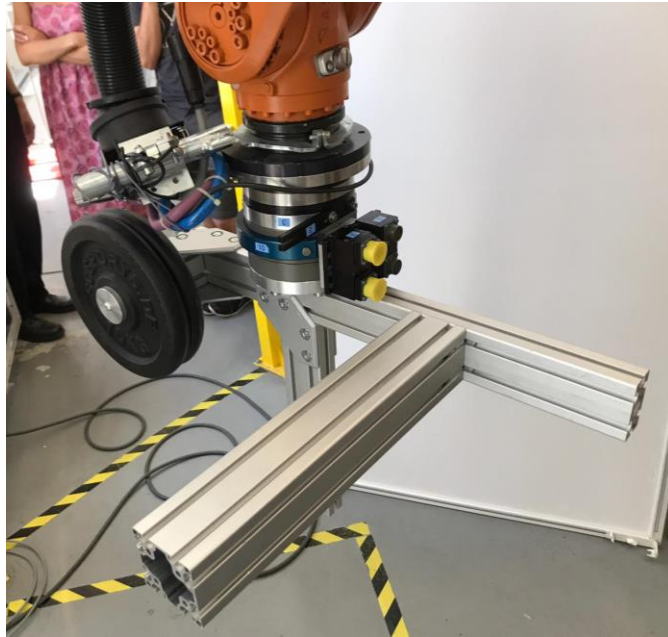


Figura 3.9: Configuración 2.

La tercera configuración coloca las pesas en el extremo de la barra 80x80, siendo el último vértice del tetraedro. Esta barra, como se ha mencionado previamente, resiste efectivamente la flexión y la torsión. Además, su unión a la barra transversal es muy sólida y contribuye a lo anterior. Sin embargo, esta configuración es más débil que las anteriores, ya que las pesas están demasiado lejos del resto de la estructura.

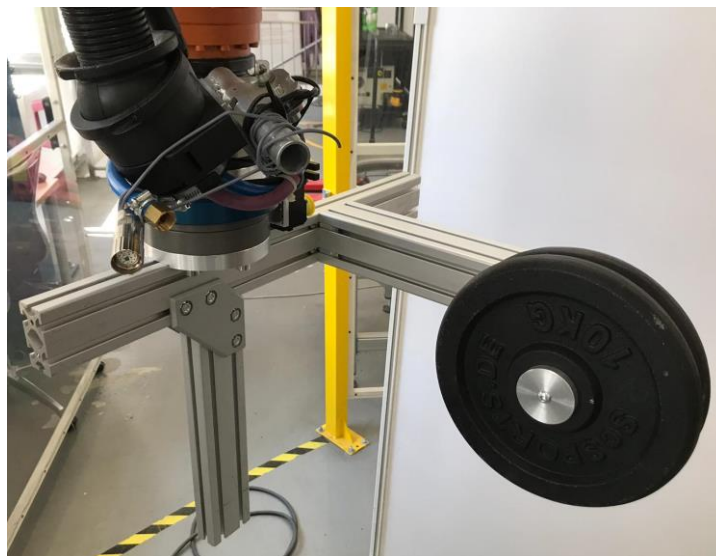


Figura 3.10: Configuración 3.

La cuarta y última configuración es la más débil, ya que las pesas están instaladas en la barra menos rígida (la que se ha reutilizado de la herramienta de calibración anterior).

Además, como en el caso anterior, la carga se encuentra en el extremo, lo que añade más inestabilidad a la estructura.

Se pudo comprobar a simple vista cómo es la configuración menos sólida al golpearla: la vibración no era grande, sin embargo mayor que en los casos anteriores. Constituye la cúspide del tetraedro de centros de gravedad.

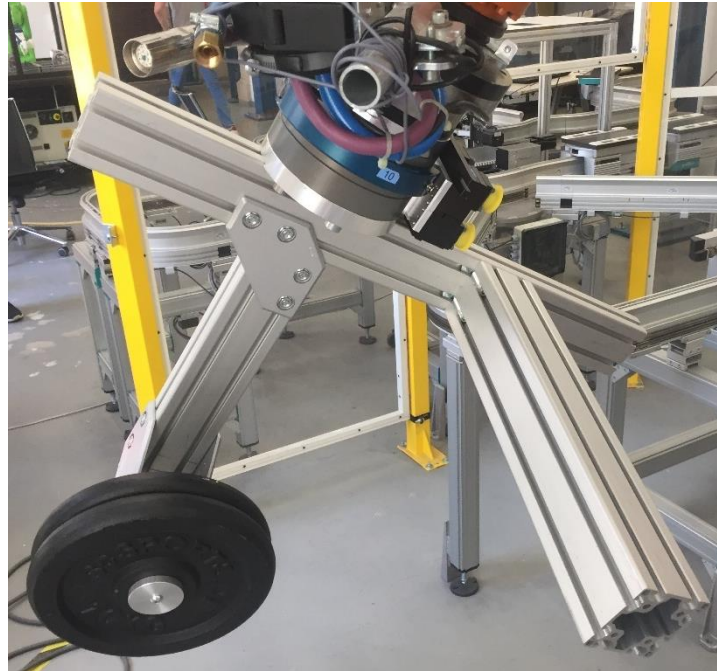


Figura 3.11: Configuración 4.

Una vez probadas todas las configuraciones, se procedió a tomar las medidas con el sensor. Como no se disponía de mucho tiempo en el laboratorio, estas se tomaron únicamente con las dos configuraciones menos inestables, sabiendo que las dos primeras serían mejores.

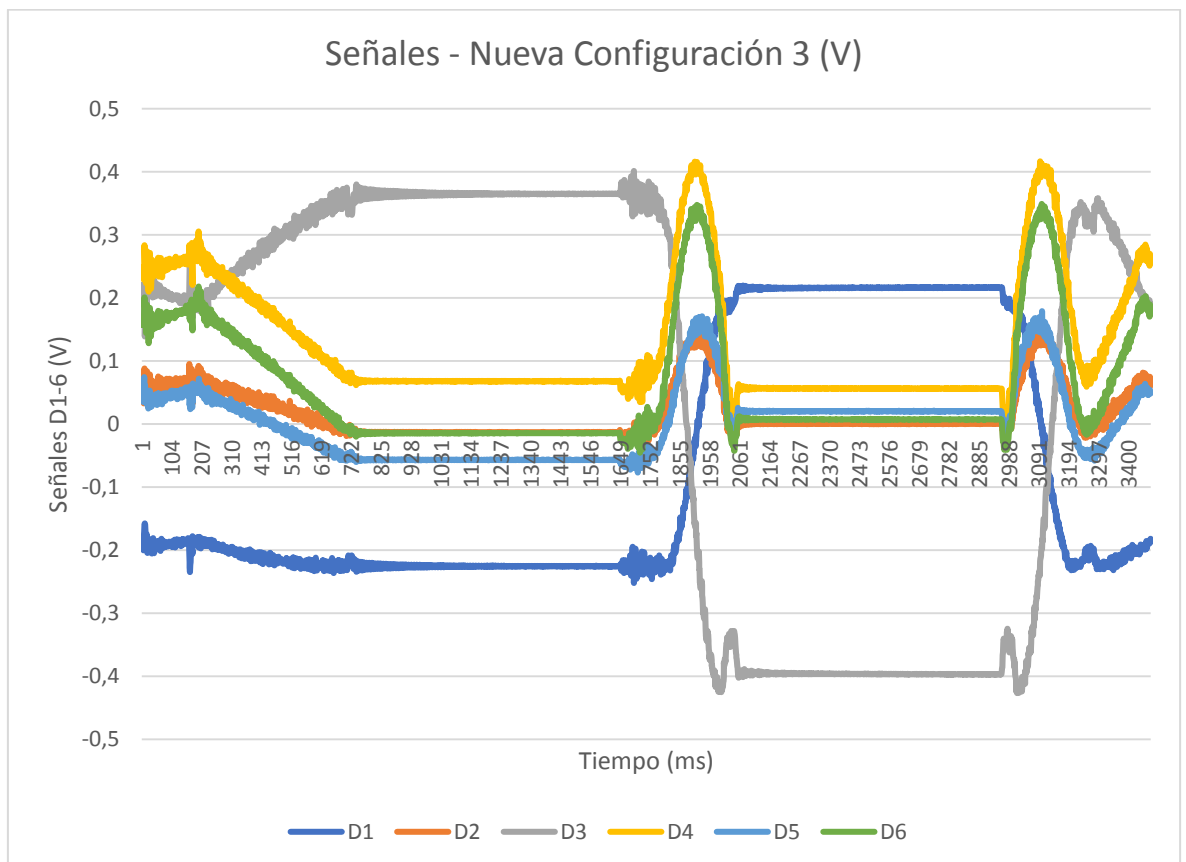
Cabe destacarse el mejorado proceso de instalación, que se desarrolló de forma más simple y rápida: tan solo fue necesario desatornillar las placas que unen las pesas con la base y reconfigurarlas.

RESULTADOS

Para evaluar cuantitativamente la mejora en el diseño de la herramienta de calibración, en comparación con la antigua (configuración 1, véase gráficas 2.1-3), se procedió a tomar las medidas de las señales de las seis dimensiones D1-6 del sensor F-T para las nuevas configuraciones 3 y 4. Para hacer la mejor comparación posible, el experimento se llevó a cabo con la misma velocidad del robot y tomando las mismas posiciones.

Primeramente, se registraron las medidas de la tercera configuración. El proceso consistió en colocar las pesas de acuerdo con dicha configuración, instalar la herramienta en el sensor y, mediante el control remoto, orientarla en diferentes posiciones, combinando rotaciones del mayor número de ejes posible del robot. De esta forma, los vectores de fuerza y torsión no fueron semejantes entre las orientaciones y así el registro fue más surtido. Mediante Matlab se recogieron los datos y se analizaron. En las siguientes gráficas se representan las señales de las seis dimensiones.

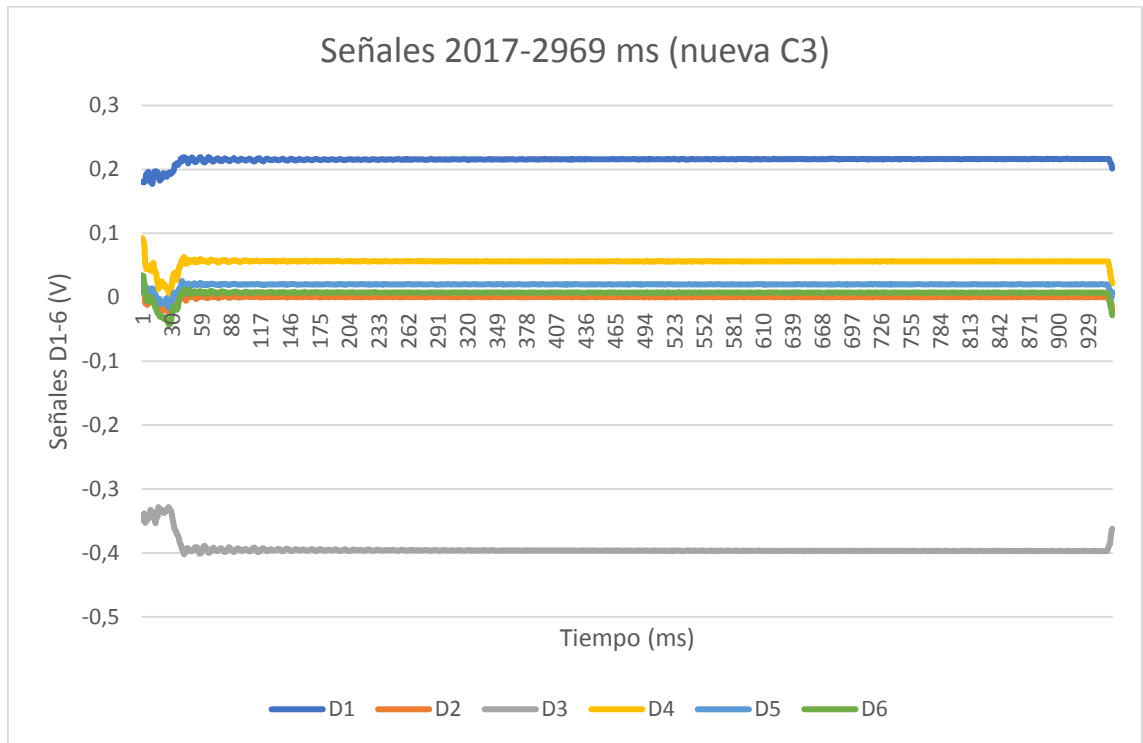
Observando la gráfica 4.1, se puede apreciar cómo existe una clara pero corta vibración antes de cada amortiguación, momento en el que el robot detiene su movimiento constante de forma repentina, dando lugar a una vibración en la estructura para absorber la energía.



Gráfica 4.1: Registro general de señales de la nueva Configuración 3.

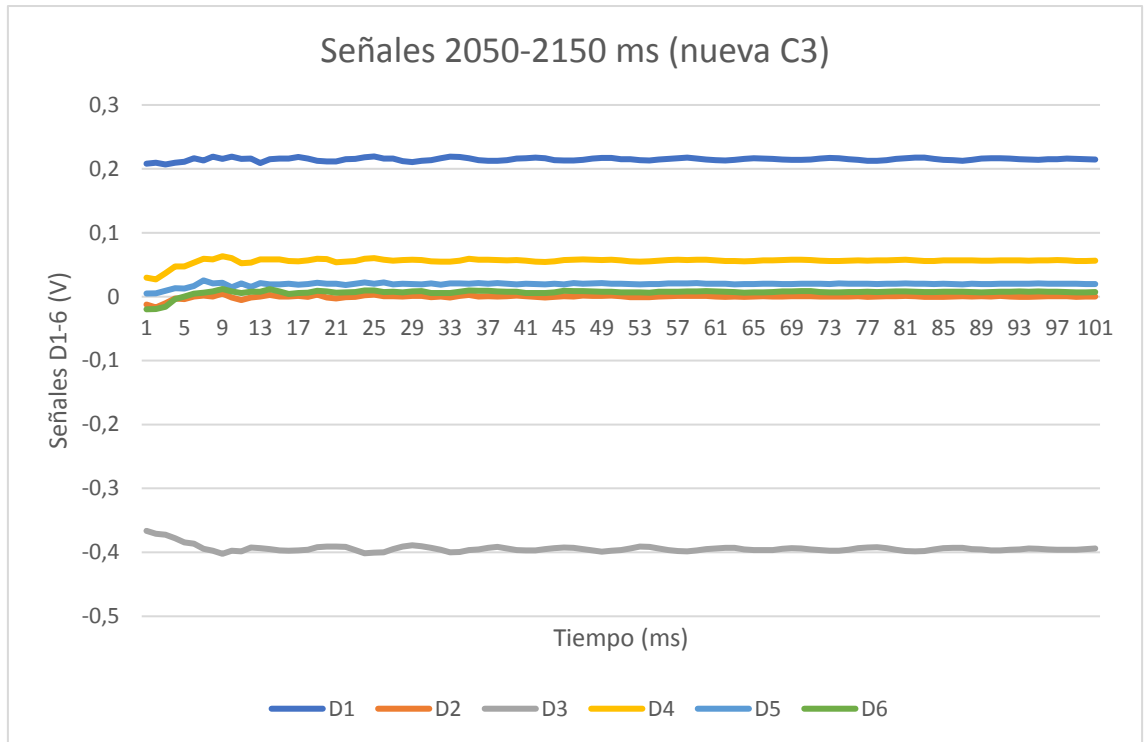
Evaluando las medidas, cabe señalar que, tras el cambio de posición en aprox. $t=1,6$ s, la primera y la tercera dimensión responden inicialmente de forma muy amortiguada y existe una evidente diferencia entre el antes y el después (véase que en el caso D3, el rango supera los 0,8 V). Esto indica ambas dimensiones representan mayoritariamente la nueva orientación de la herramienta, recogiendo las fuerzas y torsiones más importantes.

