MODELACIÓN Y DISEÑO DE SUJETADOR PARA LA MANIPULACIÓN DE UNA FRESADORA DE SUPERFICIE FRONTAL (*ROUTER*) CON BRAZO ROBÓTICO.

TESINA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN MANUFACTURA AVANZADA

PRESENTA:

GERARDO BRIANZA GORDILLO

Aguascalientes, Aguascalientes, Agosto de 2017

CIATEQ

31 de julio de 2017

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno Ing. Gerardo Brianza Gordillo, una vez revisada la Tesis o tesina titulada: "DISEÑO Y MODELACIÓN DE SUJETADOR PARA LA MANIPULACIÓN DE UNA FRESADORA DE SUPERFICIE FRONTAL (ROUTER) CON BRAZO ROBÓTICO", autorizamos que el citado trabajo sea presentado por el alumno para la revisión del mismo con el fin de alcanzar el grado de Maestro en Manufactura Avanzada durante el Examen de Titulación correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 31 días de julio del año 2017.

Dr. Gonzalo González Rey
Asesor Académico

Ing. Jorge Iván Rodriguez Galicia
Asesor en Planta

CIATEQ

Aguascalientes, Ags.
2 de octubre del 2017

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora
Posgrado CIATEQ
PRESENTE.

Por medio de la presente me estoy dirigiendo a Ud. de la manera más atenta, de que fui designado como revisor del trabajo de tesis del (la) *Ing. Gerardo Brianza Gordillo*, del trabajo titulado:

"Diseño y modelación de sujetador para la manipulación de una fresadora de superficie frontal (router) con brazo robótico"

Después de haber leído, corregido e intercambiado información con el (la) estudiante antes mencionado(a), el trabajo de tesis que me fue entregado y haciendo resaltar que el (la) estudiante realizó todos los cambios que le fueron sugeridos a la tesis, ésta puede ser autorizada para su publicación y que de ésta manera pueda iniciar los trámites correspondientes para iniciar el proceso de titulación.

Sin otro particular por el momento y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta y en beneficio del estudiante y la institución, agradezco la atención que se sirva prestar a la presente,

A T E N T E M E N T E

Dr. Fernando García Navarro

AGRADECIMIENTOS

Con todo mi amor a mi linda esposa Gaby, que, gracias a su presencia y apoyo incondicional a procurado mis logros profesionales y personales.

A los que me dieron la vida, que, hasta el día de su existencia, me apoyaron con todo su cariño y amor por el camino del bien y la superación. Que la vida me permita seguir honrando su memoria. Mis Padres.

A mis hijos, que, como un motor espiritual tiende a impulsar todo ese potencial a desarrollar durante el camino profesional. En especial a mi hijo Abraham, que habré de estar a su lado durante todo el camino de sus éxitos y fracasos.

A mi asesor Gonzalo Gonzalez y profesores, por compartir tan vastos conocimientos y experiencias, con singular dedicación, me han orientado en el camino del grado de maestría.

Siendo hombre de ciencia y también de FE, a ese Poder Superior, al que llamo, DIOS, por ese aliento de vida que me permite continuar.

GRACIAS.

RESUMEN.

La Universidad Tecnológica de Aguascalientes, cuenta con un taller de robótica industrial, en el cual se imparten asignaturas relacionadas con el manejo de los brazos robóticos, relacionadas con aplicaciones industriales, cuenta con un brazo robótico FANUC ARR Mate 120ic de 20 kg., que, actualmente realiza operaciones de corte por plasma y manipulación de objetos con base de hierro por medio de un electroimán con fines didácticos orientados al sector industrial.

En el presente trabajo se desarrolla la modelación y el diseño de un dispositivo mecánico capaz de adaptarse al robot y manipular una fresadora de superficie frontal (*Router*), esto con la principal finalidad de realizar maquinados con fines didácticos orientados a procesos industriales en madera.

Con el apoyo del CAD SolidWorks se modelan todas las piezas mecánicas necesarias para el manipulador. Con ayuda del software CES edupack 2015, se logra la selección de los materiales para ingeniería a utilizar en cada elemento crítico.

Con ayuda de modelos matemáticos para la obtención de fuerzas de operación se establecen con ayuda del software SolidWorks, los análisis de esfuerzo y deformación, se establecen también los factores de seguridad correspondientes para asegurar la capacidad de trabajo de los elementos y sobre todo del brazo robótico durante la operación.

Se presentan los planos de fabricación, así como el costo estimado a valor actual, con la finalidad de establecer la posibilidad de construcción.

Palabras clave: SolidWorks, Brazo Robótico, Maquinado, Diseño Mecánico.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 ANTECEDENTES GENERALES 1
1.2 DEFINICIÓN O PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3
1.3 JUSTIFICACIÓN 4
1.4 OBJETIVOS 6
1.4.1 General 6
1.4.2 Específicos 6
1.5 HIPÓTESIS 6
1.6 ALCANCE 7
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO 8
2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT INDUSTRIAL 8
2.2 EVOLUCIÓN MECÁNICA DE LOS ROBOTS 9
2.3 EL MECANIZADO Y LOS ROBOTS 10
2.4 ESPACIO DE TRABAJO 12
2.5 GRADOS DE LIBERTAD 13
CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT FANUC ARC MATE 120iC 18
3.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS 18
3.2 CAPACIDAD DE CARGA 21
3.3 REPETIBILIDAD 23
3.4 CAMBIADORES AUTOMÁTICOS DE HERRAMIENTA ROBÓTICA 23
CAPÍTULO 4. MODELACIÓN 28
4.1 MODELO CAD FANUC ARC MATE 120IC 28
4.2 CAMBIADOR AUTOMÁTICO PARA EL ROBOT FANUC ARC MATE 120IC. 29
4.2.1 Conjunto ensamble macho 29
4.2.2 Conjunto ensamble hembra 32
4.3 SOPORTE DE SUJECIÓN AL ROUTER 34
4.4 FRESADORA DE SUPERFICIE FRONTAL COMPACTA DE 1-1/4 HP 35
4.5 ENSAMBLE COMPLETO INTERCAMBIABLE PARA MAQUINADO CON ROUTER 37
CAPÍTULO 5. SELECCIÓN DE MATERIALES 40
5.1 BASE HEMBRA 40
5.2 INSERTO DE SOPORTE. 48

5.3 SUJETADOR DE LA FRESADORA (MAMELÓN) 52
CAPÍTULO 6. ANÁLISIS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS 58
6.1 CONCEPTO GENERAL 58
6.2 PARÁMETROS DE CORTE. 59
6.2.1 Fresado 59
6.2.2 Taladrado 62
6.3 SIMULACIÓN DEL CONJUNTO A LAS CARGAS DE FRESADO Y TALADRADO 64
6.3.1 Malla para fresado 65
6.3.2 Análisis de tensión y deformación por fresado 65
6.3.2.1 Vista de sección de trazado ISO (ISO Clipping) 67
6.3.2.2 Fuerza de normal y fuerza de fricción 67
6.3.3 Factor de seguridad por fresado 68
6.4 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO DE SUJECIÓN AL ROUTER DENOMINADO MAMELÓN 73
6.4.1 Tornillo de apriete 73
6.4.2 Malla para el sujetador del *router* (Mamelón) 76
6.4.3 Análisis de tensión y deformación para el mamelón 76
6.4.4 Factor de seguridad para el mamelón 79
6.5 AJUSTES Y TOLERANCIAS 80
CAPÍTULO 7. RESULTADOS 82
7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS 82
7.2 CONCLUSIONES 86
7.3 TRABAJOS FUTUROS 87
7.4 RECOMENDACIONES 87
7.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88
Anexo 91

GLOSARIO

Router: Herramienta eléctrica manual, versátil de mayor utilidad en carpintería; usada para trabajos en madera y otros materiales, trabajos de decoración, rebaje, desbaste, biselado, uniones, etc.

Computer Aided Manufacturing: Fabricación Asistida por Ordenador (CAM) comúnmente se refiere al uso del control numérico (NC).

Fresadora de superficie frontal: refiérase a router.

Anisotropía: propiedad general de la materia según la cual cualidades como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas.

Grippers: En robótica, el termino de actuador final se utiliza para describir la mano o herramienta que está unida a la muñeca.

Semántica: Vocablo griego que puede traducirse como "significativo". Se trata de aquello perteneciente o relativo a la significación de las palabras.

Computer Aided Design: Diseño Asistido por Ordenador, es el uso de programas informáticos para crear representaciones gráficas de los objetos físicos en dos o tres dimensiones (2D o 3D).

Abrazadera: Pieza de metal, madera u otro material que rodea una cosa y sirve para apretarla o asegurarla a otra.

Cinemática antropomorfa: Trata del movimiento en sus condiciones de espacio y tiempo, sin tener en cuenta las causas que lo producen y que atribuye rasgos y formas humanas a cosas o seres no humanos.

Mecanizado: Proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante el arranque de viruta en el material.

Teach Pendant: Teclado, monitor y caja de comandos.

Muñeca: Similitud con la anatomía de las extremidades superiores del cuerpo humano, se usa para hacer referencia a elementos que componen el robot.

Ensamble macho: El elemento interior, ó sea, la parte llena, se la denomina eje (macho).

Ensamble hembra: El elemento exterior, ó sea, la parte hueca, se la denomina agujero (hembra).

Mamelón: Refiérase a la extensión rígida mecánica que mejora la resistencia de montaje y funcionamiento de un elemento mecánico, comúnmente usado en catarinas.

Cople: elemento mecánico que se utiliza para conectar tramos de ejes, en diferentes planos o con dirección paralela, para transmitir energía.

Solver Direct Sparse: resuelve el sistema de ecuaciones directamente sin aproximaciones, **por lo tanto, no hay ningún error asociado con los procedimientos de solución.**

ISO Clipping: sección recortada que muestra el detalle de la tensión dentro de una parte o conjunto.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES GENERALES

El manejo de una fresadora de superficie eléctrica (*router)*, para maquinados en madera, en la mayoría de los casos en la pequeña y mediana industria, así como en los talleres escolares de educación superior se hace de forma manual, con dependencia directa al operario más experto para el mejor resultado, en estas condiciones los operadores, están expuestos a ambientes poco ergonómicos y peligrosos, como entornos de polvo, poca visibilidad y exposiciones de sustancias toxicas. El uso de robots supera en mucho estas desventajas [1].

En la industria moderna es importante desarrollar metodologías para reducir riesgos, costos y lograr alta calidad en las piezas mecanizadas sobre todo en la exactitud que requieren en su geometría. Se pueden utilizar las adaptaciones ya existentes de los modelos CAD 3D geométrico utilizados para generar trayectorias por software CAM *(Computer Aided Manufacturing)* en robots, para maquinados en madera con trayectorias previamente definidas [2]. De los controladores que se utilizan en robots para realizar operaciones con precisión, son los de lazo abierto los que siguen los ciclos deseados con mayor precisión, esto ha dado la posibilidad de incrementar las operaciones que un brazo robótico puede realizar [3].

Un brazo robótico con capacidad de peso de 20 Kg será capaz de manipular una fresadora de superficie frontal (*router)* con un peso aproximado de 7 Kg. En máquinas herramientas, y herramientas de corte se han desarrollado tecnologías que pueden compensar las velocidades de corte y los radios de giro de herramentales sujetos a un robot utilizando un sistema de software que clasifica maquinados hasta en cinco ejes, con análisis de la información de la geometría de las piezas [4].

Hoy los operadores en la industria son capaces de manipular un robot guiado por modelos 3D en internet. Resultados experimentales demuestran la factibilidad de cumplir los requisitos de montaje industrial con calidad y poco tiempo de procesamiento [5].

El laboratorio de robótica industrial de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes cuenta con brazos robóticos. En la actualidad se requiere diseñar y modelar un sujetador

para uno de los brazos robóticos capaz de soportar y manipular un (*router)* eléctrico para operaciones de corte en madera, con el deseo de realizar maquinados en tres dimensiones y que tenga la capacidad suficiente para soportar las fuerzas de corte correspondientes a las propiedades mecánicas y físicas, que en su conjunto revelan la anisotropía de la madera [6].

Para un buen diseño y modelado del sujetador, se debe tomar en cuenta sus componentes y el sistema, junto con sus particularidades, dado el propósito de aplicación. Algunas restricciones por considerar para el sujetador pueden ser; ligereza, dimensiones reducidas, rigidez, capacidad multitarea, y fácil mantenimiento. Todas estas características interactúan con los efectos esperados [7].

El desarrollo actual de la tecnología utilizada en manufactura donde intervienen robots está siendo usada principalmente en operaciones que requieren estabilidad y repetibilidad [8]. El laboratorio de robótica cuenta con un brazo robótico que ya realiza operaciones de manipulación de materiales ferrosos por medio de un electroimán y corte por plasma. Cuando se emplean robots en procesos de mecanizado, la precisión puede ser mejorada con un buen modelo de calibración y con incremento en la rigidez cinemática del manipulador. En el procedimiento de calibración cinemática, son parametrizados los movimientos del robot con alta precisión usando sistemas de medición óptica para una carga constante en el cortador de la fresadora de superficie. Los métodos de compensación de la rigidez del manipulador Involucran datos experimentales, siendo los datos de los sensores necesarios en la fase de modelado y medición al ejecutar el maquinado [9].

Actualmente existen dispositivos de sujeción que facilitan la interacción adecuada entre el sistema robótico y el complejo ambiente de trabajo del *router*. Una garra sintetizada orientada para dispositivos de manipulación automática diseñada para el montaje de trabajo bajo producción de aparatos y artículos eléctricos industriales [10] podría ser una buena adecuación y adaptación para el manejo correcto del *router*. La adecuación del sujetador no debe basarse solamente en las características del objeto a manipular, de hecho, muchos otros parámetros habrán de intervenir, como, condiciones de alimentación, parámetro de montaje, las condiciones de posicionamiento, así como espacios disponibles [11].

1.2 DEFINICIÓN O PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen asignaturas específicas donde se dispone de operaciones de mecanizado orientados a procesos industriales de manufactura con énfasis en la eliminación de material de una pieza en forma de viruta, como el fresado, torneado y taladrado. En particular, el fresado como tecnología de manufactura con arranque de viruta tiene una amplia difusión en la industria moderna y está incluido en los programas académicos de la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes.

En este sentido, el problema del presente trabajo queda definido como:

En un brazo robótico, disponible en el laboratorio de robótica de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes, se necesita un sujetador para la manipulación de una fresadora de superficie frontal capaz de realizar operaciones de corte variadas y con precisión aceptable en piezas de madera.

Después de la primera innovación que será el fresado, será deseable seguir escalando las siguientes operaciones de maquinado, con sus respectivos diseños en la sujeción de las herramientas. Los sistemas de maquinado automático tienen una larga historia en la industria y la comunidad de investigación. El uso de robots industriales para el maquinado es interesante debido a su programación flexible y el relativo bajo costo. En estos sistemas es necesario un conjunto de abrazaderas para evitar vibraciones durante el manejo de la herramienta de corte ya que genera fuerzas axiales, horizontales y verticales durante el proceso de corte [12]. Una vez diseñado y modelado el sujetador de la fresadora de superficie frontal es precisamente donde surge lo interesante del maquinado debido a su programación flexible.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La Universidad Tecnológica de Aguascalientes, ofrece cursos y laboratorios en el área de robótica como especialidad en la carrera de Mecatrónica. En una compleja investigación sobre brazos robóticos, los elementos de manipulación (*grippers*) resultantes, proporcionan las bases necesarias para el desarrollo de nuevos sistemas, métodos y pruebas de algoritmos de control robótico basados en simples analogías. Los descubrimientos científicos y su aplicación comercial en las industrias de alta tecnología son puntos de referencia para la economía moderna. Esto plantea altos requisitos de formación de profesionales capaces de implementar los últimos avances de la ciencia y tecnología en la industria. Por tal motivo es necesario la atracción masiva de jóvenes a las carreras de tecnología y diseño [13]. Actualmente el brazo robótico de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes manipula materiales ferrosos por medio de un electroimán y maneja una antorcha de corte por plasma. Estas aplicaciones se llevan a cabo con fines didácticos.

Diseñar y modelar un sujetador que sea capaz de manipular una herramienta eléctrica para fresado frontal de superficies en madera, generará una aplicación más, que despertará el interés de los estudiantes para lograr maquinados en tres dimensiones con fines didácticos basado en aplicaciones industriales. Hecha esta aplicación de manipulación puede ser modificada por los estudiantes en la ejecución de sus tareas, desarrollando experiencia en la búsqueda de algoritmos de codificación para el movimiento del brazo robótico en operaciones nuevas [14]. La literatura científica reporta muchas plataformas desarrolladas específicamente para la enseñanza de robótica móvil y brazos robóticos para ayudar a estudiantes de ingeniería a estimular sus conceptos y mejorar sus habilidades innovadoras Adicionalmente se sabe que existen plataformas que pueden utilizarse para desarrollar múltiples configuraciones en robots [15].

El brazo robótico de la universidad tiene una capacidad de carga y manipulación de 20 Kg. El tamaño de la fresadora de superficie frontal (*router)* será de crucial importancia. El robot deberá tener la capacidad de manipulación por peso y por capacidad de corte. La fuerza de corte afecta a las herramientas durante el mecanizado de piezas y depende de factores tales como, la profundidad de corte, desplazamiento y la velocidad del husillo. Las cargas en la herramienta de corte conducen a fuerzas

resultantes y momentos flexionantes que actúan sobre los servomotores del robot. Aunque el robot se mueve con un programa determinado, a una velocidad constante, nos enfrentamos a retos tales como, la profundidad de corte y los cambios en la geometría de las partes a mecanizar [16].

Solo aproximadamente el 0.6 % de los robots operativos en el mundo [9] se utilizan para aplicaciones de mecanizado, incluyendo fresado y pulido. Para este fin se han estado utilizando maquinas herramientas tales como máquinas de control numérico (CNC), debido a su alta exactitud de posicionamiento y rigidez. Considerando que los robots industriales pueden ofrecer flexibilidad y eficiencia en el costo de mecanizado, el interés por el mecanizado con robots ha aumentado [9]. Algunas estaciones de manufactura con operaciones por arranque de viruta, CNC, han evolucionado con la ayuda de la programación en robots, que a su vez manipulan herramientas de corte [17]. En este contexto queda clara la necesidad apremiante de escalar las posibilidades operacionales dentro del laboratorio de robótica de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes, para que los estudiantes se vean reforzados en sus conocimientos y habilidades en competencias que actualmente demanda la industria.

En la tendencia actual se espera que el número de dispositivos asociados a un robot crezca sostenidamente hasta el año 2020 [18]. En el día de hoy el número de robots inteligentes capaces de comunicarse entre sí e interactuar con los seres humanos se consideran alrededor de 50 millones [18]. Esta es la revolución prevista, en el cual uno de los principales objetivos es "conectar todo y a todos en todas partes con todo lo demás". Los robots jugaran un papel importante en la sociedad del mañana, ayudando a los seres humanos en la realización de muchas tareas, que abarcan operaciones auxiliares de montaje industrial incluyendo sistemas de rescate con apoyo militar, hasta sistemas de automatización para la salud [18]. Las nuevas generaciones que tengan a su alcance el estudio de nuevas tendencias tecnológicas se verán altamente beneficiados en su desarrollo profesional, así como la industria. Los sistemas robóticos del mañana necesitan ser capaces de hacer frente a una gran variedad de cambios, flexibles y agiles. Para tener éxito, estos sistemas necesitan combinar experiencia, conocimiento de sus propias habilidades y limitaciones e información ambiental tanto semántica y geométrica [19]. Una vez instalada en el Laboratorio de Robótica de la Universidad Tecnológica de

Aguascalientes la fresadora de superficie frontal (*router)*con brazo robótico, será posible la adquisición de nuevas habilidades y conocimientos.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 General

Modelar y diseñar un sujetador para la manipulación de una fresadora de superficie frontal (*router*), que se adapte a un robot industrial FANUC ARC Mate 120ic.

1.4.2 Específicos

- Analizar la geometría del sujetador adaptable a un robot industrial para la manipulación de una fresadora de superficie frontal (router), apoyándose en software CAD (*Computer Aided Design*).
- Simular el funcionamiento del sujetador adaptable a un robot industrial para la manipulación de una fresadora de superficie frontal (*router*), apoyándose en software CAD (*Computer Aided Design*).

1.5 HIPÓTESIS

Con el empleo de técnicas CAD (*Computer Aided Design*) será factible modelar y diseñar un sujetador para la manipulación de una fresadora de superficie frontal (*router*) adaptable a un robot industrial FANUC ARC Mate 120ic, con posibilidad de construcción con recursos de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes.

1.6 ALCANCE

Al finalizar el presente trabajo se podrá simular la manipulación de un *router* eléctrico, diseñando un sujetador para un brazo robótico de seis grados de libertad, esto con la finalidad de poder hacer pruebas didácticas de maquinados en madera.

Inicialmente será considerado el trabajo del *router* para procesos de maquinado para procesos de maquinado por fresado con cortador, después de la primera innovación, será deseable seguir escalando las siguientes operaciones de maquinado, con sus respectivos diseños en la sujeción de las herramientas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIÓN DE ROBOT INDUSTRIAL

Aparece el termino por primera vez en 1921, debido al dramaturgo Karel Capek y su obra (Rossum's Universal Robots), de origen checoslovaco en cuyo idioma aparece la palabra "robota" que significa fuerza de trabajo o servidumbre.

De aquí que el termino robot nace asociado de la idea de trabajo y producción. Los robots industriales surgen entonces de la convergencia del control automático sobre todo en las maquinas herramientas.

Un robot industrial es considerado como un sistema mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a tareas de manipulación, es la definición que aporta el mundo industrial japonés, mientras que el mundo industrial europeo y de los Estados Unidos, la definición de robot se toma además de lo anterior, con mayor complejidad, relativa a aspectos de control.

Dentro de las definiciones de robot industrial, de las más aceptadas a nivel mundial es como sigue:

"Es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tares diversas" [21].

"Es una máquina de manipulación automática reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que puedan posicionar y orientar materiales, piezas, herramientas o dispositivos espaciales para la ejecución de diversas tareas en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento" [21].

Oficialmente la ISO (*International Organization for Standardization*) define robot industrial como un manipulador multipropósitos, reprogramable y controlado automáticamente en tres o más ejes que puede ser fijo o móvil para uso en aplicaciones de automatización industrial [22].

2.2 EVOLUCIÓN MECÁNICA DE LOS ROBOTS

La cinemática antropomorfa básica, con movimientos giratorios de las articulaciones, se puede apreciar en la gama actual de robots industriales. Lo que a lo largo de los años ha cambiado es la velocidad, la precisión y el ahorro de espacio, con envolventes de trabajo más amplias y dimensiones más reducidas [23].

El primer avance importante en mecánica robótica después del robot ABB IRB 6 fue el ABB IRB 2000 de 10 kg de capacidad, presentado por ASEA en 1986. En este diseño de segunda generación, cajas reductoras sin retroceso sustituyeron a los mecanismos de bolas y tornillo sinfín en los ejes de la "cadera" y el "hombro", con el resultado de una mejor cinemática espacial. Otro cambio destacado fue en los motores de accionamiento, que pasaron de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA). Los motores de CA entregan un par más alto, son más pequeños que los de CC, no tienen escobillas, por lo que son más sencillos de mantener, y tienen una vida útil más larga, características, que los usuarios, especialmente los fabricantes de automóviles demandaban [23].

Flexibilidad y adaptabilidad son características que los usuarios de robots industriales nunca han dejado de pedir, y en 1991 surge el robot ABB IRB 6000 de 150 kg de capacidad para trabajos pesados. Previsto inicialmente para la soldadura por puntos y la manipulación de grandes componentes, tenía una estructura modular, con una gama de módulos de base, brazo y muñeca que permitía optimizarlo para las necesidades de cada usuario. Este resultó también muy competitivo en costos ya que se redujeron componentes con respecto al anterior en un 60%. Fue el robot de soldadura por puntos con más éxito e importantes pedidos por parte de los principales fabricantes de automóviles. En 2007 se presentó el IRB 6620, un robot para la soldadura por puntos, ligero y compacto, dos unidades ocupan el mismo espacio que una de su modelo predecesor, el IRB 6600 [23].

El robot IRB 6620 de ABB (Figura 2.1), tiene una capacidad de 150 kg y un robusto diseño de muñeca capaz de manipular las típicas pistolas de soldadura por puntos con transformador incorporado. La brida de montaje de herramientas cumple las normas ISO (TS 15066/10218) para 200 kg. viene equipado con un revestimiento diseñado para la soldadura por puntos, es más fácil de instalar, tiene un costo de inversión menor y puede

realizar una gama amplia de trabajos. El concepto de robot especializado está empezando a ganar popularidad, pues ofrece mayor flexibilidad y soluciones más económicas a la industria [23].

Figura 2.1 Robot IRB 6620. El soldador de punto flexible (fuente: http://new.abb.com)

2.3 EL MECANIZADO Y LOS ROBOTS

Desde antes de la primera revolución industrial, que se atribuye a la invención de la máquina de vapor (siglo XVIII), la manufactura a través del tiempo, por miles de años ha sido practicada por artesanos y sus aprendices, empezando a tallar madera, piedra, algunos metales, entre otros.

Con la segunda revolución industrial (1913), los artesanos, ahora obreros pasan a formar parte de un pequeño engranaje dentro del proceso productivo el cual se ve beneficiado con la tecnología de las computadoras y dispositivos electrónicos, que hacen posible el desempeño de las tareas del proceso productivo con una mayor repetibilidad, eficiencia y precisión a bajo costo.

En países industrializados, debido a los factores anteriores y la versatilidad, los robots industriales, se utilizan para operaciones de manufactura. En la actualidad, los robots de fresado son equipos tecnológicos de última generación, que permiten realizar trabajos eficaces y precisos.

Para que en una aplicación particular un robot sea útil, debe equiparse y habilitarse con herramentales diseñados para cada aplicación específica. El actuador final es la

habilitación especial del herramental que se conecta al final de la muñeca del robot para realizar una tarea específica. Los actuadores finales pueden ser herramentales o sujetadores (*grippers*). La herramienta se utiliza, cuando se requiere de una tarea de operación o procesamiento especifico que el robot deba realizar, pueden incluir pistolas para soldadura de puntos, herramentales para soldadura de arco eléctrico, boquillas para pintar por aspersión, ejes rotatorios, sopletes de gas para calentamiento y algunas herramientas de ensamble que pudieran ser herramientas de uso manual o automático. A partir de aquí el robot se programa para manipular la herramienta que es necesaria para la pieza de trabajo que habrá de procesarse [24].

El mecanizado en el campo de la robótica viene definido por la capacidad de un sistema robótico de fabricar piezas en algún tipo de material ya sea por arranque de viruta o abrasión del mismo, este procedimiento resulta a partir del CAD que obtiene una trayectoria CAM en el espacio, capaz de generar una pieza mecanizada con los grados de libertad disponibles en el robot. Esta trayectoria va a ser seguida por un robot que puede disponer de seis grados de libertad.

Empresas como FABLAB VLC de España, cuentan con un sistema compuesto de dos robots industriales KUKA sobre un eje lineal y una mesa giratoria, esto aplica un concepto sencillo e innovador, que se caracteriza por su fácil manejo gracias al cambio rápido y flexible de las herramientas. Las trayectorias de movimiento y mecanizado están programadas mediante un sistema CAM [25].

La compañía FANUC desarrolló el sistema *RoboTrim® Front*-502 (figura 2.2), una solución de corte con fresadora de superficie frontal (*router*) flexible diseñada específicamente para las industrias de plásticos y sus compuestos. El robot montado en vertical está situado de tal manera que permite recortar piezas de una amplia gama de tamaños. Cuenta con una mesa giratoria servo controlada que gira cuando el robot se ajusta, permitiendo fresar partes a cada lado de la celda de trabajo, este sistema dispone del mismo sistema de control del robot FANUC R-30iA para la optimización de rutas y rendimiento de corte.

RoboTrim® FT-502 también pueden añadir características adicionales de mecánica y software para adaptarse a la producción necesaria. Algunas características mecánicas incluyen puertas automáticas, cambiador de herramientas automático. También se

puede añadir entre las opciones de software, el de fresado y programación fuera de línea [26].

Figura 2.2 *RoboTrim*¨ FT-502 ROUTER TRIMMING SYSTEM (Fuente: [26])

2.4 ESPACIO DE TRABAJO

Los robots industriales, también se conocen como brazos robots o brazos mecánicos, por su analogía con el brazo humano. Están compuestos por la base, la cual puede rotar 360 grados alrededor de su eje, también poseen articulaciones para hombro y codo. En el extremo final del codo tienen una parte mecánica que se denomina muñeca, esta permite orientar a la herramienta final que determina la operación a realizar. En la figura 2.3 se muestra un robot industrial de la compañía ABB, un robot como estos tiene un peso aproximado de 3 toneladas, alcanza una altura de 4 metros y una velocidad de movimiento de 3000 mm/s. Una de las características de los robots industriales es que pueden trabajar sin descanso las 24 horas del día de los 365 días del año y tienen la habilidad de repetir el proceso siempre con el mismo tiempo y la misma posición, a esto se le conoce como repetibilidad [22].

Figura 2.3 Robot ABB IRB 6620LX (Fuente: www.abb.com.mx)

Cuando se habla de espacio o volumen de trabajo de un robot se hace principalmente referencia a todos los puntos que pueden ser alcanzados por un robot, según el tamaño y la zona por abarcar. Para estos casos no se toma en cuenta el alcance del efector final, ya que puede este tener una amplia gama de tamaños. La cantidad de articulaciones determina el espacio de trabajo depende del tipo de unión, el rango de movimiento y la forma de unión entre ellas. El volumen de trabajo es importante porque determina cuales aplicaciones puede ejecutar un robot [24].

2.5 GRADOS DE LIBERTAD

Mecánicamente, un robot industrial está formado por un conjunto de eslabones, elementos o brazos. Los eslabones unidos mediante articulaciones permiten el movimiento relativo entre dos articulaciones consecutivos. El movimiento de cada articulación puede ser: desplazamiento lineal, giro o una combinación de ambos, dando lugar a articulaciones de los tipos: Prismática (1 grado de libertad), rotación (1 grado de libertad), cilíndrica (2 grados de libertad) y esférica o rótula (3 grados de libertad).

Nótese que aparece ligado al movimiento de las articulaciones el concepto: "grado de libertad", que se refiere a cada uno de los movimientos independientes que puede realizar una articulación con respecto a la anterior [27].

El número de grados de libertad de un robot es la suma de los grados de libertad de cada una de sus articulaciones. Dependiendo del tipo de articulaciones se obtienen

diferentes configuraciones geométricas para los robots industriales. Las más usuales son las siguientes:

Manipulador Cartesiano (de 3 grados de libertad), tal vez la configuración más simple. Como se muestra en la figura 2.4, las articulaciones, de la 1 a la 3, son prismáticas, mutuamente ortogonales y corresponden a las direcciones cartesianas Xˆ, Yˆ y Zˆ.

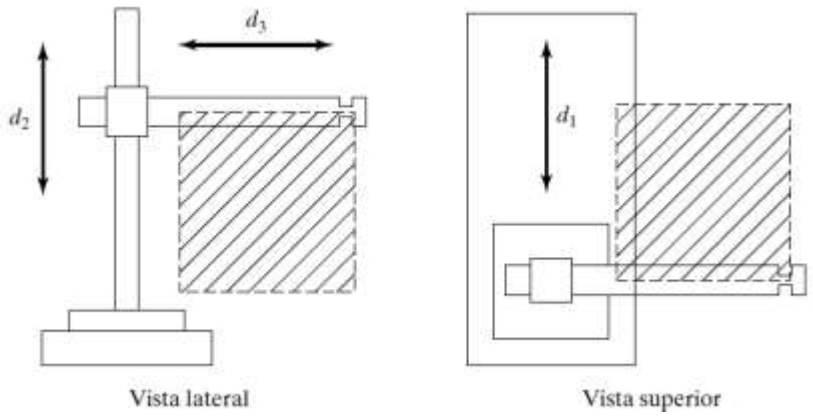


Figura 2.4 Manipulador cartesiano (Fuente: [28]).

Manipulador SCARA (de 4 grados de libertad), como se muestra en la figura 2.5, tiene tres articulaciones angulares paralelas (que le permiten moverse y orientarse en un plano), con una cuarta articulación prismática para mover el efector final de forma normal al plano.

