



TESIS

Universidad La Salle Noroeste

“Estudios mecánicos y de manufactura de componentes en Solidworks”

Que para obtener el título de
Licenciatura en Ingeniería Mecatrónica

con Reconocimiento de Validez Oficial No. 2012247

de fecha 17 de agosto de 2001

presenta

Bruno Coronado Trenti

José Luis Ceballos Girón

Asesor de Contenido

Dr. Eusebio Jiménez López

Ciudad Obregón, Sonora, México; septiembre 2022

ULSA – Biblioteca
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDS) de los Estados Unidos Mexicanos (México)

El uso para la reproducción parcial o total del contenido que sea objeto de protección de derechos de autor, se restringe para fines educativos e informativos, citando la fuente de donde se obtuvo y sus autores.

Sanciones pueden resultar aplicables en caso de lucro, reproducción, edición o modificación, sin la autorización del titular de los derechos.

DEDICATORIAS

Este documento va dedicado a mis padres José Coronado y Corina Trenti y a mi hermano Lucano Coronado quienes siempre me brindaron su apoyo y su confianza. Me gustaría dedicar está investigación a mi Nono, a mi Abuela y a mi tía Norma que son mis ejemplos más grandes a seguir.

También, Gracias Dios que siempre me has acompañado y me has dado fuerza para seguir siempre adelante.

DEDICATORIAS

Este documento va dedicado sin duda alguna a mi familia por siempre apoyarme en mi formación personal como profesional, a mis padres Horacio Ceballos y a mi madre Judith Giron, a mis hermanos Horacio, Isabel. A mi novia María Fernanda Diaz, gracias por hacerme feliz, por todo tu apoyo y por todo lo que haces por mí.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia por todo su apoyo incondicional que me brindan día con día. También, a mi maestro y asesor Dr. Eusebio Jiménez López por todas sus enseñanzas y su tiempo dedicado a este trabajo y a mi educación. A mi profesor Luis Andrés por su apoyo y sus enseñanzas. A todos los docentes de la universidad que me apoyaron. A mi compañero de tesis José Luis Ceballos por arduo trabajo y su amistad. A todos mis compañeros y amigos de la universidad muchas gracias, ya que con su apoyo y amistad me inspiraron a seguir adelante.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la casa de estudios mi alma mater la Universidad La Salle Noroeste con gratitud por haber sido mi casa de estudios en donde pude ampliar mis conocimientos y expandir mis horizontes, donde pude conocer a excelentes compañeros, futuros ingenieros y sobre todo a muy buenos amigos. Un agradecimiento especial a Bruno Coronado, mi compañero de tesis que sin él nada de esto hubiera sido posible, A nuestro profesor Luis Andrés García y a nuestro asesor de tesis Eusebio Jiménez por todo su conocimiento aportado y aplicado a este documento.

RESUMEN

La industria 4.0 es una realidad en las fábricas y en las universidades de todo el mundo. La digitalización y la inteligencia artificial son dos áreas que le dan soporte a la cuarta revolución industrial. En el campo de la digitalización, el diseño y la manufactura de partes y componentes están evolucionado en forma acelerada y son tareas esenciales en las empresas, por lo que es necesario conocer los distintos modelos digitales de diseño y de manufactura que pueden crear los distintos paquetes computacionales que asisten a los ingenieros en la concepción de nuevos productos y en la fabricación de los mismos. En este trabajo de tesis se obtienen diversos modelos de diseño, ingeniería y manufactura relacionados con un componente didáctico usando el software Solidworks. Se parte de la ingeniería inversa realizada al componente de la cual se generan las dimensiones principales, para posteriormente realizar el plano de fabricación y el modelado de sólidos (modelos digitales del diseño). Con la información geométrica y materiales, se realizan estudios de elemento finito y de sustentabilidad al componente (modelos digitales de ingeniería), finalizando con un estudio de simulación de la manufactura (modelo digital de la manufactura). La idea es conocer con más profundidad los paquetes computacionales modernos para dominar el diseño y la manufactura digital, y de esta manera atender de una mejor manera al sector educativo e industrial.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1 Antecedentes	12
1.2 Problemática	19
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo General	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
1.4 Justificación	20
1.5 Delimitaciones	21
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	22
2.1 Aspectos generales del CIM	22
2.1.1 Definiciones del CIM	22
2.1.2 Origen del CIM	23
2.1.3 Ejemplos CIM	24
2.2 La automatización de la información geométrica y de manufactura	25
2.2.1 Los sistemas CAD	25
2.2.2 Los sistemas CAM	26
2.2.3 Los sistemas CAE	26
2.2.4 Los sistemas CAPP	27
2.2.5 Ejemplos de aplicación	27
2.3 Sistemas de manufactura	28
2.3.1 Definiciones y ejemplos de sistemas de manufactura	28
2.3.2 Sistemas de manufactura flexibles	30
2.3.3 Manufactura celular	31
2.4 Sistemas de manejo de materiales	32
2.4.1 Los sistemas MRP	32
2.4.2 Lean Manufacturing	33
2.4.3 Sistemas Just in Time	34
2.4.4 Sistemas de gestión de la calidad	35
2.5 Sustentabilidad	35
2.6 Elementos finitos	37
2.7 Ingeniería inversa	38
2.8 Manufactura digital	39
2.9 SOLIDWORKS	48
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	51