Haciendo una ampliación de la amortiguación que sucedió aproximadamente entre 2017 y 2969 ms, se pueden observar las señales de forma más detallada en la siguiente gráfica:



Gráfica 4.2: Registro señales amortiguación completa 2017-2969 ms en nueva Configuración 3.

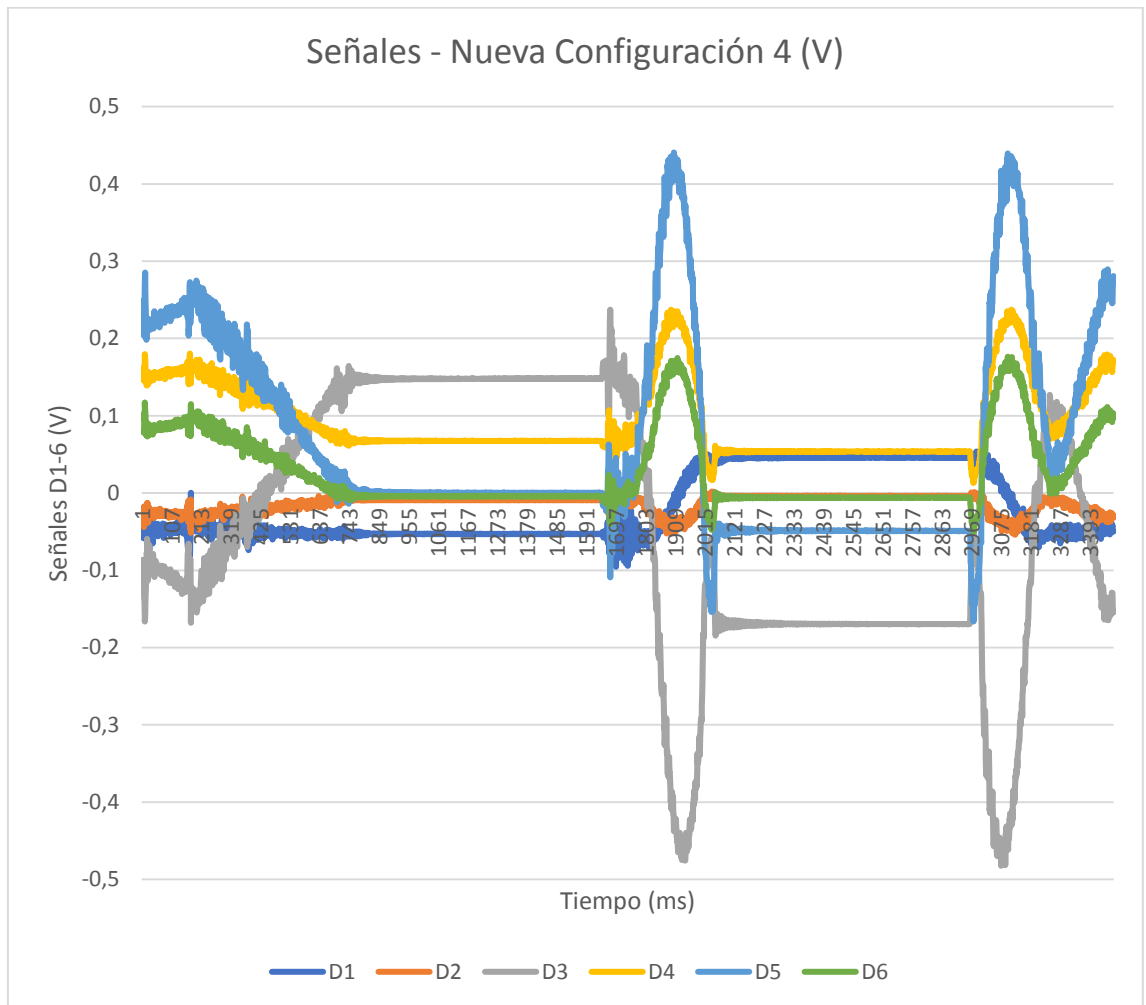
En la gráfica anterior se percibe una rápida y altamente amortiguada inestabilidad. Ampliando el principio de la amortiguación desde 2050 hasta 2150 ms, ya que son las ondas más claras para analizar, se obtiene la siguiente gráfica:



Gráfica 4.3: Registro señales 2050-2150 ms en nueva Configuración 3.

Evaluando esta última gráfica, se pueden contar 10 vibraciones de D3 en el intervalo de 9 hasta 82 ms, resultando un periodo de aproximadamente 8,2 ms. Teniendo en cuenta que el tiempo de ciclo del controlador es de 12 ms, se obtiene una frecuencia natural de 11,42 Hz. Además, se puede observar la relevantemente atenuada amplitud de la onda y la fuerte amortiguación. De esta forma, se comprueba que la nueva herramienta de calibración se estabiliza más rápido y más eficazmente que la original, por lo que se puede afirmar que el diseño desarrollado es un éxito.

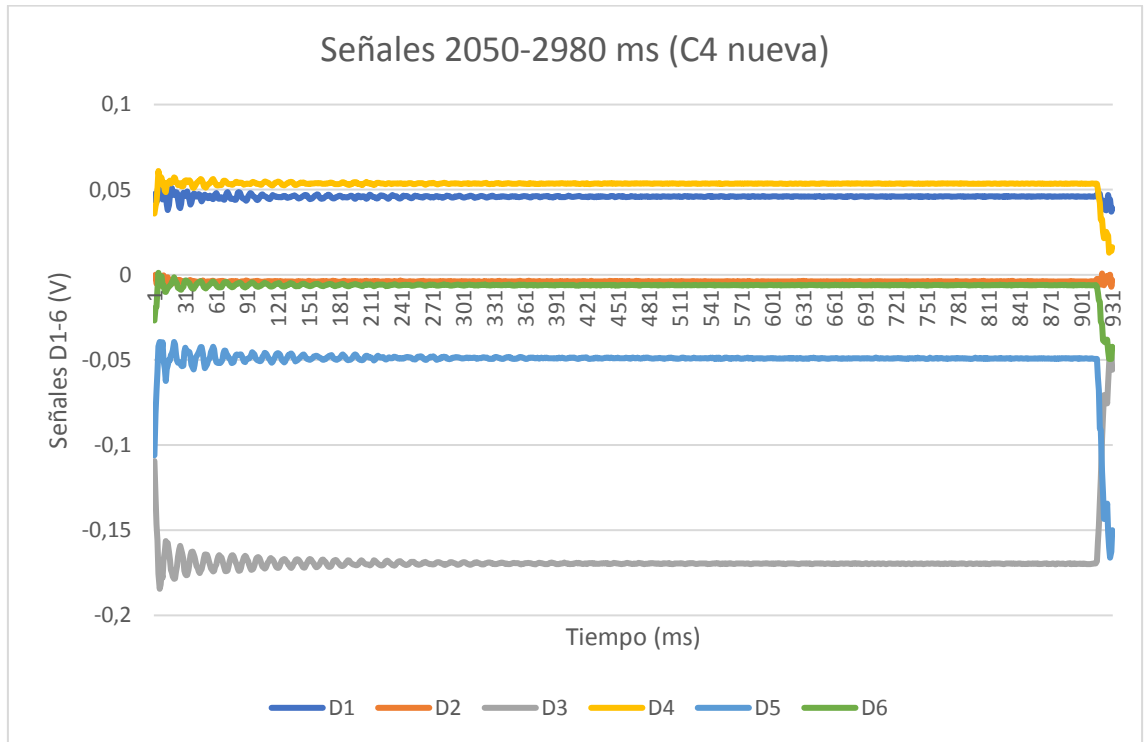
A continuación, se repitió el mismo proceso con la herramienta de calibración con la nueva cuarta configuración, aparentemente la más inestable:



Gráfica 4.4: Registro general de señales de la nueva Configuración 4.

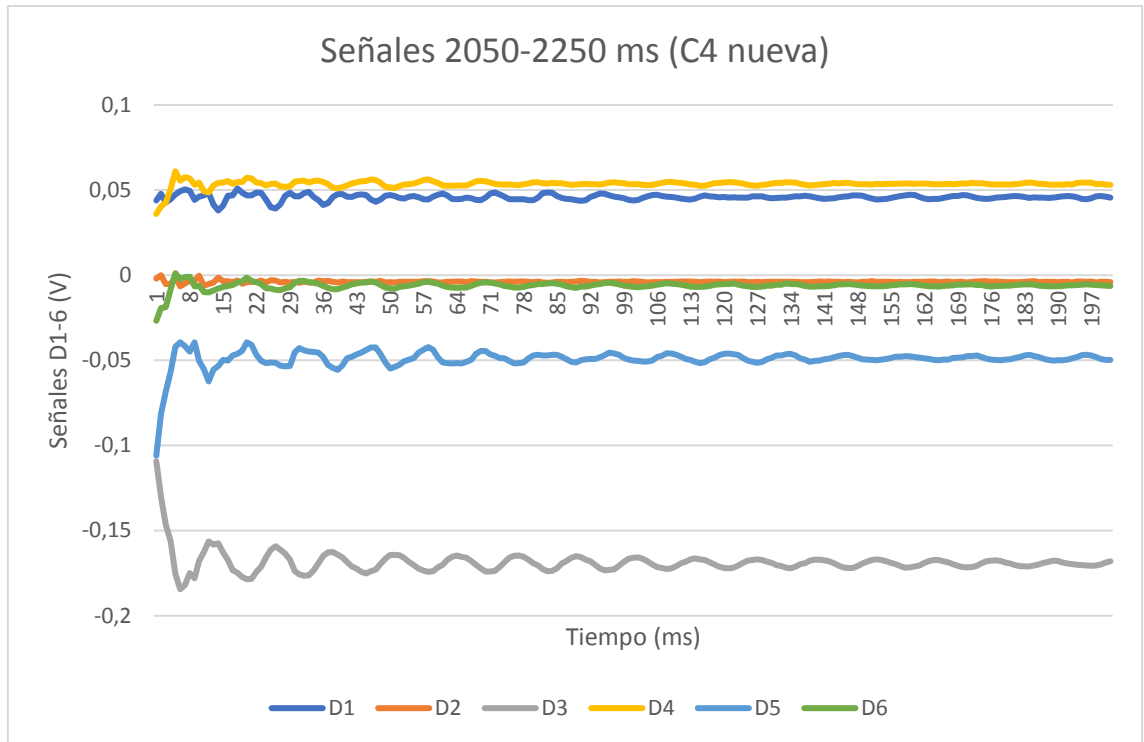
En la gráfica 4.4 se pueden observar claras diferencias con respecto de las de la 4.1, la más evidente se corresponde con la presencia de unos picos más exagerados que se estabilizan rápidamente. De nuevo, la dimensión más representativa es la tercera y la menos, la segunda, muy débil.

Ampliando el intervalo de la amortiguación completo, desde 2050 hasta 2980 ms, se obtiene el siguiente gráfico 4.5:



Gráfica 4.5: Registro señales 2050-2980 ms en nueva Configuración 4.

Observando la gráfica anterior, se aprecia una rápida amortiguación. Es mucho menor que en el caso original pero más marcada que en la nueva configuración 3. Ampliando el intervalo en el comienzo de la amortiguación, se obtiene la siguiente gráfica:



Gráfica 4.6: Registro señales vibración previa onda 2050-2250 ms en Configuración 4.

En esta última gráfica se comprueba una vibración más intensa, comparándola con el caso anterior (véase gráfica 4.3). Los picos son más pronunciados, sobre todo en los primeros milisegundos. Una vez estabilizados, se pueden contar 10 oscilaciones entre 45 y 126 ms, lo que resultaría un periodo aproximado de 8,1 ms. Teniendo en cuenta el tiempo de ciclo del controlador, 12 ms, la frecuencia natural de la estructura resulta 10,29 Hz. Se confirma que se trata de un caso ligeramente más inestable que la nueva configuración 3.

Por tanto, se comprueba que hasta la configuración más inestable de la nueva herramienta de calibración presenta una calidad muy superior a la anterior.

CONCLUSIONES

El proyecto ha desarrollado una herramienta de calibración del sensor fuerza-torsión que presenta una calidad muy superior a la que se utilizaba anteriormente, por lo que ahora se encuentra totalmente en línea con la del robot al que sirve.

Para lograr el objetivo, primeramente, se evaluó el diseño y el comportamiento de la herramienta de calibración original durante el proceso de calibrado, comprobándose que era necesario fabricar una más estable. Después, se comenzó el diseño de la estructura escogiendo barras más largas y robustas, más adecuadas para soportar la carga de 20 kg. Además, se modificó el plato que instala la herramienta en el robot de forma que se atornilla al *tool changer* permanentemente y este se coloca en el flanco del sensor de forma directa. Así, cambiar de la vara táctil a la herramienta y viceversa no requiere tornillos ni elementos intermedios que interfieren en la señal y la instalación resulta rápida. El diseño cumple el requisito de estructura tridimensional cuatro veces reconfigurable, cuyos centros de gravedad unidos entre sí forman un tetraedro que se corresponde con el espacio de trabajo del robot. Este último factor ayuda a recoger una cantidad de datos de fuerza y torsión más surtida, lo que se refleja en una calibración más completa. Una vez construida la herramienta se probó en el robot y se tomaron medidas del sensor de las dos peores configuraciones, resultando una frecuencia natural mínima de 10,29 Hz, mucho mayor que la de la mejor configuración de la herramienta original: 2,82 Hz.