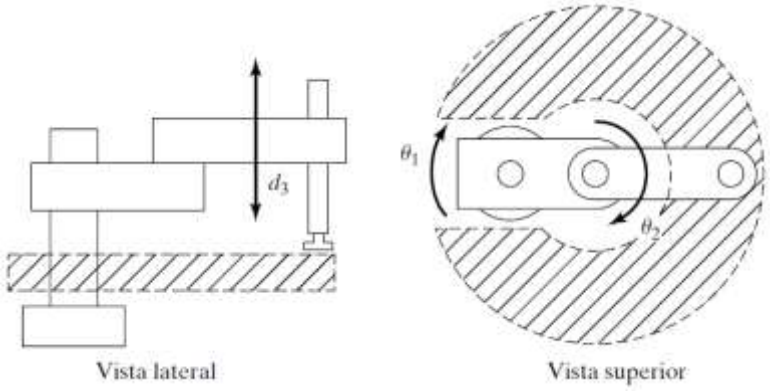


Figura 2.5 Manipulador SCARA (Fuente: [28]).

Manipulador Antropomórfico (de 6 grados de libertad), como se muestra en la figura 2.6, un manipulador de este tipo generalmente consiste en dos articulaciones tipo "hombro" (una para girar sobre un eje vertical y otra para elevarse en el plano horizontal), una articulación tipo "codo" (cuyo eje es normalmente paralelo a la articulación de elevación del hombro) y dos o tres articulaciones de muñeca en el extremo del manipulador.

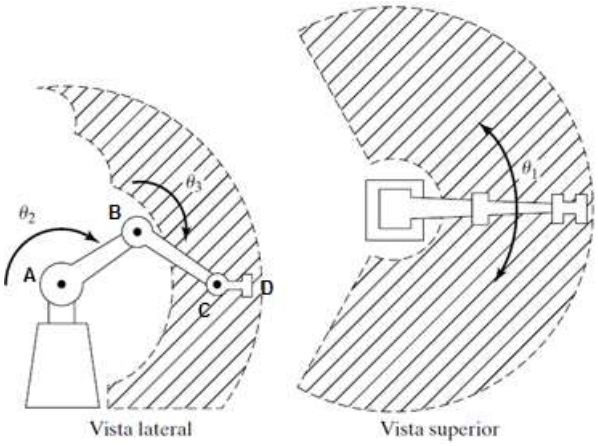


Figura 2.6 Manipulador articulado, de codo o antropomórfico (Fuente: [28]).

Un brazo robótico industrial provisto de una muñeca con algún efector final. Puede ser tratado en dos pasos. Luego de ubicar la extensión del codo (AB), primero se mueve el brazo (BC) para posicionar el extremo de su articulación exterior (C) y segundo se orienta la muñeca (CD) para que el efector final logre la posición deseada. De aquí se desprende el hecho, de que pudieran requerirse el movimiento simultaneo del brazo y la muñeca y viceversa.

Cuando se requiere que el efector final tenga una determinada orientación en el espacio, la muñeca del manipulador lo consigue. En la figura 2.7 se muestra un brazo robótico provisto de una muñeca que añade tres grados de libertad de rotación a la estructura. Estas posiciones angulares permiten especificar la orientación del efector final en el espacio. Se debe tomar en cuenta que con esto se llega a los seis grados de libertad, donde tres son proporcionados por el brazo y tres por la muñeca, que habrán de necesitarse en un caso general para especificar la posición y orientación del efector final en el espacio [29].

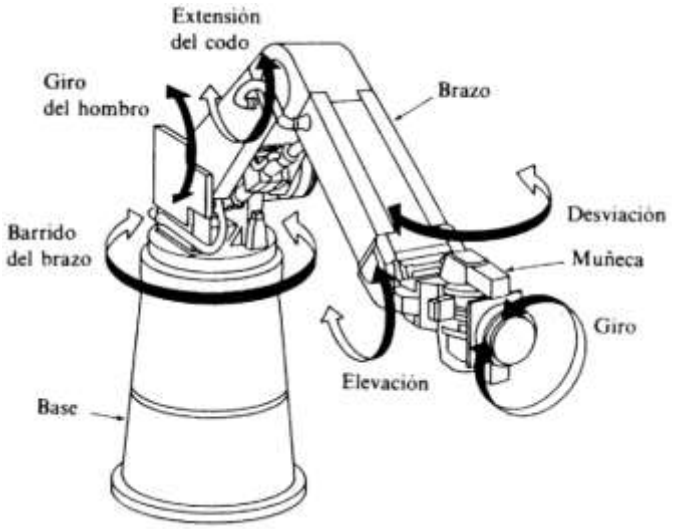


Figura 2.7 Manipulador con configuración angular y Muñeca con seis grados de libertad (fuente: [29]).

El número de grados de libertad que se requiere para una tarea específica, deberán concordar con el número de grados de libertad en el manipulador. No todas las tareas requieren seis grados completos de libertad. En los manipuladores es muy común el caso de efector final con un eje de simetría. La figura 2.8 muestra un manipulador con una herramienta para esmerilado en dos formas distintas. Nótese que la orientación de la herramienta con respecto al eje Z resulta irrelevante, ya que la piedra de amolar se mantiene girando a miles de revoluciones por minuto. De esta manera podemos apreciar que el robot puede ser posicionado en una infinidad de formas para esta tarea, donde la rotación sobre el eje Z, resulta una variable libre. Podemos apreciar como el robot es redundante para esta tarea. Otros ejemplos de

tareas cuando los efectores finales cuentan con al menos un eje de simetría, son los manipuladores para soldadura por arco eléctrico, soldadura por puntos, encolado, el pulido, por mencionar algunos [28].

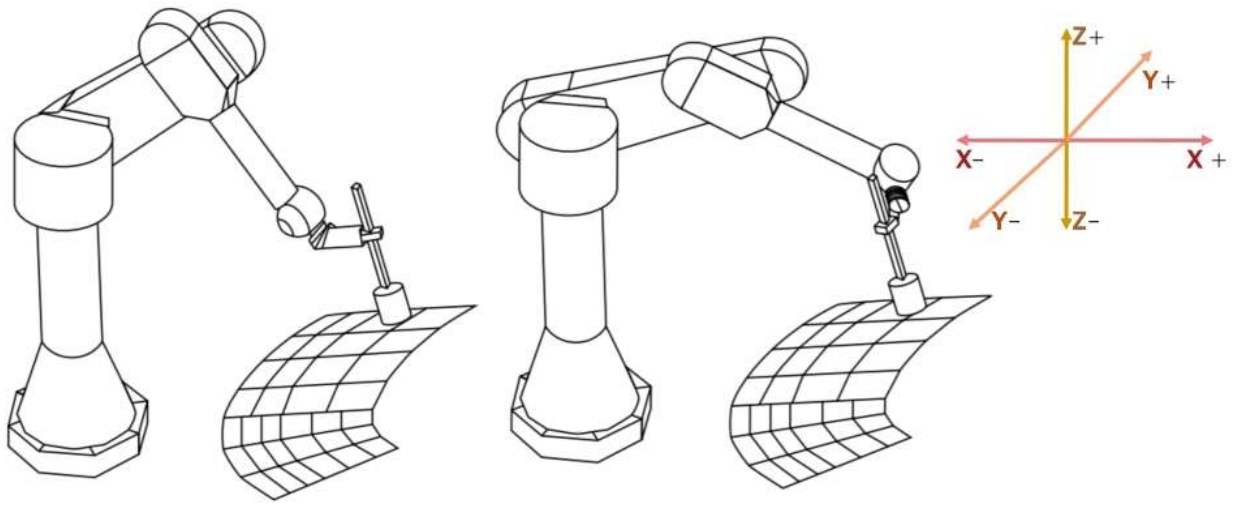


Figura 2.8 Manipulador de 6-DOF, con herramienta simétrica y un grado redundante de libertad (fuente: [28])

CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT FANUC ARC MATE 120iC

3.1 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

El ARC Mate 120iC de FANUC, es un robot diseñado para realizar operaciones de soldadura y corte por plasma con alta precisión y a alta velocidad en piezas pesadas, esta versión estándar de 6 ejes dispone de la potencia suficiente para aumentar la eficiencia en diversas tareas de corte y de soldadura de todo tipo [30].

Los ejes principales y secundarios mostrados en las figuras 3.1 y 3.2 muestran los movimientos de la herramienta situada en el extremo del brazo del robot: Movimientos de giro, desplazamiento vertical y desplazamiento lateral. El Robot ARC Mate 120ic es totalmente articulado con tres ejes principales de rotación y tres ejes secundarios de rotación. El elemento terminal será una fresadora de superficie frontal (*router*) acoplada en el extremo del brazo del robot, adecuada para aplicaciones de corte en madera.

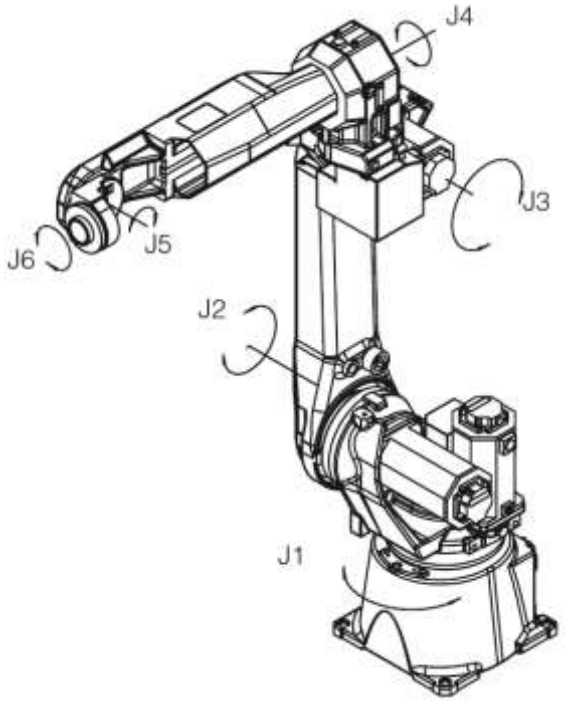


Figura 3.1 Ejes principales y secundarios del robot FANUC ARC Mate 120iC. (Fuente: [31]).

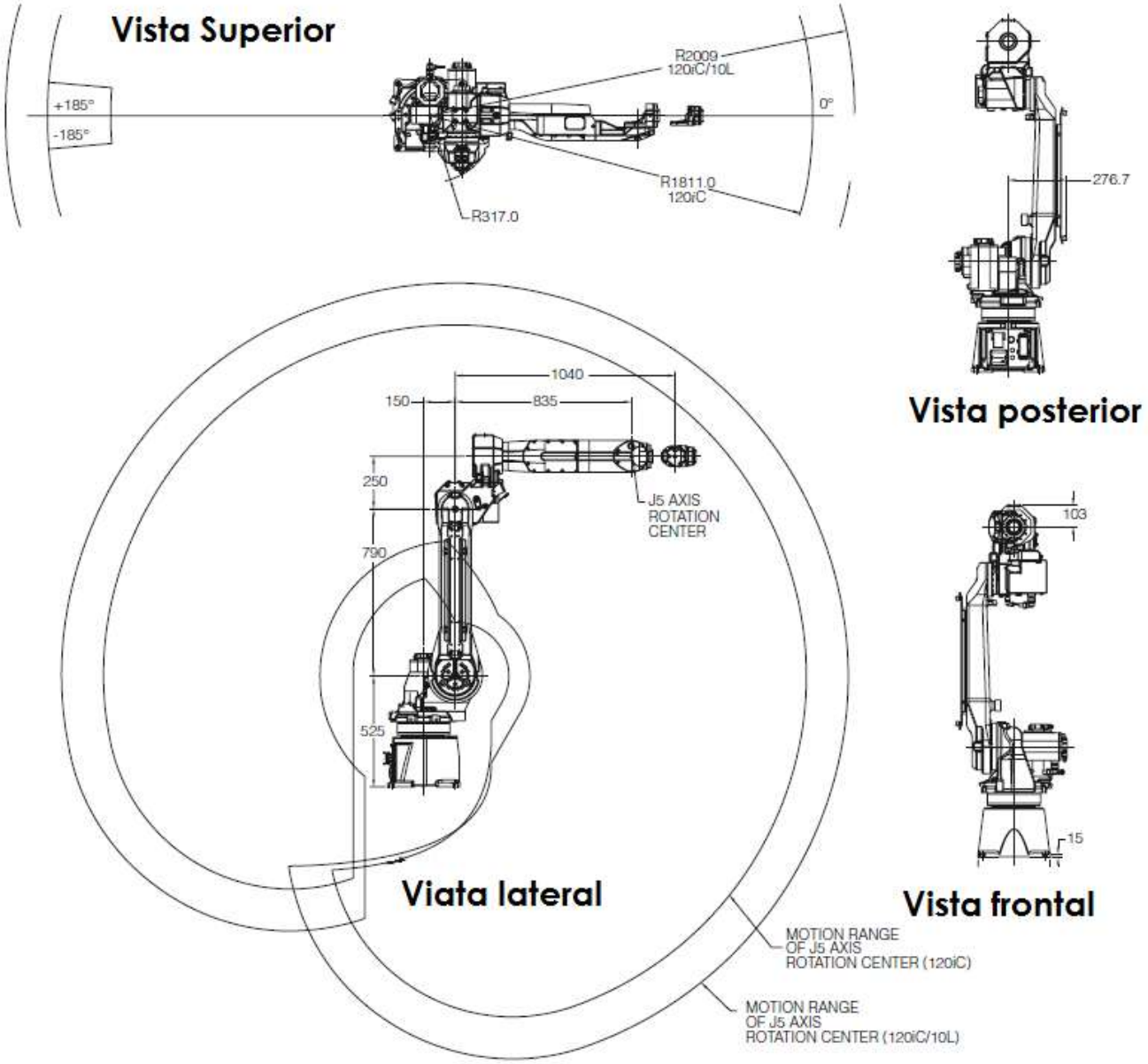


Figura 3.2 Desplazamientos y dimensiones del FANUC ARC Mate 120iC y 120iC/10L. Las dimensiones son mostradas en milímetros. (Fuente: [31]).

La tabla 3.1 muestra la capacidad de movimiento del FANUC ARC Mate 120iC

Tabla 3.1 Especificaciones del ARC Mate 120iC (fuente: [31])

Característica	**Eje**	**ARC Mate 120iC**
Rango de movimiento (grados)	J1	370
	J2	260
	J3	458
	J4	400
	J5	380
	J6	900
Velocidad de movimiento (grados/segundo)	J1	195
	J2	175
	J3	180
	J4	360
	J5	360
	J6	550
Momento de la Muñeca N.m (kgf.m)	J4	44 (4.4)
	J5	44 (4.4)
	J6	22 (2.2)
Inercia de la muñeca (kg. m^2)	J4	1.04
	J5	1.04
	J6	0.28

3.2 CAPACIDAD DE CARGA

Para el uso efectivo de un robot industrial, es recomendable establecer adecuadamente la información sobre cargas, de la herramienta, de la pieza de trabajo, y dispositivos que pudieran estar montados en el robot.

Cuando se ajusta adecuadamente la capacidad de carga de un robot podemos obtener los siguientes beneficios:

- Mejor rendimiento del movimiento, vibración más baja y tiempos de ciclo más cortos.
- Reacción más efectiva de las funciones relacionadas con la dinámica: mejora el rendimiento relacionado con la detección de choque y la compensación de la gravedad.

La figura 3.3 muestra la distribución dimensional de la muñeca del FANUC ARC Mate 120iC. Nótese que el eje de rotación J4 corresponde al eje de rotación J6 en el punto máximo del robot en cantiléver (ver figura 3.1), también coincide con el punto central para la herramienta (TCP). De manera tal que deberá de especificarse con importancia el centro de gravedad de la carga con respecto del TCP. Los momentos de inercia Ix, Iy, Iz, definidos en el robot (tabla 3.2) corresponden a los ejes de J4, J5 Y J6, para cada uno, deberán también especificarse los momentos de inercia para una masa puntual en kg respecto a los ejes X, Y, Z que pasan por el centro de gravedad de la herramienta.

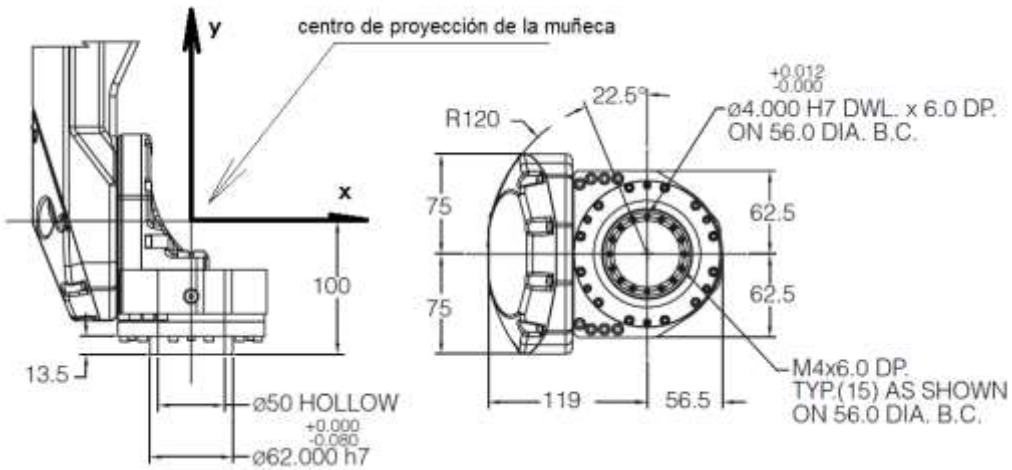


Figura 3.3 Muñeca FANUC ARC Mate 120iC. Las dimensiones son mostradas en milímetros. (Fuente: [31]).

La tabla 3.2 muestra características adicionales al movimiento del FANUC ARC Mate 120iC.

Tabla 3.2 Especificaciones del ARC Mate 120iC (fuente: [31])

Característica	**ARC Mate 120iC**
Ejes	6
Carga máxima N (kgf)	196.2 (20)
Carga máxima del actuador en J3 N (kgf)	196.2 (20)
Alcance máximo (mm)	1811
Repetibilidad (mm)	± 0.08
Radio de interferencia (mm)	317
Frenos mecánicos	Todos los ejes
Peso mecánico N (kgf)	2,452.5 (250)
Método de montaje	Piso, techo, Angulo y pared
Condiciones de instalación	
Temperatura (° C)	0 a 45
Humedad	Normalmente: 75% o menos en un periodo limitado (menor a un mes): 95% o menor sin condensación.
Vibración (m/s^2)	4.9 o menos.

3.3 REPETIBILIDAD

La repetibilidad es una de las características del movimiento que se exige a los robots manipuladores. Este concepto se refiere, a que cuando el robot requiera repetidamente regresar al punto coordenado previamente, no siempre será a la misma posición. Se considera que la repetibilidad es ± 3 veces la desviación normal de la posición original. Desde el punto de vista de la robótica, la exactitud se define como la habilidad de un robot de moverse con precisión a una posición deseada dentro de un espacio tridimensional. En la figura 3.3 se muestra la apreciación de la capacidad de repetibilidad relacionada con la exactitud, en este sentido la repetibilidad representa la precisión, dicho de otra forma, es la medida de la habilidad de un robot para regresar a misma posición y orientación. Para el FANUC ARC Mate 120iC, con ± 0.08 mm de repetibilidad y considerando la pretensión de la aplicación en el manejo de una fresadora de superficie frontal, resulta dentro de buenos parámetros [32]. Cuando en planos de fabricación no se establecen limites, a esto se le llama cotas libres o cotas sin tolerancia y admiten ± 0.5mm, con lo que tenemos hasta 42 centésimas de milímetro para la condición máxima y mínima de material al término del maquinado.

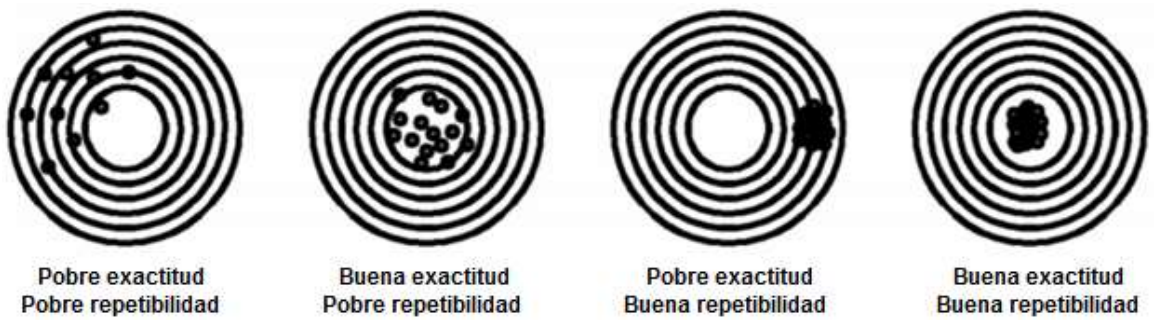


Figura 3.3 Exactitud y Repetibilidad. (fuente: [32])

3.4 CAMBIADORES AUTOMÁTICOS DE HERRAMIENTA ROBÓTICA

El cambiador de herramientas robótico proporciona flexibilidad para el cambio automático de efectores terminales u otras herramientas periféricas. Estos, están diseñados para funcionar confiablemente en millones de ciclos en su límite de carga al tiempo de mantener muy alta repetibilidad.

El modelo con el que se cuenta actualmente y está instalado en el FANUC ARC Mate 120iC del laboratorio de robótica de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes,

puede cubrir una amplia gama de aplicaciones, desde muy ligeras cargas hasta aplicaciones de cargas pesadas las mismas por encima del límite en carga del brazo robótico [33]. La figura 3.4 muestra la forma en la que el intercambiador de herramientas puede expandir en su función, el manejo de la nueva herramienta para maquinado (*router*).

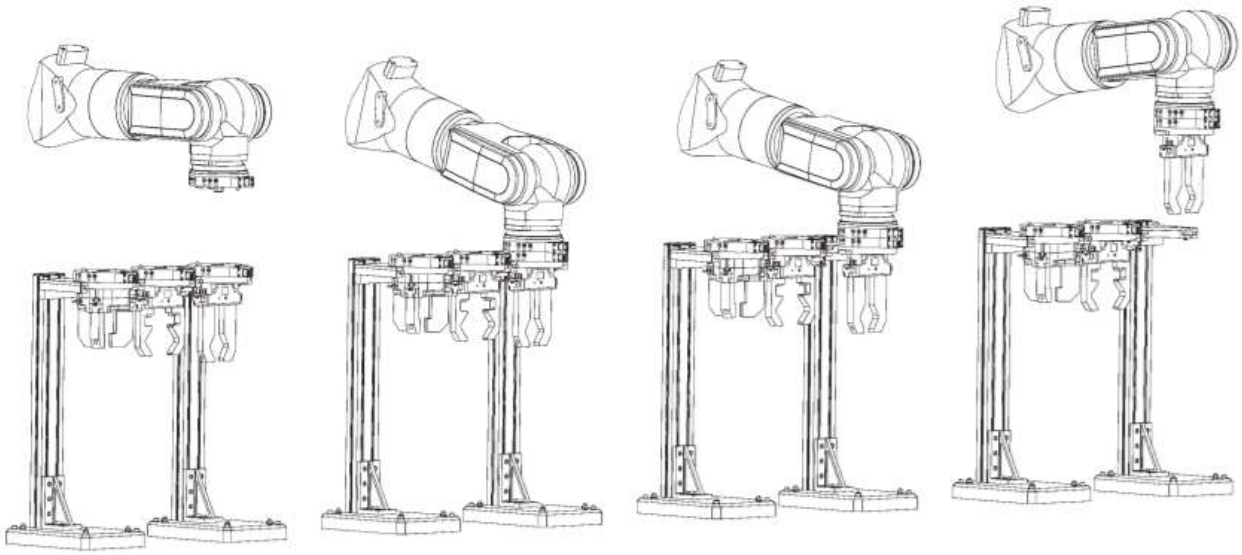


Figura 3.4 Ejemplo de aplicación del intercambiador de herramientas (Fuente: http://selltech.com.pl)

Mientras que la carga útil es un buen punto de partida, la capacidad de momento es el factor más crítico para la selección del modelo cambiador de herramientas apropiado. Además, será necesario conocer el centro de gravedad del actuador final (en este caso la fresadora de superficie frontal (*router*)), que se usará y la distancia del centro de gravedad a la parte de abajo del plato del cambiador, para determinar el momento estático del uso. Los cambiadores de herramientas están diseñados para manejar momentos dinámicos tres veces mayores a sus valores de momento estático [33].

El cambiador de la serie ISO TK, que tiene instalado el FANUC ARC Mate 120iC, proporciona beneficios tales como:

- Cambios rápidos de herramientas y pinzas en robots, con capacidades de carga útil hasta de 686.7 N (70 kgf).
- Transmisión de señales eléctricas por contacto con pasadores de resorte.
- Acoplamiento y desacoplamiento de líneas hidráulicas y neumáticas.
- Ejecución específica a prueba de salpicaduras (opcional).
- Sellado de la señal eléctrica de transmisión (opcional).
- Cambiador de herramientas de acero inoxidable (opcional).

La figura 3.5 muestra la imagen del cambiador de herramientas, que para este caso corresponde al modelo TK80 *after* EN ISO 9409-1 [34] y que se ajusta en dimensiones al que está montado en el FANUC ARC Mate 120iC.

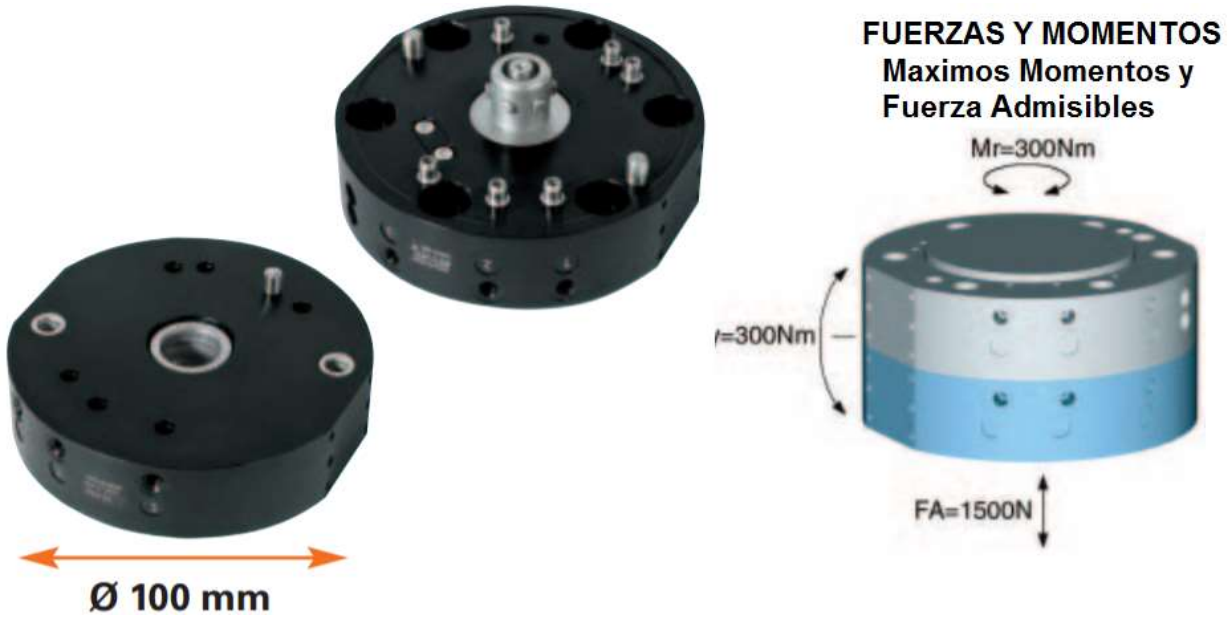


Figura 3.5 Cambiador de herramientas TK80 (Fuente: selltech.com.pl/sommer)

La Figura 3.6 muestra el mecanismo de bloqueo del cambiador con empleo de esferas. Las esferas son presionadas sobre un bisel en un receptáculo.

Con, pérdida de presión, las esferas se quedan dentro del receptáculo por la acción de un resorte integrado en el cilindro, por el que un bloqueo automático está garantizado con disminución de la presión.

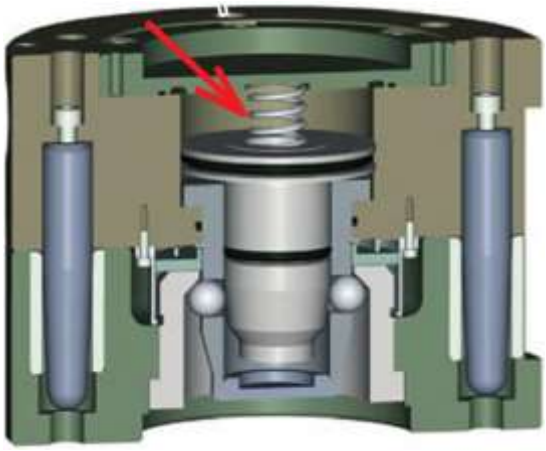


Figura 3.6 Mecanismo de bloqueo (Fuente: IPR Robotics, Inc.)

La figura 3.7 muestra la mecánica de bloqueo que consta de una conexión positiva debido a la sujeción de la manga al montar bolas

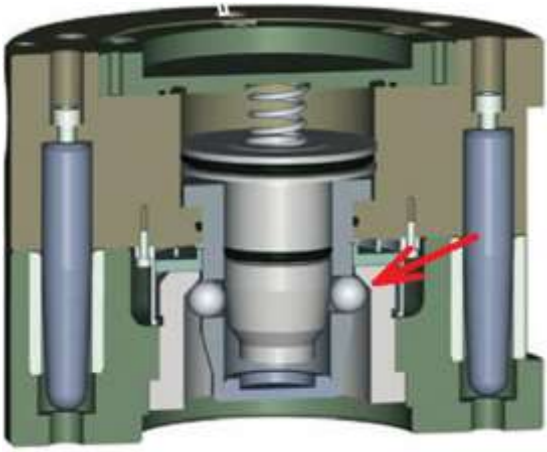


Figura 3.7 Sistema cerrado Fuente: (IPR Robotics, Inc.)

La tabla 3.3 Muestra las especificaciones técnicas del cambiador TK80

Tabla 3.3 Características del cambiador TK80 (Fuente: selltech.com.pl/sommer)

Peso recomendado de manipulación N (kgf)	686.7 (70)
Transferencia de energía eléctrica/neumática	Opcional
Auto limitación cuando esté cerrado	Mecánico
Carrera de Cierre (mm)	1
Precisión de Repetición en Z (mm)	0.01
Precisión de Repetición en X, Y (mm)	0.02
Presión de operación Mínima/Máxima MPa (bar)	0.4/1 (4/10)
Temperatura de operación Mínima/Máxima (° C)	5/80
Momento de Inercia (kg/cm^2)	3.36
Peso N (g)	6.47 (660)

Todos los datos están medidos a 0.6 MPa (6 bar)

CAPÍTULO 4. MODELACIÓN

Las soluciones potentes y fáciles de utilizar CAD en 3D de SolidWorks permiten a las empresas e instituciones, acelerar el desarrollo de productos, reducir los costos de fabricación, y mejorar la calidad y fiabilidad del producto en una gran variedad de sectores y aplicaciones. Las herramientas intuitivas de desarrollo de productos le ofrecen las capacidades de crear, validar, comunicar y gestionar los diseños del producto y lanzar los productos al mercado rápidamente a través de su fabricación posterior [35].

4.1 MODELO CAD FANUC ARC MATE 120IC

GrabCAD es un lugar en la red que facilita el trabajo de los diseñadores, ingenieros, estudiantes y profesionales de la fabricación. Desde el año 2010, millones de ingenieros han compartido archivos *CAD* y consejos de diseño, participan en retos de diseño, y modelados *CAD* para evitar partir de cero. Además, la impresión 3D y fabricación aditiva, permite por medio de los modelos *CAD*, generar prototipos a escala para una mejor apreciación previa a su fabricación [36]. La figura 4.1 muestra la imagen del modelo *CAD* conjunto del robot FANUC ARC Mate 120iC.