3.1 Tipo de investigación.	51
3.2 Diseño de la investigación.	52
3.3 Variables de estudio.	53
3.4 Objetos de estudio.	53
3.5 Materiales e instrumentos.	54
3.5.1 Materiales	54
3.5.2 Instrumentos	54
3.6 Procedimiento	54
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1 Descripción de la pieza de estudio.	55
4.2 Primer modelo digital (modelo de mediciones).	56
4.3 Modelos digitales de diseño.	59
4.4 Modelos digitales de ingeniería.	67
4.4.1 Modelos digitales de elemento finito	67
4.4.2 Modelos digitales de sustentabilidad	73
4.5 Modelos digitales de fabricación.	81
4.5.1 Modelos digitales de fabricación (simulación).	83
4.5.1.1 Torneado	83
4.5.1.2 Fresado	92
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES	106
REFERENCIAS	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Salida gráfica de un diseño generado en Solidworks	49
Figura 2. Salida gráfica de una pieza sometida a cargas externas.	50
Figura 3. Caso de estudio	56
Figura 4. Simbolización de primitivas	58
Figura 5. Plano de fabricación de la pieza en norma ISO.	62
Figura 6. Plano de fabricación de la pieza en norma DIN.	63
Figura 7. Dimensionamiento en sólidos.	64
Figura 8. Dimensionamiento en MBD.	66
Figura 9. Configurando el problema estático-elástico en Solidworks	69
Figura 10. Asignación cargas de tensión y condiciones de frontera	69
Figura 11. Proceso de mallado de la pieza	70
Figura 12. Cálculo y salida gráfica de los resultados	70
Figura 13. Configurando el problema térmico en Solidworks	71
Figura 14. Asignación cargas térmicas y condiciones de frontera	72
Figura 15. Proceso de mallado de la pieza para el problema térmico	72
Figura 16. Cálculo y salida gráfica de los resultados para el estudio térmico.	73
Figura 17. Configuración de torno simple en SolidCAM.	84
Figura 18. Se considera la opción de pieza completa con sobrante.	84
Figura 19. Se ubican las coordenadas del torneado.	85
Figura 20. Se seleccionan las caras en donde se realizarán las operaciones.	85
Figura 21. Se da de alta un cambio de herramienta.	86
Figura 22. Se lleva a cabo la simulación de la operación.	86
Figura 23. Proceso de simulación.	87
Figura 24. Resultado final del desbaste.	87
Figura 25. Se selecciona una nueva herramienta	88
Figura 26. Se localiza el área de trabajo.	88
Figura 27. Se selecciona la configuración creada	89
Figura 28. Se configuran los parámetros de la herramienta	89
Figura 29. Se establece la profundidad de la operación	90
Figura 30. Se configura la trayectoria de la herramienta	90
Figura 31. Se lleva a cabo la simulación.	91

Figura 32. Se observa el resultado final de las operaciones y se realiza la misma operación del lado opuesto.	91
Figura 33. Se selecciona la operación de fresado.	92
Figura 34. Se seleccionan las coordenadas del origen	93
Figura 35. Se establece una zona de trabajo en base a un plano coordenado	93
Figura 36. Se crean un plano para realizar el croquis.	94
Figura 37. Se elabora el croquis para la operación de desbaste.	94
Figura 38. Se crea otro plano para la siguiente operación.	95
Figura 39. Se elabora el croquis para la operación de cajera.	95
Figura 40. Se empieza con la parte de manufactura.	96
Figura 41. Se selecciona la opción de desbaste.	96
Figura 42. Se selecciona la herramienta de corte	98
Figura 43. Se selecciona la configuración para crear un rasgo de 2.5 ejes.	98
Figura 44. Se activa la casilla de un plano existente	98
Figura 45. Se selecciona el tipo de operación (desbaste) y se selecciona el primer plano de trabajo que se creó.	98
Figura 46. En condición final se selecciona la opción (Coarse), y también la profundidad del desbaste. Se desactiva la opción (Stock extents) esto para que no se extienda el área de trabajo.	99
Figura 47. Una vez se acepte el Rasgo creado, se configura el trabajo, con un ángulo de 90°y un máximo paso de 50.	99
Figura 48. En la pestaña leads/links, en el umbral de enlace se establece en 50.	100
Figura 49. Se simula la operación para observar si el trabajo realizado fue el correcto.	100
Figura 50. Para maquinar la cajera se selecciona la operación de 2.5 ejes.	101
Figura 51. Se selecciona la opción rough mill para el desbaste.	101
Figura 52. Se selecciona la herramienta.	102
Figura 53. Se selecciona la configuración creada.	102
Figura 54. Se selecciona la opción de cajera y el segundo croquis que se realizó.	103
Figura 55. Se selecciona la opción de desbaste, y se asigna la profundidad a trabajar.	103
Figura 56. Se desactiva el primer rasgo para trabajar con el nuevo rasgo.	104
Figura 57. Se establecen los parámetros adecuados del desbaste.	104
Figura 58. Se simula la operación para revisar el trabajo realizado.	105
Figura 59. Se simulan las dos operaciones juntas para revisar el trabajo y se realiza el mismo método del lado opuesto.	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variable de estudio (Espinoza, 2021)	53
Tabla 2. Medición del lado A	58
Tabla 3. Medición del lado B	58
Tabla 4. Promedio, moda, mediana, varianza, desviación estándar de cada primitiva.	59
Tabla 5. Estudio de sustentabilidad en Solidworks.	80
Tabla 6. Hoja de proceso	82

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

A lo largo de la historia humana el proceso de la manufactura ha sido de gran importancia para el desarrollo de las civilizaciones como en el caso de China que hace 1000A.C comenzaron a desarrollar procedimientos organizados para la planeación y especialización del trabajo, todo con el propósito de tener control sobre los recursos disponibles y por ende sobre la producción de diferentes artículos, a su vez en Grecia, los procesos de fabricación de armas, armaduras, papiros, herramientas, construcción de edificios, artesanías, entre otros, también tuvieron sus propios métodos de control y registro de materiales y costos de producción. Hoy en día la manufactura se lleva una enorme porción de la economía global, por lo que hace indispensable que los futuros ingenieros, tengan en cuenta la antigüedad y la importancia de la manufactura, este tema resulta hasta un reto, ya que

empieza a implementar nuevas tecnologías y conceptos a un ritmo muy alto, por lo que hace que este campo se vuelva dinámico e innovador.

La manufactura se puede definir como la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio para fabricar piezas o productos (Groover, 2007).