Con el presente documento se ha comprobado cómo el proceso al completo fue llevado a cabo con la máxima precisión, tomando siempre decisiones con base técnica y sin dejar detalles al azar. El diseño de cada configuración y los elementos empleados para su construcción fueron elegidos con cautela y, por ello, resultaron ser los adecuados; así como el proceso de montaje. Asimismo, el proyecto ha sido lo más económico posible, pues se reutilizaron piezas y se manipularon mediante las máquinas del laboratorio. Otro factor importante, como se ha indicado anteriormente, es el ahorro también en tiempo de trabajo, pues con las mejoras aplicadas en la instalación de la herramienta en el flanco del sensor se disminuye el número de operarios necesarios para llevarla a cabo, así como la dificultad de manipulación de los pesados elementos.

Es importante mencionar que, durante todo el desarrollo del proyecto, se aplicaron conocimientos estudiados pertenecientes a diferentes disciplinas dentro del campo de la ingeniería, tales como álgebra, mecánica, resistencia de materiales o cálculo avanzado.

Como resultado, se obtuvo una herramienta de calibración que, gracias a su estabilizada vibración durante el proceso de calibrado, aumenta la precisión del sensor por encima del 400% a lo largo de la vida del robot.

FUTUROS DESARROLLOS

Una vez fabricada con éxito la herramienta de calibración, para completar el proceso de calibrado del sensor será necesario calcular la nueva Matriz de Calibración. Esta matriz representará la relación entre las medidas del sensor (vector

$\vec{D} = (D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | D_5 | D_6)$, la entrada) y la carga teórica ($\vec{L} = (F_x | F_y | F_z | T_x | T_y | T_z)$, salida), de la forma: $\vec{L} = K_{ATI} \cdot \vec{D}$.

Para una calibración de calidad se necesitará que K_{ATI} sea lo más precisa posible; su cálculo se explica a continuación.

Durante cada configuración el sensor registrará 25 medidas, como se ha explicado anteriormente, tomando diferentes orientaciones en el espacio. Después, las 36 componentes de la matriz se calcularán por el método de mínimos cuadrados (véase siguiente fórmula), utilizando Matlab debido a las grandes dimensiones del sistema.

$$\sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{25} (L_{ji} - K_{ATI} \cdot D_{ji})^2$$

Con la resultante matriz se obtendrán unos valores en el sensor más ajustados a los teóricos, por lo que la calibración del robot será óptima.

Por último, es importante mencionar que para representar la función aproximadamente lineal que relaciona las medidas con los valores de carga calculados (para los mínimos cuadrados) se deben tener en cuenta los voltajes de gravedad nula. Estos se corresponden con las medidas recogidas por el sensor cuando no hay carga en su flanco y servirán para corregir dicha función, obteniendo resultados aún más precisos.

Datos técnicos – Perfiles



Perfiles extruídos
 Designación: Al Mg Si 0.5 F 25
 Referencia del material: 3.3206.72
 Tratamiento: envejecido artificialmente

Características mecánicas
 (valores válidos en el sentido de extrusión)
 Resistencia a la tracción R_m mín. 245 N/mm²
 Límite de elasticidad R_{p0.2} mín. 195 N/mm²
 Densidad 2,7 kg/dm³
 Alargamiento hasta rotura A₅ mín.10 %
 Alargamiento hasta rotura A₁₀ mín. 8 %
 Coeficiente de dilatación lineal 23,6x10⁻⁶ 1/K
 Módulo de elasticidad E aprox. 70 000 N/mm²
 Módulo de compresión G aprox. 25 000 N/mm²
 Dureza aprox. 75 HB - 2,5/187,5

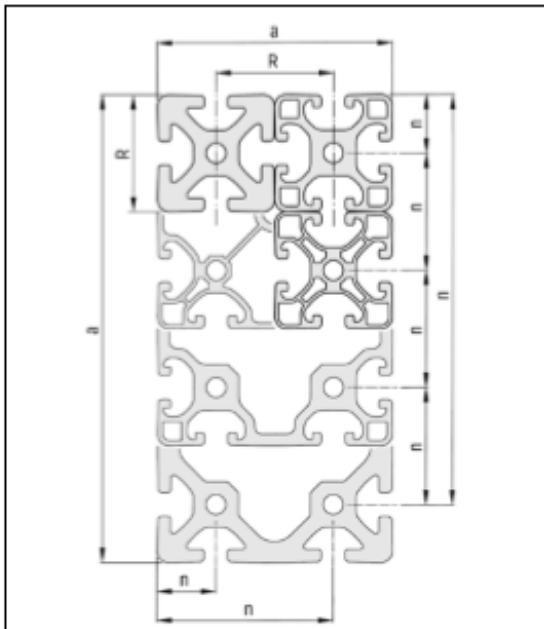
Tolerancias
 Las deformaciones tales como tolerancia de alineación y planitud cumplen con la norma DIN EN 12020 parte 2.

Los perfiles no cortados a medida pueden ser hasta 100 mm más largos que lo indicado, debido a los métodos de fabricación.

Superficie
 Los perfiles de aluminio son anodizados en color natural (C0) o negro (C35) y por ello resisten permanentemente la corrosión y el rayado. La superficie tiene un acabado mate (E6), y está anodizada y comprimida. El grosor mínimo de la capa es de 10µm y su dureza es de 250~350 HV. Esta superficie con anodizado duro permite hacer los cortes prácticamente sin rebabas, de forma que no es necesario desbarbar.

Todos los perfiles H (pesados), perfiles L (Light) y perfiles E (Economy) de todas las series presentan aristas de apoyo en el exterior de las caras del perfil y ranuras con aletas inclinadas. Las aristas de apoyo definidas en el exterior de las caras del perfil aseguran una unión firme y robusta con todos los demás componentes. La pre-tensión de las aletas de la ranura en la zona elástica del material se transmite a los tornillos, protegiendo la unión ante vibraciones.

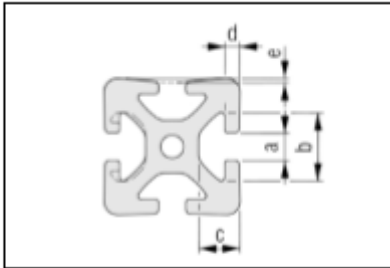
Tolerancia de las dimensiones externas y posición de la ranura



Dimensión modular R [mm]				
5	6	8	10	12
20	30	40	50	60

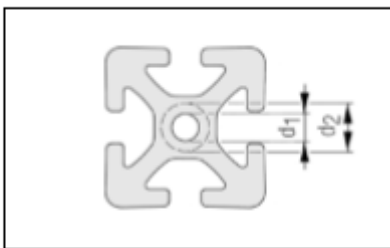
Longitud del canto del perfil a [mm]		Tolerancias de la dimensión a y la posición de la ranura n ± [mm]
desde	hasta	
0	10	0,10
10	20	0,15
20	40	0,20
40	60	0,30
60	80	0,40
80	100	0,45
100	120	0,50
120	160	0,60
160	240	0,80
240	320	1,50

Dimensiones de la ranura

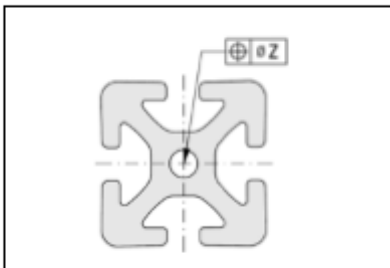


	5	6	8	10	12
a	5,0 ^{+0,3}	6,2 ^{+0,3}	8,0 ^{+0,4}	10,0 ^{+0,4}	12,0 ^{+0,4}
b	11,5 ^{+0,3}	16,3 ^{+0,3}	20,0 ^{+0,4}	25,0 ^{+0,4}	30,0 ^{+0,3}
c	6,35 ^{+0,15}	9,75 ^{+0,2}	12,25 ^{+0,3}	15,5 ^{+0,3}	18,3 ^{+0,3}
d	1,8 ^{+0,1}	3,0 ^{+0,25}	4,5 ^{+0,3}	5,3 ^{+0,3}	6,6 ^{+0,3}
e	0,15 ^{+0,1}	0,15 ^{+0,1}	0,2 ^{+0,1}	0,25 ^{+0,1}	0,3 ^{+0,1}

Núcleo



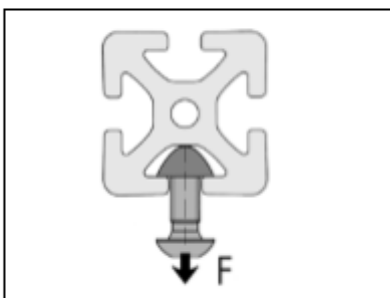
	5	6	8	10	12
Taladro d ₁	∅ 4,3 ^{+0,1} mm para M5	∅ 5 ^{+0,2} mm para M6	∅ 6,8 _{-0,2} mm para M8	∅ 8,5 _{-0,1} mm para M10	∅ 10,2 _{-0,2} mm para M12
Retaladrable hasta máx. d ₂	∅ 6 mm o M6	∅ 8 mm o M8	∅ 13 mm o M12 (no perfiles E)	∅ 16 mm o M16 (no perfiles E)	∅ 20 mm o M20



Perfiles con ranuras abiertas		Ranuras cerradas	
Número de agujeros	z [mm]	Número de agujeros	z [mm]
1	0,4	1	0,6
2 a 4	0,6	> 1	0,8
> 4	0,8		

La tolerancia de la posición del taladro depende del número de agujeros y del contorno del perfil.

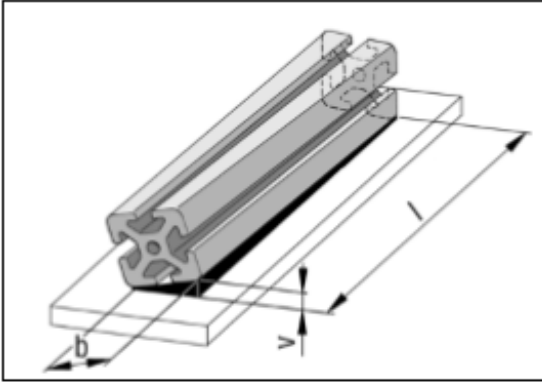
Carga de tracción



Forma de la ranura	5	6	8	10	12
normal	500 N	1.750 N	5.000 N	7.000 N	10.000 N
ligero		500 N	2.500 N		5.000 N
E			1.750 N	3.500 N	

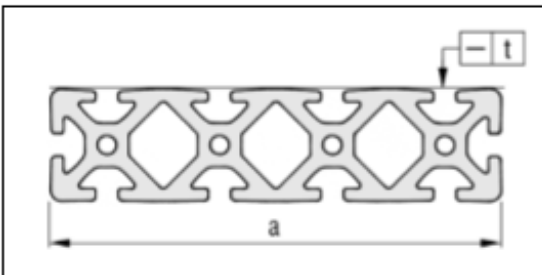
Fuerzas de tracción F admisibles en las aletas de la ranura. Estas cargas nominales incluyen factores de seguridad ($S > 2$) a la deformación plástica.

Torsión



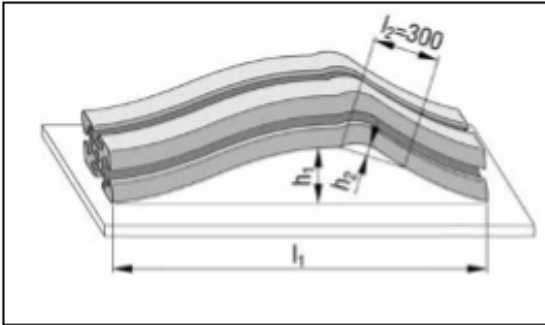
b [mm]		Tolerancia a la torsión v para longitud l [mm]					
desde	hasta	hasta 1.000	hasta 2.000	hasta 3.000	hasta 4.000	hasta 5.000	hasta 6.000
-	25	1,0	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0
25	50	1,0	1,2	1,5	1,8	2,0	2,0
50	75	1,0	1,2	1,5	1,5	2,0	2,0
75	100	1,0	1,5	1,8	2,2	2,5	3,0
100	125	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	3,0
125	150	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5	3,0
150	200	1,5	1,8	2,2	2,6	3,0	3,5
200	300	1,8	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
300	320	2,0	2,8	3,5	4,0	4,5	5,0

Tolerancia de planitud transversal



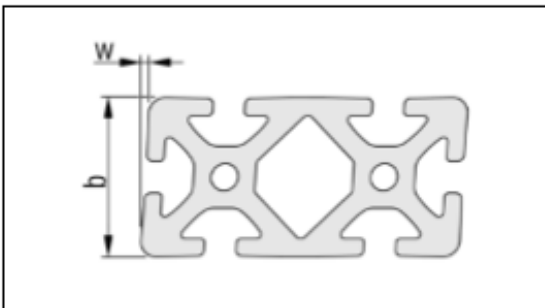
Ancho a [mm]		Tolerancia de planitud
desde	hasta	t [mm]
0	80	0,3
80	120	0,4
120	160	0,5
160	240	0,7
240	320	1,0

Tolerancia de planitud longitudinal



Longitud l_1 [mm]	Tolerancias	
	h_1 [mm]	h_2
hasta 1.000	0,7	Para cada tramo de largo $l_2 = 300$ mm, se permite una desviación máxima de 0,3 mm
hasta 2.000	1,3	
hasta 3.000	1,8	
hasta 4.000	2,2	
hasta 5.000	2,6	
hasta 6.000	3,0	

Tolerancia angular



Ancho b [mm]		Tolerancia angular
desde	hasta	w ± [mm]
0	20	0,2
20	40	0,4
40	80	0,6
80	120	0,8
120	200	1,2
200		1,5

Determinación de la flexión del perfil

Para calcular la flecha f son válidas las siguientes ecuaciones:

Ejemplo de carga 1

$$f = \frac{F \cdot l^3}{3 \times E \times I \times 10^4}$$

Ejemplo de carga 2

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \times E \times I \times 10^4}$$

Ejemplo de carga 3

$$f = \frac{F \cdot l^3}{192 \times E \times I \times 10^4}$$

Para calcular la flecha causada por el peso propio del Perfil, deben aplicarse las siguientes fórmulas:

Como el ejemplo de carga 1

$$f = \frac{F \cdot l^3}{8 \times E \times I \times 10^4}$$

Como el ejemplo de carga 2

$$f = \frac{5 \times F \cdot l^3}{384 \times E \times I \times 10^4}$$

Como el ejemplo de carga 3

$$f = \frac{F \cdot l^3}{384 \times E \times I \times 10^4}$$

- F - Carga en N
- l - Longitud del perfil en mm
- I - Momento de inercia en cm⁴
- E - Módulo de elasticidad en N/mm²
- E_{Al} - 70 000 N/mm²

Un cálculo aproximado de la flecha puede obtenerse mediante la ayuda del nomograma adjunto. En el ejemplo mostrado, la flexión se determina siguiendo las flechas del gráfico.