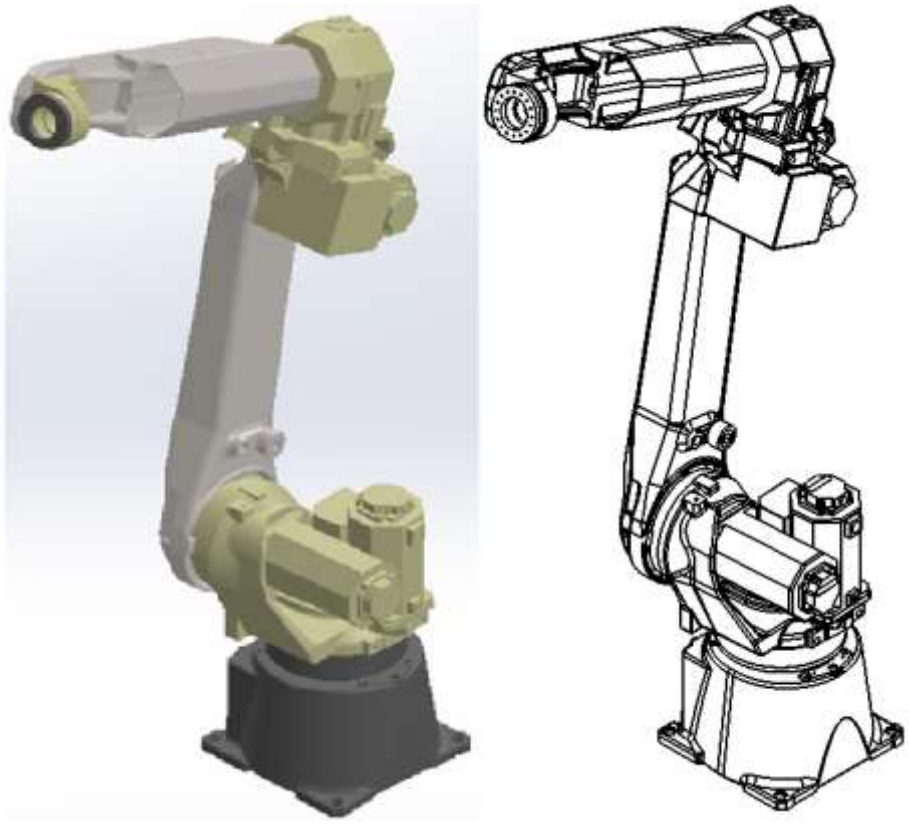


Figura 4.1 Modelo *CAD* robot FANUC ARC Mate 120iC (Fuente: [36]).

4.2 CAMBIADOR AUTOMÁTICO PARA EL ROBOT FANUC ARC MATE 120IC.

4.2.1 Conjunto ensamble macho

Se muestra a continuación conjunto ensamblado (macho) de la mitad del cambiador automático, (dos vistas) [34] con el que cuenta el FANUC ARC Mate 120iC, (figura 4.2), como complemento se muestra la vista en explosión de sus partes (figura 4.3). Esta parte del cambiador permanece y se encuentra instalada en el brazo robótico (figura 4.3.1), la tabla 4.1 muestra la descripción de sus partes.

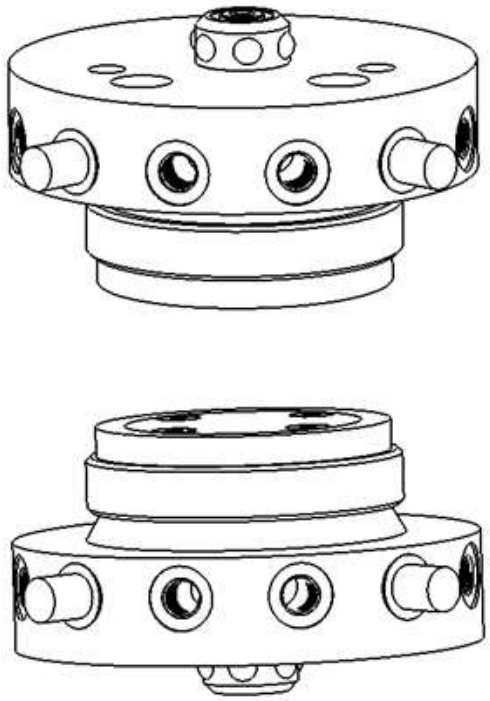


Figura 4.2 Conjunto ensamble macho, cambiador TK80.

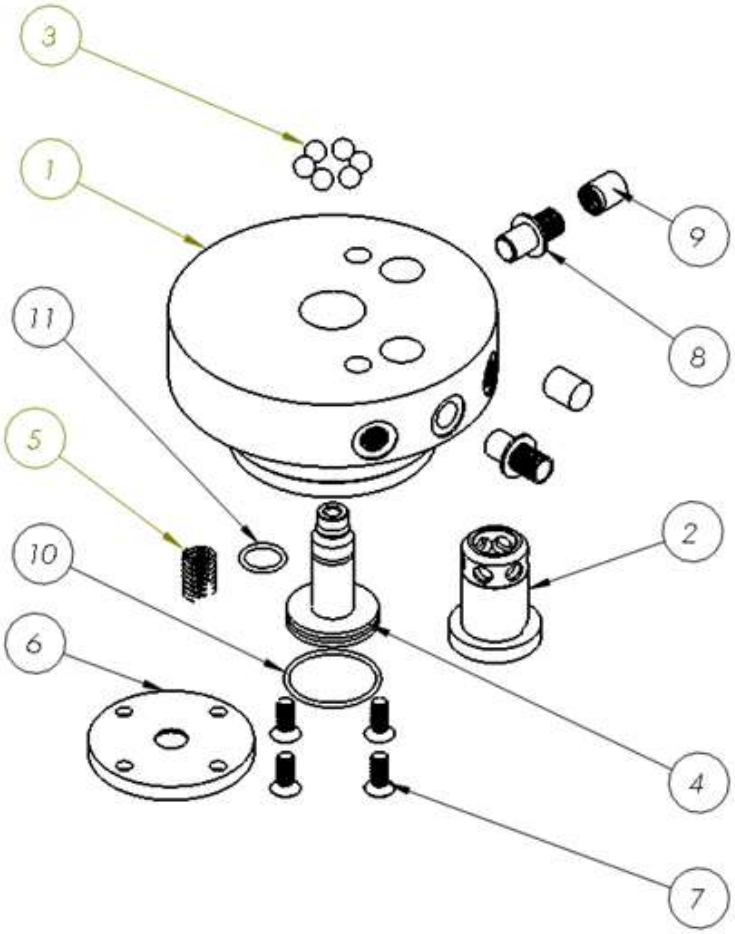


Figura 4.3 Vista explosiva del ensamble macho del cambiador TK80.

Tabla 4.1 Listado de las partes del ensamble macho del cambiador TK80.

ELEMENTO No.	NUMERO DE PARTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	SW01-001	Base Macho	1
2	SW01-002	Casquillo Porta Esfera	1
3	SW01-003	Esfera	6
4	SW01-004	Piston	1
5	SW01-005	Resorte De Seguridad	1
6	SW01-006	Tapa de Piston	1
7	SW01-007	Tornillo Cabeza Plana M5 x 12	4
8	SW01-008	Para Conector Electrico	2
9	SW01-009	Tapon de Conector	2
10	SW01-010	O-Ring de 28	1
11	SW01-011	O-Ring de 13	1

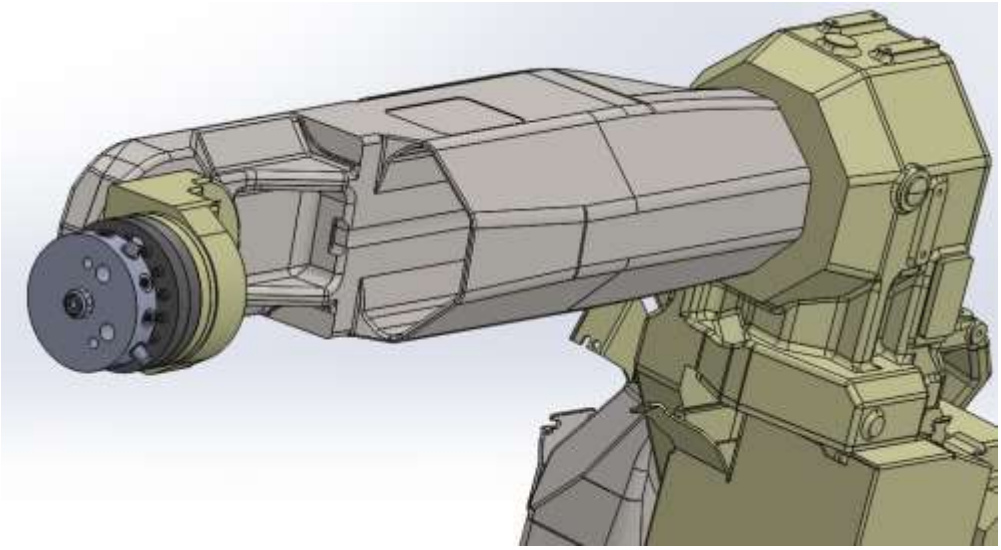


Figura 4.3.1 El ensamble al robot del cambiador macho

4.2.2 Conjunto ensamble hembra

El robot FANUC ARC Mate 120iC, cuenta actualmente con lo que se ha denominado, por motivo de este trabajo, como el conjunto ensamble hembra, es la conexión hembra del cambiador automático TKBR con correspondencia al TK80 [34]. Este a su vez, tiene montado ya en sus dos configuraciones, los herramentales que corresponden a la antorcha de corte por plasma y el dispositivo electroimán para la manipulación de piezas y elementos hechos a base de hierro.

Se presenta en la figura 4.4 la primera aportación para este trabajo del conjunto denominado conjunto ensamble hembra TKBR. como complemento se muestra la vista en explosión de sus partes (figura 4.5), la tabla 4.2 muestra la descripción de sus partes.

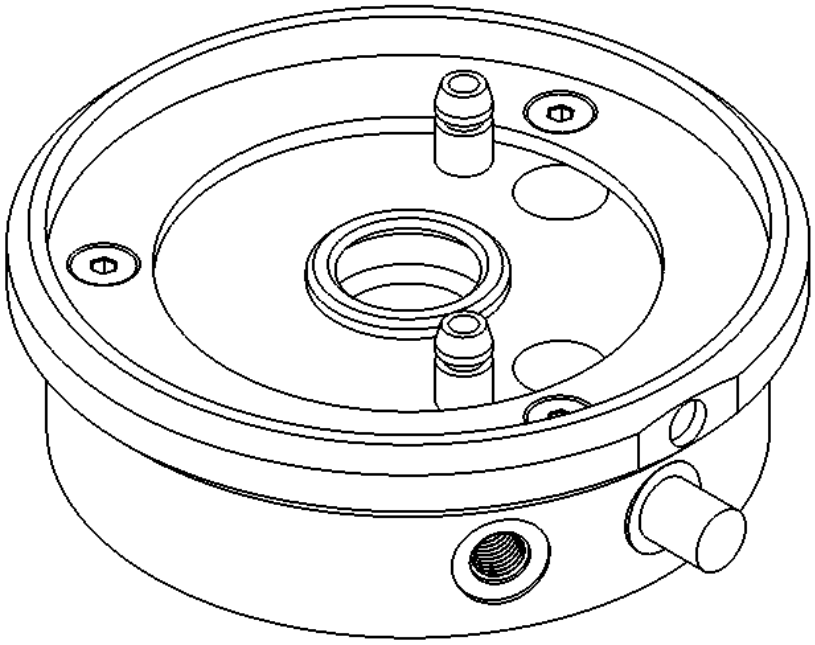


Figura 4.4 Conjunto ensamble hembra, cambiador TKBR.

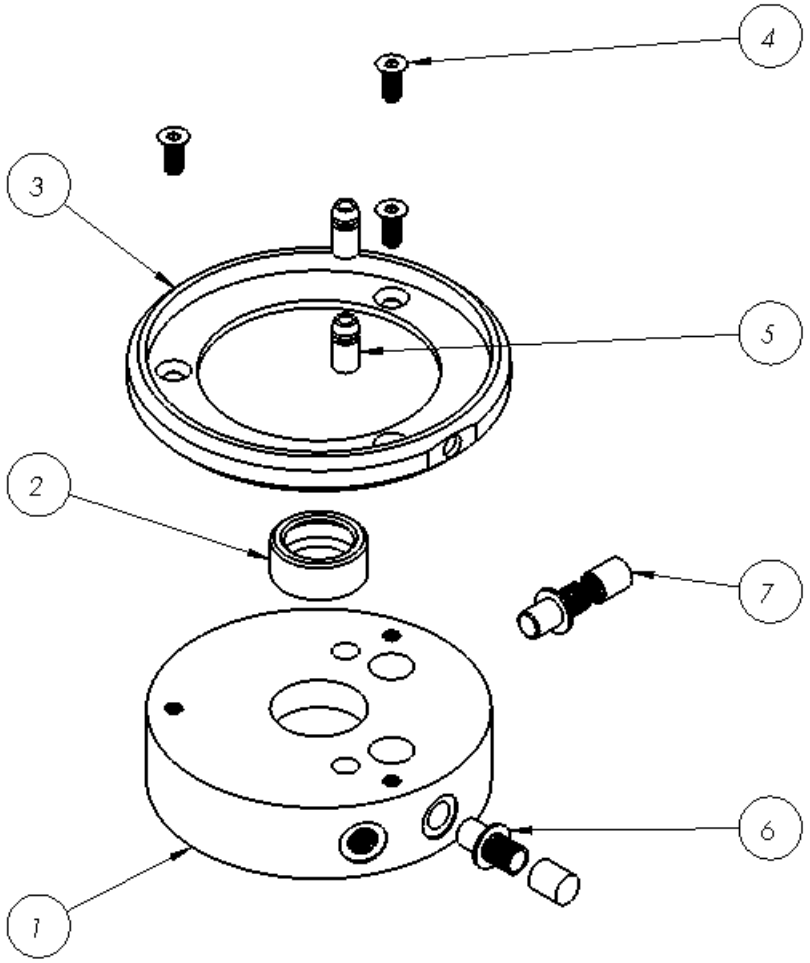


Figura 4.5 Vista explosiva del ensamble hembra del cambiador TKBR.

Tabla 4.2 Listado de las partes del ensamble hembra del cambiador TKBR.

ELEMENTO NO.	NUMERO DE PARTE	DESCRIPCION	CANTIDAD
1	SW02-001	Base Hembra	1
2	SW02-002	Inserto de Sujecion	1
3	SW02-003	Anillo de Montaje	1
4	SW01-007	Tornillo Cabeza Plana M5 x 12	3
5	SW02-004	Pivote Guia	2
6	SW01-008	Para Conector Electrico	2
7	SW01-009	Tapon de Conector	2

El efector final con dos partes que se adaptan entre si son llamados "Master", corresponde al que se denominó conjunto ensamble macho (ver figura 4.2) y "tool" llamado conjunto ensamble hembra (ver figura 4.4). han sido diseñadas para acoplarse y cerrarse automáticamente, son capaces de pasar entre si, servicios como, señales eléctricas, fluidos neumáticos, etc. La mayoría de los robots acopladores usan fluidos neumáticos para unir y asegurar el "Master" y el "Tool".

Para esta aplicación no se requiere el manejo de señales eléctricas en la manipulación del *Router*, debido a que cuenta con alimentación propia, se omite en el diseño el tratamiento de la transmisión eléctrica.

4.3 SOPORTE DE SUJECIÓN AL *ROUTER*

Una consideración importante, es el momento de fuerza que soporta el cambiador automático ensamblado y bajo carga, generado desde el centro de proyección de la muñeca hasta el centro de masa del *router*. De ahí que, aunque se tenga suficiente disponibilidad, es recomendable lograr la cercanía del *router* conjunto ensamble hembra del cambiador TKBR. La figura 4.6 muestra la modelación del soporte.

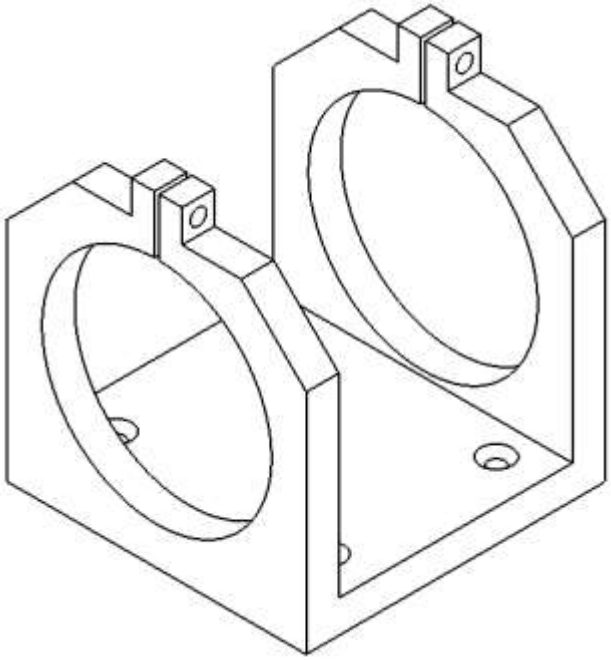


Figura 4.6 Soporte de sujeción del *router*.

4.4 FRESADORA DE SUPERFICIE FRONTAL COMPACTA DE 1-1/4 HP

Un *Router* es la herramienta ideal para trabajar y modelar la madera y varios materiales blandos, se usa para fresar o agujerear un área determinada. En general es una herramienta multifunción, que cuando se utiliza con la base de soporte es capaz de realizar diferentes trabajos.

A continuación, se presenta la fresadora que se utilizó en este trabajo (Figura 4.7), así como sus características técnicas (tabla 4.3).

Figura 4.7 Fresadora RT0700C (Fuente: 885025-938; www.makita.com)

Tabla 4.3 Características Técnicas, Fresadora RT0700C (Fuente: 885025-938; www.makita.com)

Capacidad del cople	¼" +- 1/16" (6 y 8 mm)
Velocidad sin carga	10,000 – 30,000 rpm
Amperes (115V)	65
Potencia	1 – ¼ HP (710 W)
Peso neto	3.9 libras (17.6 N) (1.8 kg)
Emisión de vibración	3.50 m/s^2
Incertidumbre (K) de vibración	1.50 m/s^2
Presión sonora	82,00 dB
Potencia sonora	93,00 dB
Incertidumbre (K) sonora	3,00 dB

La figura 4.8 muestra el modelo *CAD* del *router* a utilizar adecuado a las características correspondientes al RT0700C de Makita.

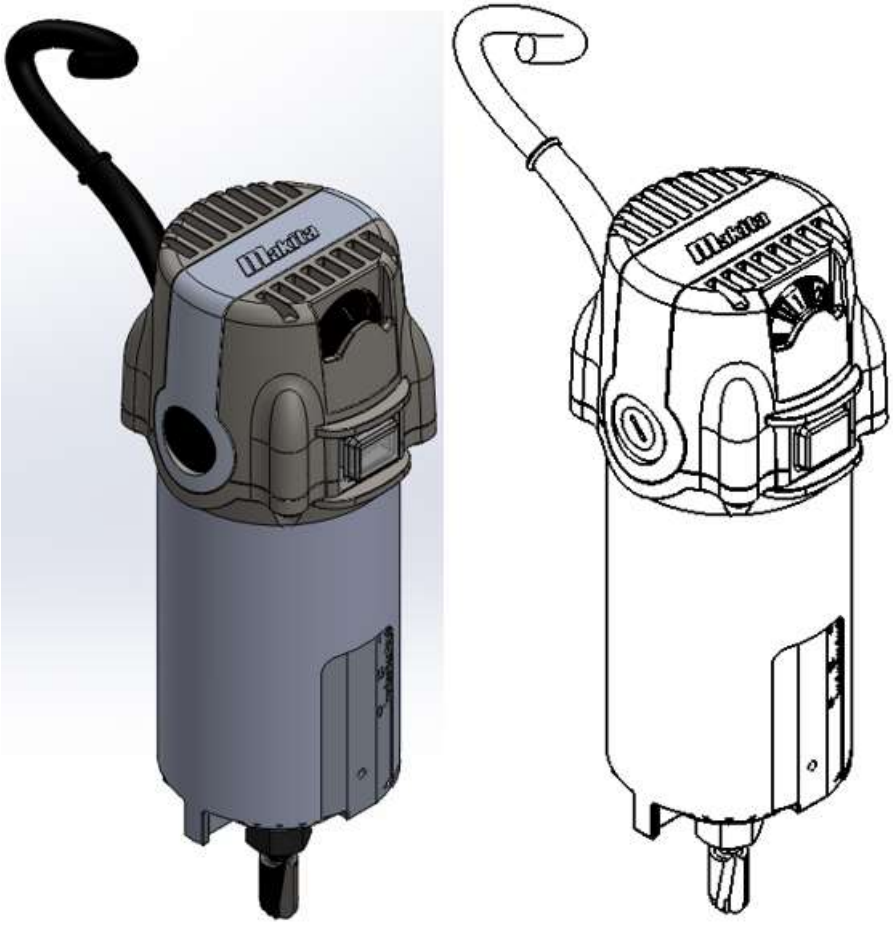


Figura 4.8 Modelo CAD *Router* RT0700C (Fuente: [36]).

4.5 ENSAMBLE COMPLETO INTERCAMBIABLE PARA MAQUINADO CON *ROUTER*

La figura 4.9 muestra las herramientas actuales en robot FANUC ARC Mate 120iC con sus respectivas bases. Se muestra también el modelo de la nueva aplicación (Figura 4.10), así como el conjunto de partes que lo componen (figura 4.11).

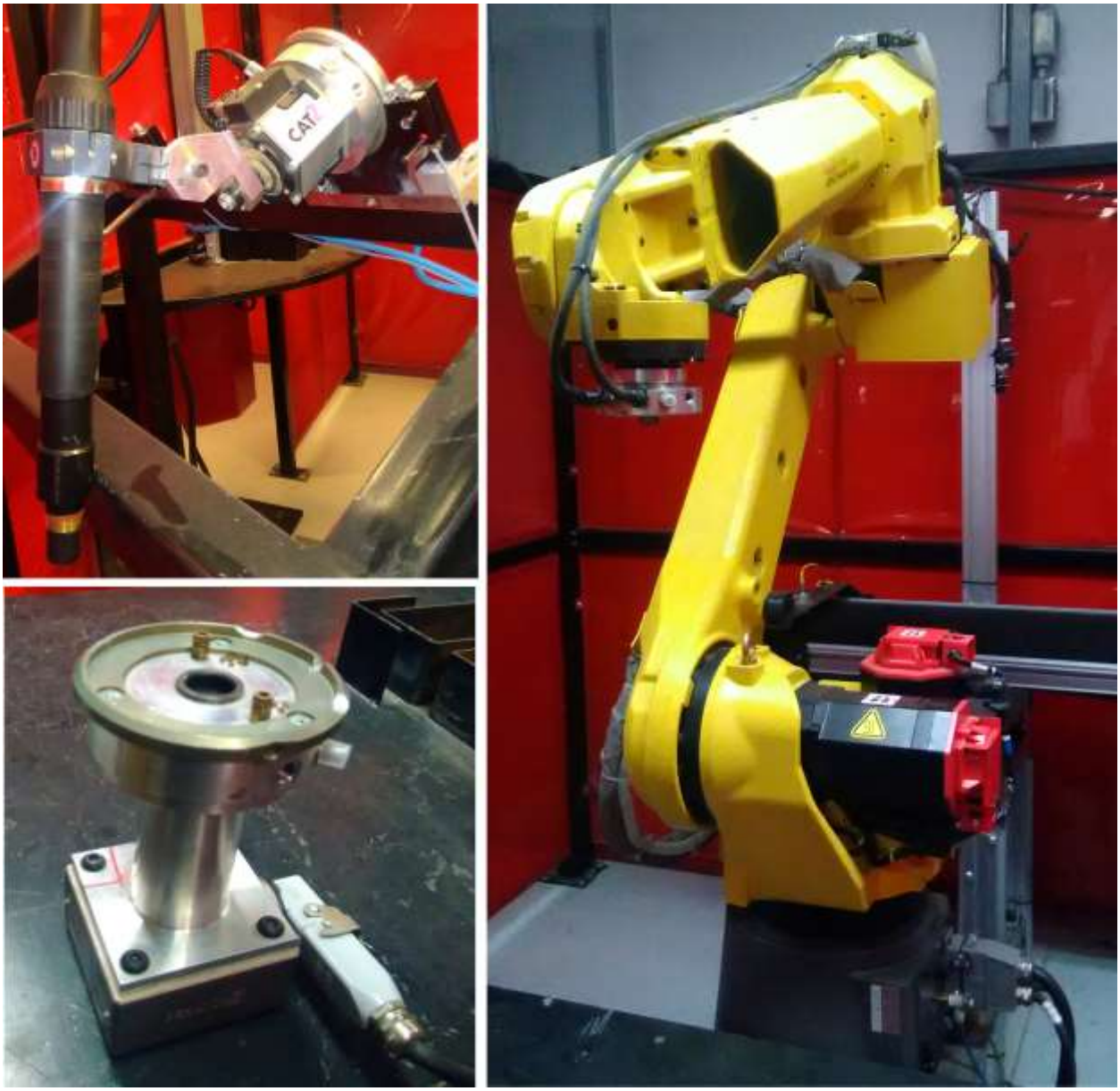


Figura 4.9 Robot FANUC ARC Mate 120ic con aplicaciones de corte con plasma y electroimán. Fuente: (Universidad Tecnológica de Aguascalientes)

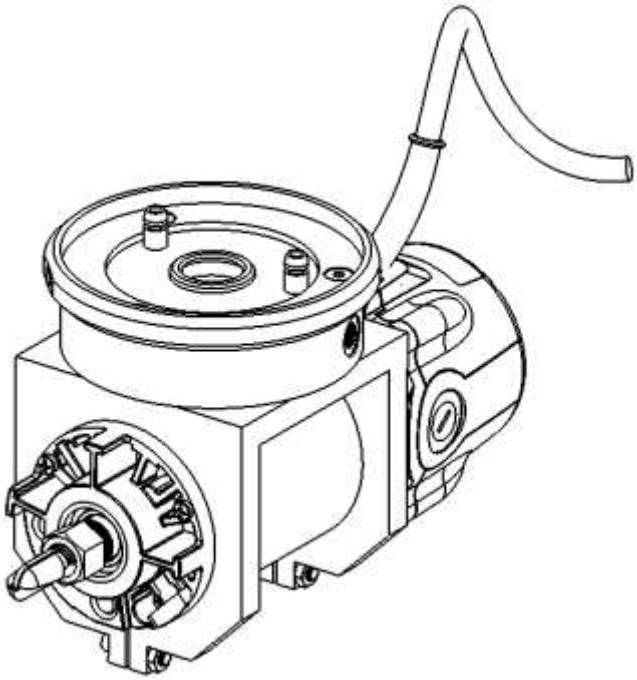


Figura 4.10 Vista isométrica del ensamble del *router* con el cambiador.

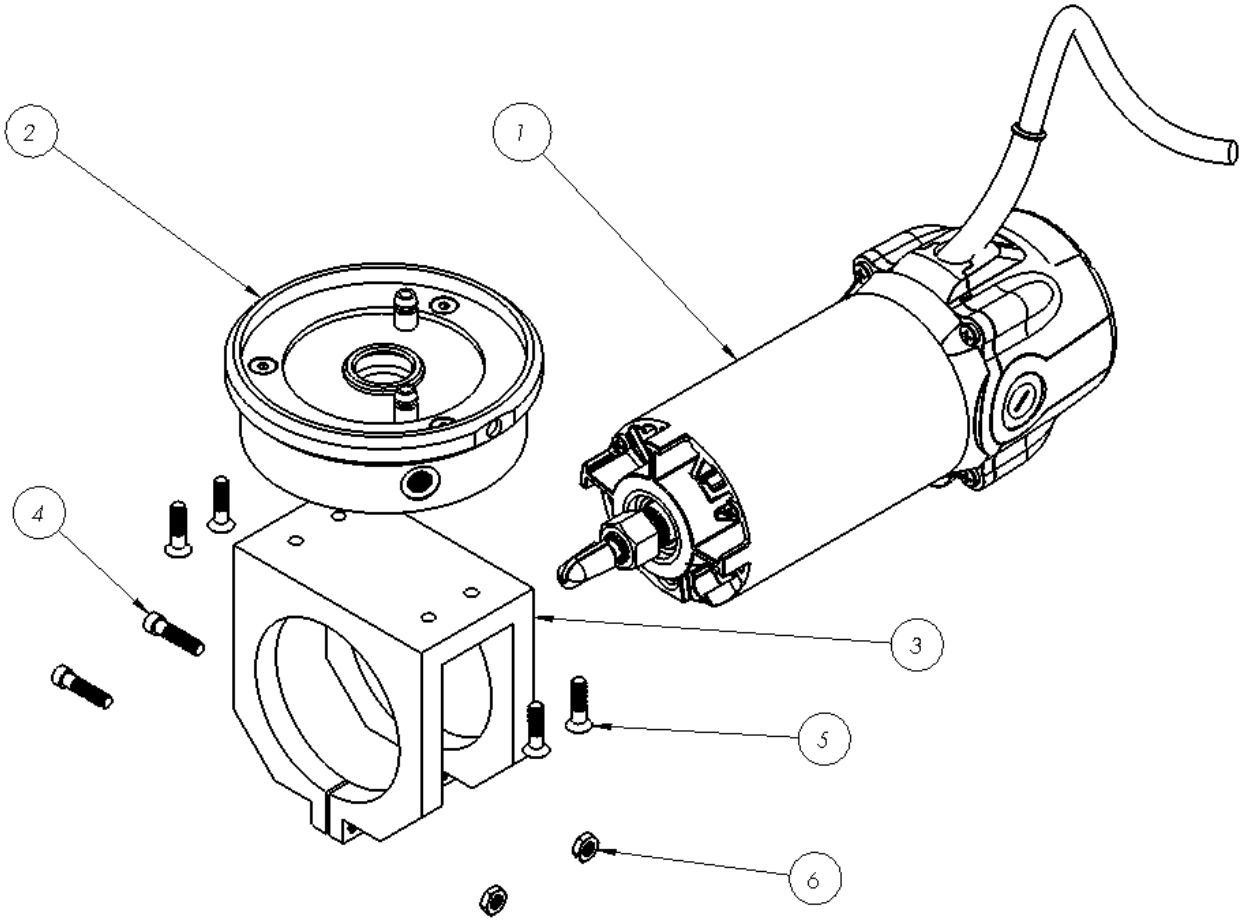


Figura 4.11 Vista explosiva del ensamble del *router* con el cambiador.

Tabla 4.4 Lista de materiales del ensamble del router con el cambiador.

ELEMENTO NO.	NUMERO	DESCRIPCION	CANTIDAD
1	SW03-RT0700C	Fresadora	1
2	SW02-001	Base Hembra	1
3	SW03-001	Soporte ROUTER	1
4	SW02-005	Tornillo allen M5 x 20	2
5	SW01-007	Tornillo Cabeza Plana M5 x 12	7
6	SW02-006	Contra Tuerca M5	2

CAPÍTULO 5. SELECCIÓN DE MATERIALES

En la actualidad la ingeniera de materiales presenta gran desarrollo, tanto en nuevos materiales descubiertos y sus aplicaciones, como las combinaciones de los ya existentes. Con una gama que rebasa los 150,000 materiales disponibles para ingeniería, el ingeniero tiene la posibilidad dentro de este vasto menú, poder escoger el más adaptable a las necesidades requeridas [37].

Para el conjunto ensamble hembra, la base debe ser capaz de soportar todo el conjunto, adicionalmente la base hembra soporta el *router* y el inserto de sujeción con el bloqueo neumático (esferas de acero, pistón neumático e insertos guías). Por lo anterior es condición necesaria para la base hembra una conveniente rigidez que corresponde a un alto módulo de elasticidad (propiedad mecánica de los materiales), así como ligereza, que corresponde a la cantidad de masa por unidad de volumen (densidad).

5.1 BASE HEMBRA

La figura 5.1 muestra un esquema de análisis de la base del conector hembra. Por lo anterior la optimización del material de la base del conector hembra (ver figura 5.1) requiere establecer las siguientes condiciones Ry

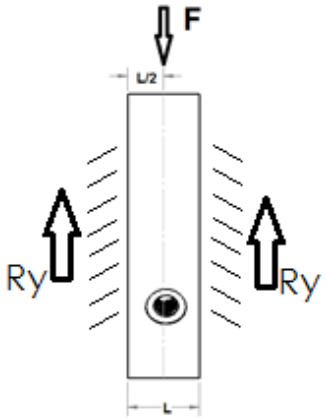


Figura 5.1 Base del conector hembra sometido a flexión por acción del peso y corte (las reacciones corresponden a las partes involucradas en conexión).

Función: elemento de sección circular que soporta flexión

Restricciones: a) Longitud especificada "L";

b) Deflexión "Y" para una carga "F"

Variables por especificar:

a) Mínimo peso
b) Máxima rigidez

El material debe tener propiedades racionales de maquinabilidad, resistencia a la oxidación y posibilidad de buen acabado superficial.