La revolución industrial se divide en 4 segmentos diferentes. La primera revolución industrial comenzó en 1784 y fue famosa por producir la máquina de vapor. La segunda revolución industrial comenzó en 1870 y trató sobre la producción en masa, especialmente la línea de montaje de producción Ford Modelo T. La tercera revolución comenzó en 1969 y se conoce oficialmente como la revolución digital, donde se implementó el uso de PLC (Controlador lógico programable) y TI para acelerar la producción y mejorar la calidad del producto terminado. Muchas industrias todavía están en la Industria 3.0.

La industria 4.0 es más que una revolución tecnológica. Esencialmente está conectando diferentes dispositivos entre sí para la trazabilidad y la rastreabilidad. Por ejemplo, si hay un problema en una de las líneas de fabricación que causa un retraso, esto puede actualizarse automáticamente en el sistema y ajustar el plan de producción en tiempo real sin ninguna participación humana. Los humanos solo deben interactuar para escenarios basados en excepciones.

Si las empresas no toman medidas pronto y comienzan a impulsar la Industria 4.0 en su división de fabricación, se arriesgan a quedarse atrás de su competencia. Los fabricantes

externos pueden comenzar a ofrecer una mejor eficiencia y precios más bajos. El Capgemini Research Institute realizó un estudio recientemente que reveló que el 76% de los fabricantes tienen una iniciativa de manufactura digital en curso o están trabajando para formularla. La Industria 4.0 no debe consistir en agregar un proceso al entorno actual, sino en eliminar un proceso existente y lograr un resultado de mayor calidad (Koshy, 2020).

La automatización industrial nace gracias a la necesidad del ser humano por mejorar el proceso manual de realizar actividades físicas o mecánicas estas pueden ser de gran dificultad, peligrosidad, productividad o que sean demasiado repetitivos. El primer ejemplo de automatización fue el de Telar de Jacquard a principios del siglo XVIII, el cual utilizaba unas tarjetas perforadas para automatizar el proceso de tejido, mientras un experto del telar tejía 2 cm de brocado en una semana, el telar de Jacquard era capaz de realizar hasta 60 cm. Este suceso histórico hizo que la automatización diera un gran brinco para formar la disciplina que hoy tantos conocemos. Hoy en día la automatización es cada vez más importante, por lo que los alumnos de ingeniería tienen que tener en la mente, no solo el concepto si no también su importancia.

La palabra automatización se deriva del griego que significa “automotor” o “auto-pensante”. Es el proceso de la habilitación de las máquinas para seguir una secuencia predeterminada de operaciones con poca o ninguna mano de la obra humana, utilizando equipo especializado y dispositivos que realizan y controlan los procesos de manufactura (Kalpakjian y Schmid, 2008).

La automatización es un concepto evolutivo. En las plantas de manufactura, se ha implementado sobre todas las siguientes áreas básicas de actividad: 1. Procesos de manufactura: Las operaciones de maquinado, forjado, extrusión en frío, fundición, metalurgia de polvos y rectificado son ejemplos principales de procesos que se han automatizado ampliamente. 2. Manejo y movimiento de materiales: Los materiales y las partes en diversas etapas de terminación se movilizan a través de una planta mediante equipo controlado por computadora, con poca o ninguna guía humana.

Inspección: Se inspecciona automáticamente la precisión dimensional, el acabado superficial, la calidad y diversas características específicas de las partes mientras se fabrican (inspección en proceso) 4. Ensamble: Las partes manufacturadas individualmente y los componentes se ensamblan de manera automática como subensambles y ensambles para formar un producto. 5. Empaque: Los productos se empacan automáticamente para su envío (Kalpakjian y Schmid, 2008).

La innovación más importante en la automatización se inició con el control numérico (NC) de las máquinas herramienta. A partir de este desarrollo ha habido un rápido avance en la automatización de la mayoría de los aspectos de manufactura. Estos desarrollos comprenden la introducción de computadoras en la automatización. Ejemplos: CNC: Control Numérico computarizado AC: Control Adaptable CIM: Manufactura Integrado por Computadora

La manufactura comprende diversos niveles de automatización, dependiendo de los procesos utilizados, el producto deseado y los volúmenes de producción. Los sistemas de

manufactura, en orden creciente de automatización incluyen las siguientes clasificaciones:

Trabajo de taller (job shops): En estas instalaciones se utilizan máquinas de propósito general y centros de maquinado con altos niveles de participación de mano de obra.

Producción autónoma de NC: Utiliza máquinas de control numérico, pero con interacción significativa operador/máquina. Celdas de manufactura: Utilizan un conjunto diseñado de

máquinas de control integrado por computadora y manejo flexible de materiales, a menudo con robots industriales.

Sistemas flexibles de manufactura: Utilizan control por computadora de todos los aspectos de la manufactura, incorporación simultánea de varias celdas de manufactura y sistemas

automatizados de manejo de materiales. Líneas flexibles de manufactura: Organizan la maquinaria controlada por computadoras en líneas de producción en lugar de celdas,

mediante automatización rígida y el flujo de productos. Líneas de flujo y líneas de

transferencia: Constan de agrupamientos organizados de maquinaria con manejo automatizado de materiales entre la máquina. La línea de manufactura está diseñada con

flexibilidad limitada o sin ella, ya que el objetivo es producir una sola parte (Kalpakjian y Schmid, 2008).

Tipos de automatización.

1. La automatización dura: Se refiere a métodos de control que requieren un esfuerzo considerable para programar las diferentes partes u operaciones.

2. Automatización suave o flexible: Implica la agilidad de reprogramación, con frecuencia solo cambiando el software (Schey, 2002).

La automatización industrial, considerada como el manejo de la información en las empresas para la toma de decisiones en tiempo real, incorpora la informática y el control automatizado para la ejecución autónoma y de forma Óptima de procesos diseñados según criterios de ingeniería y en consonancia con los planes de la dirección empresarial (DNP, Colciencias. Plan Estratégico del Programa Nacional de Desarrollo Tecnológico Industrial y Calidad, 2000-2010).