Ejemplo:

Datos:

F - 1 000 N

l - 500 mm

I_y - 5,14 cm⁴ (Perfil 5 40x20, de canto)

Se busca:

f - Flexión en mm

Resultado:

Ejemplo de carga 1

f - 11,6 mm

Ejemplo de carga 2

f - 0,72 mm

Ejemplo de carga 3

f - 0,18 mm

A los valores de flexión calculados o determinados utilizando los gráficos, hay que añadir la flexión causada por el peso propio de los perfiles.

Para un cálculo aproximado de la flecha causada por el peso propio, hay que introducirlo como F en el nomograma y dividir el resultado por 2.

Comprobación de la tensión debida a la flexión

$$\sigma = \frac{M_b}{W \times 10^3}$$

σ - Tensión debida a la flexión en N/mm²

M_b - Momento flector máximo en Nmm

W - Momento resistente en cm³

R_{p0,2 Al} - 195 N/mm²

La tensión calculada o debe compararse con la tensión permisible debida a la flexión σ_{perm} .

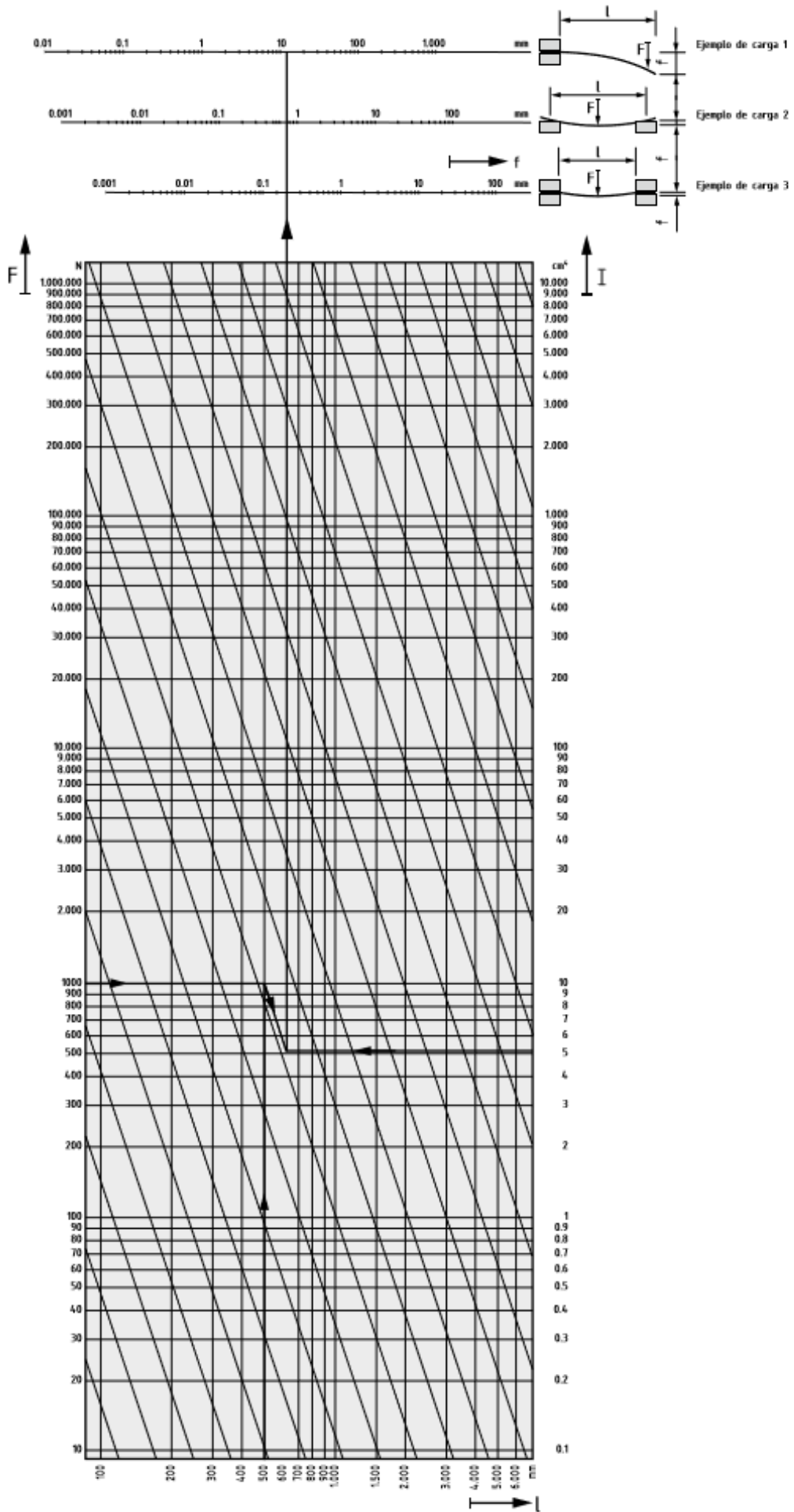
$$\sigma_{perm} = \frac{R_{p0,2}}{S}$$

El factor de seguridad S debe seleccionarse según las condiciones exigidas por la aplicación.



Nota:

En www.item24.es encontrará una calculadora de flexión que contempla los tres escenarios.



Determinación del ángulo de torsión

Para el cálculo del ángulo de torsión ϑ son válidas las siguientes ecuaciones:

Ejemplo de carga 1

$$\vartheta = \frac{180^\circ \times M_t \times l}{\pi \times G \times I_t \times 10}$$

Ejemplo de carga 2

$$\vartheta = \frac{180^\circ \times M_t \times l}{\pi \times 4 \times G \times I_t \times 10}$$

Donde:

- M_t - Momento torsor en Nm
- l - Longitud del perfil en mm
- I_t - Momento de inercia en cm^4
- G - Módulo de cizallamiento en N/mm^2
- G_{s1} - 25 000 N/mm^2
- ϑ - Ángulo de torsión en grados decimales

El ejemplo mostrado en el nomograma parte de la longitud libre del perfil y de un determinado par de giro. El resultado es el ángulo de torsión obtenido con la deformación de un perfil de la serie 8 de 80x80.

El nomograma también puede utilizarse en sentido inverso y empezar con el par de torsión máximo admisible para calcular los tamaños de perfil necesarios o los momentos de carga con una determinada longitud.

Ejemplo:

Datos:

$M_t = 20\text{Nm}$

$l = 2\,000\text{ mm}$

$I_t = 136,98\text{ cm}^4$ (Perfil 8 80x80)

Se busca:

ϑ - Ángulo de torsión en grados decimales

Resultado:

Ejemplo de carga 1

$\vartheta = 0,07^\circ$

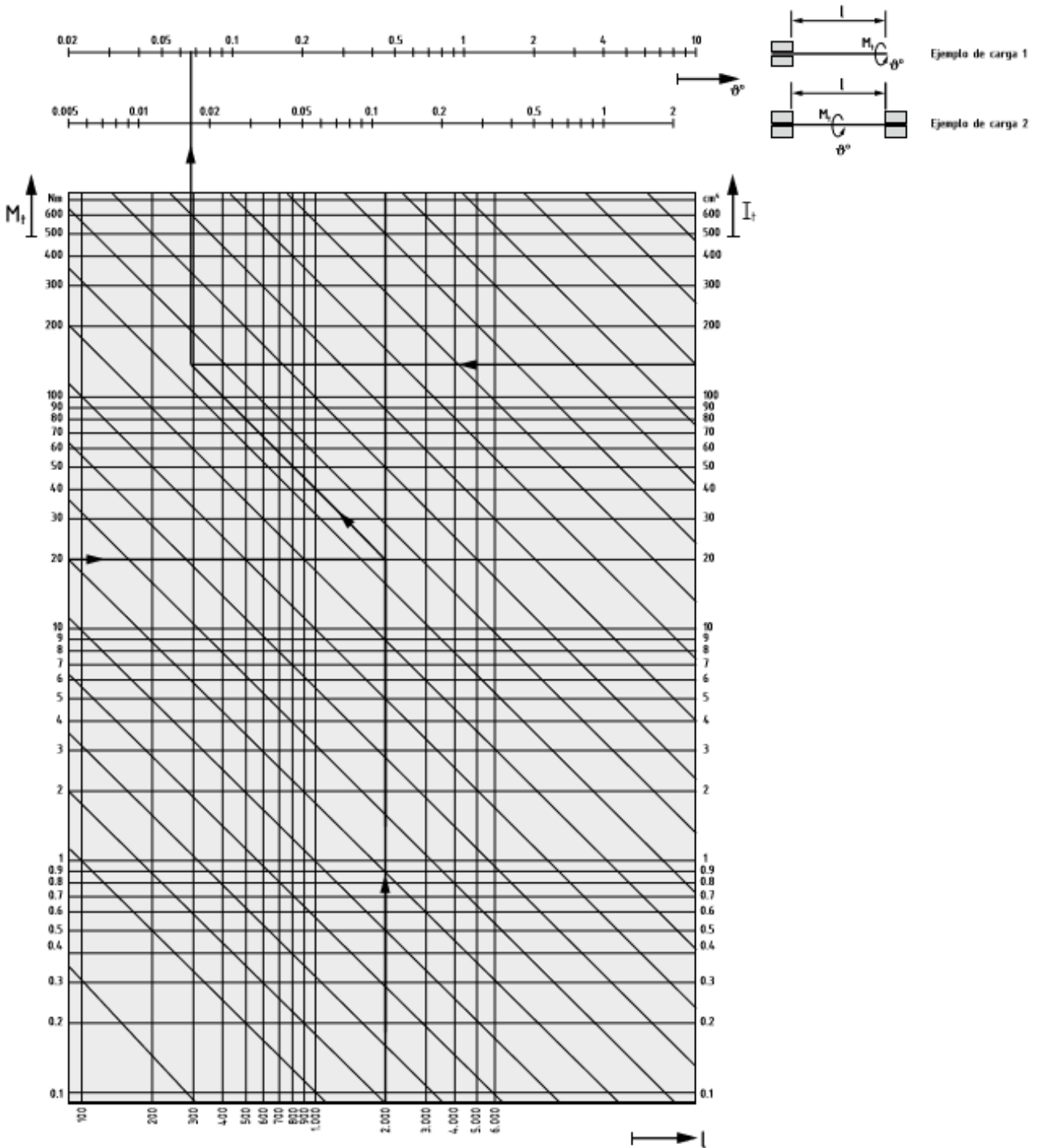
Ejemplo de carga 2

$\vartheta = 0,02^\circ$

Los valores de los momentos de inercia torsionales de los perfiles se determinó experimentalmente o por medio de una cálculo aproximado. Las tolerancias los componentes y las simplificaciones asumidas significan que los ángulos de torsión reales pueden diferir de los calculados hasta en un 15%.

Comprobación del esfuerzo torsional

En la práctica, el criterio para que un perfil falle bajo carga torsional no es tanto el hecho que se sobrepase la tensión torsional permitida, sino más bien la presencia de una torsión excesiva (ángulo de torsión) aunque todavía esté dentro del límite elástico. Esta deformación deteriora en gran manera el funcionamiento correcto de los componentes. Por lo tanto, debe seleccionarse un perfil más rígido a la torsión mucho antes de que se alcancen los valores permitidos de tensión.



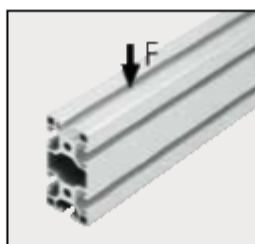
Configuraciones de montaje recomendadas



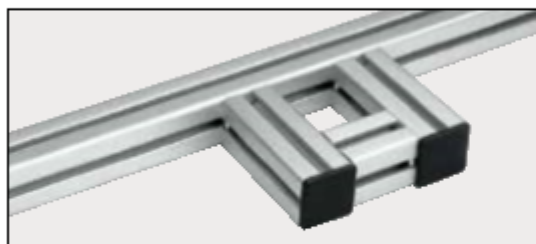
Siempre que sea posible, los perfiles verticales deberían extenderse en toda la altura; esto simplifica la unión de los elementos de suelo y mejora el aspecto general.



Las estructuras deberían diseñarse para soportar las cargas que se prevé que van a recibir, es decir, evitando esfuerzos de torsión en los puntos de unión y dando preferencia a la unión con bloqueo frente a la resistencia por rozamiento en el sentido de la fuerza aplicada a todas las uniones.



Siempre que sea posible, los perfiles deben instalarse de tal forma que la carga sea soportada por el perfil puesto de canto, para conseguir la máxima resistencia a la flexión.



Hay que evitar las interrupciones en el perfil de soporte cuando se instalan fijaciones adicionales; las ventajas son una mayor estabilidad, menos cortes, menos uniones y menor tiempo de montaje.



Prolongar los perfiles sólo con la ayuda de los correspondientes elementos de unión y, siempre que sea posible, apoyarlos en las uniones.



Si no es posible evitar que las superficies anodizadas entren en contacto directo unas con otras, hay que engrasar los puntos de contacto. Esto ayudará a evitar los ruidos que puedan producirse por el movimiento.



Si se prevé que las estructuras basadas en perfiles van a exponerse a esfuerzos extremos, p. ej. impactos, que podrían provocar el desplazamiento de los puntos de unión, hay que instalar elementos de enclavado para ofrecer un seguro adicional.

PLANOS

PLANOS DEL ROBOT

El robot de estructura en forma de brazo articulado en seis ejes KR60HA está fabricado por la empresa KUKA Inc. Presenta un radio máximo de trabajo de 2 metros.