El análisis de las restricciones del dispositivo para la base hembra y las variables a optimizar de las propiedades del material permite realizar el siguiente procedimiento matemático:

La rigidez de la base $\frac{F}{y} = \frac{48EI}{L^3}$ donde: $I = \frac{\pi d^4}{64}$

Por lo que: $\frac{F}{y} = \frac{48E\pi d^4}{64L^3}$ .....(I)

El peso de la base $G = \delta LA$ donde: $A = \frac{\pi d^2}{4}$

Por lo que $G = \delta L \frac{\pi d^2}{4}$ de donde $d^2 = \frac{4G}{\delta L\pi}$ .....(II)

Obteniendo la función objetivo se sustituye (I) en (II):

$$\frac{F}{y} = \frac{48}{64} \cdot \frac{E\pi}{L^3} \left(\frac{4G}{\delta L\pi}\right)^2 = \frac{48E\pi 4^2 G^2}{64L^3\delta^2 L^2\pi^2} = \frac{12EG^2}{L^5\delta^2\pi}$$

Despejando en función del peso:

$$G = \sqrt{\frac{F}{y} \cdot \frac{L^5\pi\delta^2}{12E}} = \sqrt{\frac{F}{y} \cdot \frac{L^5\pi}{12}} \cdot \sqrt{\frac{\delta^2}{E}}$$

Por lo que el índice de desempeño estará dado por: $M = \sqrt{\frac{\delta^2}{E}} = \frac{\delta}{E^{1/2}}$ .....(III)

De tal manera que: $E = \frac{\delta^2}{\mu^2}$ $\quad logE = log\left(\frac{\delta^2}{\mu^2}\right) = 2log\delta - 2log\mu$

$logE = 2(log\delta - logM)$.....(IV)

Nótese que la ecuación (III) sustenta el índice de desempeño M tal que:

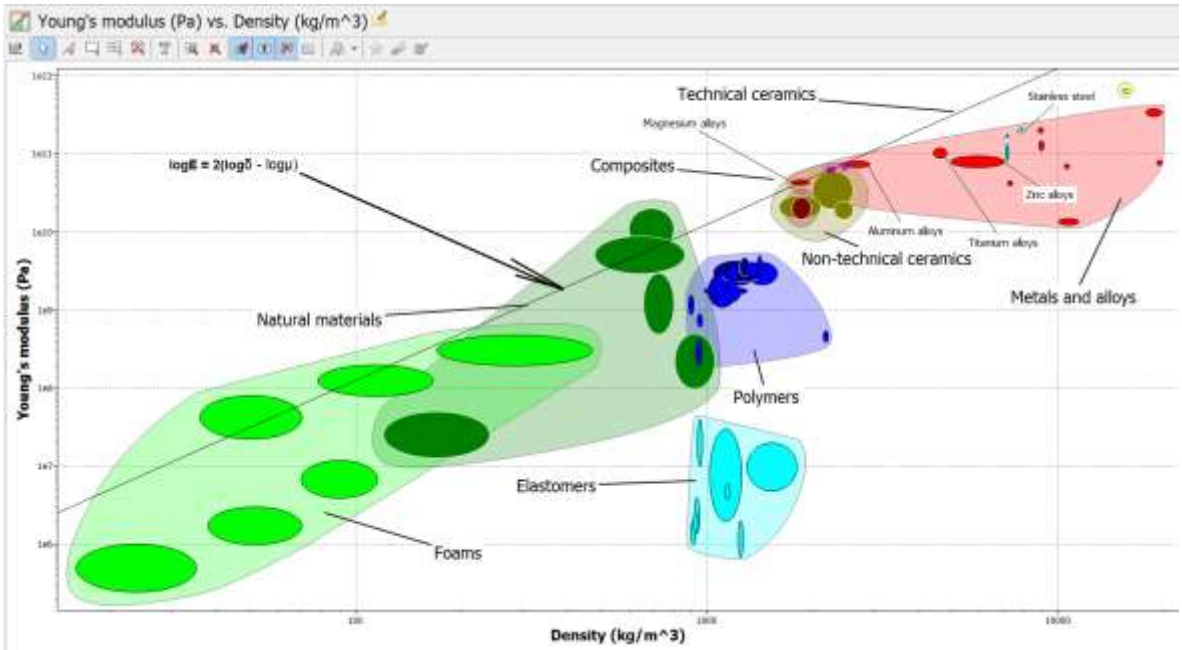
Cuando el módulo de elasticidad E es mayor y la densidad δ es menor en la relación $\frac{\delta}{E^{1/2}}$ se logra un material óptimo de buena rigidez y poco peso.

La ecuación (IV) muestra la pendiente de grado 2 a ocupar en el software CES EduPack 2015 en un gráfico $Log - Log$ de $E = f(\delta)$.

Con el empleo del método de Ashby, el cual es base del software CES edupack 2015 para ingeniería de materiales, se procede a la selección del material óptimo para la base hembra del sujetador.

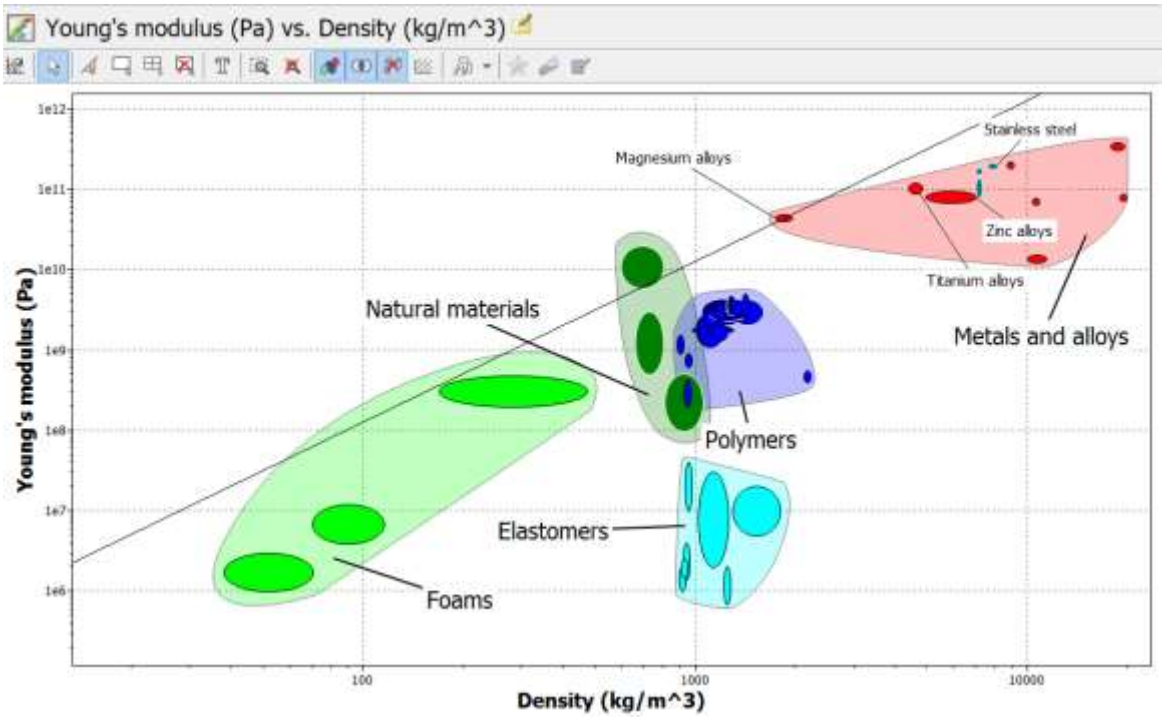
La figura 5.2 muestra la primera selección dentro del nivel 1 de la gama de materiales.

Figura 5.2: 69 posibles materiales dentro de la máxima y mayor inclusión de la pendiente logarítmica.



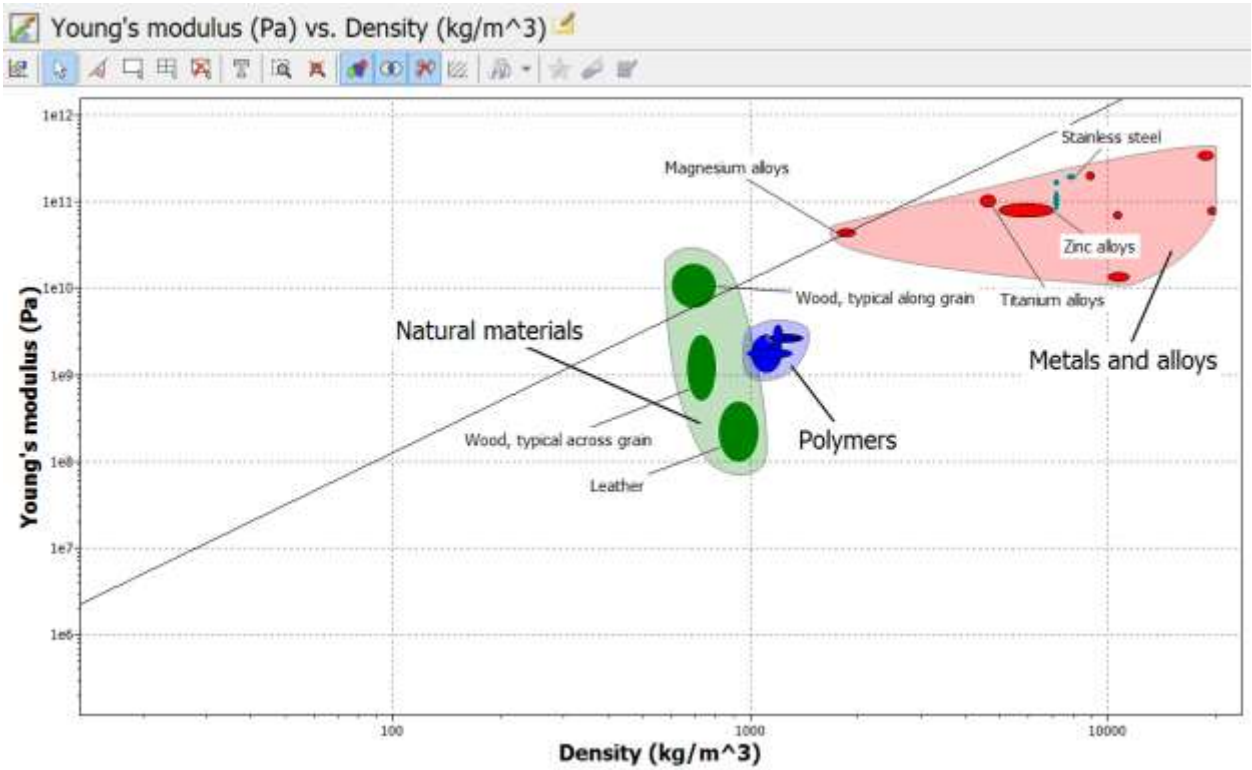
Se deberá tomar en cuenta la maquinabilidad del material por lo que la gama reduce de 69 a 42 materiales factibles de selección. La figura 5.3 muestra los materiales restantes.

Figura 5.3: Materiales con buen índice de maquinabilidad



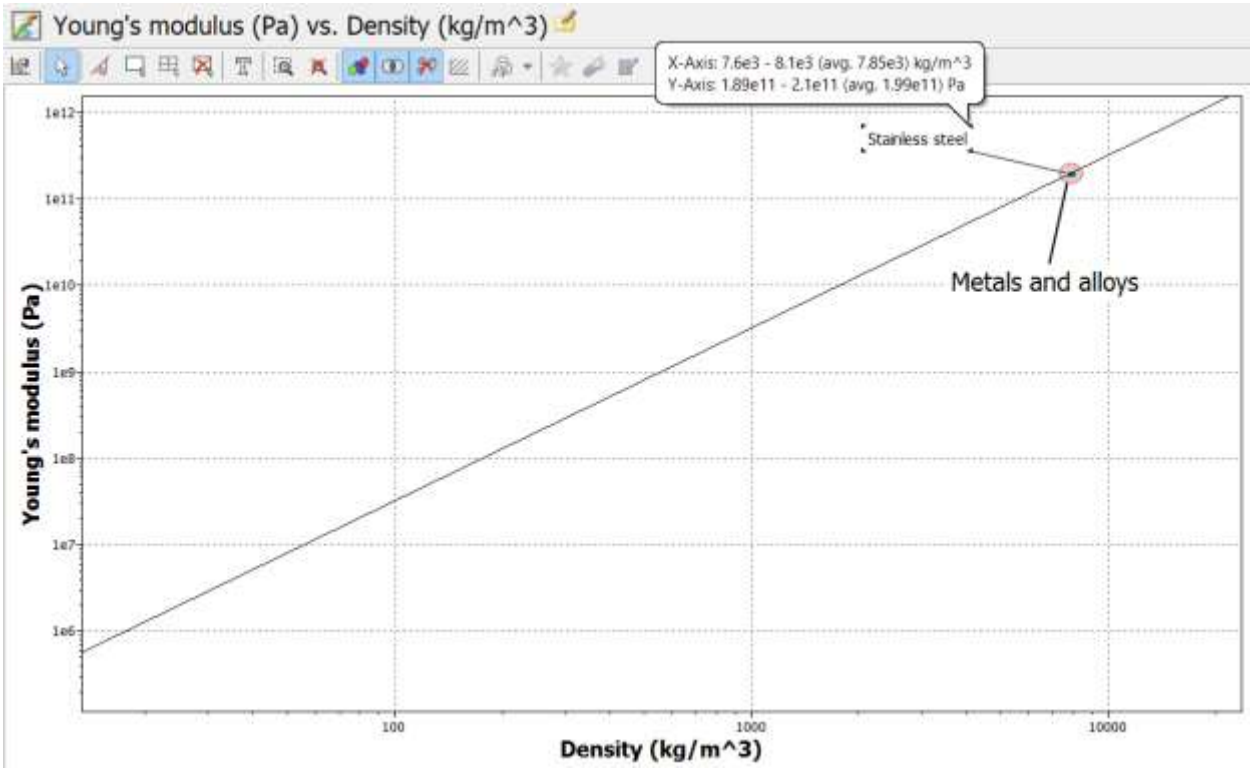
El material por cuestiones de montaje deberá ser capaz de admitir un buen acabado superficial con rectificaciones de maquinado, al tener inserto por presión se requiere de una buena precisión en los estados superficiales. La figura 5.4 muestra la reducción a 19 materiales disponibles dentro de estos límites.

Figura 5.4: Materiales admisibles a buen acabado superficial



Finalmente, se aprecia en la figura 5.4, que la familia de los metales presenta las características optimas de la relación E/δ, buena maquinabilidad y acabado superficial y además en estos materiales podemos escoger aquel que no permite oxidación o degradación por ambientes húmedos, por lo que los nuevos parámetros de restricción serán que sea metal y además inoxidable. La figura 5.5 muestra el resultado final de selección para el material en cuestión.

Figura 5.5: Selección de material final para la base del acoplador hembra.



El material de acero inoxidable

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con cromo, níquel y a menudo de otros cuatro o cinco elementos. La aleación transmuta el acero al carbono simple que se oxida y es propenso a la fragilidad por debajo de temperatura ambiente. De hecho, la mayoría de los aceros inoxidables resisten la corrosión en ambientes húmedos, y permanecen dúctiles a bajas temperaturas.

Los usos típicos se dan en autos de carreras, camiones, remolques, equipo de proceso de alimentos, mingitorios, estufas, utensilios de cocina, cuchillería, tijeras, metal de arquitectura, equipo de lavado, equipo para procesos químicos, partes de turbina de avión, equipo quirúrgico, componentes para calderas, componentes de quemadores de aceite, equipo de procesamiento de petróleo, equipo de tratamiento térmico, corte automotriz. Uso estructural en ambientes corrosivos, plantas de energía nuclear, barcos, plataformas petroleras, cables y tubos submarinos [38].

La figura 5.6 muestra las propiedades del denominado acero inoxidable férrico serie 200.

Figura 5.6: Algunas propiedades del acero inoxidable férrico serie 200 (fuente: [38]).

General properties				
Density	7.6e3	-	8.1e3	kg/m^3
Price	* 76.1	-	83.8	MXN/kg
Mechanical properties				
Young's modulus	1.89e11	-	2.1e11	Pa
Yield strength (elastic limit)	1.7e8	-	1e9	Pa
Tensile strength	4.8e8	-	2.24e9	Pa
Elongation	0.05	-	0.7	strain
Hardness - Vickers	1.27e9	-	5.59e9	Pa
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 1.75e8	-	7.53e8	Pa
Fracture toughness	6.2e7	-	1.5e8	Pa.m^0.5
Thermal properties				
Melting point	1.37e3	-	1.45e3	°C
Maximum service temperature	750	-	820	°C
Thermal conductor or insulator?	Poor conductor			
Thermal conductivity	12	-	24	W/m.°C
Specific heat capacity	450	-	530	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	1.3e-5	-	2e-5	strain/°C
Electrical properties				
Electrical conductor or insulator?	Good conductor			
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Eco properties				
Embodied energy, primary production	* 8.03e7	-	8.88e7	J/kg
CO2 footprint, primary production	* 4.73	-	5.23	kg/kg
Recycle	✓			

La figura 5.7 muestra la asignación del material al modelo hecho en SolidWorks. Cabe mencionar la serie 200, es el correspondiente al módulo de rigidez del acero. La amplia gama de materiales para ingeniería que maneja CES edupack 2015, tan solo para esta serie maneja una gama de aceros nivel 4 de 179 aceros que varían en su composición química, la figura 5.8 muestra algunos ejemplos de esta aplicación, efectivamente como marca en figura 5.6 el módulo de elasticidad varía entre los valores marcados.

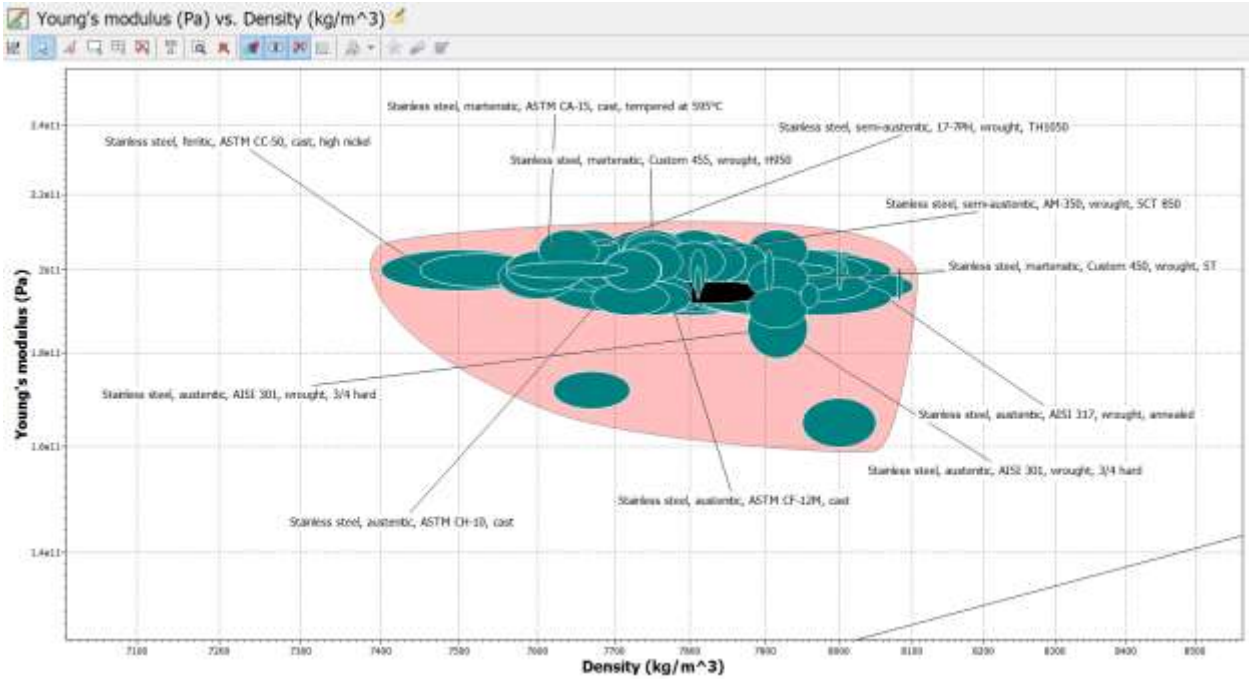
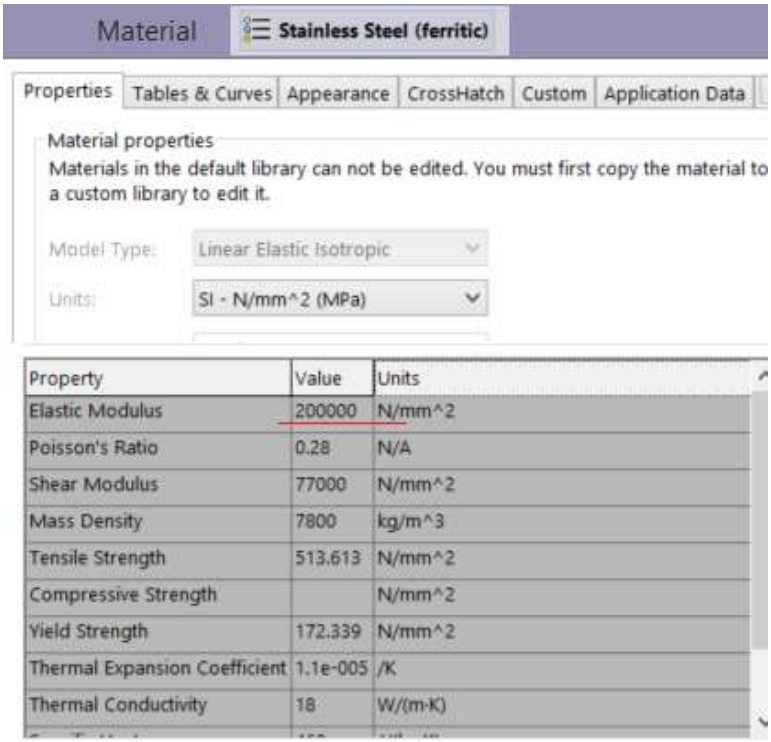


Figura 5.8: Algunos aceros de la gama de 179, del acero inoxidable.



Property	Value	Units
Elastic Modulus	200000	N/mm^2
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	77000	N/mm^2
Mass Density	7800	kg/m^3
Tensile Strength	513.613	N/mm^2
Compressive Strength		N/mm^2
Yield Strength	172.339	N/mm^2
Thermal Expansion Coefficient	1.1e-005	/K
Thermal Conductivity	18	W/(m·K)

Figura 5.7 Propiedades acero inoxidable en SolidWorks.

5.2 INSERTO DE SOPORTE

Para el inserto que soporta el bloqueo mecánico donde el pistón neumático enclava las esferas de acero para la sujeción, la rigidez y la dureza son propiedades mecánicas por considerar para el material del inserto de soporte. La rigidez es valorada con el modelo de elasticidad (E) y la dureza por el grado Vickers (HV), de esta forma la relación a maximizar sigue siendo E/δ pero considerando durezas elevadas, como referencia se toman las bolas de acero de los rodamientos a bolas. Los elementos de rodadura son de acero templado hasta el núcleo, según DIN 17 230 y tienen una dureza de al menos, 740 HV10 (61.8HRC). Las medidas y tolerancias corresponden a DIN 5 401/ISO 3 290. Además, la solución será de aquellos materiales que podrían ser altamente endurecidos deberá, tomarse en cuenta la maquinabilidad previa y tratamiento térmico.

Para el grafico, la pendiente será lineal. La selección queda como sigue, las figuras 5.9 a la 5.14 muestran la secuencia de selección del material en ingeniería. El material seleccionado para el inserto de soporte fue el acero de baja aleación, hierro manganeso (0.6 – 0.9 % Mn). El acero SAE 1045 (0.43 – 0.50 % C).

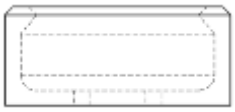


Figura 5.9: Inserto de sujeción hembra

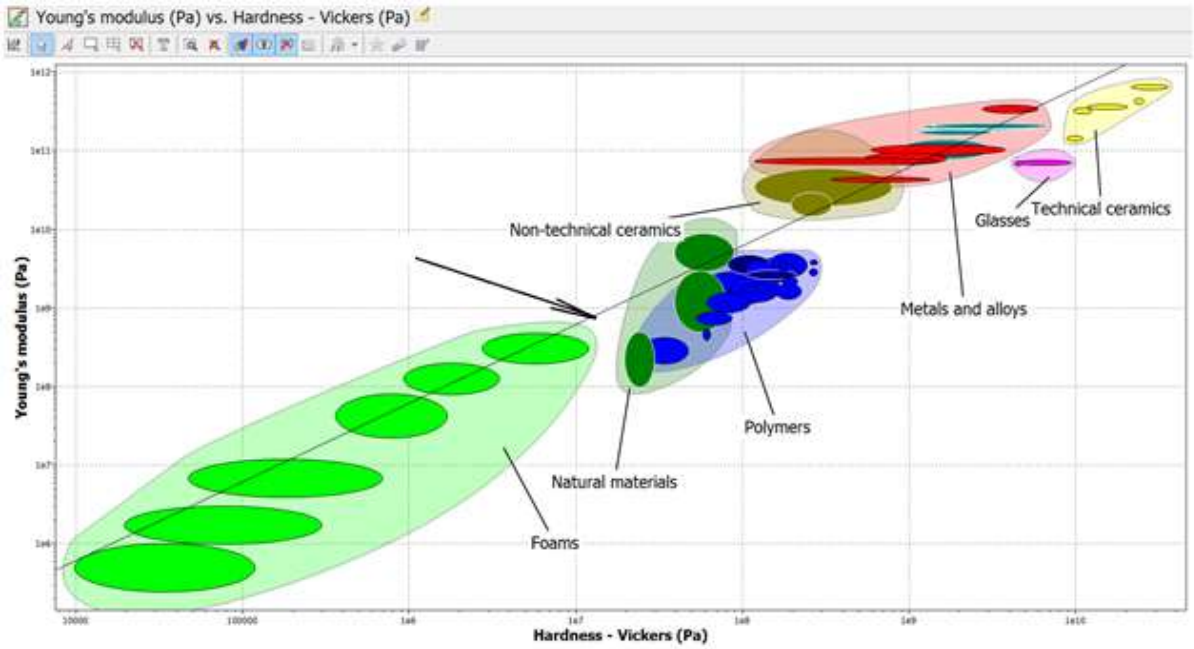


Figura 5.10 Primera selección con las familias de materiales disponible

Siendo la dureza una condición de la superficie del material, se suele definir como la resistencia del material a la deformación plástica localizada debido a la indentación repetida y contactos superficiales. La figura 5.11 muestra el material de acero maximizado en dureza y resistencia y que permiten maquinado y tratamiento térmico.

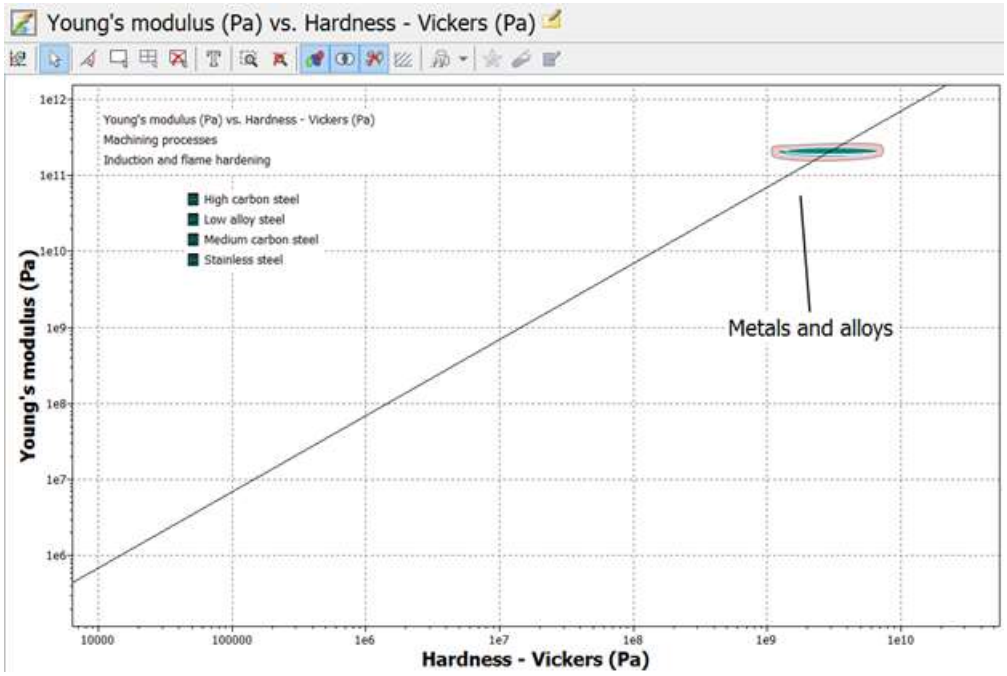


Figura 5.11 Selección después de condicionar el maquinado y el tratamiento térmico.

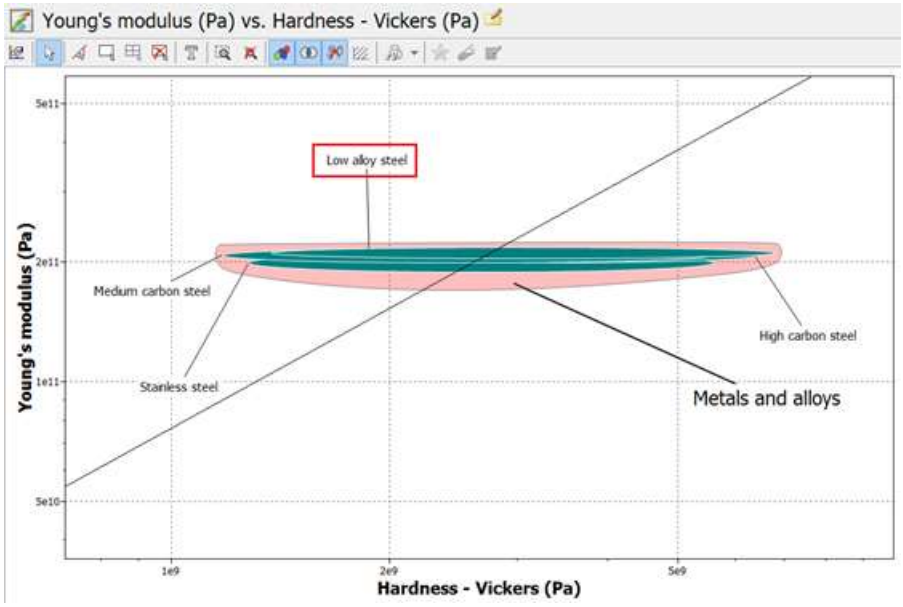


Figura 5.12 Selección final del material criterio de alta rigidez.

Acero de baja aleación

El acero de baja aleación seleccionado está caracterizado por tener el 0.05 % de carbono (C) y presenta en calidad de elementos de aleación, el cromo (Cr), el níquel (Ni), el molibdeno (Mo) y el vanadio (V). El acero aleado al níquel – cromo – molibdeno es de elevada resistencia con esfuerzo limite elástico alrededor de 750 MPa.

Este acero de baja aleación posee muy buenas características para aumentar su dureza con tratamiento térmico, logrando una distribución uniforme del grado de dureza en todo el volumen de la pieza. Si el componente es más de algunos milímetros de grosor, existe la posibilidad, de que el interior no enfríe lo suficientemente. Este problema se resuelve por aleación. Agregando vanadio (V), permite una dispersión de carburos dando fuerza, conservando la tenacidad y ductilidad. [38].

Sus usos típicos, herramientas, esferas de baleros, rodillos, cigüeñales, engranes, ejes de conexión, cuchillos y tijeras, recipientes a presión, entre otros.

La figura 5.13 muestra las propiedades del denominado acero de bajo carbono.

General properties				
Density	7.8e3	-	7.9e3	kg/m^3
Price	* 7.24	-	8.02	MXN/kg
Mechanical properties				
Young's modulus	2.05e11	-	2.17e11	Pa
Yield strength (elastic limit)	4e8	-	1.5e9	Pa
Tensile strength	5.5e8	-	1.76e9	Pa
Elongation	0.03	-	0.38	strain
Hardness - Vickers	1.37e9	-	6.79e9	Pa
Fatigue strength at 10^7 cycles	* 2.48e8	-	7e8	Pa
Fracture toughness	1.4e7	-	2e8	Pa.m^0.5
Thermal properties				
Melting point	1.38e3	-	1.53e3	°C
Maximum service temperature	* 500	-	550	°C
Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal conductivity	34	-	55	W/m.°C
Specific heat capacity	410	-	530	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	1.05e-5	-	1.35e-5	strain/°C
Electrical properties				
Electrical conductor or insulator?	Good conductor			
Optical properties				
Transparency	Opaque			
Eco properties				
Embodied energy, primary production	* 2.87e7	-	3.17e7	J/kg
CO2 footprint, primary production	* 1.93	-	2.13	kg/kg
Recycle	✓			

Figura 5.13 Algunas propiedades del acero de bajo carbono. (Fuente: [38]).