Por otro lado, dentro del campo de la automatización, en especial dentro del contexto de la Manufactura Integrada por Computadora (CIM, por sus siglas en inglés), existen diversos softwares que automatizan el diseño, la manufactura, la ingeniería y planeación de procesos industriales. El término CIM se creó para demostrar el uso generalizado de computadoras para diseñar productos, planificar la producción, realizar operaciones y llevar a cabo diversas funciones relacionadas con el negocio que se requieren en una empresa de fabricación, entre otras actividades industriales (Siderka y Jadaan, 2018). El concepto CIM permite el uso eficaz de la tecnología informática como parte de la integración de la producción por computadora. El paradigma actual supone que la industria manufacturera moderna se está transformando en una red de fabricación global y una cadena de suministro que permite el uso de sistemas y recursos de fabricación distribuidos globalmente. El concepto de CIM se considera uno de los indicadores clave en el desarrollo de la industria manufacturera (Yuan, Deng y Chaovalitwongse, 2017).

La automatización se potenció con el uso de la computadora y permitió diversas integraciones computacionales en beneficio de las tareas de diseño y de fabricación. Por

ejemplo, se tiene más éxito con la aplicación de CAD/ CAM/ máquinas-herramienta que hacerlo por separado. La integración CAD/ CAM en el sistema de fabricación se puede obtener para asegurarse de que las máquinas y las personas se utilizan en la mayor medida posible. La interfaz CAD/ CAM también se ha desarrollado para las tareas de técnicas de planificación de procesos asistida por computadora (CAPP) y de diseño para la fabricación y el montaje (DFMA). Estas técnicas permiten que la función de fabricación influya en el proceso de diseño y que los diseñadores sean conscientes de los efectos de las distintas características del diseño en la facilidad de fabricación de una pieza (Balamurugan y Balamurugan, 2021).

Debido a la automatización más eficiente que hoy en día existe en las universidades, es necesario comprender y aplicar los softwares que asisten al diseño, la manufactura y la planeación de procesos. Por ello, se requiere extraer la potencialidad de cada paquete computacional con la finalidad de explotar sus ventajas y beneficios. Ante la inminente llegada de la industria 4.0, se requiere que las universidades cambien la estrategia de enseñanza sobre el uso del software que se aplica en la educación en ingeniería. Es necesario, por un lado, masificar el uso del software y, por otro, promover el uso integrado de software. En este sentido el paquete SolidWorks es un software de Diseño que se usa en la educación y en las aplicaciones industriales. Sin embargo, en la enseñanza tradicional, este paquete solo se usa para dibujo técnico y modelado de sólidos. Es importante conocer que otros modelos digitales pueden obtenerse de este paquete para poder potenciar la enseñanza de la Ingeniería Mecatrónica en la Universidad La Salle Noroeste.

1.2 Problemática

El software educativo es necesario para complementar la formación de los ingenieros. Sin embargo, debido a diversos factores que van desde la falta de planeación para usar los paquetes hasta la ausencia de permisos de software hace que los alumnos no se formen adecuadamente. Este problema se agudiza más debido a que estamos en una fase de transición de la industria 3.0 a la industria 4.0 que implica el uso de tecnologías disruptivas y la digitalización para poder optimizar los procesos productivos de las empresas. En diversas industrias el diseño, la ingeniería y la manufactura son tareas comunes e importantes que están migrando debido al enfoque de la industria 4.0, al diseño y la manufactura digitalizada. Por tal motivo es sumamente necesario que los ingenieros sean capaces de utilizar de la mejor manera los paquetes computacionales que asisten al diseño y la manufactura por computadora, para que de este modo sea posible conformar egresados con las competencias y habilidades que se requieren en el vaivén industrial de hoy en día. En la Universidad La Salle Noroeste se utiliza el software Solidworks para la enseñanza de la Mecatrónica y es necesario buscar alternativas para poder conocer que más modelos digitales se pueden obtener de dicho paquete que vayan más allá del dibujo y del modelado de sólidos tradicional.

Bajo este contexto se formula el siguiente cuestionamiento:

¿Qué beneficios tendrían los estudiantes de la Universidad La Salle Noroeste si se mostrará una aplicación más completa del paquete Solidworks?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar modelos digitales de una pieza, usando el Software Solidworks, para conocer las potenciales del paquete en beneficio de los alumnos de la carrera de Mecatrónica de la Universidad La Salle Noroeste.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obtener las dimensiones de una pieza usando ingeniería inversa.
- Diseñar dos modelos digitales dimensionales de la pieza en Solidworks.
- Diseñar dos modelos digitales de ingeniería en Solidworks.
- Diseñar un modelo digital de manufactura en el paquete Solidworks

1.4 Justificación

Los principales beneficiados con el desarrollo de este trabajo de tesis son los alumnos de la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad La Salle Noroeste ya que, con la información sistematizada y presentada en esta tesis, podrán conocer algunos de los modelos digitales de diseño, ingeniería y manufactura de partes y componentes que son posibles generar en el paquete de CAD llamado Solidworks, y con ello podrán explorar mejor las aplicaciones del paquete para sacarle más provecho. De la misma manera, los profesores

de la universidad se verán beneficiados, ya que podrán dejar trabajos de investigación y prácticas a sus alumnos tomando como referencia este trabajo. Finalmente, y de manera indirecta, las empresas de diseño y de fabricación se verán favorecidas debido a que los egresados dominarán de una mejor manera, si es que usan este trabajo, el diseño y la manufactura digitalizados.

1.5 Delimitaciones

En este trabajo de tesis se utilizará el paquete Solidworks para desarrollar los modelos digitalizados de diseño, ingeniería y fabricación de un componente mecánico usado para realizar prácticas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Aspectos generales del CIM

2.1.1 Definiciones del CIM

La manufactura integrada por computadora conocida por sus siglas como (CIM), es un método de manufactura en el cual todo el proceso de producción de una empresa es controlado por una computadora.