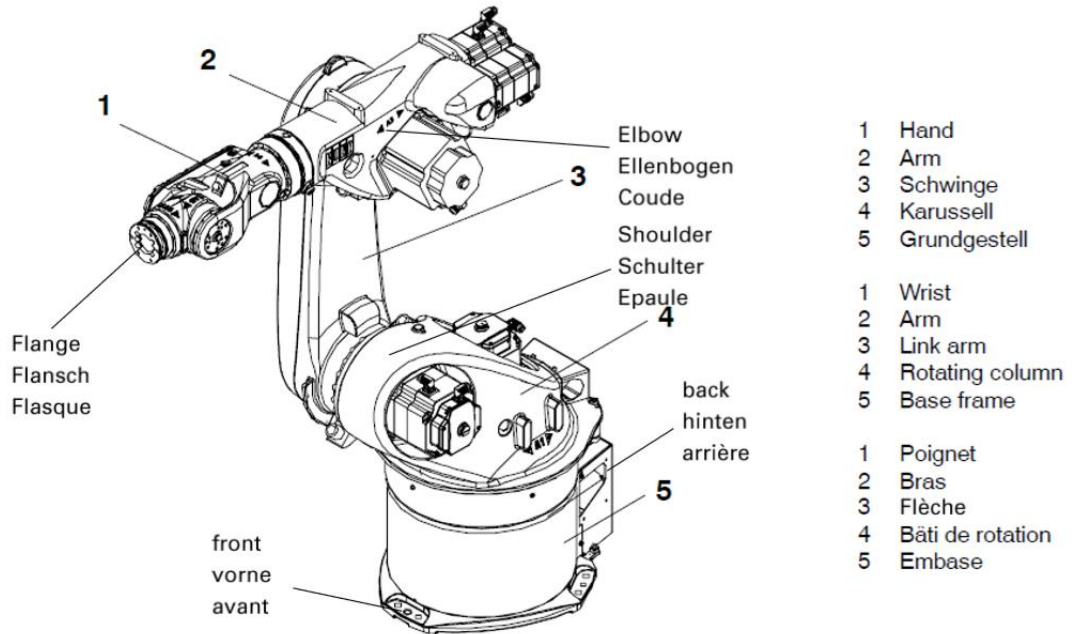


Figura I: Vista general del robot.

A continuación, se muestra el esquema de sistemas de referencia del robot en 3D. La cadena sigue el orden:

$$\{0\} \rightarrow \{1\} \rightarrow \{2\} \rightarrow \{3\} \rightarrow \{4\} \rightarrow \{5\} \rightarrow \{6\} \rightarrow \{F\} \rightarrow \{E\}$$

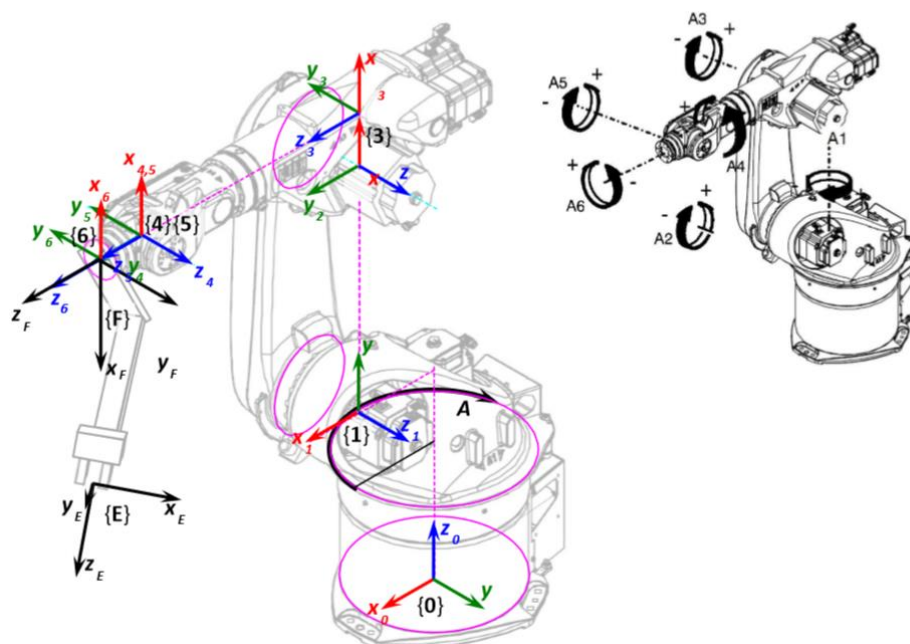


Figura II: Sistemas de referencia del robot.

PLANOS DEL SENSOR

El sensor ATI Omega 160 se representa detalladamente en el siguiente plano con su sistema de referencia:

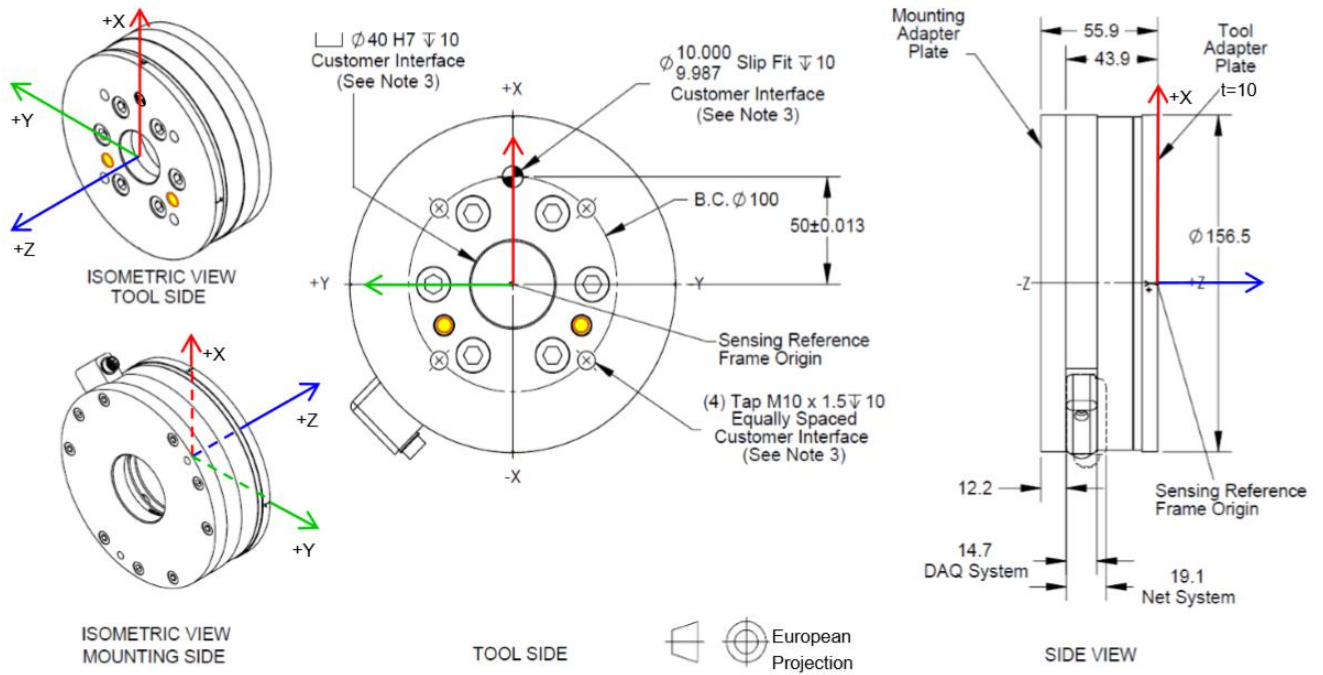


Figura III: Plano sensor ATI.

Orientando las fuerzas y torsiones medidas por el sensor con los ejes establecidos en la anterior figura:

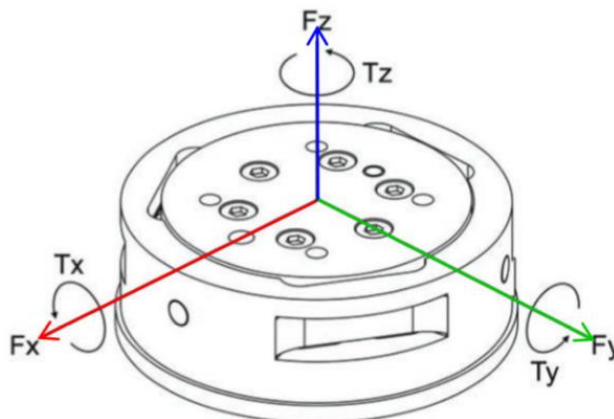


Figura IVI: Sistema esfuerzos sensor ATI.

Como se ha explicado en puntos anteriores, el sensor tiene seis dimensiones que describen los esfuerzos medidos, en la siguiente figura se localizan:

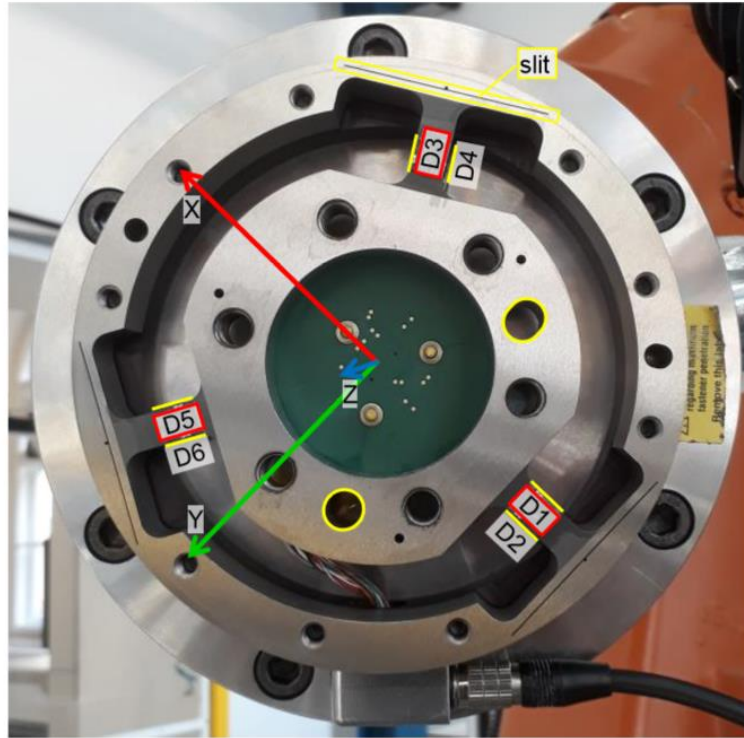


Figura V: Dimensiones sensor ATI.

Al someterse a una carga, cada pareja de dimensiones mide la deformación de su correspondiente membrana (*slit* en la figura V) y esa información es transformada en señal de voltaje. En los siguientes croquis se explica con ejemplos:

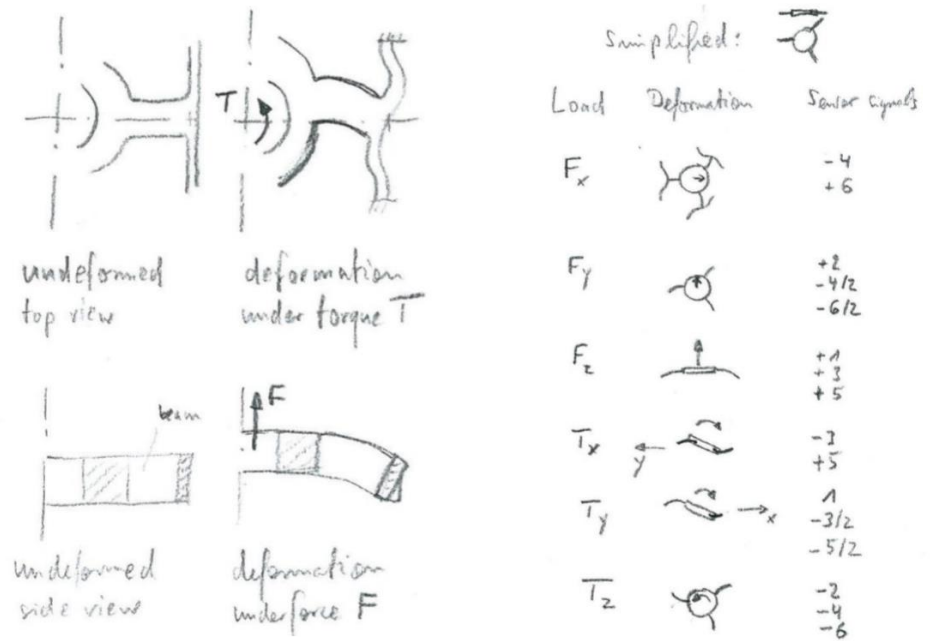
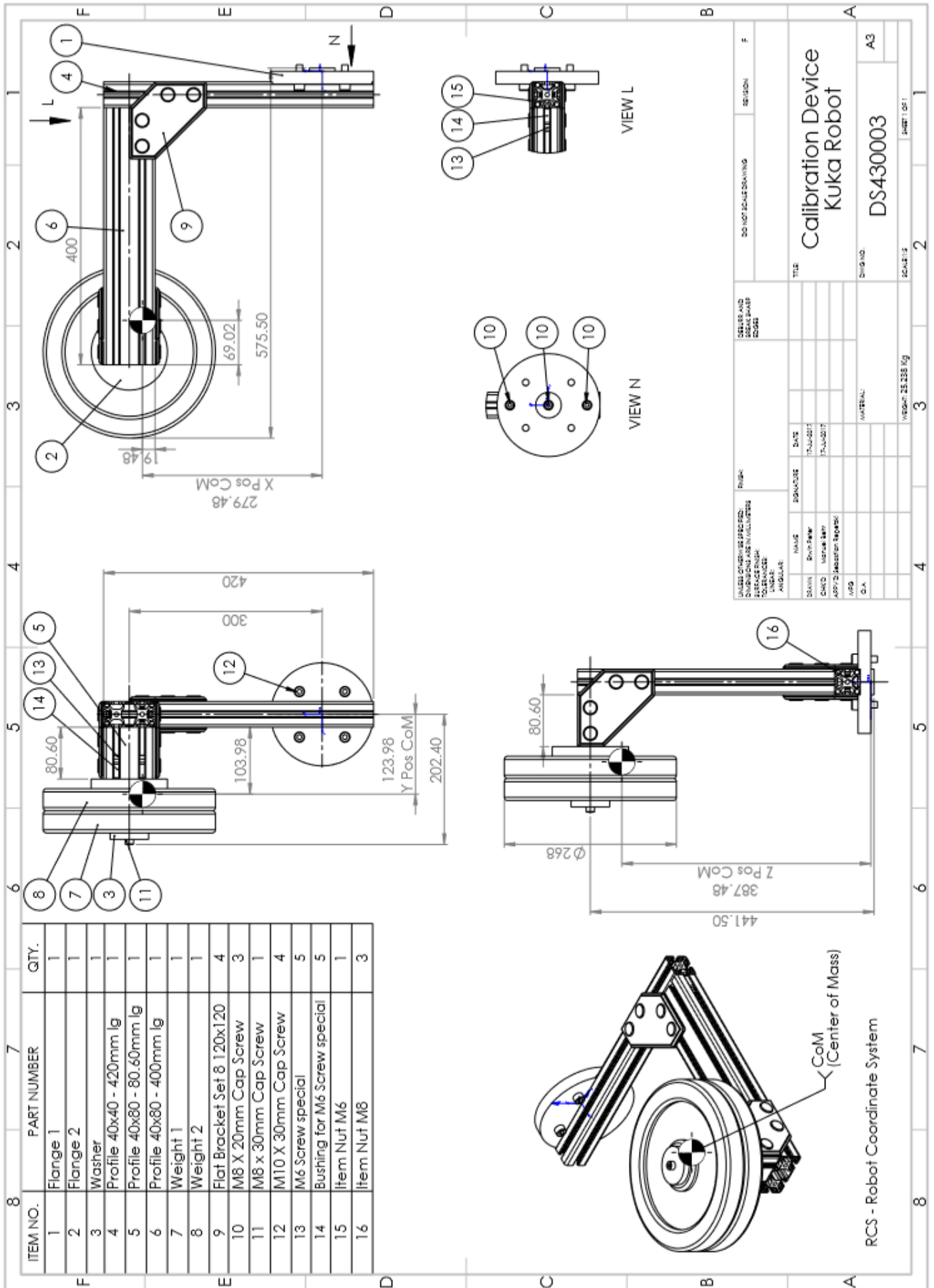