La figura 5.14 muestra la asignación del material al modelo hecho en SolidWorks

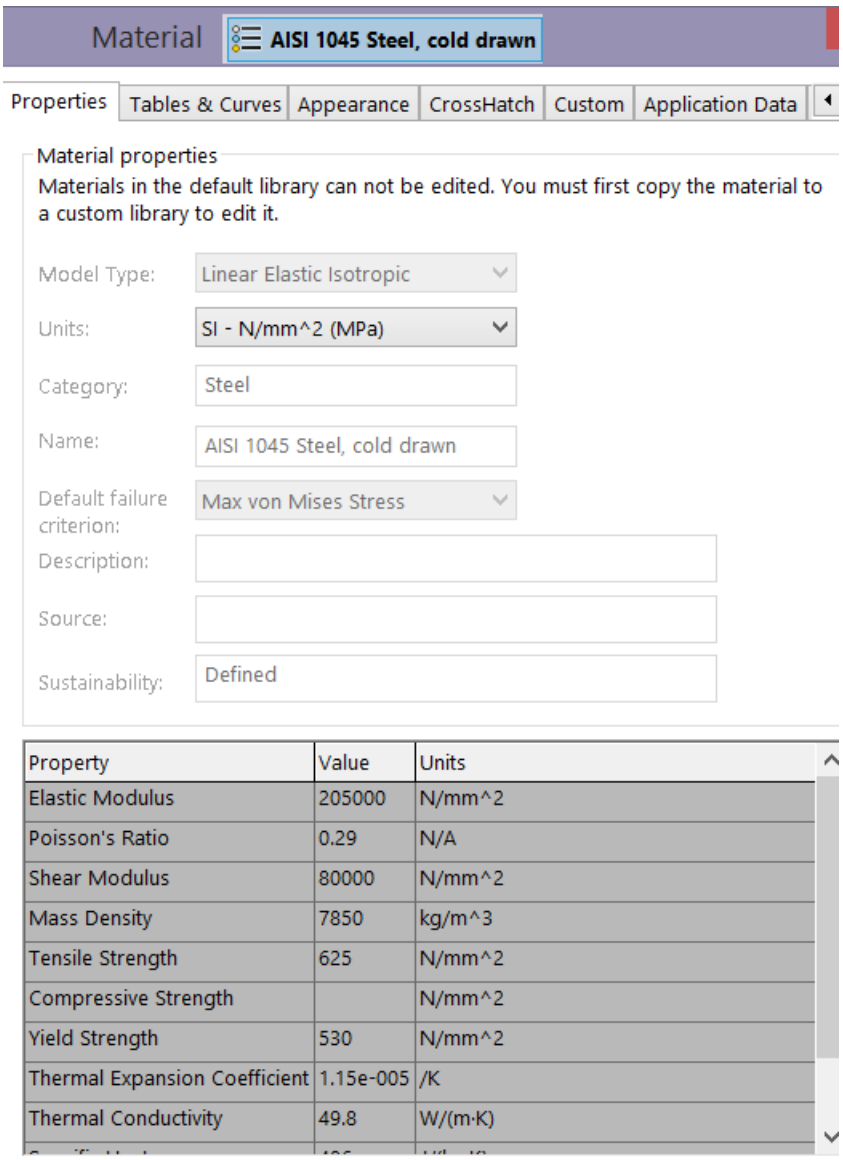


Figura 5.14 Algunas propiedades mecánicas del material a utilizar en la simulación de SolidWorks. Nótese que el módulo de elasticidad y el limite elástico aparecen como un promedio de la gama que maneja la selección.

5.3 SUJETADOR DE LA FRESADORA (MAMELÓN)

Para la selección del material del soporte del *router* al cambiador, denominado mamelón, debe ser considerada una suficiente rigidez caracterizada por el módulo de elasticidad (propiedad mecánica de los materiales), así como su ligereza, que

corresponde a la cantidad de masa por unidad de volumen (corresponde a la densidad). También deberá tomarse en cuenta la maquinabilidad previa y elasticidad.

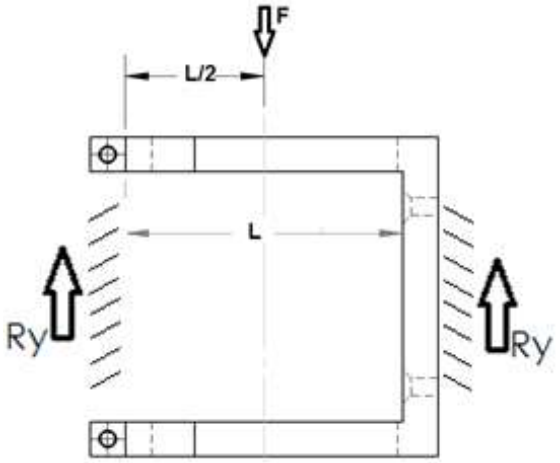


Figura 5.15 Mamelón sometido a flexión por acción del peso y corte.

De acuerdo con el manejo de software CES Edupack, las figuras 5.15, 5.16 y 5.17, muestran la selección final del material para el mamelón. Se destaca el hecho de que las aleaciones de aluminio presentan la mejor relación entre la rigidez y el peso, su maquinabilidad, ductilidad y precio.

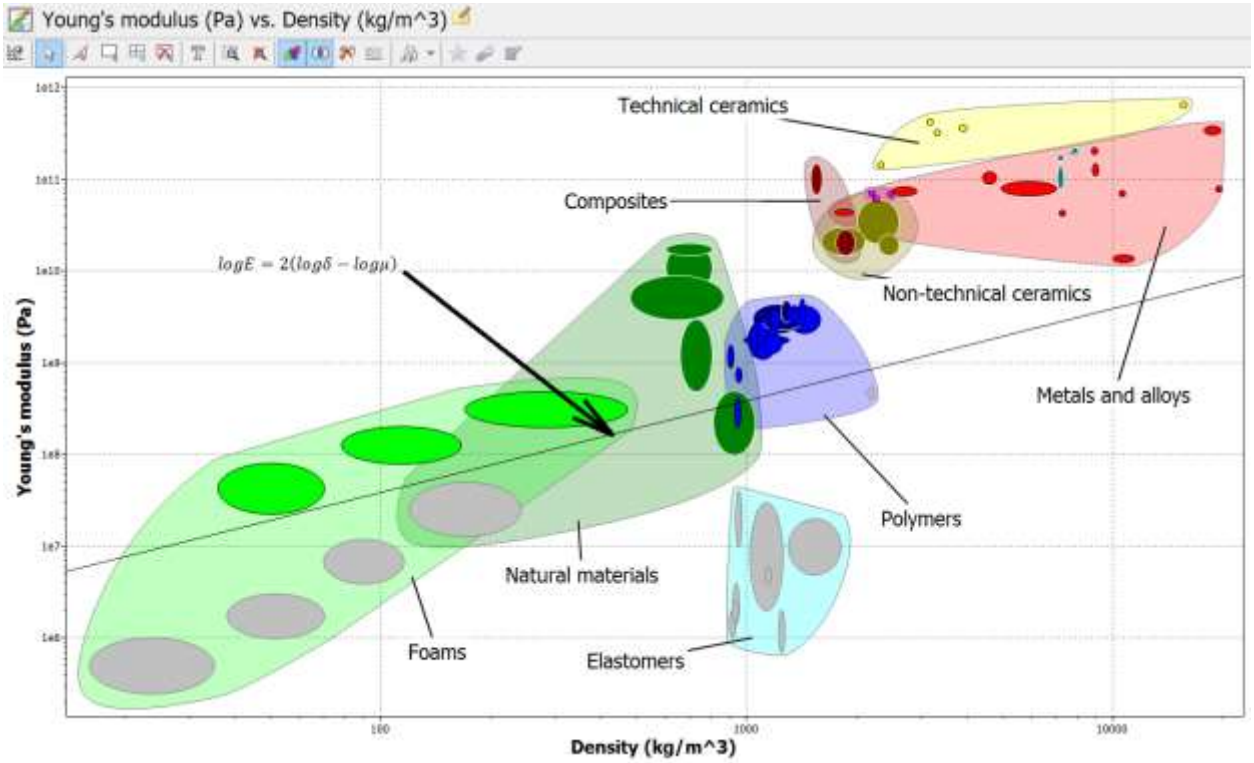


Figura 5.16 Primera selección de acuerdo con la pendiente grado 2.

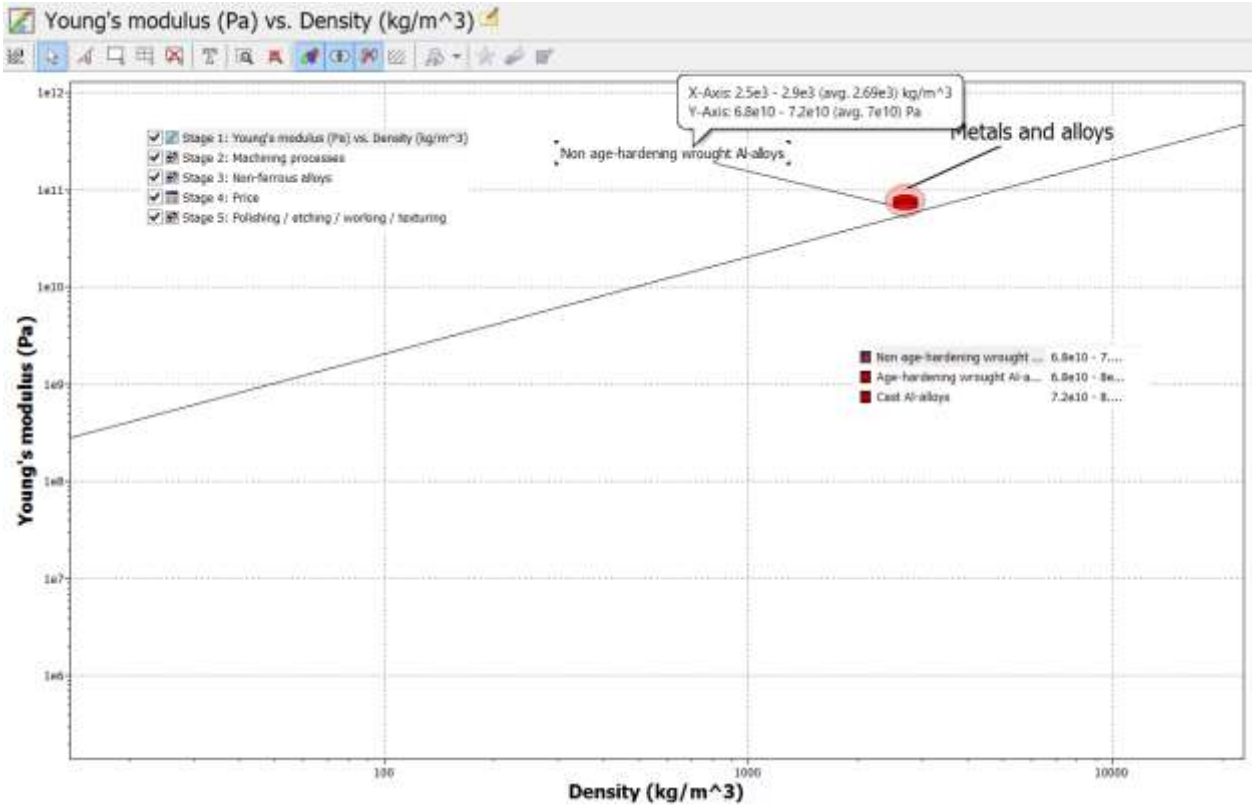


Figura 5.16 las condiciones de cinco estados tres grupos de aluminio restantes.

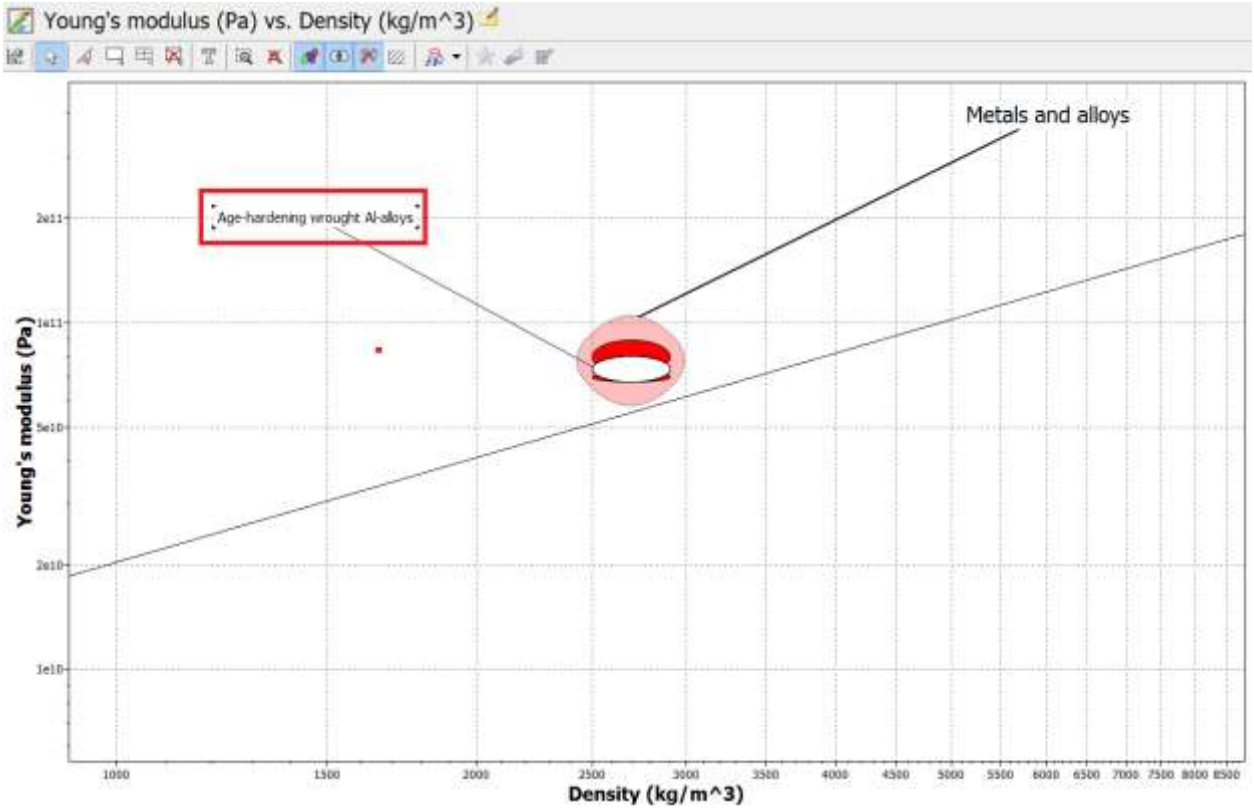


Figura 5.17 El grupo más conveniente para las restricciones establecidas.

El material de Aluminio

El aluminio es de las más importantes aleaciones ligeras, el segundo más importante después del acero en volumen de uso. Cuando se encuentra en estado puro es extremadamente dúctil (puede ser rolado en papel a micras de espesor), resistente a la corrosión. El aluminio puro tiene una conductividad eléctrica y térmica de cerca del 60% del cobre y solo una tercera parte de su densidad. Se registra en series, de acuerdo con sus aleaciones mediante tratamientos no explosivos.

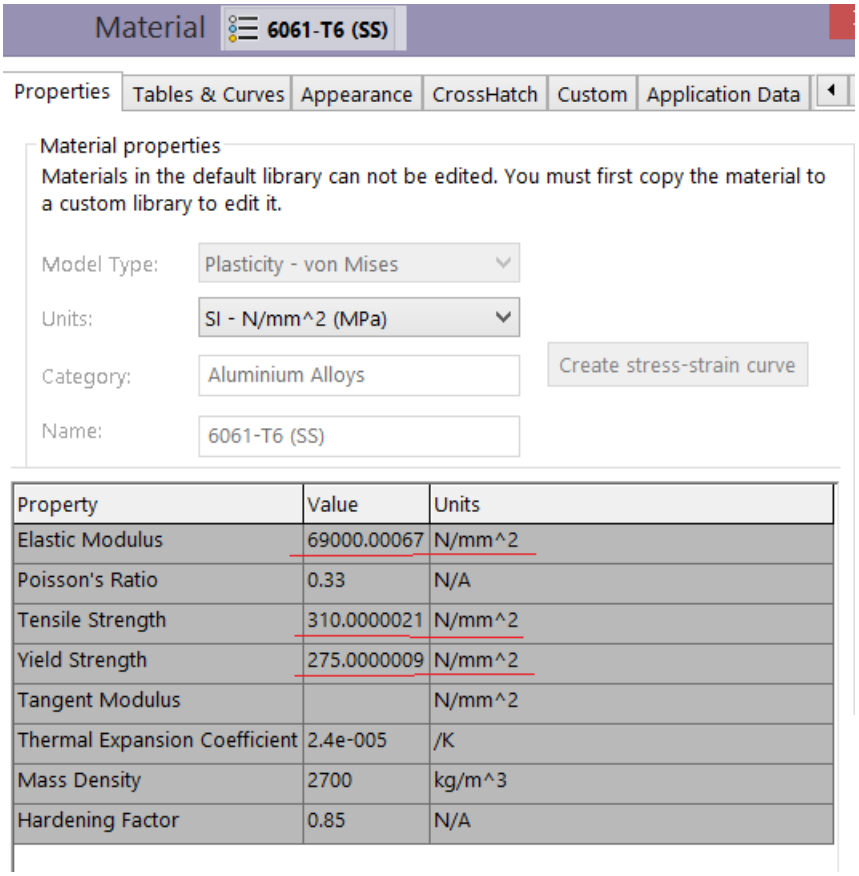
La serie 1000, se usa en papel aluminio, equipo de cocina, conductores eléctricos y barras de autobús, la 3000, contenedores de bebidas, estructuras y techos, utensilios de cocina, extrusión. La serie 5000 para, tubería, extrusiones y transportación. La figura 5. 18, muestra algunas de las características más relevantes para este material [38].

Serie 5000

General properties				
Density	2.5e3	-	2.9e3	kg/m^3
Price	* 27.4	-	30.3	MXN/kg
Date first used	1914			
Mechanical properties				
Young's modulus	6.8e10	-	7.2e10	Pa
Shear modulus	2.5e10	-	2.8e10	Pa
Bulk modulus	6.4e10	-	6.9e10	Pa
Poisson's ratio	0.32	-	0.36	
Yield strength (elastic limit)	3e7	-	2.86e8	Pa
Tensile strength	7e7	-	3.6e8	Pa
Compressive strength	3e7	-	2.86e8	Pa
Elongation	0.02	-	0.41	strain
Hardness - Vickers	2.94e8	-	9.81e8	Pa
Fatigue strength at 10^7 cycles	4.2e7	-	1.6e8	Pa
Fracture toughness	2.6e7	-	4.2e7	Pa.m^0.5
Mechanical loss coefficient (tan delta)	2e-4	-	0.002	
Thermal properties				
Melting point	570	-	670	°C
Maximum service temperature	130	-	220	°C
Minimum service temperature	-273			°C
Thermal conductor or insulator?	Good conductor			
Thermal conductivity	119	-	240	W/m.°C
Specific heat capacity	886	-	995	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	2.2e-5	-	2.5e-5	strain/°C
Electrical properties				
Electrical conductor or insulator?	Good conductor			
Electrical resistivity	2.5e-8	-	6e-8	ohm.m

Figura 5.18 Características del aluminio (Fuente: [38]).

La figura 5.19 muestra las características principales del material seleccionado en la plataforma de SolidWorks, nótese la comparativa de las características (subrayadas en rojo) para los materiales.



Property	Value	Units
Elastic Modulus	69000.00067	N/mm^2
Poisson's Ratio	0.33	N/A
Tensile Strength	310.0000021	N/mm^2
Yield Strength	275.0000009	N/mm^2
Tangent Modulus		N/mm^2
Thermal Expansion Coefficient	2.4e-005	/K
Mass Density	2700	kg/m^3
Hardening Factor	0.85	N/A

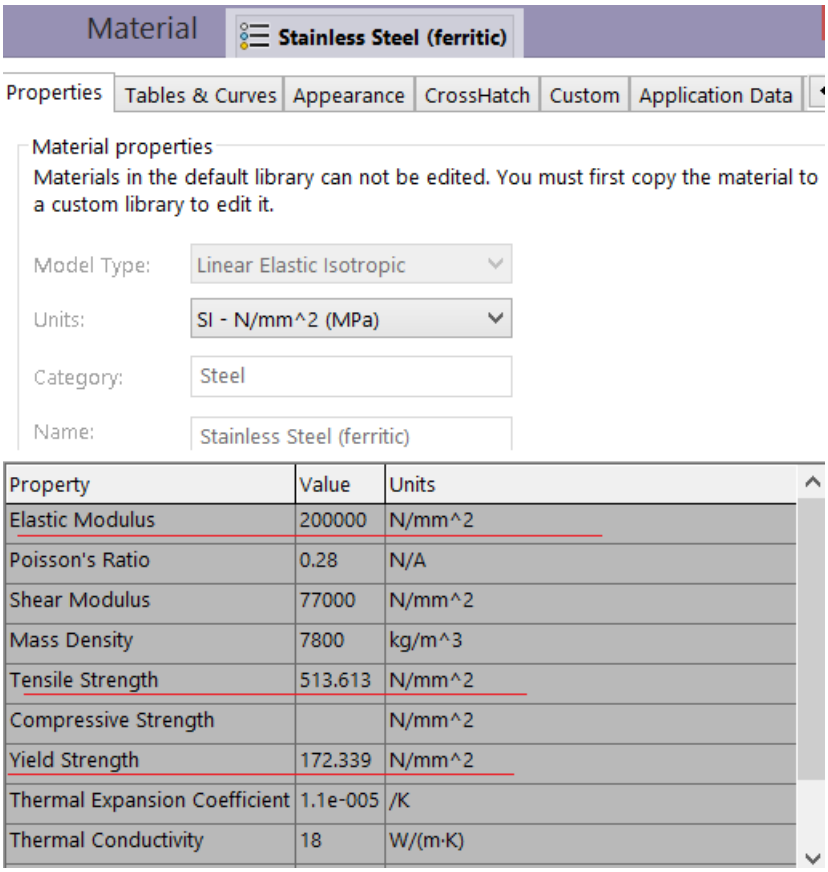
Figura 5.19 Material designado en SolidWorks

Aluminio 6061-T6 (AISI/ASTM)

Aleación dúctil y ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado, el aluminio 6061-T6 es ideal para la elaboración de piezas maquinadas con calidad de excelencia y para trabajos que requieran buen acabado superficial. Posee excelente resistencia a la corrosión y acabado además de facilidad de soldadura y una resistencia parecida a la del acero. Esta es una aleación de propósito general muy popular con buena facilidad de maquinado a pesar de su tratamiento de envejecimiento artificial.

Para la tornillería se tomará el criterio del acero inoxidable seleccionado en la base de la hembra.

La designación en tornillería el SolidWorks se puede apreciar en la figura 5.20



Property	Value	Units
Elastic Modulus	200000	N/mm^2
Poisson's Ratio	0.28	N/A
Shear Modulus	77000	N/mm^2
Mass Density	7800	kg/m^3
Tensile Strength	513.613	N/mm^2
Compressive Strength		N/mm^2
Yield Strength	172.339	N/mm^2
Thermal Expansion Coefficient	1.1e-005	/K
Thermal Conductivity	18	W/(m·K)

Figura 5.20 Características de material de tornillería.

CAPÍTULO 6. ANÁLISIS POR MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

6.1 CONCEPTO GENERAL

Al Método de los Elementos Finitos se le considera una técnica general para encontrar soluciones numéricas de sistemas de ecuaciones diferenciales e integrales. Tiene su origen en la ingeniería estructural, entre los años 50/60, para solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de elasticidad. Su aplicación se generalizó integrado a sistemas de CAD/CAE [39].

SOLIDWORKS Simulation, utiliza el método de formulación de desplazamientos de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas. La geometría que se analiza se individualiza con elementos tetraédricos (3D), triangulares (2D) y de vigas, y se resuelve con un *solver Direct Sparse* o iterativo. Puede utilizar un tipo de elemento h adaptativo o p adaptativo, que proporciona una gran ventaja a los diseñadores e ingenieros, ya que el método adaptativo garantiza el hallazgo de la solución. Dado que la mayoría de los componentes industriales están fabricados en metal, la mayor parte de los cálculos de análisis por elementos finitos afectan a componentes metálicos. El análisis de componentes metálicos puede realizarse mediante el análisis de tensión lineal o no lineal [35].

6.2 PARÁMETROS DE CORTE.

La presente adaptación, está enfocada en el maquinado en madera, sin embargo, se pretende implementar el sistema para ser capaz de realizar desbaste en materiales metálicos suaves. Tomando en cuenta los parámetros para maquinado en aluminio, serán considerados los parámetros de corte para materiales metálicos suaves de los catálogos *Sandvik* y *Dormer* [40].

La figura 6.1, muestra las cargas principales a las que el sistema estará sometido durante su operación normal. Nótese que la fresa es intercambiable, se fabrican en una amplia gama de medidas y formas. Para maquinados de alta velocidad, la diferencia en los parámetros radica en los ángulos de inclinación de la herramienta.

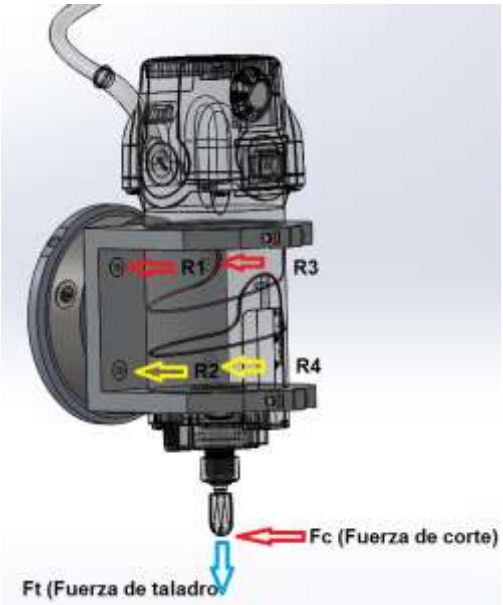


Figura 6.1 *Router* sometido a cargas de trabajo

6.2.1 Fresado

La tabla 6.1 muestra los cálculos hechos, para la determinación de la fuerza de fresado a la cual estará sometido el sistema. Nótese que cuando cambia la inclinación del cabezal que depende la muñeca del robot (Tabla 6.2) la fuerza de fresado disminuye, de manera tal que incluso pudiera considerarse con los mismos valores para los cuatro cuadrantes de giro de la muñeca. Por consiguiente, puede ser considerada la fuerza a 90 grados como la fuerza máxima de corte por fresado. Análogamente se puede

apreciar como el cambio del diámetro de la fresa (para variaciones en los espacios de maquinado), (tabla 6.3), afecta la velocidad del husillo. Estos diámetros se consideran al valor equivalente aproximado de las fresas comerciales de diámetros 1/8", ¼", 3/8" y 1/2".

Tabla 6.1 Cálculos correspondientes a fuerza de corte

PARAMETROS DE CORTE PARA FRESADO	DATOS Y CÁLCULOS	UNIDADES	FÓRMULAS
Velocidad de corte (Vc)	300	m/min	Dato
Diámetro de la fresa (Dc)	12.50	mm	Dato
Avance por diente (fz)	0.28	mm	Dato
Numero de dientes de la fresa (Zc)	3		Dato
Ángulo de posición (Kr)	90	°	Dato
Fuerza de corte especifica para un espesor de viruta de 1 mm (kc1)	450	N/mm2	Dato
Factor de compensación del grosor de la viruta (mc)	0.18		Dato
Ángulo de desprendimiento de la plaquita (Yo)	0	°	Dato
Profundidad de corte axial (ap)	2	mm	Dato
Velocidad del Husillo (n)	7640	rpm	$n = \frac{V_c \ x \ 1000}{\pi \ x \ D_c}$
Avance del brazo (Vf)	6418	mm/min	$V_f = f_z \ x \ z_c \ x \ n$
Profundidad de corte radial (ae)	9.38	mm	$a_e = \frac{3}{4} \ x \ D_c$
Espesor medio de la Viruta (hm)	0.20	mm	$h_m = \frac{360 \ x \ \sin(K_r) \ x \ a_e \ x \ f_z}{\pi \ x \ D_c \ arcos(1 - \frac{2 \ x \ a_e}{D_c})}$
Fuerza de corte especifica (kc)	600.92	N/mm2	$k_c = k_{c1} \ x \ h_m^{-mc} \ x \ \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$
Potencia Neta (Pc)	1.21	kW	$P_c = \frac{a_p \ x \ a_e \ x \ V_f \ x \ k_c}{60 \ x \ 10^6}$
Par de apriete (Mc)	1.51	Nm	$M_c = \frac{P_c \ x \ 30 \ x \ 10^3}{\pi \ x \ n}$
Área de corte (Ac)	0.40	mm2	$A_c = a_p \ x \ h_m$
Fuerza de corte (Fc)	**241.01**	N	$F_c = k_c \ x \ A_c$

Tabla 6.2 Relación de la fuerza de corte, con el ángulo de posición.

Ángulo de posición (Kr) °	Fuerza de corte (Fc) N	Ángulo de posición (Kr) °	Fuerza de corte (Fc) N
10	57.35	100	238.01
20	99.99	110	229.03
30	136.52	120	229.03
40	167.75	130	214.20
50	193.70	140	193.70
60	214.20	150	167.75
70	229.03	160	136.52
80	238.01	170	99.99
90	**241.01**	180	0.00

Tabla 6.3 Relación de la velocidad del husillo, con el diámetro de la fresa.

Diámetro de la fresa (Dc) mm	Velocidad del Husillo (n) rpm
12.5	7640.00
9.375	10186.00
6.25	15279.00
3.125	**30558.00**

6.2.2 Taladrado

La tabla 6.4 muestra los cálculos hechos, para la determinación de la fuerza de taladrado a la que estará sometido el sistema. Nótese que cuando cambia la inclinación del cabezal que depende la muñeca del robot (Tabla 6.5) la fuerza de taladrado disminuye, de manera tal que se considera con los mismos valores para los cuatro cuadrantes de giro de la muñeca. Entonces la fuerza a 90 grados será la fuerza máxima de corte por taladrado. Análogamente se puede apreciar como el cambio del diámetro de la fresa (para variaciones en los espacios de maquinado), (tabla 6.6) afecta la velocidad del husillo. Estos diámetros se consideran al valor equivalente de las fresas comerciales con diámetros 1/8", ¼", 3/8" y 1/2".

Tabla 6.4 Cálculos correspondientes a Fuerza de taladrado

PARAMETROS DE CORTE PARA TALADRADO	DATOS Y CÁLCULOS	UNIDADES	FÓRMULAS
Velocidad de corte (Vc)	160	m/min	Dato
Diámetro de la broca (Dc)	12.50	mm	Dato
Avance por revolución (fn)	0.25	mm/rev	Dato
Numero de dientes de la fresa (Zc)	3		Dato
Ángulo de posición (Kr)	90.00	°	Dato
Fuerza de corte especifica para un espesor de viruta de 1 mm (kc1)	450	N/mm2	Dato
Factor de compensación del grosor de la viruta (mc)	0.18		Dato
Ángulo de desprendimiento de la plaquita (Yo)	0	°	Dato
Velocidad del Husillo (n)	4075	rpm	$n = \frac{V_c \, x \, 1000}{\pi \, x \, D_c}$
Avance por diente (fz)	0.08	mm	$f_z = \frac{f_n}{z_c}$
Fuerza de corte especifica (kc)	703.83	N/mm2	$k_c = k_{c1} \, x [f_z \, x \sin(K_r)]^{-mc} \, x \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$
Consumo de potencia (Pc)	1.47	kW	$P_c = \frac{f_n \, x \, V_c \, x \, D_c \, x \, k_c}{240 \, x \, 10^3}$
Fuerza de avance (Ff)	**549.86**	N	$F_f = 0.5 \, x \, k_c \, x \, \frac{D_c}{2} \, x \, f_n \, x \sin(K_r)$
Par de apriete (Mc)	3.44	Nm	$M_c = \frac{P_c \, x \, 30 \, x \, 10^3}{\pi \, x \, n}$

Tabla 6.5 Relación de la fuerza de corte de taladrado, con el ángulo de posición.

Ángulo de posición (Kr) °	Fuerza de corte (Fc) N	Angulo de posición (Kr) °	Fuerza de corte (Fc) N
10	132.95	100	551.69
20	231.78	110	530.88
30	316.45	120	496.51
40	388.83	130	448.99
50	448.99	140	388.83
60	496.51	150	316.45
70	530.88	160	231.78
80	551.69	170	132.95
90	**558.66**	180	0.00

Tabla 6.6 Relación de la velocidad del husillo, con el diámetro de la fresa.