El concepto CIM, en su más amplio sentido, no se limita a la automatización integrada del sistema productivo, sino que pretende lograr la total integración de la unidad de negocios.

De ahí el punto: automatizar el diseño computarizado adoptando e integrando el proceso de manufactura en su totalidad (Gálvez, 2011).

Un sistema CIM tendrá elementos integrados a través de una base de datos por computadora:

- Diseño asistido por computadora (CAD).
- Manufactura asistida por computadora (CAM).
- Robótica.
- Planeación de recursos de fabricación (MRP II).
- Tecnología de grupos (Group Technology).

Estos elementos son básicos para el diseño y manufactura del producto. Los equipos deben de tener sensores que permitan la respuesta ante los datos de rendimiento, y se debe implementar un entorno informático distribuido.

2.1.2 Origen del CIM

El origen del CIM se remonta cuando surgió un cambio de pensamiento, antes los fabricantes eran quienes definían el producto, hoy en día el proceso es diferente, el cliente es quien exige ciertas características del producto, al productor no le queda otra opción más que aceptar las exigencias, debido a la globalización y a la competencia internacional.

Para tener una mejor competitividad las empresas tienen que llegar a ciertos objetivos (Angulo, 2001):

- Mejorar la calidad de los productos
- Reducir el tiempo de fabricación de los productos
- Más variedad en la gama de productos

Debido a estos objetivos nació el concepto y la metodología CIM. Gracias a la implementación de sistemas automatizados, robots industriales, sin embargo, para lograr los tres objetivos de manera eficiente es necesario coordinar tres factores: mecanización, flujo de materiales y flujo de la información.

Para mejorar la competitividad de las industrias es indispensable dentro de los procesos de la empresa, mejorar la cantidad de información que se puede procesar para realizar estos procesos de manera más rápida y eficiente.

De esta manera, en la resolución de este problema de información, es donde surge el concepto CIM. El concepto CIM es un planteamiento dirigido hacia el futuro, con el fin de crear y profundizar los sistemas actuales de automatización de la producción.

2.1.3 Ejemplos CIM

El nivel más bajo es el uno: control de máquinas (PLCs), y consiste en los productos basados en los microprocesadores que se encargan directamente de controlar las máquinas. En el control de celdas, el cual es el segundo nivel, es el trabajo en conjunto de varias máquinas que funcionan individualmente en su trabajo, pero son controladas por una máquina central. El tercer nivel: computadora de área, este nivel se encarga de monitorear un área en específico, ya sea una línea de ensamblado o maquinado. El nivel cuatro se ocupa

específicamente para las funciones administrativas, ya que todas las actividades a pesar de ser automatizadas y tener una planeación a diferentes niveles, siempre existe alguien que autoriza y reparte las actividades en la organización. Por último, tenemos el nivel cinco con el computador corporativo, que es donde se ubica la base de datos, programas financieros y la información administrativa de la organización.

2.2 La automatización de la información geométrica y de manufactura

2.2.1 Los sistemas CAD

La abreviación de CAD corresponde a las siglas en inglés Computer Aided Design y significa diseño asistido por computadora. Este sistema sirve para crear representaciones gráficas en dos dimensiones y en tres dimensiones, aplicado al sistema CAD consiste en:

- Entrada de datos desde un scanner o algún método digitalizador de materia física.
- Aplicación o programa que recibe los datos y crea imágenes en pantalla que van del computador a otros componentes.
- Salida o impresión de imágenes.

Esto teniendo en cuenta un sistema CAD básico o también llamado estación de trabajo y puede ser adaptado para conformar una red de estaciones

Los beneficios de esta tecnología es el ahorro del tiempo, así como la alteración de las piezas antes de su construcción además de los estudios que se pueden realizar a las

piezas con las distintas herramientas tecnológicas para asegurar calidad sin la necesidad de producir prototipos, así como el ahorro de material.

2.2.2 Los sistemas CAM

A diferencia de los sistemas CAD, los sistemas CAM son integrados por software para generar un programa de CNC para cualquier máquina controlada por CNC para la creación de piezas complejas, superficies difíciles o en general piezas de precisión. Los sistemas CAM obtienen el programa de mecanizado en dos pasos, el primero no considera datos de maquinado ni del tipo de CNC que tiene la máquina, solamente se encarga de calcular la posición relativa de una herramienta con respecto a la pieza, sin considerar el tamaño o la cinemática de la máquina. Posterior a esto tenemos que el programa CNC se debe aplicar a una máquina utilizando el postprocesador, el cual es un módulo que también integra los sistemas CAM y es el que va personalizado dependiendo del tipo de máquina que se va a emplear para el uso de la máquina (Universidad del País Vasco– Euskal Herriko Herriko Unibertsitatea).

2.2.3 Los sistemas CAE

Las siglas CAE hacen referencia a la ingeniería asistida por ordenador, y consiste el uso de software para simular el rendimiento de los procesos industriales, con el fin de mejorar diseños en los productos o para la resolución de problemas de ingeniería dentro de varios sectores, de los cuales se puede incluir, la simulación, la optimización de productos, procesos y validación (SIEMENS, 2021).

Un proceso típico de este sistema consta de varios pasos los cuales son, el preprocesamiento, la resolución y el postprocesamiento.

2.2.4 Los sistemas CAPP

El CAPP conocido como planeación de proceso asistido por computadora. CAPP es un intermediario entre el diseño y la manufactura (CAD y CAM) de un producto o una parte de él, mediante el uso de tecnología computacional; trasladando así las especificaciones técnicas dentro de los detalles del proceso de manufactura. Se encarga de hacer procesos de planificación mediante dibujos, especificaciones, materiales y previsión de demandas para determinar una secuencia de operaciones o fases y simplificarlas lo mayor posible, para así poder tener una producción eficiente y eficaz, incluyendo detalles sobre costos, rentabilidad en su fabricación, plazos de entrega, disponibilidad de equipos necesarios, volúmenes de producción, sustitución de materiales y buen uso de recursos (Garavito, 2012).