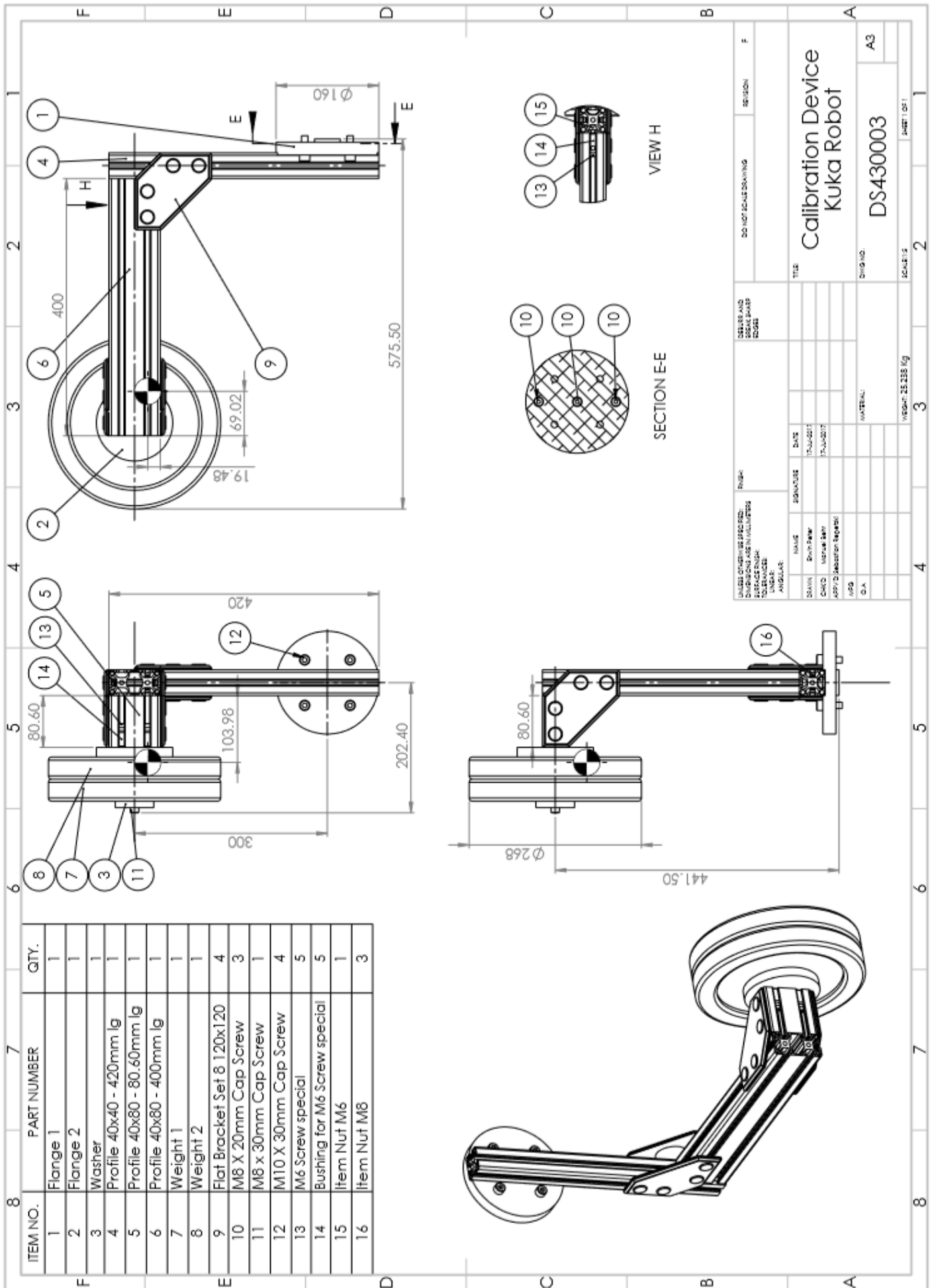
Figura VI: Croquis membranas sensor ATI.

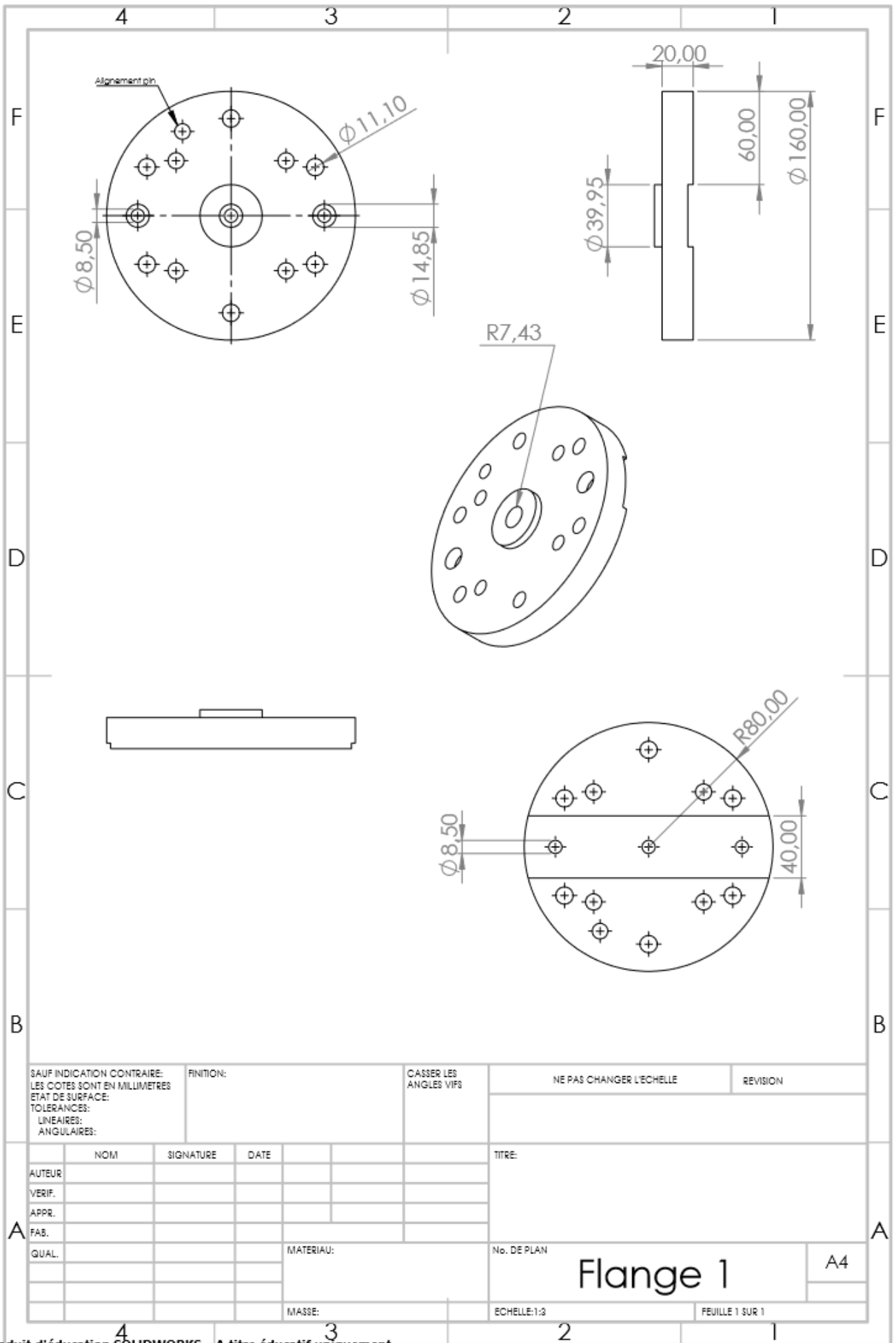
PLANOS DE LA HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN

ÍNDICE

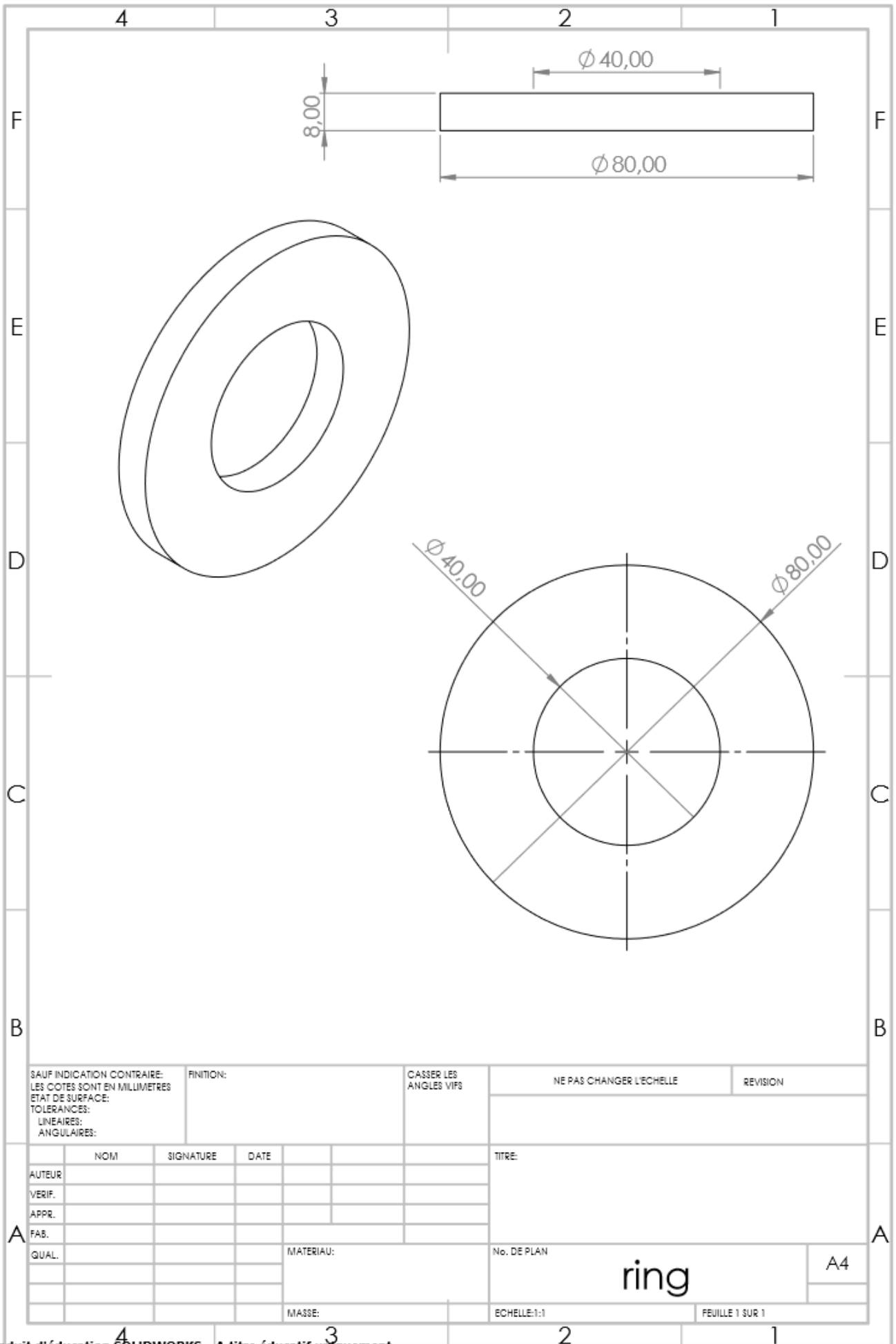
PLANOS DE LA HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN ORIGINAL	73
PLANOS DE LA HERRAMIENTA DE CALIBRACIÓN NUEVA	77
1. Nuevo plato	77
2. Anillo	79
3. Base de configuraciones	81
4. Nueva Configuración 1	93







SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE		TITRE:	
VERIF.						
APPR.						
FAB.						
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN	A4
				MASSE:	ECHELLE:1:3	FEUILLE 1 SUR 1



SAUF INDICATION CONTRAIRE:
LES COTES SONT EN MILLIMETRES
ETAT DE SURFACE:
TOLERANCES:
LINEAIRES:
ANGULAIRES:

FINITION:

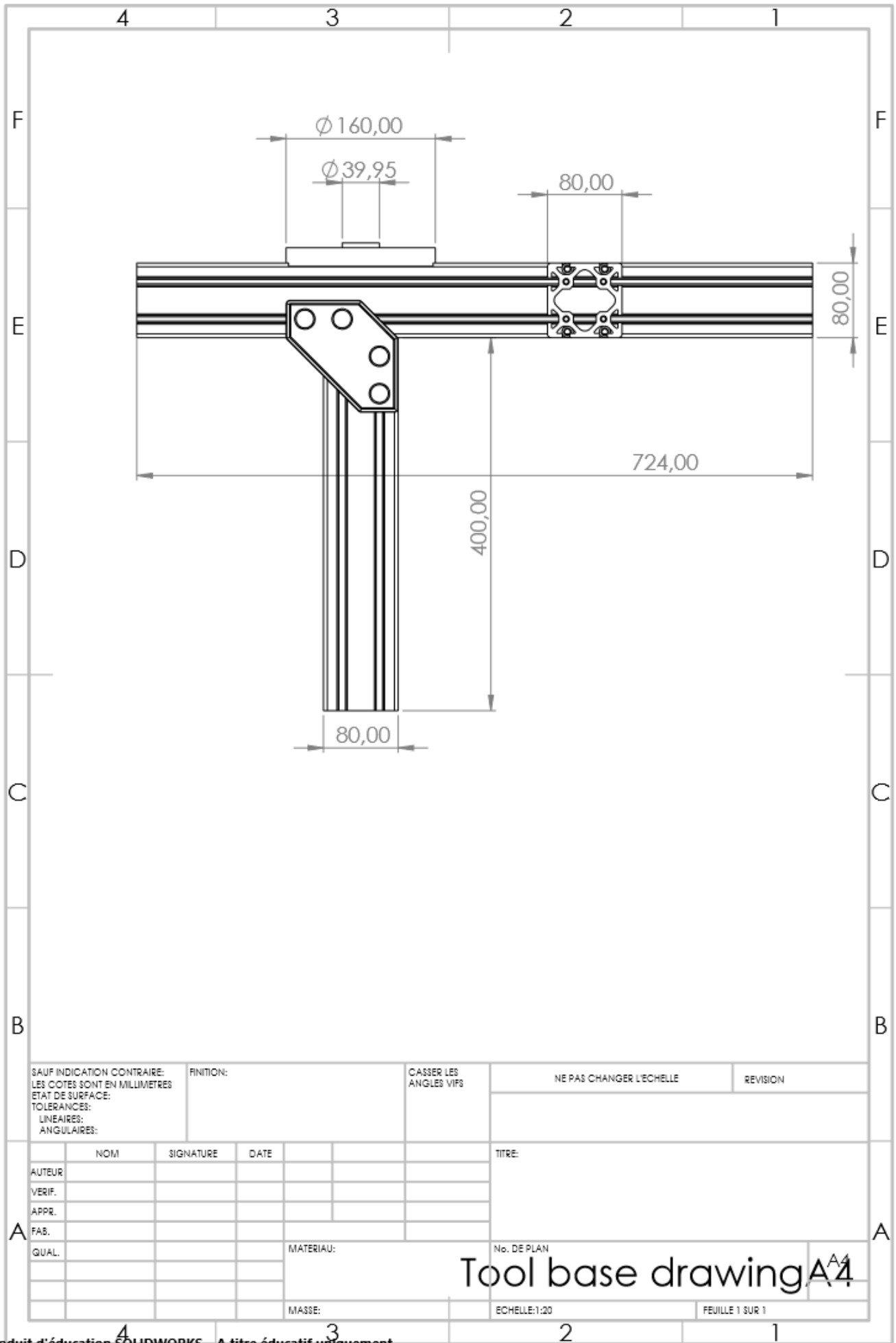
CASSER LES
ANGLES VIFS

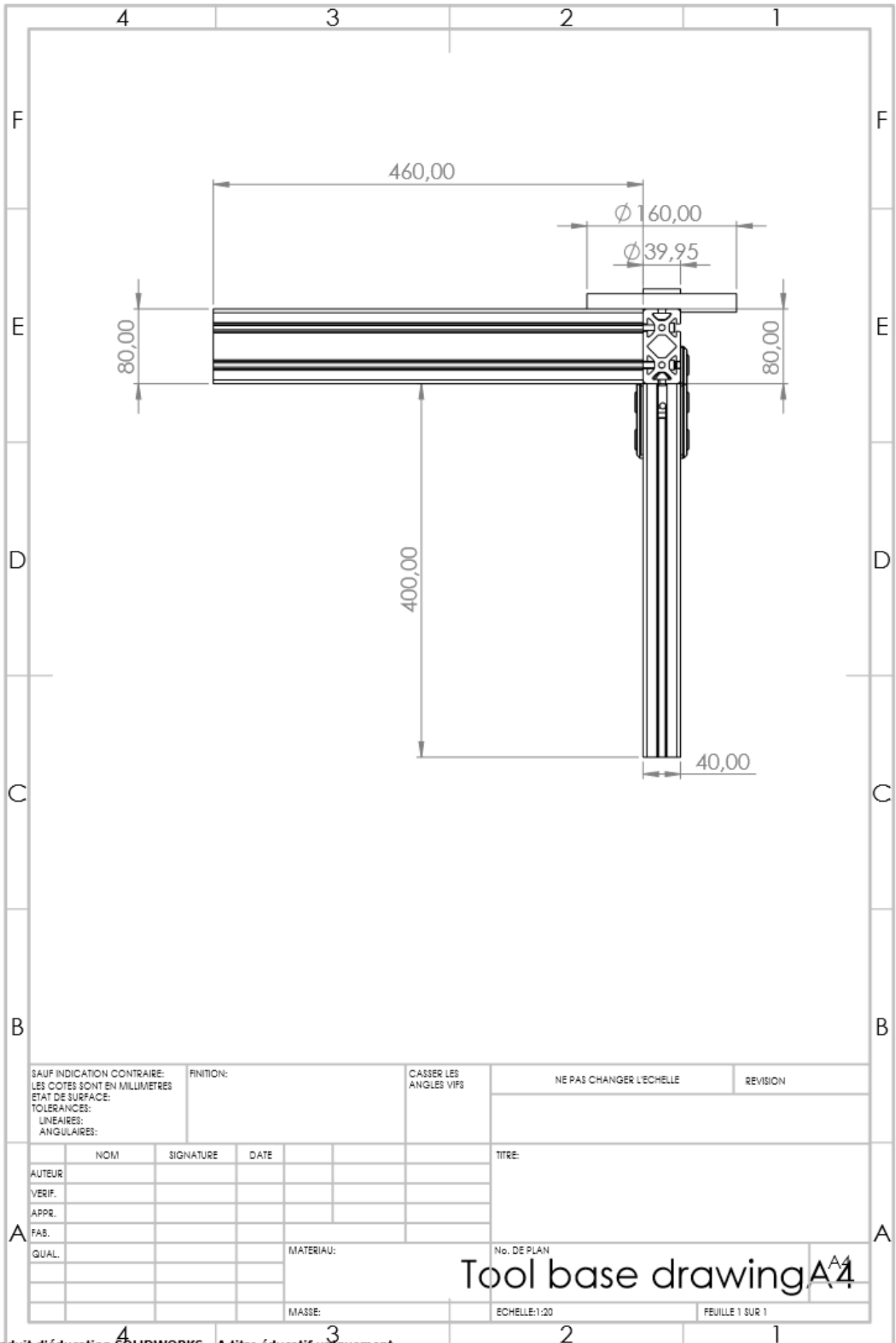
NE PAS CHANGER L'ECHELLE

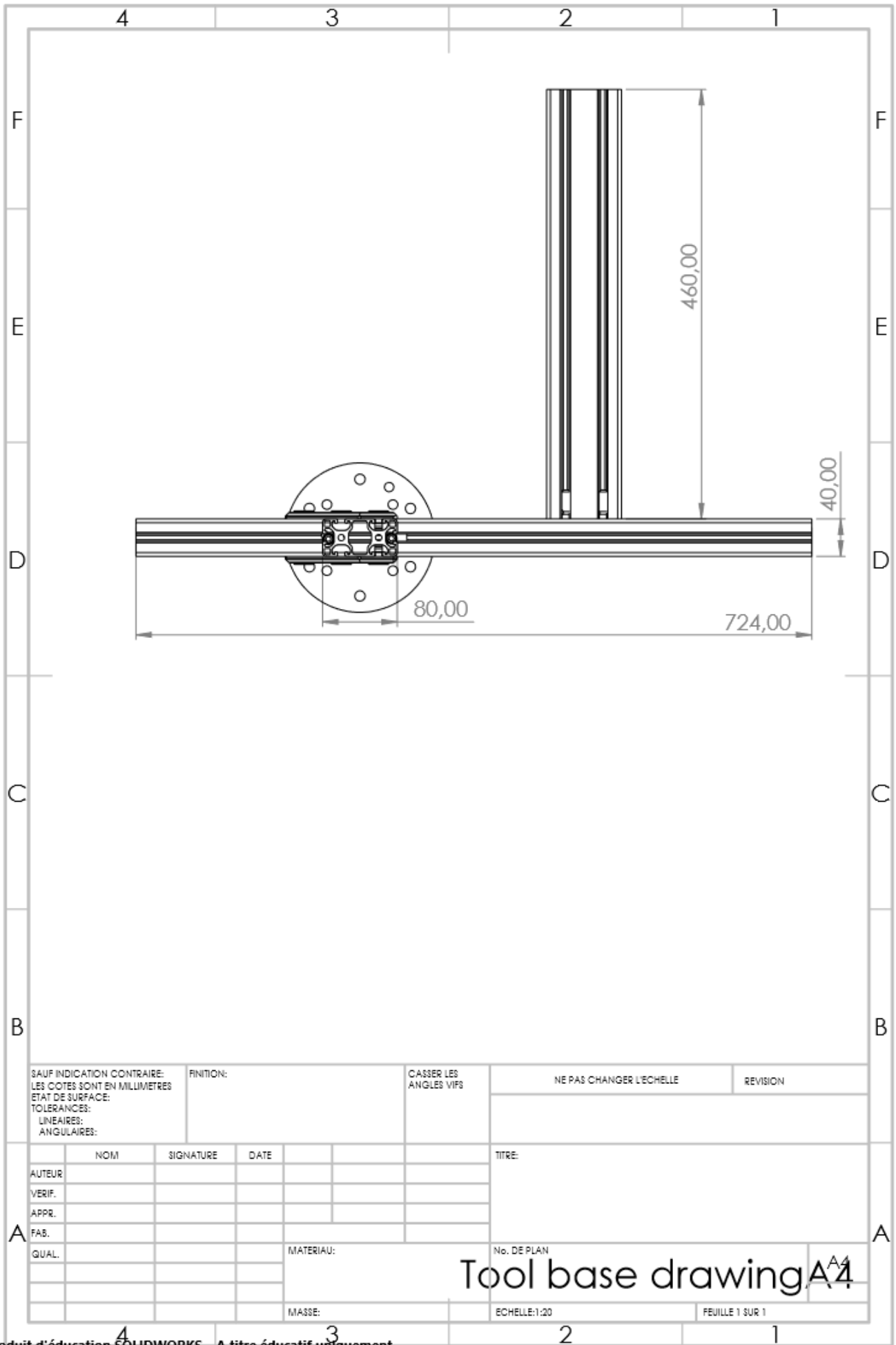
REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE		
AUTEUR					
VERIF.					
APPR.					
FAB.					
QUAL.					