Diámetro de la fresa (Dc) mm	Velocidad del Husillo (n) rpm
12.5	4011.00
9.375	5433.00
6.25	8149.00
3.125	**16298.00**

6.3 SIMULACIÓN DEL CONJUNTO A LAS CARGAS DE FRESADO Y TALADRADO.

Debido a la complejidad del modelo denominado *router*, en si mismo cuenta con muchos elementos mecánicos – eléctricos que componen el cuerpo en su totalidad, se opta para propósitos de la simulación un *router* que corresponde al material de acero para herramientas, característica de masa es equivalente al *router* original y el elemento de corte (fresa) corresponde a las propiedades mecánicas del elemento que estará sometido a fuerzas de corte y taladrado, las características mecánicas como resistencia a la tensión y límite de fluencia, se muestran en la figura 6.2 que el software de simulación tomará en cuenta al momento de la simulación.

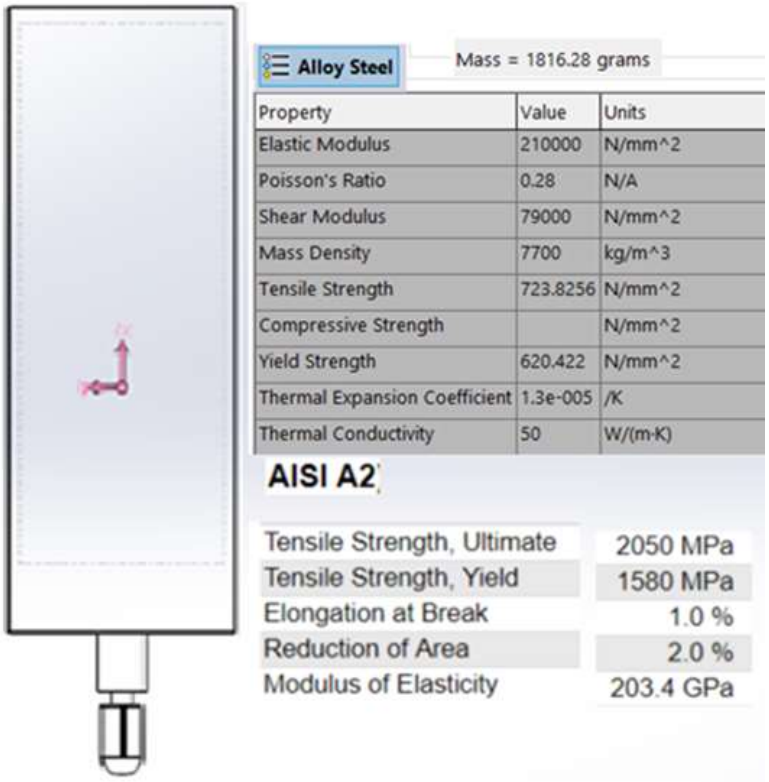


Figura 6.2 Propiedades mecánicas del acero para la fresa en operación.

6.3.1 Malla para fresado

La malla que se utiliza en SolidWorks (figura 6.3), crea elementos en zonas de mayor curvatura automáticamente (sin necesidad de controlar la malla) y admite mallado multiproceso para documentos de ensamblaje y sólidos multi-cuerpo.

Los Puntos jacobianos (elementos parabólicos que pueden trazar la geometría curva de manera mucho más precisa que los elementos lineales del mismo tamaño), cuando la calidad de malla es alta, establecen el número de puntos que se utilizarán para comprobar el nivel de distorsión de los elementos tetraédricos de nivel superior.

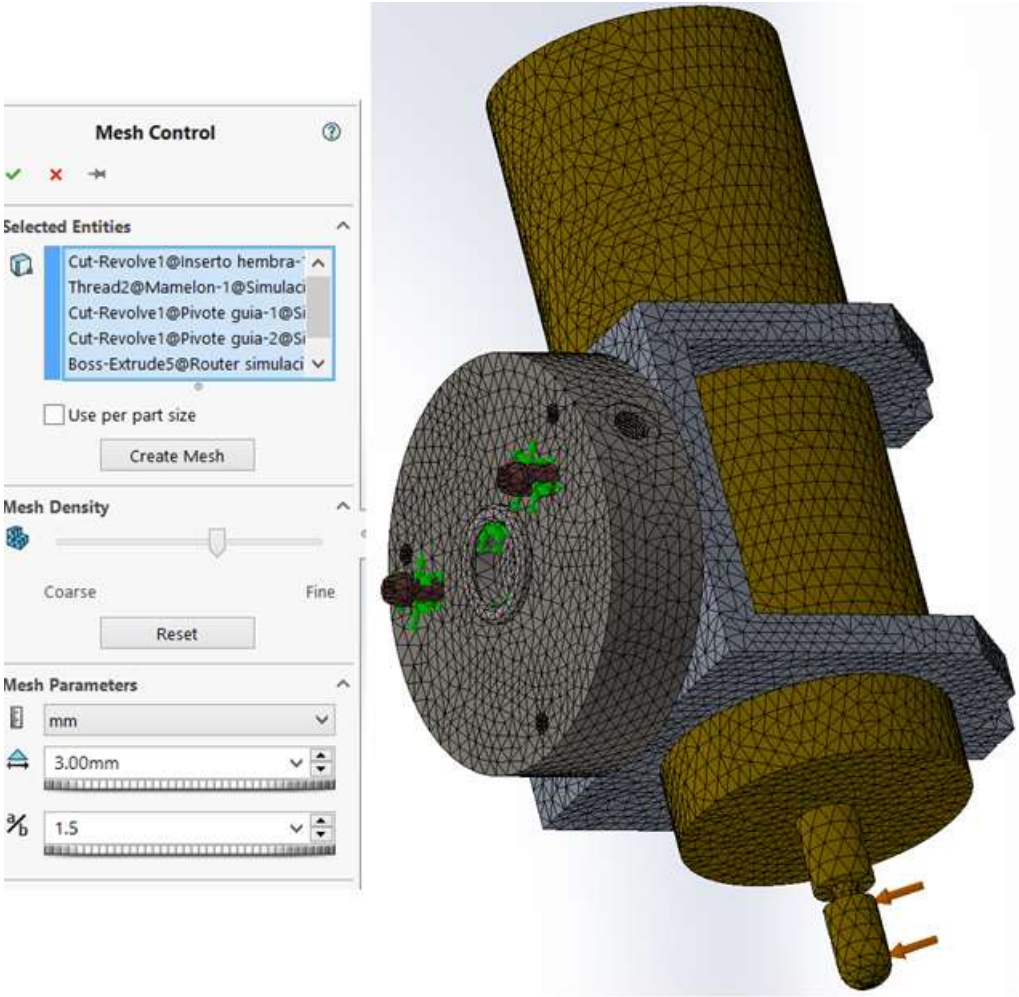


Figura 6.3 Mallado para la carga de fresado.

6.3.2 Análisis de tensión y deformación por fresado.

El análisis de tensión lineal calcula las tensiones y deformaciones de las geometrías basándose en tres supuestos básicos:

- La pieza o ensamblaje con carga se deforma con pequeños giros y desplazamientos.
- La carga del producto es estática (sin inercia) y constante a lo largo del tiempo.
- El material tiene una relación tensión-deformación constante (ley de Hooke).

La figura 6.4 muestra los resultados del estudio en régimen nominal (estático) cuando el sistema se encuentra sometido a carga de fresado. Muestra el máximo valor de esfuerzo por acción de la carga. Nótese la ubicación del valor máximo, debido a la carga, el punto de esfuerzo máximo se sitúa en el vástago de la fresa, en este caso con un diámetro aproximado de 6 milímetros.

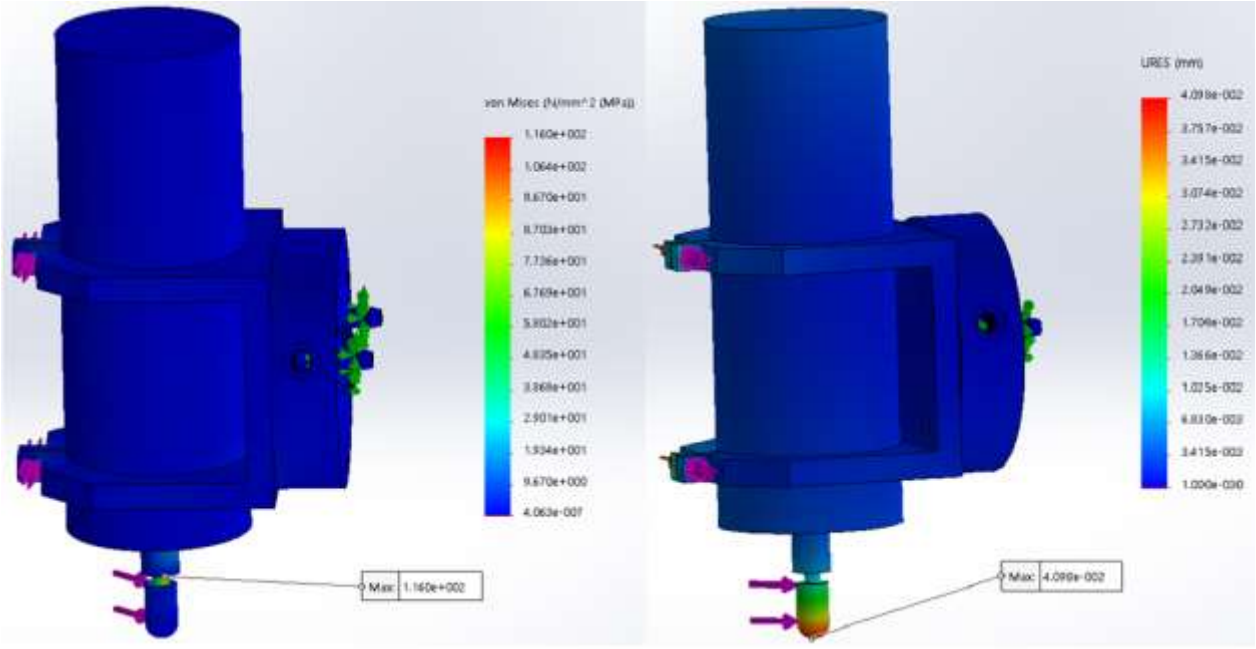


Figura 6.4 Esfuerzo máximo y desplazamiento máximo por acción de la carga de fresado.

6.3.2.1 Vista de sección de trazado ISO (*ISO Clipping*)

Es necesario recordar que típicamente se está haciendo un análisis lineal, lo que sucede más allá, no es representativo de lo que está sucediendo en realidad. Esta propiedad en SolidWorks permite visualizar superficies de trazo para valores determinados conforme se presentan las afectaciones elemento por elemento del ensamble. *Iso clipping* funciona como un filtro por encima o por debajo de los puntos seleccionados. La figura 6.4.1 muestra las primeras afectaciones en esfuerzo de estrés a un valor mínimo, indica a su vez el volumen involucrado en la afectación de la carga.

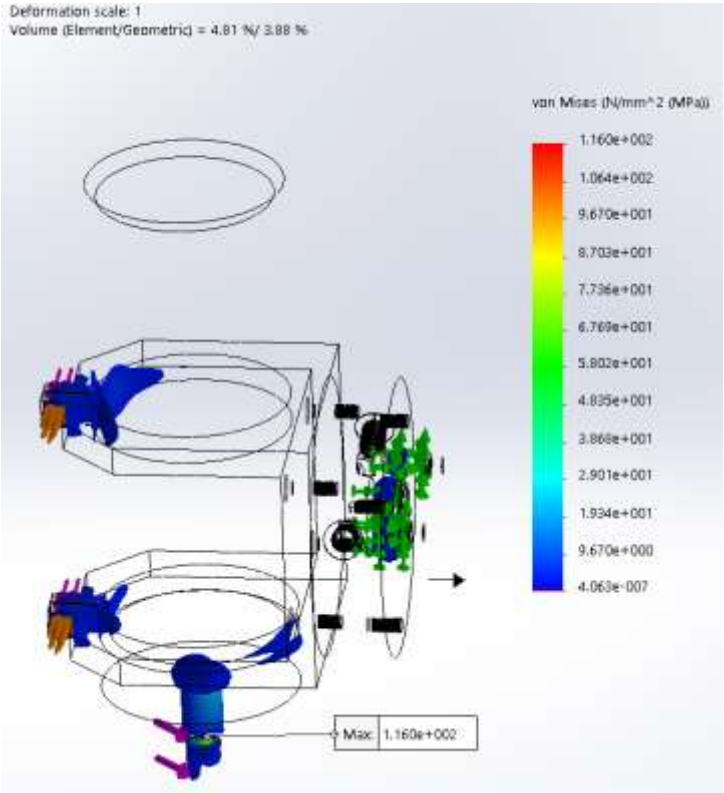


Figura 6.4.1 Vista de sección de trazado ISO por carga de fresado.

6.3.2.2 Fuerza de normal y fuerza de fricción.

La carga que se produce por acción del corte en la fresadora de superficie frontal, actúa paulatinamente sobre los subsiguientes elementos que forman el conjunto, incluso el brazo completo del robot hasta la cimentación misma. Se muestran las afectaciones iniciales al ensamble del sujetador. La figura 6.4.2 muestra las fuerzas normales y fuerzas de fricción en las superficies en contacto del sujetador y al intercambiador.

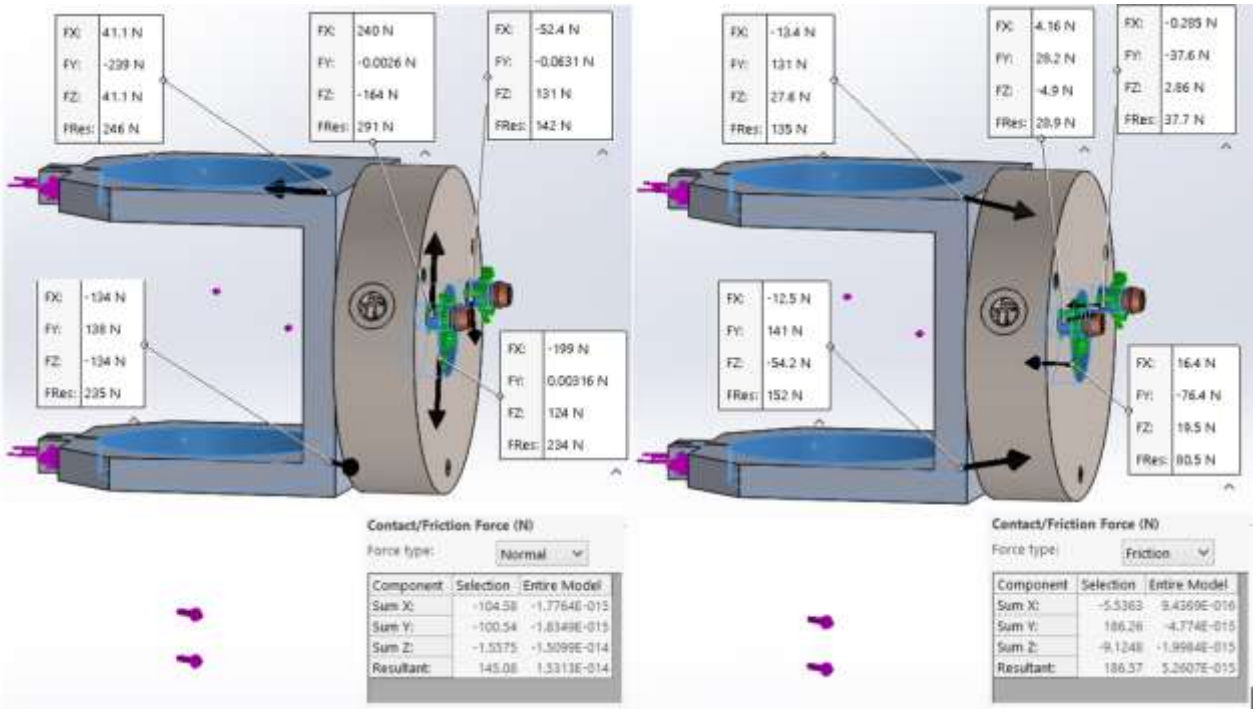


Figura 6.4.2 Fuerzas de afectación normales y de fricción para el conjunto por fresado.

6.3.3 Factor de seguridad por fresado

El Asistente para el factor de seguridad permite evaluar el factor de seguridad en cada nodo del modelo, según un criterio de error. Las regiones con un valor de factor de seguridad inferior a 1 se muestran en rojo (regiones no seguras). Las regiones en azul indican regiones seguras. Los factores de seguridad altos en una región indican que puede ahorrar material en dicha región. Muchos códigos requieren un factor de seguridad mínimo entre 1.5 y 3.0. Un factor de seguridad inferior a 1.0 en una ubicación significa, que el material que se encuentra en esa ubicación ha fallado. Un factor de seguridad de 1.0 en una ubicación significa que el material que se encuentra en esa ubicación ha empezado a fallar. Un factor de seguridad superior a 1.0 en una ubicación significa que el material que se encuentra en esa ubicación es seguro [35].

Tras haber llevado a cabo el estudio estático (figura 6.4), se calcula el factor de seguridad del modelo. El criterio de tensión normal máxima, también conocido como criterio de Coulomb, se basa en la teoría de tensión normal máxima. Según esta teoría, la falla se produce cuando la tensión principal máxima alcanza el límite de ruptura del material ante una tensión simple.Este criterio se utiliza para materiales frágiles (que es el caso de la fresa, 235 BHN), con diferentes propiedades de tracción y compresión,

predice el fracaso cuando la combinación de la tensión principal máxima y mínima supera sus límites de esfuerzos respectivos.

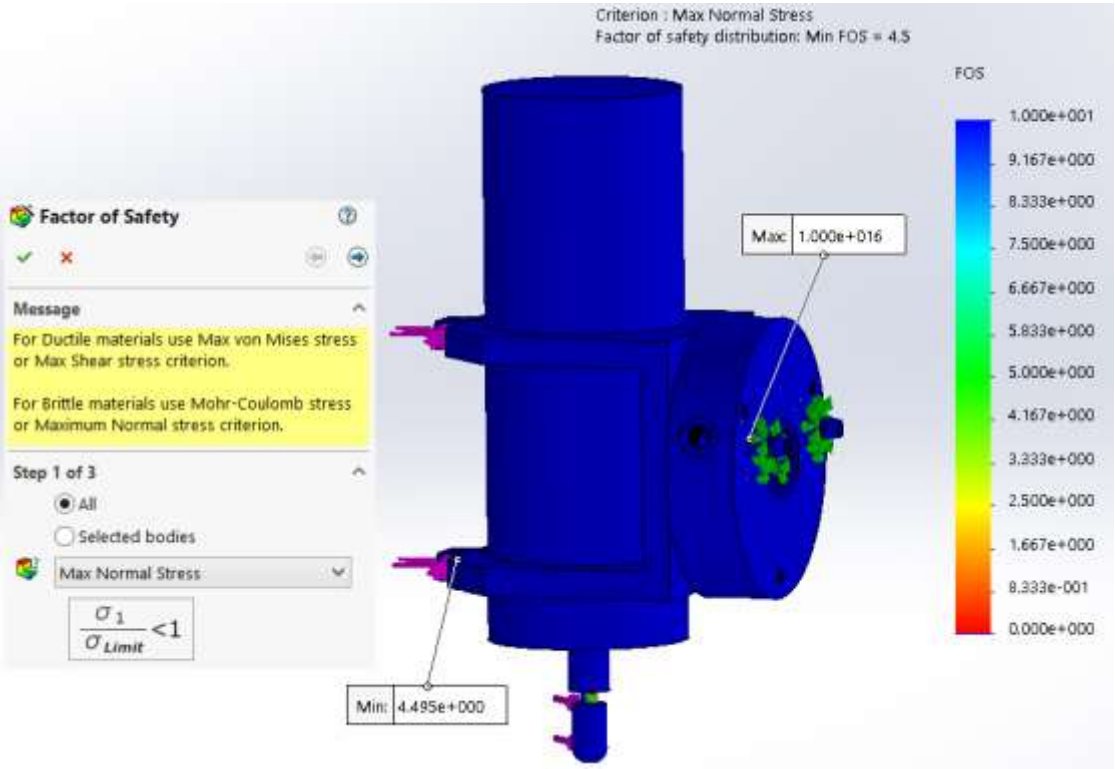


Figura 6.5 Factor de seguridad, para el máximo esfuerzo normal por fresado.

Se muestra análogamente el estudio de elementos finitos correspondiente a la operación de taladrado, figuras 6.6, 6.7, 6.7.1, 6.7.2 y 6.8

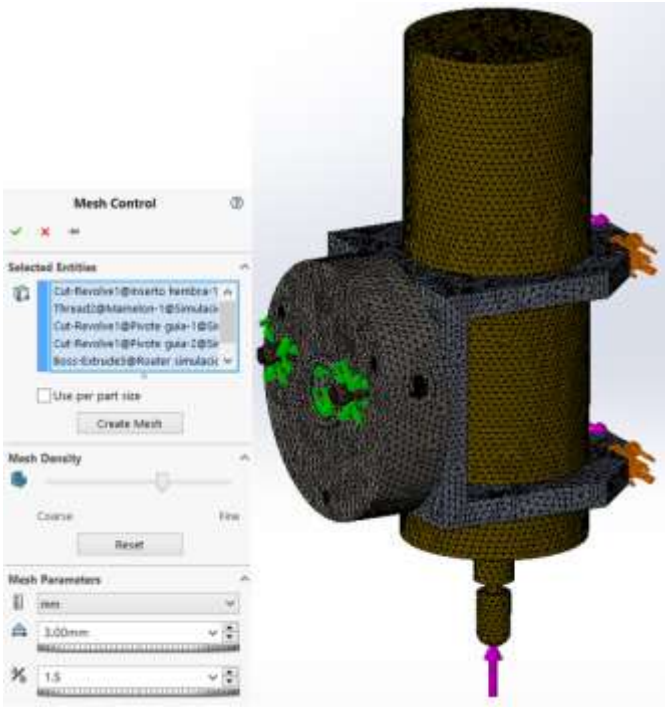


Figura 6.6 Mallado para la carga de taladrado.

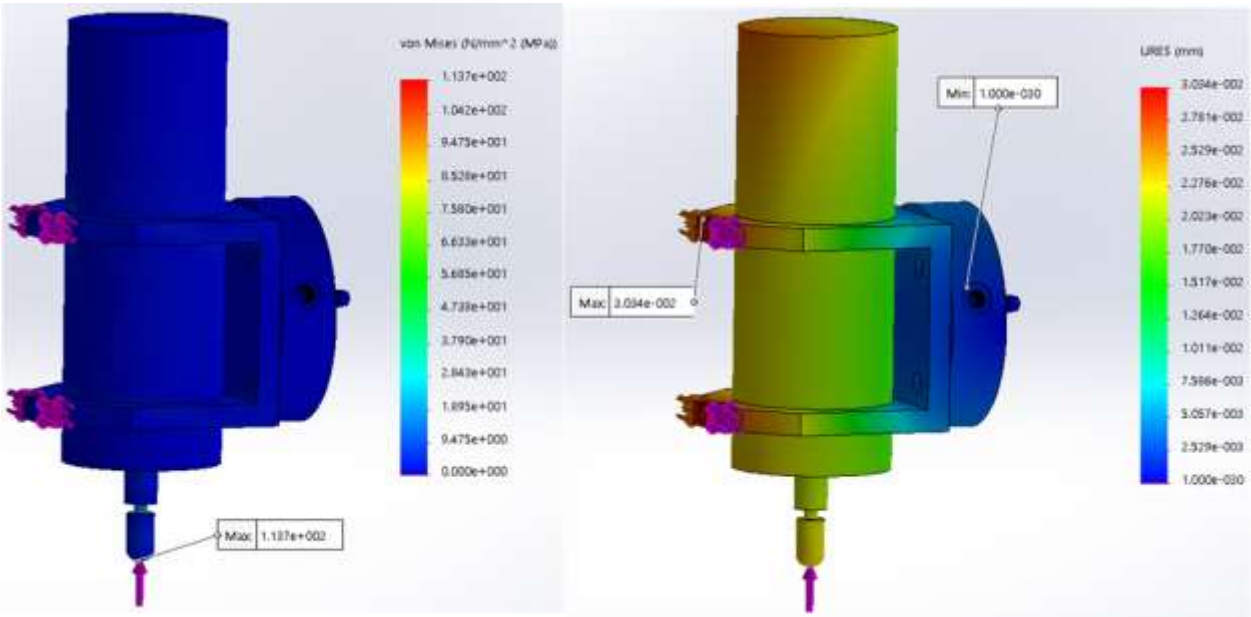


Figura 6.7 Esfuerzo máximo y desplazamiento máximo por acción de la carga de taladrado.

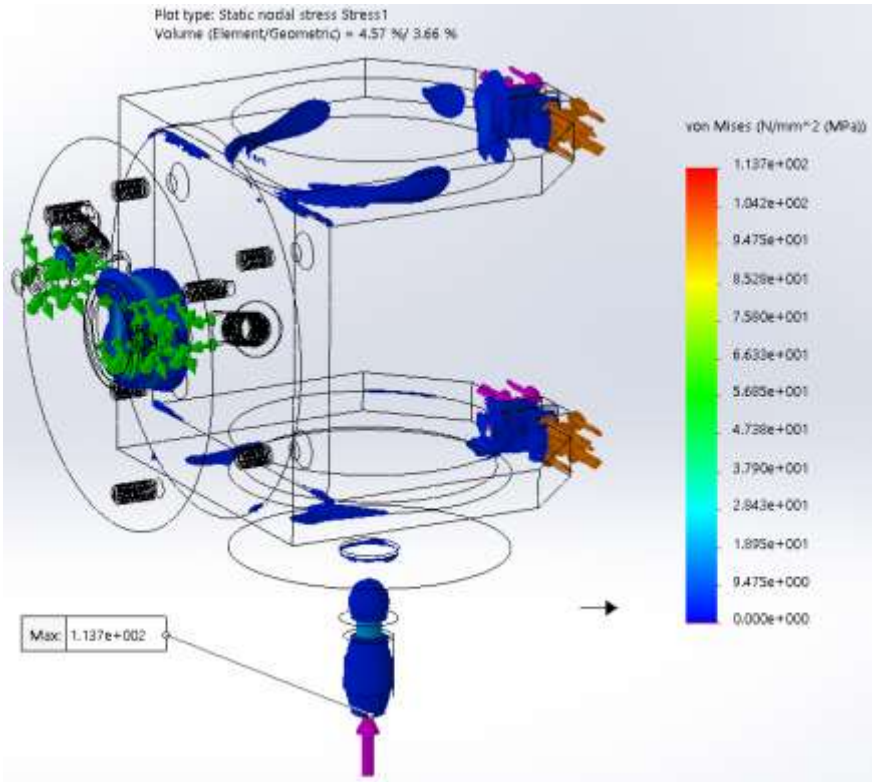


Figura 6.7.1 Vista de sección de trazado ISO por carga de taladrado.

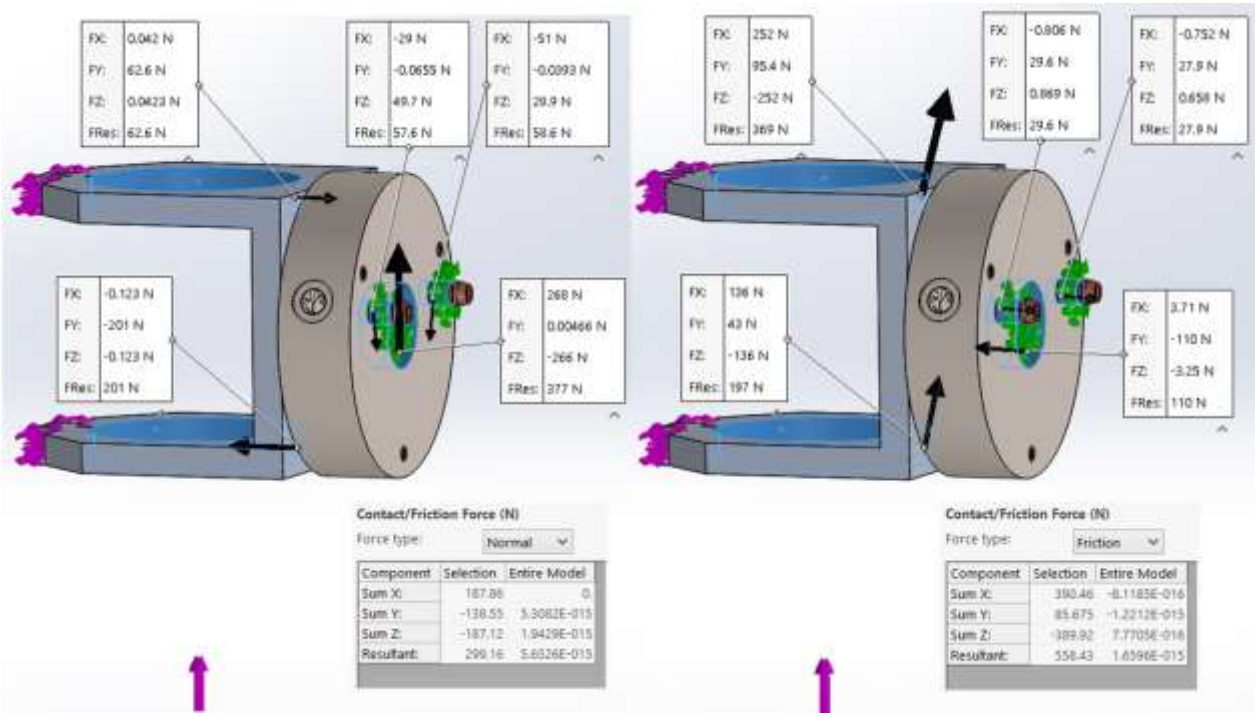


Figura 6.7.2 Fuerzas de afectación normales y de fricción para el conjunto por taladrado.

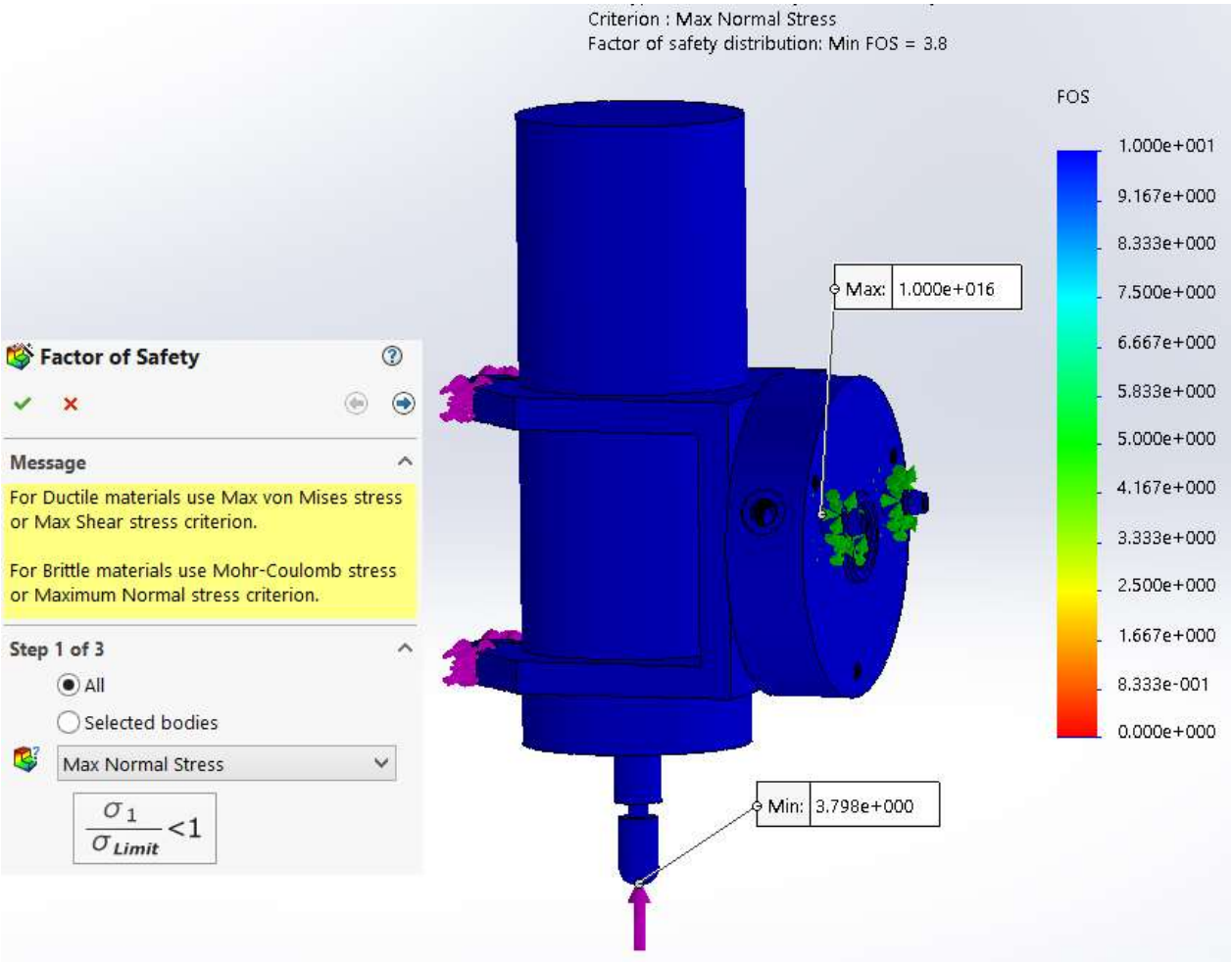


Figura 6.8 Factor de seguridad mínimo, para el máximo esfuerzo normal por taladrado.