2.2.5 Ejemplos de aplicación

Algunas de las aplicaciones de la CAE son las siguientes:

- Optimización del producto o proceso.
- Análisis de sistemas de control.
- Análisis de tensión y de dinámicas en componentes y ensambles mediante el análisis de elementos finitos (FEA).
- Análisis de cinemática y dinámica de mecanismos (dinámica de cuerpos múltiples).

- Simulación de procesos de fabricación como la fundición, el moldeo o el troquelado por prensa.

Los sistemas CAPP incluye la planificación de las actividades y funciones para preparar un plan detallado con instrucciones para producir una pieza. Los pasos empiezan por dibujos de ingeniería, especificaciones partes o listas de materiales y revisión de la demanda.

2.3 Sistemas de manufactura

2.3.1 Definiciones y ejemplos de sistemas de manufactura

Un sistema de manufactura es un conjunto de actividades que interactúan con un conjunto de recursos para obtener un producto. Las actividades son los procesos de fabricación, maquinación, manejo de materiales y procesos de información que son necesarios para la producción. Los recursos son el personal, las máquinas, los materiales, etc.; que son necesarios para la ejecución de las actividades. Un sistema de manufactura incluye, por supuesto, un plan de proceso de producción (programa) que especifica las actividades y los recursos, así como también las relaciones de precedencia entre actividades: algunas actividades podrían ocurrir antes que otras. Adicionalmente el programa puede especificar varios recursos para diferentes actividades y dar prioridad a alguna de ellas para la utilización de estos recursos (Mata, 2016).

Estaciones simples

- Típico caso de una celda trabajador-máquina.

- Pueden ser manuales o automáticas y se ocupan para la producción de un modelo simple, lotes y mixtos.
- Es fácil y la menos cara de implementar especialmente en su versión manual
- Es la más adaptable, ajustable y flexible de los sistemas de manufactura
- Una estación simple manual puede ser convertida en una estación automatizada si la demanda de partes o productos lo justifican.

Celdas multi-estaciones

- Un sistema multi-estación con ruteo múltiple es un grupo de estaciones de trabajo organizadas para alcanzar un propósito común.
- Típicamente su rango de producción es medio.
- Se aplica en operaciones de procesamiento y ensamble.
- Involucran las partes o productos y tienen un cierto grado de variedad.
- Los grupos de máquinas deben de poseer flexibilidad
- Las máquinas en este grupo pueden ser manuales, automatizadas o semiautomatizadas.

Líneas de producción

Un sistema de manufactura multi-estación con un ruteo fijo.

- Consiste en una serie de estaciones de trabajo dispuestas de forma que la parte o producto se mueve de una estación a la siguiente, y una porción del trabajo total se realiza en cada estación.

- Generalmente están asociadas a la producción en masa
- Las unidades de trabajo son idénticas o muy similares
- El trabajo total puede ser dividido en tareas separadas de duración aproximadamente igual que puedan ser asignadas a estaciones de trabajo individuales.
- El ritmo de producción de la línea es determinado por su estación más lenta. Las estaciones de trabajo más rápidas deben de esperar a la estación lenta que forma un cuello de botella.
- La transferencia de una estación a otra se hace mediante bandas transportadoras o algún otro sistema mecánico, difícilmente de manera manual pero también se puede.

2.3.2 Sistemas de manufactura flexibles

La flexibilidad es un término usado para definir el atributo que permite a un sistema de manufactura de modelo mixto lidiar con un cierto nivel de variación en los estilos de partes o productos sin interrupciones en la producción para los cambios entre modelos.

Generalmente es una característica deseable en los sistemas de manufactura. Los sistemas que poseen esta característica se denominan sistemas de manufactura flexibles o sistemas de ensamble flexible (Domínguez Aguirre, 2011).

2.3.3 Manufactura celular

La manufactura celular es la aplicación de la tecnología de grupo en el cual máquinas o procesos diferentes han sido agregados en celdas y cada una está dedicada a la producción de una parte o familia de productos o un grupo limitado de familia de productos. Una célula de manufactura está organizada en forma de U o J de tal forma que los equipos, personas, herramientas, máquinas y métodos generan un solo flujo continuo (Rodríguez, 2020).

- Mejoran la calidad
- Acortan los tiempos de manufactura
- Evitan problemas
- Excelente flujo de una pieza o ensamble
- Elimina o reduce los tiempos de espera
- Mejora la seguridad
- Reduce los tiempos de cambio de modelo
- Reduce el inventario ejecutando proceso WIP

Para desarrollar una célula de manufactura se necesitan los siguientes pasos

1. Ordenar los pasos de forma secuencial

2. El recorrido de los productos debe hacerse en sentido contrario a las manecillas del reloj, de manera que las maquinas deben instalarse adecuadamente. Así se promueve el uso de la mano derecha mientras el trabajo recorre las operaciones secuencialmente
3. Las máquinas deben estar posicionadas lo más cerca posible las unas de las otras, tomando en consideración la seguridad de los movimientos de manos y material en un área reducida
4. Colocar la última operación cercana de la primera
5. Crear una célula en forma de U o C o cualquier tipo de forma que fomente la relación del equipo considerando restricciones técnicas y recursos disponibles.

2.4 Sistemas de manejo de materiales

2.4.1 Los sistemas MRP

Materials Requierments Planning en inglés, es una forma de tecnología de gran ayuda en sistemas de logística. MRP es un software para planificar materiales, control del inventario y planificar la producción.

El MRP permite realizar un seguimiento real de los procesos de la cadena de producción. Este tipo de sistemas están enfocados a empresas de gran tamaño debido a que tienen que

monitorizar cantidades muy grandes de inventario o su cadena de producción está compuesta por numerosos procesos.