TITRE:	
No. DE PLAN	
ring	A4
MASSE:	
ECHELLE: 1:1	FEUILLE 1 SUR 1

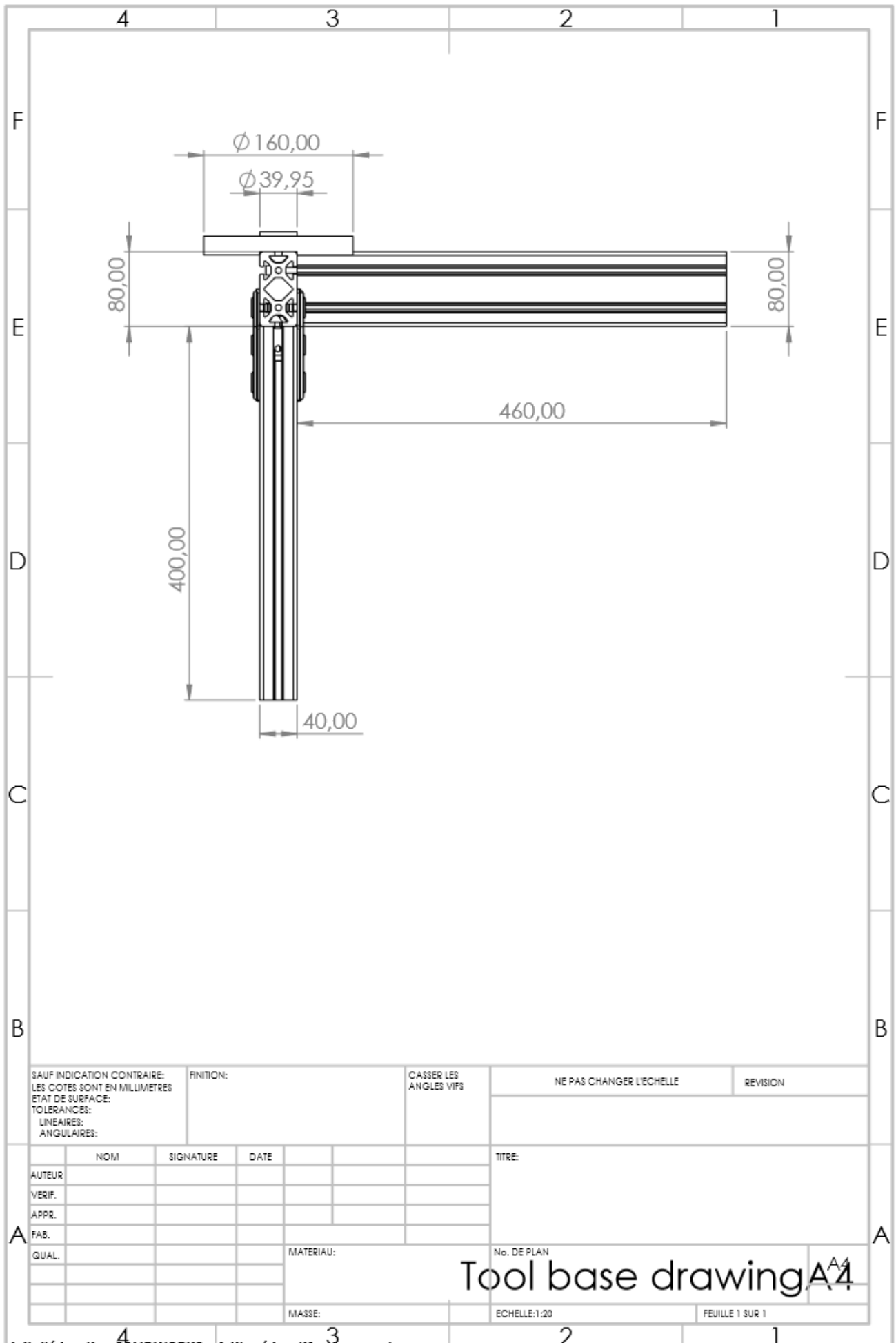


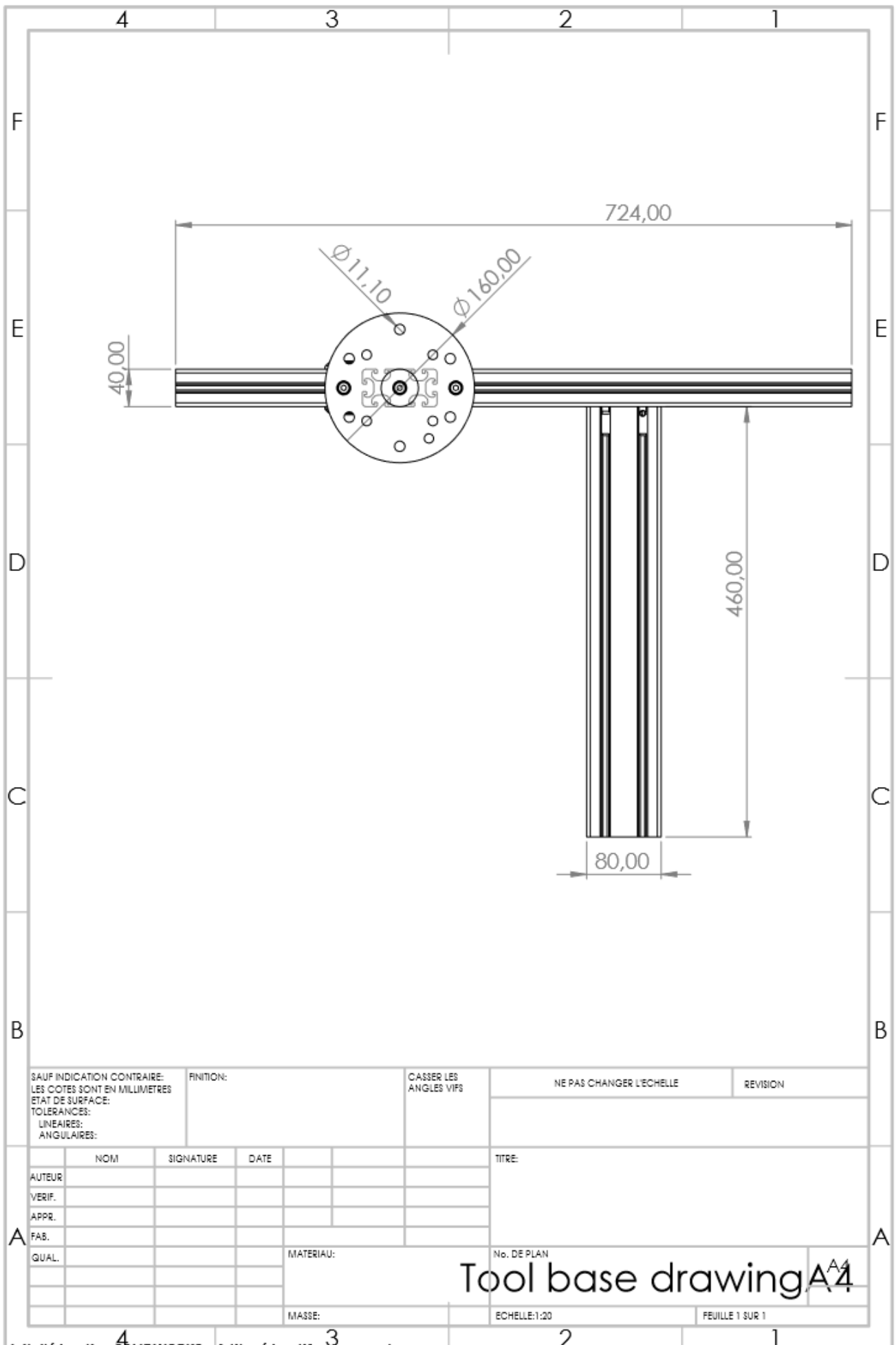




SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
AUTEUR		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
				MASSE:		ECHELLE:1:20		FEUILLE 1 SUR 1	

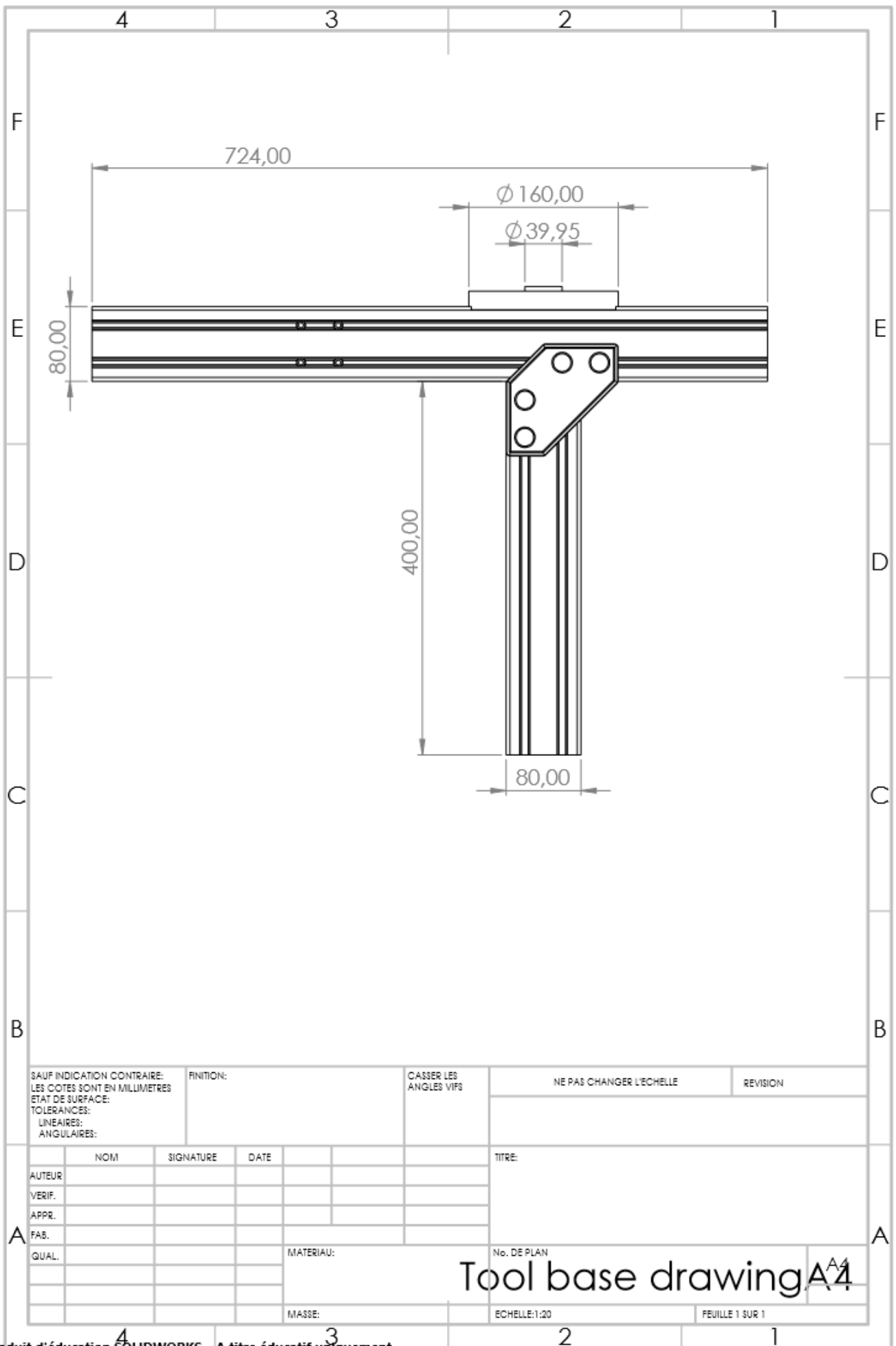
Tool base drawing A4

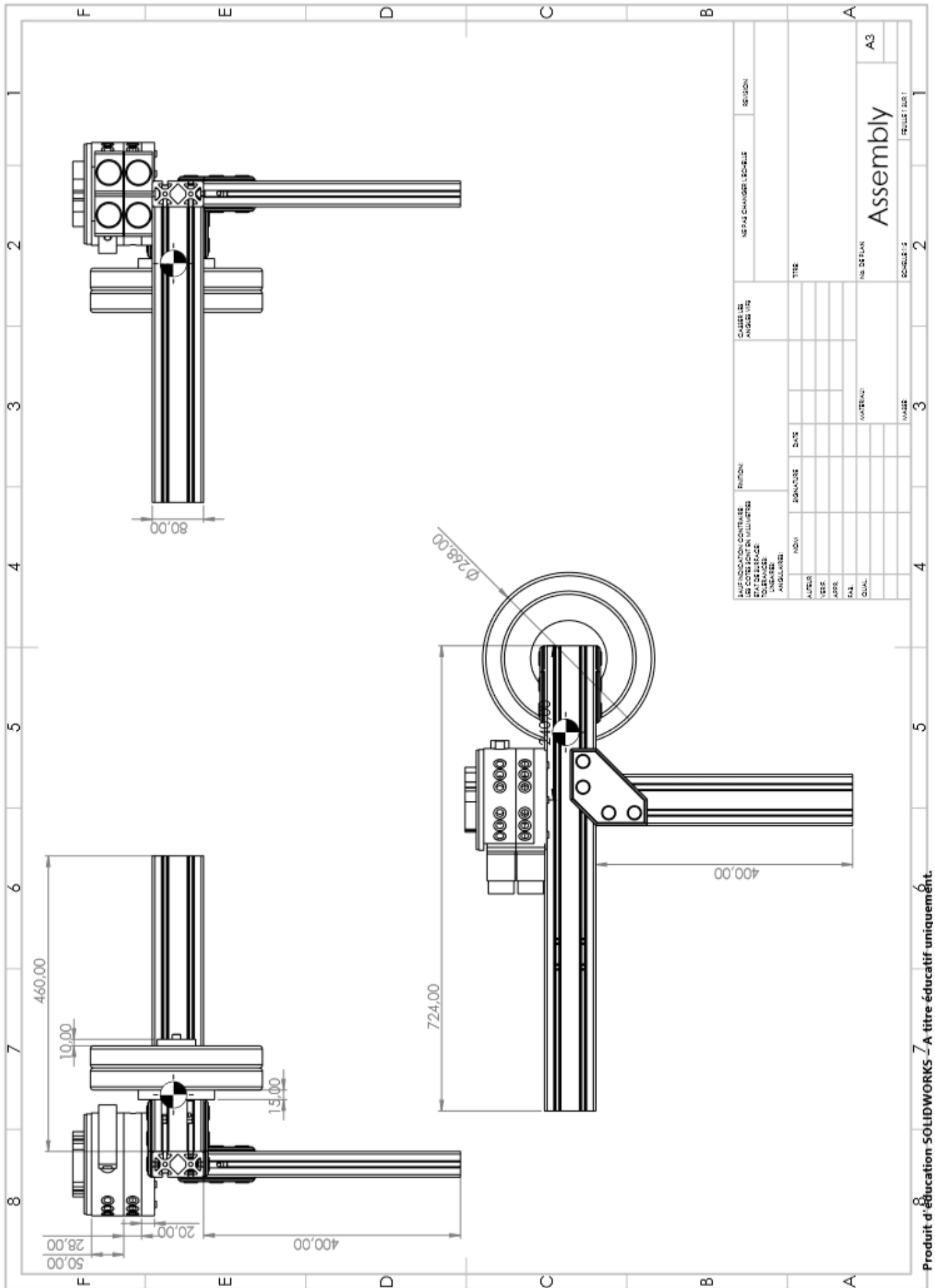




SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:									
NOM		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
AUTEUR									
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.									
				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
				MASSE:		Echelle: 1:20		FEUILLE 1 SUR 1	

Tool base drawing A4





PRESUPUESTO

Para llevar a cabo la construcción de la nueva herramienta de calibración del sensor se han reutilizado todos los elementos posibles, como los tornillos, las placas de unión de los perfiles, las pesas y su soporte; incluso el disco que se instala en el flanco del sensor, como se ha mencionado previamente, adaptándolo a él con nuevos seis agujeros. Además, las barras utilizadas estaban disponibles en el almacén del laboratorio, por lo que tampoco han supuesto un coste. Por último, los procesos de corte y agujereado fueron llevados a cabo en el mismo laboratorio, con máquinas de la escuela y por el operario encargado, al que le fueron entregados previamente los archivos de diseño detallados. De esta forma, el proyecto ha tenido un coste nulo.

Descartando las inversiones en el software de Matlab® y SolidWorks®, a continuación, se explica la cantidad destinada a la adquisición del robot:

El robot fue construido en 2008 por KUKA Inc. y adquirido por la escuela de ingeniería de Management Center Innsbruck en 2010 por un precio aproximado de 40.000€. En la compra se incluía el sensor de fuerza fabricado por ATI Inc., el pedestal y el *Manual Tool Changer* (para instalar la vara y la herramienta de calibración).

Posteriormente, en 2014, se construyó una estructura de seguridad alrededor del robot. Consiste en varias paredes de cristal con una puerta de acceso por control remoto, todo ello del fabricante americano Item Inc. El precio total de todo lo anterior fue de aproximadamente 20.000€. Un año después, en 2015, un accidente dañó la estructura y fue reparada por 1.000€.

Concluyendo, la inversión en el robot y sus accesorios y en todos los proyectos relativos hasta la fecha ha sido de 61.000€.

Actualmente no hay planeada ninguna inversión en el robot a corto plazo.

BIBLIOGRAFÍA

[REPE19] Repetzki S., "Project Book Team MA-MECH-18-VZ-2B Collision Sensitive Robot", Management Center Innsbruck 2019.

[REPE18] Repetzki S., "Calibration of a Force-Torque-Sensor attached to a KUKA Robot KR60HA at MCI", Management Center Innsbruck 2018. Documentación interna.

[SERR18] Serrano Irurzun M.L., "Tactile Assembly Robot: Elastic Behavior of a White Cane Robot Tool", Trabajo de Fin de Grado Universidad Pontificia Comillas-ICAI julio 2018.

[ITEM19] catalogue.item-south.com