6.4 SIMULACIÓN DEL ELEMENTO DE SUJECIÓN AL *ROUTER* DENOMINADO MAMELÓN

6.4.1 Tornillo de apriete

La figura 6.9, muestra el detalle del tornillo de apriete en la sujeción del *router* a la base de sujeción y soporte.

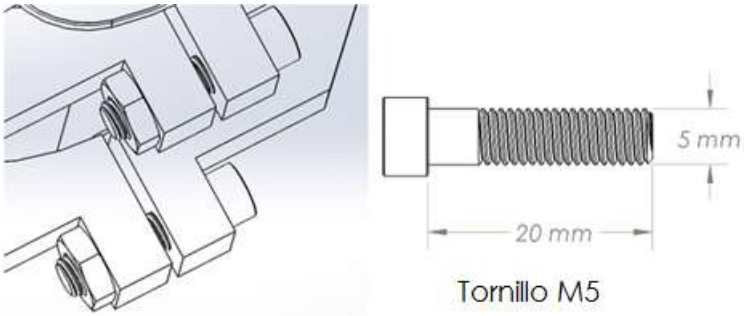


Figura 6.9 Vista del tornillo de apriete al *router*.

En la industria y en general en la mayoría de las aplicaciones prácticas, es poco común el uso de elementos roscados sin precarga, de tal manera que las existentes (como es nuestro caso), se limitan a cargas axiales de tracción estáticas. En tales condiciones de carga los elementos roscados pueden fallar por:

- rotura del vástago a través de la rosca o debajo de la cabeza del tornillo.
- aplastamiento en, los filetes del tornillo y de la tuerca.
- corte en la cabeza del tornillo [41].

Considerando el primer concepto de posible falla, por rotura del vástago en la rosca (en el filete adyacente a la tuerca), o debajo de la cabeza. Los esfuerzos normales de tracción se encuentran en el eje x, dichos esfuerzos obedecen a la ecuación:

$$\sigma_x = \frac{F_t}{A_t}$$

Donde σ_x = esfuerzo normal de tracción, F_t = carga axial de tracción, A_t = Área de fuerza de trabajo.

La ecuación para áreas de esfuerzo de trabajo para los perfiles de rosca M se definen:

$$A_t = (0.7854) * (d - 0.9382p)^2$$

Donde: d = Diámetro nominal del tornillo, p = paso en milímetros.

Para el segundo concepto, debido a la carga axial Ft, se inducen esfuerzos cortantes sobre la rosca en contacto, pueden inducir a una falla por corte a través de la superficie cilíndrica de diámetros iguales al diámetro nominal y raíz de las roscas [41].

Las ecuaciones de esfuerzo cortante:

Para el tornillo y tuerca: $$\tau_{yx} = \frac{2F_t}{\pi d_r H}$$

Donde: τ_{yx} = Esfuerzo cortante sobre la rosca del tornillo y tuerca, actuando en planos cuyas normales son paralelas al eje y, d = Diámetro nominal del tornillo (para calcular la tuerca), H = Altura de la tuerca o elemento que en una aplicación hace las veces de ella, d_r = Diámetro de raíz del tornillo.

Además, existen esfuerzos normales de aplastamiento actuando en dirección paralela al eje axial, uno en la rosca de tornillo y otro en la rosca de la tuerca o elemento que puedan hacer las veces de ella, que poseen igual magnitud y cuyo valor medio se obtiene:

$$\sigma_{ap} = \frac{4F_t p}{\pi(d^2 - d_r^2)H}$$

Donde: σ_{ap} =Esfuerzo por contacto directo entre las roscas del tornillo y tuerca o elemento que hace las veces de ella.

Para la precarga. Se toma en cuenta que para cargas estáticas se utiliza una precarga que genera un esfuerzo tan elevado como 90% de la resistencia de prueba. Para cargas variables (FATIGA), se considerarán valores de precarga de 75 % o más de la resistencia de prueba. Así fueron establecidos los límites de la carga axial en el tornillo.

$$0.75F_{pr} \leq F_i \leq 0.9F_{pr}$$

A partir del esfuerzo límite mínimo a la tracción, se determina la carga de prueba F_{pr}, valor que expresa la máxima carga que un elemento roscado es capaz de resistir, y se obtiene de:

$$F_{pr} = \sigma_{pr} A_t$$

La tabla 6.7 Muestra las características de algunas roscas métricas en dimensión y valores de resistencia.

Tabla 6.7 Rosca métrica (SI) (Fuente: [41]).

Número de Clase	Rango del diámetro [mm]	Resistencia de prueba mínima [MPa]	Resistencia elástica mínima [MPa]	Resistencia a la tracción mínima [MPa]	Material
4.6	M5-M36	225	240	400	Acero de mediano o bajo carbono
4.8	M1.6-M16	310	340	420	Acero de mediano o bajo carbono
5.8	M5-M24	380	420	520	Acero de mediano o bajo carbono

	SERIE DE PASO BASTO (MC)			SERIE DE PASO FINO (MF)			
DIAMETRO NOMINAL d (mm)	PASO P (mm)	AREA DE ESFUERZO DE TRACION A_T (mm²)	AREA DE RAIZ A_r (mm²)	PASO P (mm)	AREA DE ESFUERZO DE TRACCION A_T (mm²)	AREA DE RAIZ A_r (mm²)	ALTURA DE LA TUERCA H (mm)
4	0.70	8.78	7.75				3.0
5	0.80	14.2	12.7				4.0
6	1.00	20.1	17.9				5.0
8	1.25	36.6	32.8	1.00	39.2	36.0	6.5

La tabla 6.8 muestra los cálculos correspondientes del tornillo de sujeción que se utiliza en el mamelón que sujeta el *router*.

Tabla 6.8 Valor de carga por aplicar y el valor de esfuerzo obtenido al tornillo de 5 mm.

PARAMETROS DE CARGA Y ESFUERZO DEL TORNILLO M5	DATOS Y CÁLCULOS	UNIDADES	FÓRMULAS
Diámetro nominal del tornillo (d)	5	mm	Dato
Paso del tronillo (p)	0.08	mm	Dato
Esfuerzo de prueba mínimo	225	N/mm2	Dato
Altura de la tuerca (H)	7	mm	Dato
Diámetro de raíz del tornillo (dr)	4.92	mm	$d_r = \sqrt{\frac{4A_r}{\pi}}$
Área de fuerza de trabajo (At)	19.05	mm2	$A_t = (0.7854) * (d - 0.9382p)^2$
Máxima Carga (Fpr)	4286	N	$F_{pr} = \sigma_{pr} A_t$
Carga aplicable (Ft)	300	N	Dato
Esfuerzo axial (σx)	15.75	N/mm2	$\sigma_x = \frac{F_t}{A_t}$
Esfuerzo cortante (τyx)	5.54	N/mm2	$\tau_{yx} = \frac{2F_t}{\pi d_r H}$
Esfuerzo de aplastamiento (σap)	5.86	N/mm2	$\sigma_{ap} = \frac{4F_t p}{\pi(d^2 - d_r^2)H}$

6.4.2 Malla para el sujetador del *router* (Mamelón)

La figura 6.10 está basada en la curvatura crea más elementos en zonas de mayor curvatura sin necesidad de controlar la malla, admite un mallado multiproceso para piezas de ensamblaje y sólidos.

Los elementos parabólicos trazan la geometría curva de manera precisa de los elementos lineales del mismo tamaño, cuando la calidad de malla es alta, establecen el número de elementos que se utilizarán para comprobar el nivel de distorsión de los elementos nivel superior.

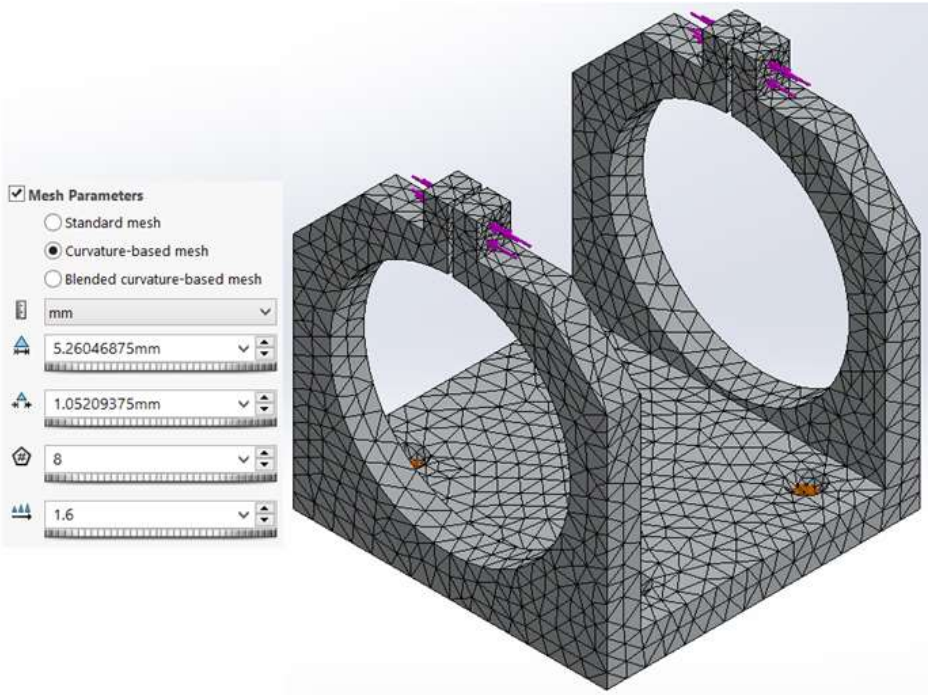


Figura 6.10 Mallado fino basado en curvatura para el mamelón.

6.4.3 Análisis de tensión y deformación para el mamelón.

El análisis de tensión lineal calcula las tensiones y deformaciones de las geometrías basándose en tres supuestos básicos:

- La pieza o ensamblaje con carga se deforma con pequeños giros y desplazamientos.
- La carga del producto es estática (sin inercia) y constante a lo largo del tiempo.

- El material tiene una relación tensión-deformación constante (ley de Hooke).

La figura 6.11 muestra los resultados del estudio de estático cuando el sistema se encuentra sometido a carga con el apriete del tornillo (se estimó un valor de 300N). Muestra el máximo valor de esfuerzo por acción de la carga. Nótese en este caso que debido a la carga del tornillo al apriete, el punto de esfuerzo máximo se sitúa en la sección transversal de la pieza de sujeción donde el área transversal se considera la menor, y es precisamente esta la que se deforma para dar el apriete al *router*.

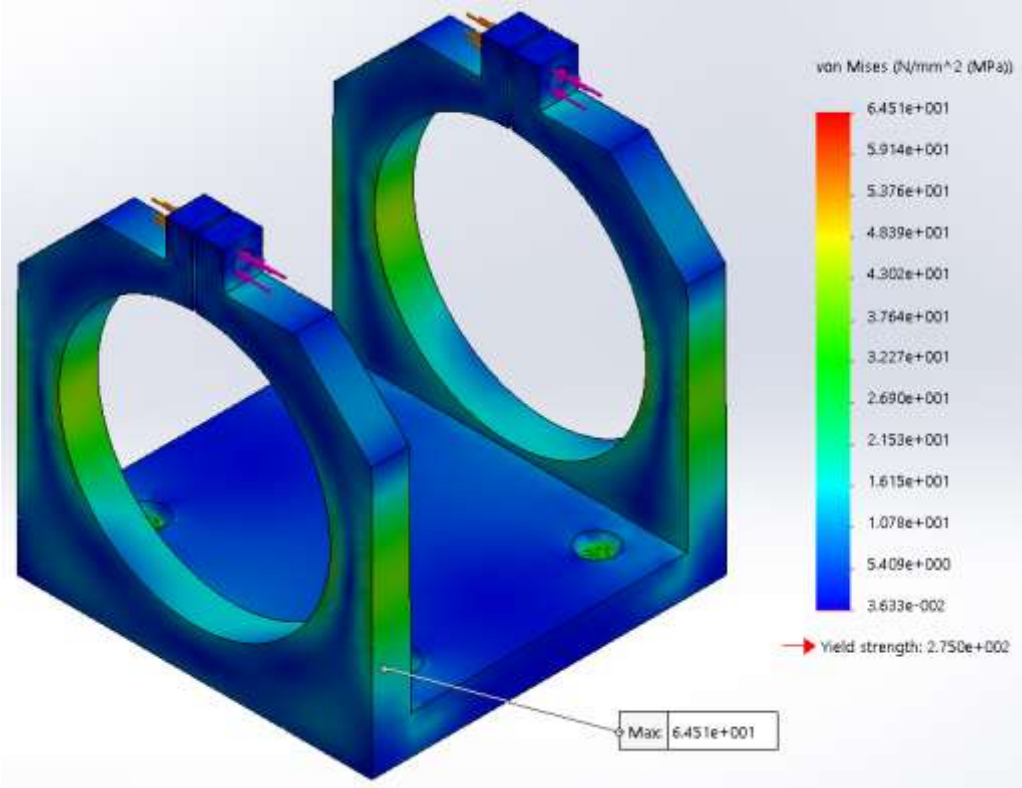


Figura 6.11 Esfuerzo máximo por acción de la carga de 300 Newtons.

Nótese en la figura 6.12 la máxima deformación en milímetros de los elementos de agarre al *router*, por acción de la carga.

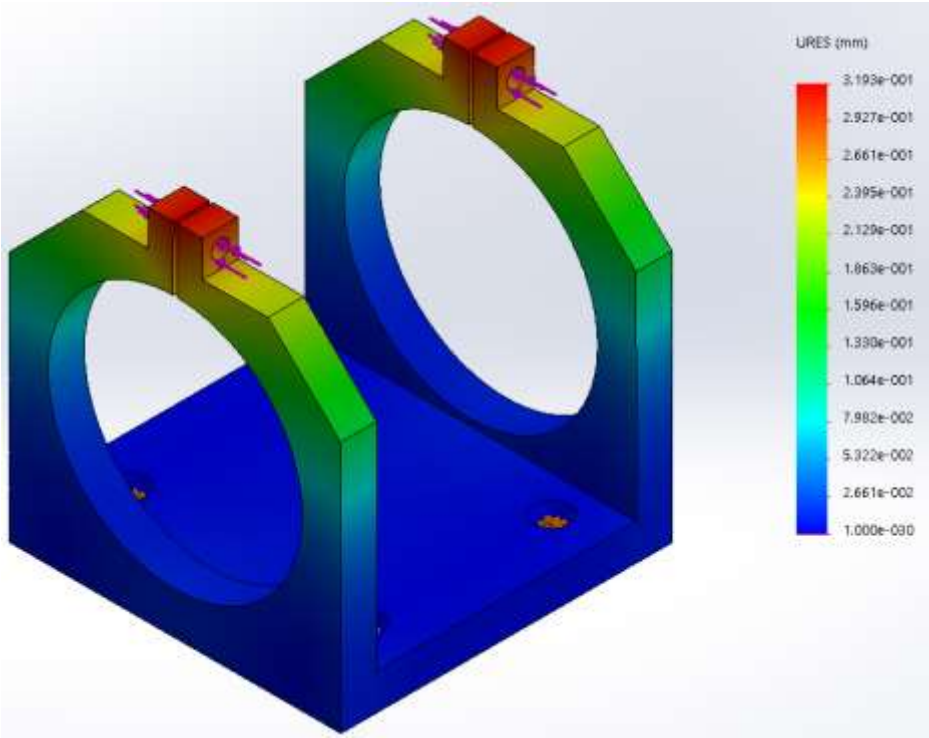


Figura 6.12 Deformación de las paredes de agarre y apriete al *router*.

La figura 6.12.1 Muestra la vista de sección de trazado ISO en el análisis de la deformación correspondiente al apriete desde 31 centésimas de milímetro y hasta 13 centésimas de milímetro.

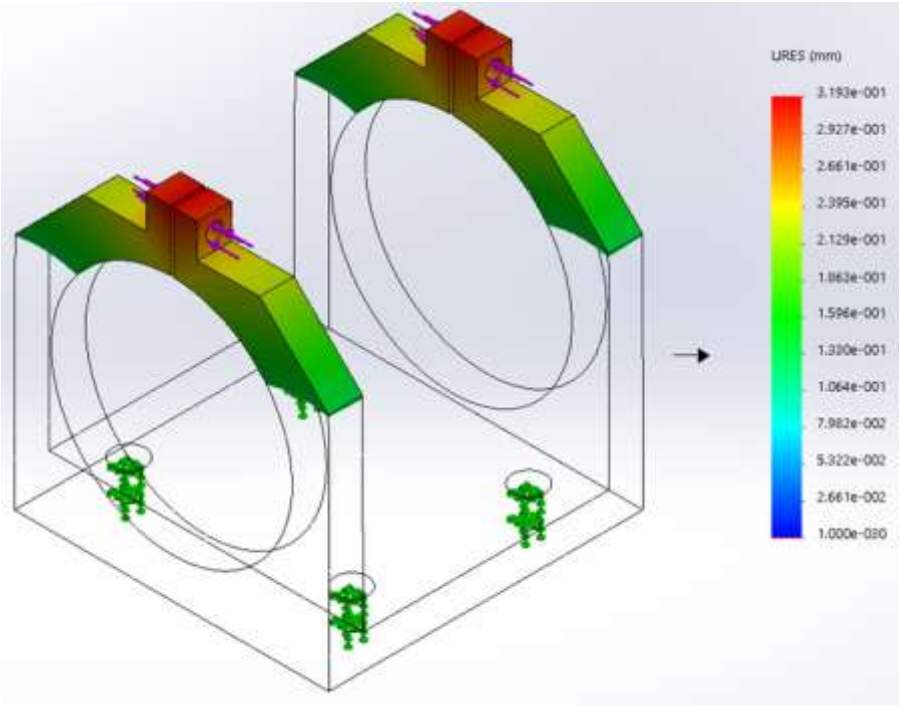


Figura 6.12.1 Vista de sección de trazado ISO para deformación del mamelón.

6.4.4 Factor de seguridad para el mamelón.

El factor de seguridad se evaluó con valores entre 1 y 10, un valor de factor de seguridad inferior a 1 se muestra en rojo implica que son regiones no seguras. Las regiones en azul indican regiones seguras. Los factores de seguridad altos en una región indican que puede ahorrar material. Un factor de seguridad inferior a 1.0 en una ubicación significa, que el material en esa ubicación ha fallado. Un factor de seguridad de 1.0 significa que el material ha empezado a fallar. Un factor de seguridad superior a 1.0 significa que esa ubicación es segura [35].

Tras haber llevado a cabo un estudio estático (figura 6.13), se puede calcular el factor de seguridad del modelo. El criterio de máxima tensión de Von Mises se basa en la teoría de Von Mises-Hencky, también conocida como teoría de la energía de cortadura o teoría de la energía de distorsión máxima. La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de Von Mises es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico se utiliza como el límite de tensión [35].

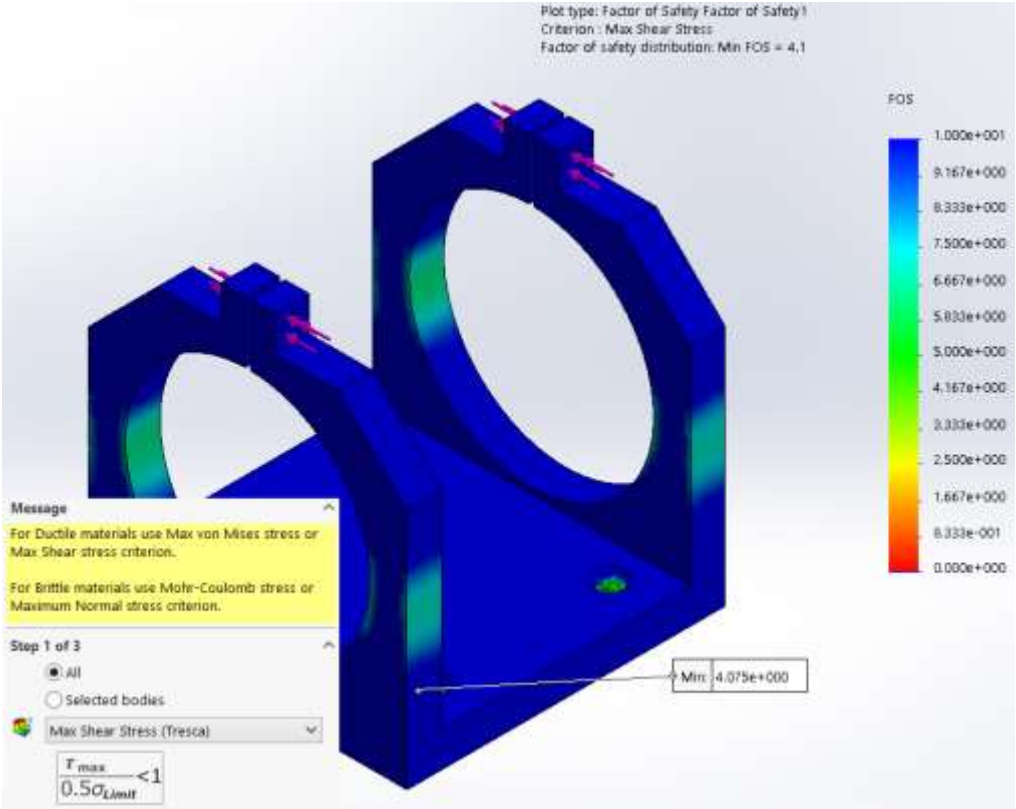


Figura 6.13 Factor de seguridad para el elemento mamelón en sujeción para el *router*.

6.5 AJUSTES Y TOLERANCIAS

Para el montaje del inserto de la base hembra y la base de acero inoxidable de la base hembra, el sistema de unión entre ambas partes deberá ser permanente. Según el tipo de superficies, se tendrán ajustes cilíndricos, planos, etc., y según el número de piezas se tendrán: ajuste sencillo o múltiple la figura 6.14 muestra los ajustes sencillos (nuestro caso) y múltiple [42].

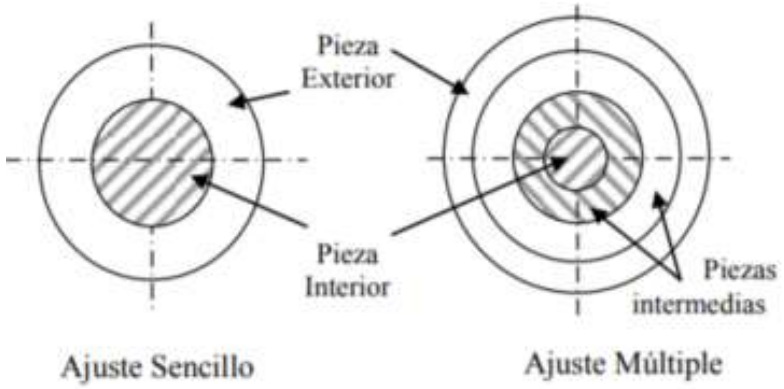


Figura 6.14 Ajustes cilíndricos (Fuente: [42]).

El apriete sucede de acuerdo con el destino o finalidad que ha de cumplir el ajuste que, por ejemplo, en el caso del ajuste cilíndrico la medida máxima del agujero sea menor que la medida mínima del eje antes del montaje. Por ello el montaje deberá realizarse a presión, o por temperatura (calentando la pieza exterior o enfriando la interior), dando lugar a una presión radial entre las dos piezas, luego de producirse el montaje. En este caso, se dice que hay apriete entre ambas piezas. Apriete, es la diferencia entre las medidas (reales) interior de la pieza exterior y exterior de la pieza interior cuando dicha diferencia es negativa, como se muestra en la figura 6.15 [42].

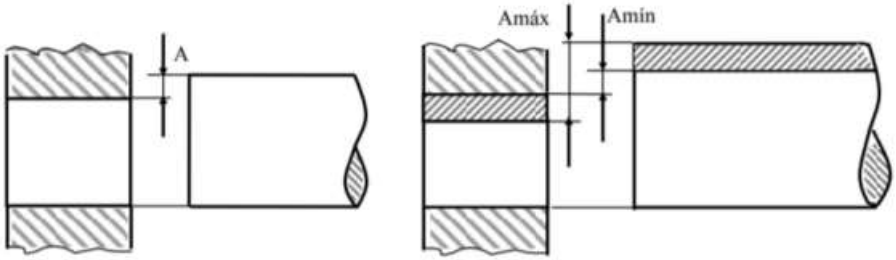


Figura 6.15 Ajuste apretado. (Fuente: [42]).

Dadas las dos medidas límites para cada una de las piezas, el apriete oscilará entre dos valores extremos.

Para el Apriete máximo ($A_{máx}$), (figura 6.15 izquierda): Es la diferencia entre la medida mínima del agujero y la medida máxima del eje, dicha diferencia es negativa.

$$A_{max} = D_{minA} - D_{maxE} = -J_{min}$$

Para el apriete mínimo (Amín), (figura 6.15 derecha): Es la diferencia entre la medida máxima del agujero y la medida mínima del eje, dicha diferencia es negativa.

$$A_{min} = D_{maxA} - D_{minE} = -J_{max}$$

La figura 6.16 muestra las piezas de acero involucradas a montaje con apriete

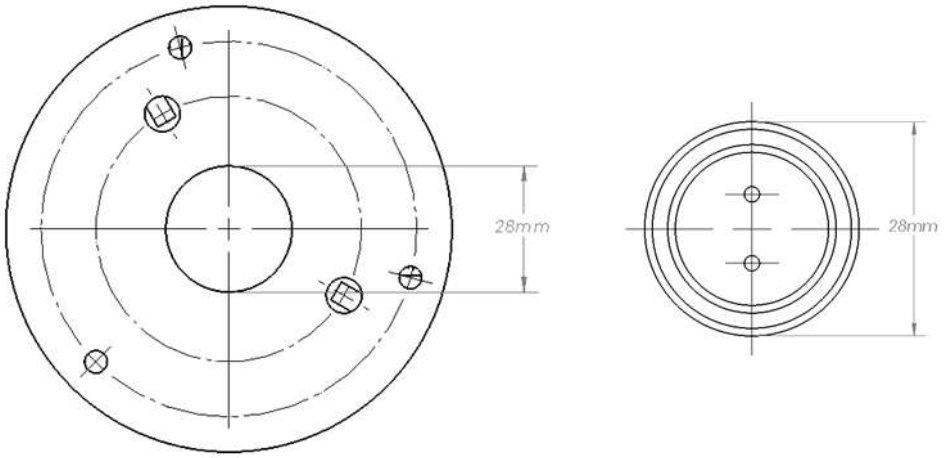


Figura 6.16 Base hembra e inserto hembra con medidas nominales de diámetro.

De tal manera que en la propuesta de maquinado de la pieza exterior (agujero):

D_{max} = 28.030 mm

D_{min} = 28.000 mm

Y en la propuesta de maquinado de la pieza interior (eje)

D_{max} = 28.075 mm

D_{min} = 28.050 mm

Entonces:

$$A_{max} = 28.000 - 28.075 = -0.075\ mm = -0.75\ \mu m\ (0.002")$$

$$A_{min} = 28.030 - 28.050 = -0.020\ mm = -0.20 \mu m\ (0.0007")$$

CAPÍTULO 7. RESULTADOS

7.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el espacio de trabajo predeterminado (figura 3.2) y tomando en cuenta que el *router* en sus dimensiones resta aproximadamente 125 mm del total de la capacidad de movimiento del FANUC ARC Mate 120ic. El espacio de trabajo resultante se encuentra dentro de la dimensión básica máxima de operación. Véase Figura 7.1.

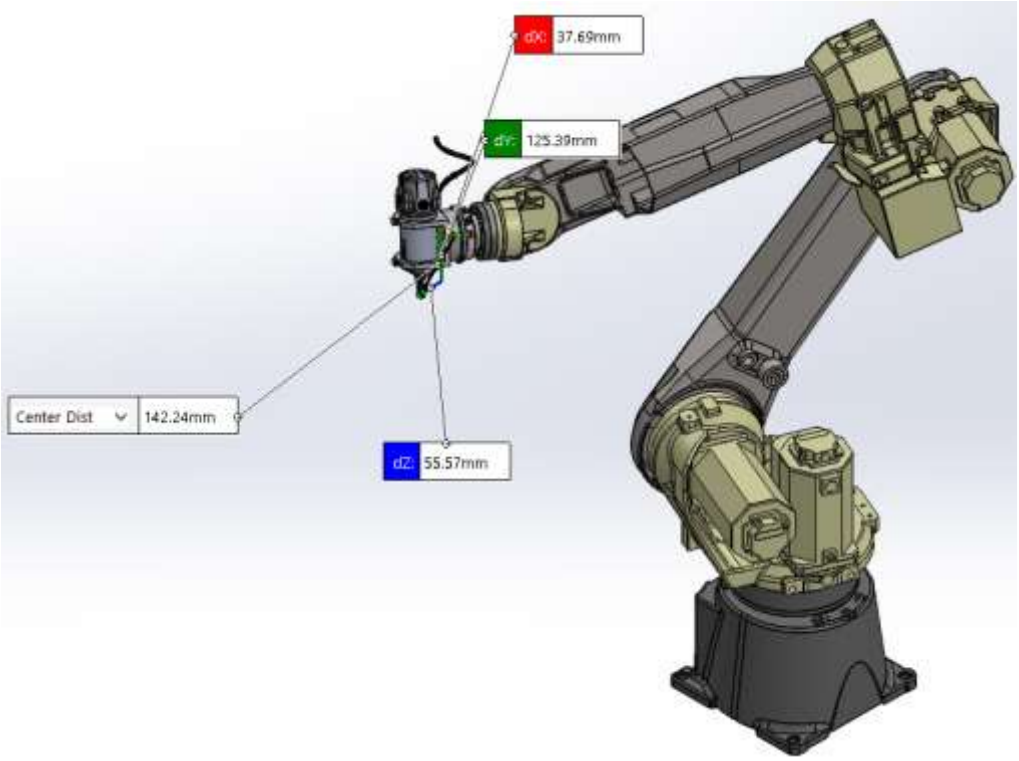


Figura 7.1 Montaje total del dispositivo de maquinado mostrando la distancia máxima de operación al brazo.

Es suficiente para soportar el peso del adaptador del router, tomando en cuenta la masa del router, = 1.8 kg, del mamelón = 0.93 kg, del ensamble hembra del cambiador = 1.5 kg y del ensamble macho del cambiador = 1.5 kg, La capacidad de carga del brazo robótico respecto a las cargas de funcionamiento. Se espera que la fuerza de corte sea capaz de manipularlas debido a que el esfuerzo máximo se presenta en el vástago de la fresa. Las cargas de fresado y taladrado, representadas en kilogramos en combinación de ambas (tablas 6.1 y 6.5) suman un total de 24.5 + 55.9 = 80.4 kg que

deben ser soportada por parte del brazo robótico en el supuesto de un régimen critico de carga como la combinación de ambas operaciones en el mismo tiempo y en las condiciones límite de operación donde el *router* está a 90 grados en fresado y taladrado.

La tabla 7.1 muestra el cambio de la profundidad de corte y el cambio de diámetro en la herramienta, con esto se logra una reducción de la fuerza de corte relacionada con la capacidad de carga del brazo robótico, con estas manipulaciones se estima alrededor de 28 kgf en condiciones máximas combinadas.

Nótese en la tabla 7.1y 7.2 como con un simple cambio en la profundidad de corte y el diámetro de la herramienta minimiza la fuerza de corte, la reacción para el brazo robótico se considera en condiciones aceptables de operación y funcionamiento en cuanto a la capacidad de carga, soporta este caso alrededor de 28 kg en condiciones máximas y combinadas.