La función de los sistemas MRP, es algo predictivo, ya que, utiliza datos de procesos anteriores para llevar a cabo su actividad. Estos responden a una serie de determinadas preguntas, cuya respuesta puede variar dependiendo de las necesidades de cada empresa (Veigler, 2021).

- ¿Qué producto hay que producir o clasificar?
- ¿Qué cantidad de producto hay que producir o clasificar?
- ¿En qué momento hay que producir o clasificar el producto?

2.4.2 Lean Manufacturing

Se define al proceso continuo y sistemático de identificar errores y eliminación de desperdicios, desperdicio se entiende como aquella actividad que no agrega valor al proceso, pero agrega costo monetario y más trabajo. El verdadero objetivo es descubrir continuamente oportunidades de mejora dentro de la empresa, pues siempre habrá áreas de mejora.

Una empresa que aplica el Lean Manufacturing, implica la colaboración y comunicación de todos los niveles de la empresa. Los trabajadores están en contacto permanente con el medio de trabajo, por lo tanto, son los primeros en observar y mejorar los problemas (Socconini, 2019).

Los siete principios de la filosofía Lean:

1. Hacerlo bien a la primera
2. Excluir actividades que no añaden valor
3. Mejora continua
4. Procesos pull
5. Flexibilidad
6. Colaborar con los proveedores
7. Cambio de enfoque de venta

2.4.3 Sistemas Just in Time

Es un sistema que está enfocado a la organización de la producción de las organizaciones. Su origen procede de Japón de la compañía Toyota. Su filosofía se basa en la eliminación de todo aquello que en el proceso de producción no sea necesario, desde las compras hasta la distribución de los productos.

Se le denomina Just in Time, tiempo justo en español, por su enfoque en utilizar los materiales necesarios para la producción como el tiempo de llegada de los productos lleguen a su destino en el momento indicado, no antes, no después.

2.4.4 Sistemas de gestión de la calidad

Un sistema de gestión de la calidad es una herramienta muy útil que permite planear, ejecutar y controlar ciertas actividades o procesos que llevarán a cabo la misión del proyecto.

Su único objetivo es unificar en un solo software todas las operaciones de la empresa con el fin de facilitar la toma de decisiones y el análisis de datos

2.5 Sustentabilidad

El término “sustentabilidad” ha cambiado a lo largo del tiempo hasta llegar al concepto moderno basado en el desarrollo de los sistemas socioecológicos para lograr una nueva configuración en las tres dimensiones centrales del desarrollo sustentable: la económica, la social y la ambiental. El presente trabajo pretende abordar la evolución de este concepto y mirar un poco más allá sobre el futuro de la sustentabilidad.

La manufactura sustentable (Jiang et al., 2012; Millar et al., 2011) basada en principios de sustentabilidad y desarrollo sustentable, a diferencia de la manufactura esbelta que busca en un proceso de mejora continua reducir o eliminar desperdicios o “mudas”, persigue eliminar los desperdicios ambientales en los procesos productivos que, de acuerdo con Wills (2009a, 2009b), son: energía (particularmente la eléctrica), agua, emisiones al aire, emisiones al agua, uso irracional de materiales, residuos sólidos y/o peligrosos, transportación y daño a la biodiversidad, mejorando así el desempeño operacional y

ventajas competitivas. Bergmiller et al. (2011) en otro estudio refieren que las plantas de manufactura exitosas en la aplicación de la manufactura esbelta deberían también ser exitosas al implantar principios sustentables y manufactura sustentable.

La sustentabilidad es un proceso de suma importancia y más en los tiempos actuales debido a la contaminación del planeta, es de suma importancia el nivel de contaminación que se produce con los materiales y los procesos utilizados en la manufactura de un producto. La Comisión Brundtland define la sustentabilidad y desarrollo como: “Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de satisfacción de las generaciones futuras” (WCED, 1987). Por otro lado, el Eco-diseño es una “Disciplina que integra acciones orientadas a la mejora ambiental del producto en la etapa de diseño” (J. Rieradevall., X. Doménech, A. Bala, C. Gazulla, 2000), cuando se habla de eco-diseño no solo habla de que el producto sea ecológicamente amigable, sino trata del ciclo de vida del producto, desde su fase de diseño, hasta su fase de desecho. Esto conlleva a las empresas a llevar una metodología que se asegure de identificar, controlar y mejorar los productos para que cumplan con dichas características medioambientales.

En la actualidad existen diversas herramientas computacionales que apoyan o asisten la evaluación de la sustentabilidad. Uno de ellos es el Solidworks Sustainable, el cual trabaja bajo la metodología del Ciclo de Vida del Producto. El objetivo de esta metodología es que cada producto diseñado tendrá en menor o mayor medida un espectro de contaminación. El encontrar los medios de producción y el diseño que contamine menos es tarea de los diseñadores actuales.

2.6 Elementos finitos

En los últimos años el método del elemento finito ha sido empleado en muchas áreas como en la aeronáutica, arquitectura e ingeniería civil, sin embargo, en los últimos años este método ha estado presente en la manufactura. El método de elementos finitos es un procedimiento basado en el uso de la computadora, para analizar estructuras y problemas del continuo. Es un método numérico, que bien aplicado permite resolver un gran espectro de problemas de ingeniería. El método es conveniente cuando los problemas aumentan en complejidad, los métodos clásicos ya no son una opción viable, y es ahí donde el método de elementos finitos se convierte en una herramienta perfecta para el análisis y la simulación de los procesos.

El método consiste en 7 pasos:

1. Creación del modelo.

Este paso consiste en definir el sistema que se va a analizar.

2. Discretización del modelo de la estructura.

El sistema se divide en una serie de elementos (elementos finitos).

3. Definición de las propiedades de los elementos.

Este paso se utiliza para definir las propiedades del tipo de elemento a utilizar como modelo físico.