Tabla 7.1 Variación de fuerzas de frezado

PARAMETROS DE CORTE PARA FRESADO	DATOS Y CÁLCULOS	UNIDADES	FÓRMULAS
Velocidad de corte (Vc)	300	m/min	Dato
Diámetro de la fresa (Dc)	12.50	mm	Dato
Avance por diente (fz)	0.28	mm	Dato
Numero de dientes de la fresa (Zc)	3		Dato
Ángulo de posición (Kr)	90	°	Dato
Fuerza de corte especifica para un espesor de viruta de 1 mm (kc1)	450	N/mm2	Dato
Factor de compensación del grosor de la viruta (mc)	0.18		Dato
Ángulo de desprendimiento de la plaquita (Yo)	0	°	Dato
Profundidad de corte axial (ap)	1	mm	Dato
Velocidad del Husillo (n)	7640	rpm	$n = \frac{V_c \ x \ 1000}{\pi \ x \ D_c}$
Avance del brazo (Vf)	6418	mm/min	$V_f = f_z \ x \ z_c \ x \ n$
Profundidad de corte radial (ae)	9.38	mm	$a_e = \frac{3}{4} \ x \ D_c$
Espesor medio de la Viruta (hm)	0.20	mm	$h_m = \frac{360 \ x \ \sin(K_r) \ x \ a_e \ x \ f_z}{\pi \ x \ D_c \ arcos(1 - \frac{2 \ x \ a_e}{D_c})}$
Fuerza de corte especifica (kc)	600.92	N/mm2	$k_c = k_{c1} \ x \ h_m^{-mc} \ x \ \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$
Potencia Neta (Pc)	0.60	kW	$P_c = \frac{a_p \ x \ a_e \ x \ V_f \ x \ k_c}{60 \ x \ 10^6}$
Par de apriete (Mc)	0.75	Nm	$M_c = \frac{P_c \ x \ 30 \ x \ 10^3}{\pi \ x \ n}$
Área de corte (Ac)	0.20	mm2	$A_c = a_p \ x \ h_m$
Fuerza de corte (Fc)	**120.51**	N	$F_c = k_c \ x \ A_c$

Tabla 7.2 Variación de fueras de taladrado.

PARAMETROS DE CORTE PARA TALADRADO	DATOS Y CÁLCULOS	UNIDADES	FÓRMULAS
Velocidad de corte (Vc)	160	m/min	Dato
Diámetro de la broca (Dc)	4.17	mm	Dato
Avance por revolución (fn)	0.125	mm/rev	Dato
Numero de dientes de la fresa (Zc)	3		Dato
Ángulo de posición (Kr)	90.00	°	Dato
Fuerza de corte especifica para un espesor de viruta de 1 mm (kc1)	450	N/mm2	Dato
Factor de compensación del grosor de la viruta (mc)	0.18		Dato
Ángulo de desprendimiento de la plaquita (Yo)	0	°	Dato
Velocidad del Husillo (n)	12214	rpm	$n = \frac{V_c \, x \, 1000}{\pi \, x \, D_c}$
Avance por diente (fz)	0.04	mm	$f_z = \frac{f_n}{z_c}$
Fuerza de corte especifica (kc)	797.35	N/mm2	$k_c = k_{c1} \, x [f_z \, x \, \sin(K_r)]^{-mc} \, x \left(1 - \frac{\gamma_0}{100}\right)$
Consumo de potencia (Pc)	0.28	kW	$P_c = \frac{f_n \, x \, V_c \, x \, D_c \, x \, k_c}{240 \, x \, 10^3}$
Fuerza de avance (Ff)	**103.91**	N	$F_f = 0.5 \, x \, k_c \, x \, \frac{D_c}{2} \, x \, f_n \, x \, \sin(K_r)$
Par de apriete (Mc)	0.22	Nm	$M_c = \frac{P_c \, x \, 30 \, x \, 10^3}{\pi \, x \, n}$

Adicional a estos resultados las figuras 6.4.2 y 6.7.2 muestran las fuerzas normales y de fricción en afectación para cada elemento de sujeción y hasta el inicio del robot por acción del intercambiador debido a las fuerzas de corte.

La repetibilidad resulta bastante aceptable (tabla 3.2) para los trabajos iniciales en madera (con fines didácticos). La repetibilidad no resulta ser un parámetro crucial como en el caso de piezas de precisión sobre todo cuando se planea producir en una línea de manufactura.

Una vez maquinado y ensamblado la parte del cambiador denominado hembra se espera que acople con el macho existente de la forma en que lo hacen los que están funcionando. La aportación de no tener que adquirir el original desde el fabricante representa un ahorro substancial a la Universidad Tecnológica de Aguascalientes de aproximadamente $1,057.00 dólares (www.ebay.com). Nótese que para esta aplicación se omite el maquinado e instalación de los conectores eléctricos disponibles en la aplicación. El elemento denominado *router* cuenta con cable de alimentación eléctrico el cual, es posible, poner en operación desde el tablero principal de programación del robot.

Con ayuda del programa CES 2015, se logró la selección de materiales, en este caso para los elementos críticos y que habrán de ser maquinados de acuerdo con las especificaciones de diseño. Es importante resaltar que las especificaciones del material que ofrece el programa CES 2015, son bastante amplias debido a esto es posible encontrar materiales que cumplen con estos rangos de aplicación en el programa de SolidWorks, este permite asegurar el estudio de elemento finito al material y geometría designada. Las condiciones de selección figuras 5.1 a 5.8 muestran los elementos que se pueden incluir en un criterio de ingeniería en la selección adecuada del material.

Con la carga aplicada en el análisis se elementos finitos de 240 N se obtienen factores de seguridad superiores a 1 resultado de confiabilidad en la operación del conjunto en las múltiples condiciones. Nótese también que al cambio del diámetro de la herramienta de corte la máxima velocidad a desarrollar será de 30558 rpm (tabla 6.3) y que corresponde a las características del *router* (tabla 4.3) sin carga. Con respecto a todo el sistema de muñeca el factor de seguridad está por encima de 4.9 (Figura 6.8) por lo que se puede deducir que el conjunto no fallará.

Para el valor supuesto de 300 N de carga axial al tornillo M5 en el mamelón los valores de desplazamiento en la parte de apriete resulta en aproximadamente 0.5 mm (figura 6.12), con un factor de seguridad de 3.3. La elasticidad es suficiente para el apriete en la sujeción del *router*.

7.2 CONCLUSIONES

Con base al objetivo principal y objetivos específicos planteados en el capítulo I, la presente investigación y desarrollo se concluye que se cumplió en un 100%. Se logró el modelado del sujetador para la fresadora de superficie frontal adaptable al robot industrial FANUC ARC Mate 120ic. Desde este momento los fines didácticos que persigue el presente diseño, permitirá potenciar el trabajo en las asignaturas de diseño mecánico, diseño asistido por computadora, entre otras asignaturas de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes.

La modelación de los componentes mecánicos del sujetador para la fresadora de superficie frontal se logró al 100 %, con ayuda del software SolidWorks, permitió el análisis de los elementos finitos en el conjunto, deflexiones, desplazamientos y factor de seguridad mayores a 2 en todos los componentes dan buena confianza al sistema.

Se proporciona además los planos de construcción con base a la hipótesis planteada en el capítulo I y brinda facilidad para la construcción del sujetador.

De acuerdo con la disposición de los elementos que componen el sujetador y los métodos de unión, su diseño resulta practico y de fácil mantenimiento, ya que no será necesario el uso de herramienta especializada para el desmontaje de los elementos principales de operación y cambio en el caso de las herramientas de corte y la fresadora de superficie frontal (*Router*).

Con base a charlas informales con expertos en maquinado y manejo de materiales en ingeniería, el costo total de fabricación para el sujetador incluyendo la fresadora de superficie frontal (*router*) se estima de $ 7,698.00 MNX, incluye materiales y mano de obra al precio actual.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

1. Llevar a cabo la fabricación del prototipo de sujeción de la fresadora de superficie frontal, con la finalidad de hacer pruebas reales de operación.

2. Diseñar un sistema de aspiración para la viruta de madera durante el maquinado de la fresadora de superficie frontal, adaptable al brazo robótico con la finalidad de que siga su movimiento durante el maquinado.

3. Realizar programas para el robot que sigan parámetros y rutas de maquinado con fines didácticos.

4. Investigar el desarrollo de programas que permitan la generación directa de lenguajes de manufactura adaptables y leíbles por el controlador del robot FANUC ARC Mate 120ic.

7.4 RECOMENDACIONES

Una vez concluida la implementación del sujetador para la fresa frontal e instalada en el brazo robótico, será de vital importancia la colaboración de un experto en el manejo del robot y un experto en el manejo de las herramientas de corte en el caso supuesto de que se presente alguna desviación a lo proyectado, buscar la seguridad en todo momento del equipo y sobre todo del factor humano.

Deberá buscarse el mejor método de montaje y sujeción de las piezas a maquinar en madera y corroborar si la mesa que actualmente se utiliza en las operaciones actuales es adaptable al montaje de las piezas en bruto de madera a ser maquinadas.

Comenzar con programas sencillos de movimientos básicos para el maquinado, con la mínima profundidad de corte, diámetro nominal medio de la herramienta de corte y madera de pino de segunda sin estar humedecida.

Para la construcción de la pieza denominada mamelón es recomendable generar la construcción de piezas soldadas o atornilladas con la finalidad de optimizar el proceso de manufactura por arranque de viruta.

7.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **Montero R., Victores J.G., Martinez S., Jardon A., Balaguer C.** 2015. *Past, present and future of robotic tunnel inspection.* Automation in Construction.

[2] **Sortino M., Belfio S.,Motyl B., Totis G.** 2013. *Compensation of geometrical errors of CAM/CNC machined parts by.* Computer-Aided Design.

[3] **Wolfslag Wouter, Plooij Michiel, Babuska Robert, Wisse Martijn.** 2015. *Learning robustly stable open-loop motions for robotic manipulation.* Robotics and Autonomous Systems.

[4] **Eng Wang, Hu Lin, Liaomo Zheng, Lei Yang, Jinjin Feng, Han Zhang.** 2014. *Design and implementation of five-axis.* **F** Chinese Journal of Aeronautics.

[5] **Wang Lihui, Mohammed Abdullah, Onori Mauro.** 2014. *Remote robotic assembly guided by 3D models linking to a real robot.* CIRP Annals - Manufacturing Technology.

[6] **Yadama Vikram, P. Wolcott Michael, V. Smith Lloyd.** 2006. *Elastic properties of wood-strand composites with undulating strands.* SCIENCE DIRECT.

[7] **Saravanan R., Ramabalan S., Raja Ebenezer N. Godwin, Dharmaraja C.** 2008. *Evolutionary multi criteria design optimization of robot grippers.* Applied Soft Computing.

[8] **Selcuk, Erkaya.** 2012. *Investigation of joint clearance effects on welding robot manipulators.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

[9] **Schneider Ulrich, Olofsson Bjorn, Sornmo Olof, Drust Manuel, Robertsson Anders, Hagele Martin, Johansson Rolf.** 2014. *Integrated approach to robotic machining with macro/micro-actuation.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

[10] **Galabov V., Stoyanova Ya., Slavov G.** 2013. *Synthesis of an adaptive gripper.* Applied Mathematical Modelling.

[11] **Fantoni Gualtiero, Capiferri Saverio, Tilli Jacopo.** 2014. *Method for supporting the selection of robot grippers.* ScienceDirect.

[12] **Olsson Tomas, Haage Mathias, Kihlman Henrik, Jahansson Rolf, Nilsson Klas, Robertsson Anders, Bjorkman Mats, Isaksson Robert, Ossbahr Gilbert, Brogradh Torgny.** 2010. *Cost-efficient drilling using industrial robots with high-bandwidth.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

[13] **Bazylev Dmitry, Margun Alexey, Zimenko Konstantin Kremlev Artem, Rukujzha Elena.** 2014. *Participation in robotics competition as motivation for learning.* ScienceDirect.

[14] **Filaretov Vladimir F., Pryanichnikov Valentin E.** 2014. *Autonomous Mobile University Robots AMUR: Technology and Applications to Extreme Robotics.* ScienceDirect.

[15] **Manzoor Sarah, Islam Raza Ul, Khalid Aayman, Samad Abdul, Iqbal Jamshed.** 2013. *An open-source multi-DOF articulated robotic educational platform for.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

[16] **Ilyukhin Yu. V., Poduraev YU. V., Tatarintseva A. V.** 2014. *Nonlinear Adaptive Correction of Continuous Path Speed of the.* ScienceDirect.

[17] **Vichare Parag, Nassehi Aydin, Kumar Sanjeev, Newman Stephen T.** 2009. *A Unified Manufacturing Resource Model for representing CNC.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing.

[18] **Grieco L.A., Rizzo A.,Colicci S. Sicari S., Piro G., Di Paola D. Boggia G.** 2014. *IoT-aided robotics applications: Technological implications, target.* Computer Communications.

[19] **Balakirsky Stephen, Kootbally Zeid, Kramer Thomas, Pietromartire Anthony, Schlenoff Craig, Gupta Satyandra.** 2013. *Knowledge driven robotics for kitting applications.* Robotics and Autonomous Systems.

[20] **Sullivan Alan, Erdim Huseyin, Perry RonaldN., Frisken Sarah F.** 2012. *High accuracy NC milling simulation using composite adaptively sampled.* Computer-Aided Design.

[21] **J. Pérez Turiel, J.C. Fraile Marinero, J. R. Perán.** 2002. *APLICACIONES DE LA ROBÓTICA: ULTIMAS TENDENCIAS Y NUEVAS PERSPECTIVAS.*, DYNA, p. 61.

[22] **ISO 8373:2012(en).** , 2012. *Robots and robotic devices - vocabulary* : ww.iso.org.

[23] **David Marshall, Christina Bredin.** 2008. *Historia de un éxito.* Revista ABB, p. 58.

[24] **Groover, Mikell P.** , 2007. *FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA.* México : McGraw-Hill Interamericana. pp. 903-906. 1234567890.

[25] **Acuña Fausto, Singaña Marco, Acosta Nora, Caizalitín Edwin.** 2014, *Diseño e implementación de una celda de manufactura robotizada, para la réplica de piezas 3d, mediante fresado en el Laboratorio de Robótica Industrial de la ESPE-EL.* Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, pp. 1,2.

[26] **Solutions, Dynamic Robotic.** 5 8, 2013. http://www.drsrobotics.com/na/. *http://www.drsrobotics.com/na/.* [Online].

[27] **Fraile-Marinero, J., Peran-Gonzalez, J. Perez-Turiel, J.,** 2002. *APLICACIONES DE LA ROBOTICA: ULTIMAS TENDENCIAS Y NUEVAS PERSPECTIVAS .* DYNA, pp. 61-68.

[28] **Craig, John J.** , 2006. *Robótica.* México : PEARSON EDUCACIÓN pp. 203-205. ISBN: 970-26-0772-8.

[29] **Baturone, Aníbal Ollero.** 2001. *Robótica Manipuladores y robots móviles.* Barcelona España : Marcombo.

[30] **FANUC.** 05 30, 2017 www.fanuc.ec. *www.fanuc.ec.* [Online].

[31] **Robotics, FANUC.** 2008. fanucrobotics.com. [Online] [Cited: 05 30, 2017.] pp 2. FR-6/08.

[32] **Madera Coronel A., Lopez Parra M.** Peru : CIBIM 8, 2007. *MEDICION DE REPETIBILIDAD EN ROBOT INDUSTRIALES.* Congreso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica. pp. 1-2.

[33]. **Automation, ATI Industrial.** junio 5, 2017, ATI Industrial Automation. *www.ati-ia.com.* [Online].

[34] **ISO9409 STANDARD, INTERNATIONAL.** 03 01, 2004. www.iso.org/standard/36578.html. *www.iso.org/standard/36578.html.* [Online] ISO 9409-1:2004(E).

[35] **SYSTEMES, DASSAULT.** 06 07, 2017. © 2002-2017 SOLIDWORKS.ES. *SOLIDWORKS.ES.* [Online] Dassault Systèmes.

[36] **GrabCAD.** abril 15, 2017, GRABCAD. *grabcad.com.* [Online].

[37] **Ashby, Michael F.** 1996 *Engineering Materials 1.* Wobum, MA : Butterworth-Heinemann.

[38] **GRANTA.**, junio 27, 2015 CES Edupack. *GRANTA Material Intelligence.* Aguascalientes, Aguascalientes, Mexico : © 2015 Granta Design Limited. CES EduPack.

[39] **Alberto Cardona, Víctor Fachinotti.** , 2014. *Introducción al Método de los Elementos Finitos.* Santa Fe, Argentina : UNL/Conicet.

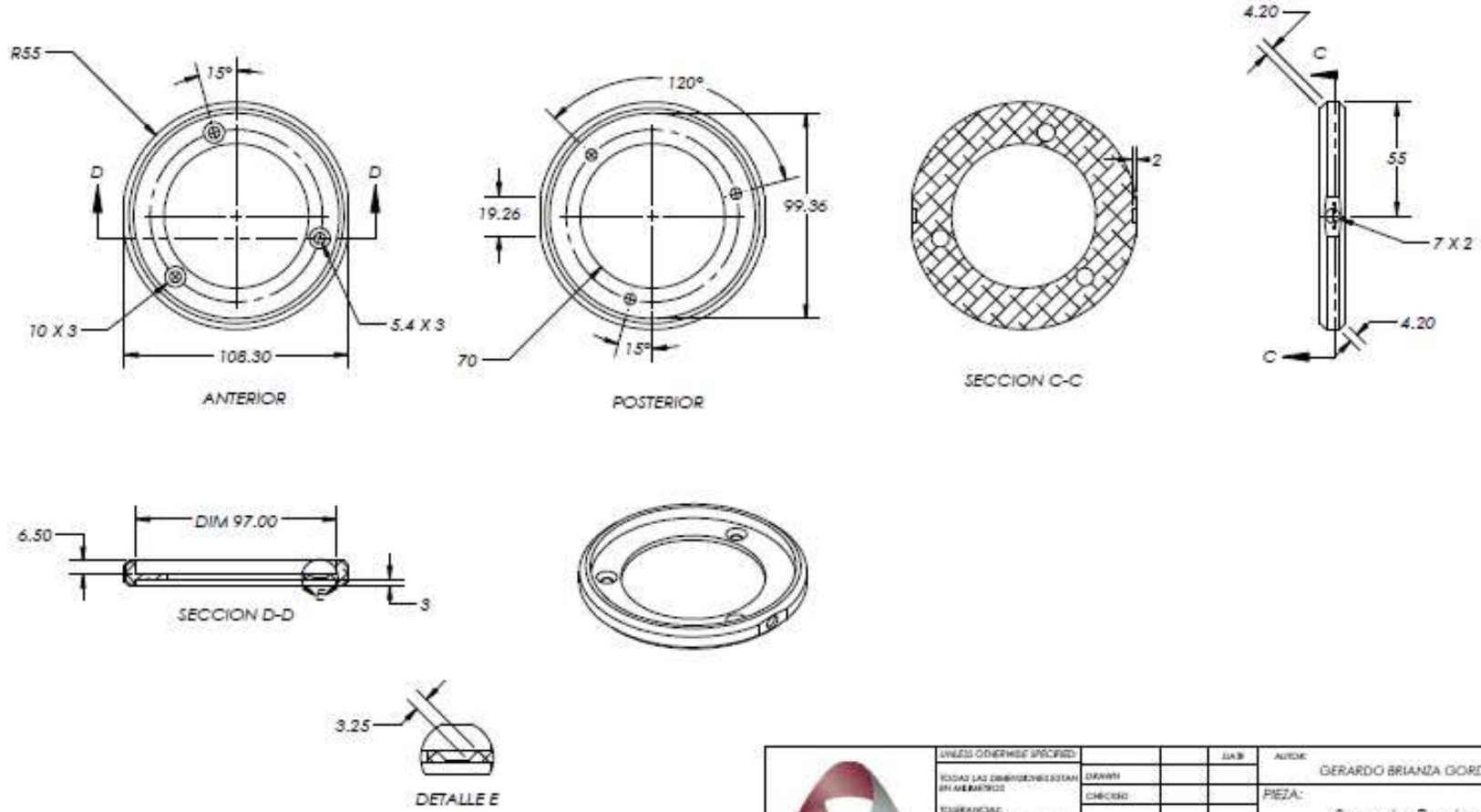
[40] **CAICEDO GUERRA, ELI DAMIAN.** , julio 23, 2017. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA ROUTER CNC DE 4 EJES PARA EL TALLADO DE MODELOS 3D EN MADERA. Ecuador, Ecuador, Ecuador : Universidad de las Fuerzas Armadas.

[41] **Merida.** , 2010. Elementos de Maquinas II. *ELEMENTOS DE UNION ROSCADOS.* MEXICO, MEXICO, MEXICO : UNIVERSIDAD LATINOAMERICANA.

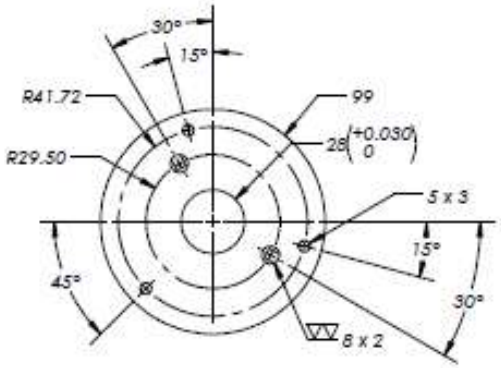
[42] **MARTIN, FEDERICO PADRON, SERVANDO R. LUIS LEON.** 07 31, 2013. TECNOLOGÍA MECÁNICA Y PROCESOS DE FABRICACIÓN. *http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos.* [Online] 149283003

Anexo

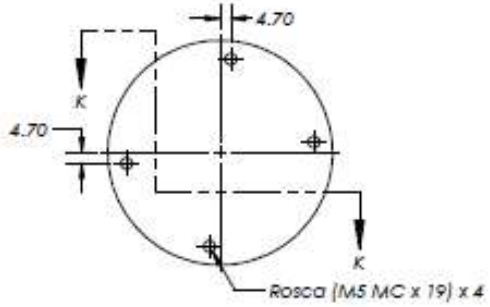
Planos de fabricación



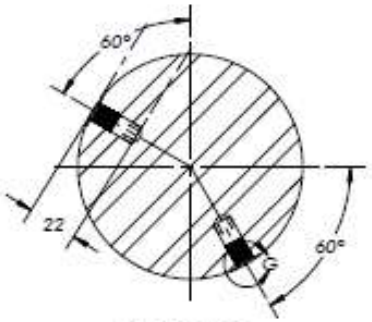
CIATEC Centro de Tecnología Avanzada	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: COMO Y DONDE SE INDICAN	DRAWN / CHECKED	AUTOR: GERARDO BRIANZA GORDILLO
			PIEZA: Soporte Router Anillo de Montaje
MATERIAL: Aluminio serie 3000 (6061 - T6 O)		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE SANTIAGO DE QUERÉTARO	SIZE B / DIBUJO NO. SW02-003 / REV
ACOTACIÓN: MILIMÉTRICO			ESCALA: 2:1 / Hoja __de__



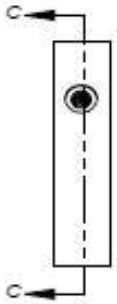
VISTA ANTERIOR

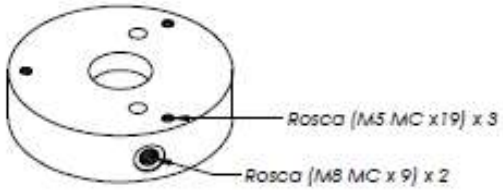


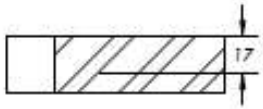
VISTA POSTERIOR



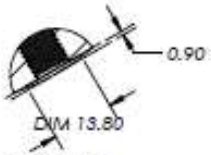
SECCION C-C



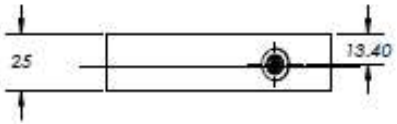




SECCION K-K



DETALLE G



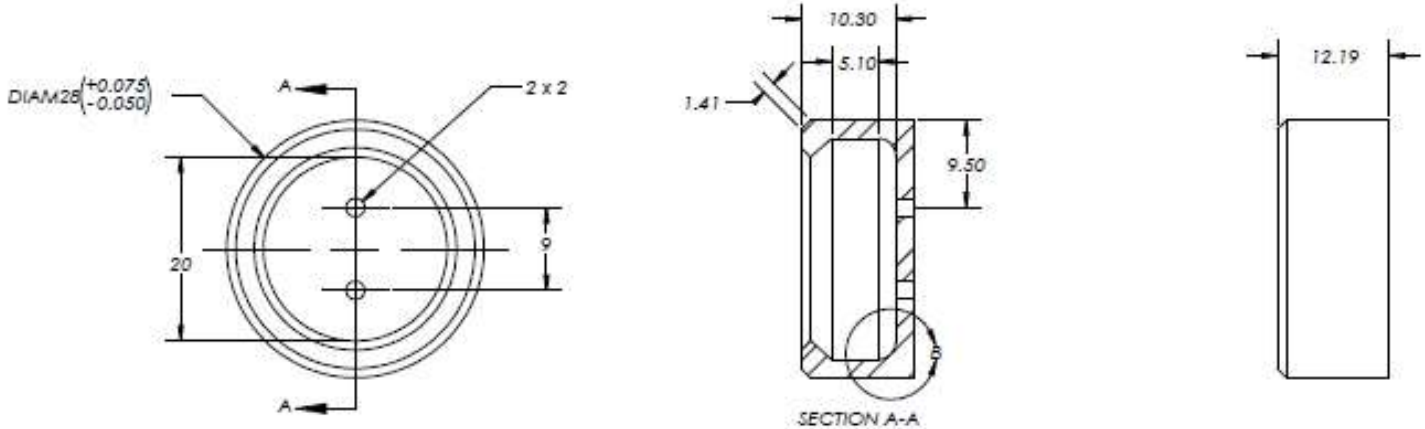
CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: COMO Y DONDE SE INDICAN	DRAWN / CHECKED	DATE
	INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER		
MATERIAL: ACERO INOXIDABLE PARRILLA			
ACOTACION: mm			

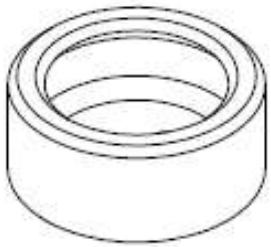
AUTOR: GERARDO BRIANZA GORDILLO

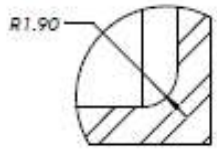
PIEZA: Soporte Router Base Hembra

SIZE	DIBUJO NO.	REV
B	SW02-001	

ESCALA: 1:2 | Hoja __de__







DETAIL B
SCALE 4 : 1

CIATEQ
Centro de Tecnología Avanzada

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN MILIMETROS
TOLERANCIAS: COMO Y DONDE SE INDICAN
INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:
MATERIAL: ACERO DE BAJO CARBONO, AL TEMPLE
ACOTACION: MILIMETRICO

		DATE
DRAWN		
CHECKED		

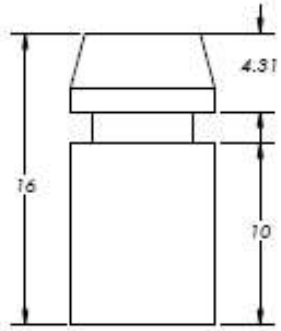
UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE SAN LUIS POTOSI

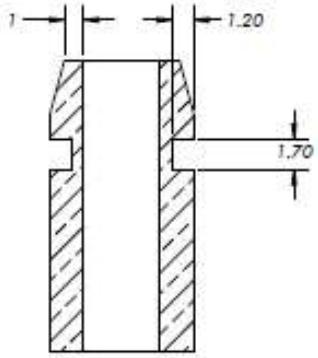
AUTOR: GERARDO BRIANZA GORDILLO

PIEZA: Soporte Router inserto de sujecion

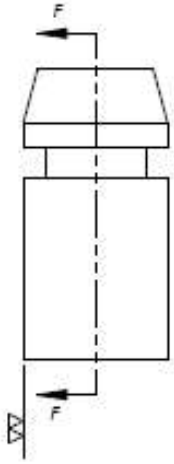
SIZE B | DIBUJO NO. SW02-002 | REV

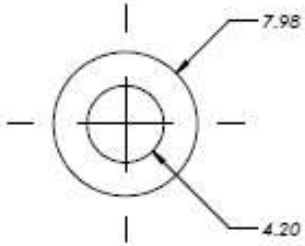
ESCALA: 2:1 | Hoja _ de _

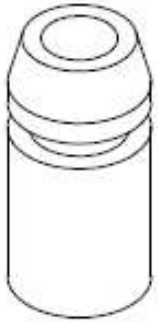




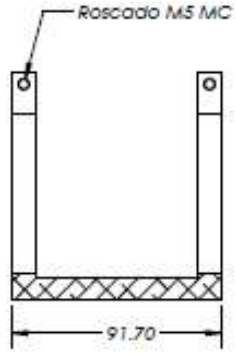
SECCION F-F



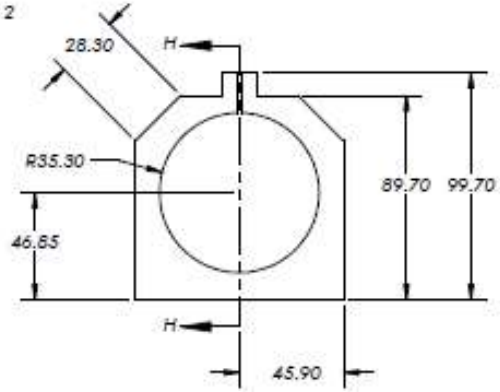


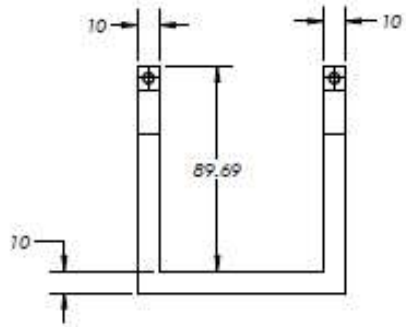


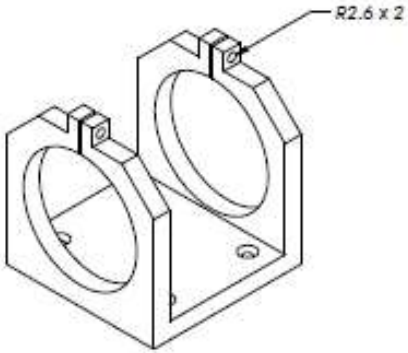
CIATEO Centro de Tecnología Avanzada	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: COMO Y DONDE SE INDICAN	DRAWN / CHECKED	DATE	AUTOR: GERARDO BRIANZA GORDILLO
MATERIAL: Cobre				PIEZA: Soporte Router Pivote Guia
ACOTACION MILIMETRICA				SIZE B / DIBUJO NO. SW02-004 / REV
				ESCALA: 4:1 / Hoja __de__

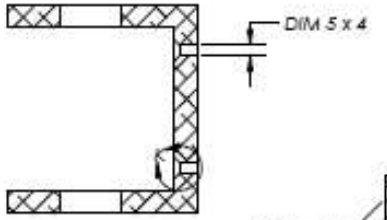


SECCION H-H

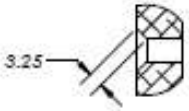




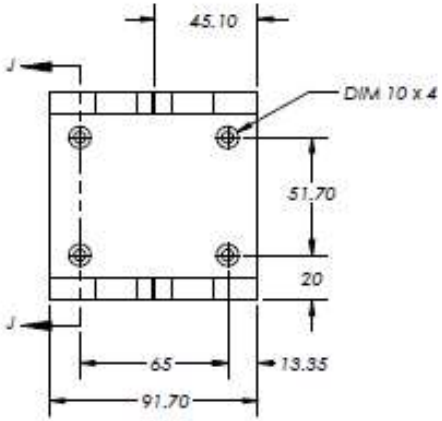




SECCION J-J



DETALLE K



CIATEQ Centro de Tecnología Avanzada	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: TODAS LAS DIMENSIONES ESTAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: COMO Y DONDE SE INDICAN		DATE	AUTOR: GERARDO BRIANZA GORDILLO	
		DRAWN		PIEZA: Soporte Router Mamelon	
		CHECKED			
	INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING: PER				
MATERIAL: Aluminio serie 3000 (H14 - T6 22)				SIZE B	DIBUJO NO. SW03-001 REV
ACOTACION: MILIMETROS				ESCALA: 1:2	Hoja _ de _