4. Aplicación de cargas y condiciones de frontera.

En este paso se definen cargas, fuerzas, temperaturas, etc.

5. Ensamble de los elementos en la matriz de rigidez.

La matriz de rigidez de los elementos relaciona los desplazamientos nodales con las cargas aplicadas en los nodos.

6. Solución del sistema.

Después de la definición de las condiciones del modelo, el programa procede a la solución de las ecuaciones simultáneas.

7. Visualización de resultados.

Una vez terminada la solución del sistema, este permite ver los resultados, a través de una interface gráfica, que por medio de una gama de colores permite visualizar las regiones donde se presentan los mayores o menores efectos.

2.7 Ingeniería inversa

En las dos últimas décadas la ingeniería inversa ha evolucionado representativamente, posibilitando un continuo mejoramiento de los procesos de construcción de software, permitiendo a arquitectos y desarrolladores tener una clara imagen del sistema que están construyendo, disminuyendo la posibilidad de error al facilitar la verificación de la coherencia entre el código desarrollado y la arquitectura propuesta, facilitando a su vez el mantenimiento y la adquisición de conocimiento de sistemas heredados (Canfora y Di Penta, 2007). Surgiendo a su vez más herramientas de este rubro con diferentes funcionalidades.

La ingeniería inversa persigue el objetivo de obtener la mayor cantidad de información técnica de un producto, del cual no se tiene la más mínima información técnica de su diseño,

construcción y funcionamiento, de modo que se debe partir de un todo para comprender cada pieza del sistema, para lo cual se deben tomar notas muy detalladas.

La ingeniería inversa tiene muchas aplicaciones en el mundo actual y es aplicada por todo tipo de empresas:

- Investigar, analizar y comprender la tecnología utilizada por otras naciones o por otras empresas.
- Analizar los productos de la competencia para analizar sin infringir alguna patente de otra empresa.
- Desarrollar productos que sean compatibles con otros productos, sin tener acceso a los detalles técnicos de estos últimos.
- Comprobar la seguridad de un producto, en informática para conocer las brechas de seguridad que puede tener un programa.

2.8 Manufactura digital

La fabricación digital es un término que se utiliza en abundancia hoy en día. Pero, ¿qué es la fabricación digital y cómo la aprovechan las empresas en su beneficio?

En pocas palabras, la fabricación digital es cuando una empresa aprovecha las tecnologías digitales para beneficiar sus operaciones de fabricación. Con la fabricación digital, los fabricantes pueden crear una fábrica que es un entorno conectado, en red y totalmente

integrado, lo que les permite utilizar el análisis de datos en tiempo real para optimizar todo el proceso de fabricación y obtener ganancias de productividad de entre el 10 y el 1.000%.

La fabricación digital permite a los fabricantes eliminar los cuellos de botella, reducir el inventario, mejorar la calidad, acortar el tiempo de comercialización, pivotar rápidamente para satisfacer las necesidades de los clientes y ampliar el número de productos fabricados. Según (Deloitte, 2019) las inversiones en fábricas digitales han supuesto un aumento medio del 10% en la producción, del 11% en la utilización de la capacidad de la fábrica y del 12% en la productividad laboral.

La adopción de iniciativas de fábricas inteligentes puede ayudar a los fabricantes estadounidenses a triplicar la tasa de productividad laboral hasta 2030, en comparación con las lentas tasas de 2007 a 2018, (Deloitte, 2019)

Casos de uso de la fabricación digital

Los casos de uso para las iniciativas de fabricación digital incluyen:

- Mantenimiento predictivo para evitar costosas averías.
- Detección de calidad para supervisar y probar equipos y productos en tiempo real con análisis visual.
- Eficiencia predictiva para evitar costosos cuellos de botella.
- Control de la temperatura para realizar los ajustes necesarios en las herramientas de corte para temperaturas más altas.
- Optimización de los puestos de trabajo en beneficio de toda la línea de producción.

- Transporte inteligente para automatizar el movimiento de material, garantizar un flujo de material continuo y eliminar las copias de seguridad.
- Colaboración de ingeniería y gemelo digital para la creación rápida de prototipos, la configuración de células de producción virtuales y el modelado digital de productos.
- Seguimiento de activos en tiempo real.
- La capacidad de ajustar la producción para satisfacer las necesidades cambiantes de los clientes y los pedidos urgentes.

La fábrica digital de Siemens es un buen ejemplo de uso. Siemens destaca como un gran triunfador. En 2010, la empresa comenzó a digitalizar su propia planta de fabricación en Amberg (Alemania). A lo largo de la siguiente década, la fábrica pasó de ser un 25% digital/automatizada a un 75%. La productividad mejoró en un asombroso 1.400%.

Antes de la digitalización, la planta podía fabricar cinco productos. En un periodo de 12 meses, la fábrica estaba en condiciones de hacer 1.300 productos diferentes, con capacidad para hacer 9.000 en total, dijo Alastair Orchard, vicepresidente de la empresa digital de Siemens Digital Industries Software. Tiempo desde el pedido hasta la entrega: 24 horas. En lugar de centrarse únicamente en la optimización de la producción en células de trabajo individuales, la fábrica digital de Siemens, y otras, adopta una visión larga y amplia para optimizar todo el proceso o incluso varios procesos.

Cómo se desarrolla esto: Imagina que una máquina de fábrica sólo puede taladrar agujeros. Un robot de fábrica inteligente puede taladrar agujeros, pero también puede soldar, realizar algunos procesos de montaje, recoger y colocar componentes eléctricos y probar

componentes. Cuando comienza el trabajo del día, el gemelo digital determina la forma más eficiente de operar en toda la fábrica y fabricar cada producto en función de todas las tareas que se realizan. Productos idénticos pueden fabricarse utilizando diferentes combinaciones de células de trabajo en función de la carga de trabajo de todo el día, explica Orchard.

"Cualquier producto puede recorrer cualquier trayecto de la fábrica interactuando con cualquier combinación de máquinas y personas", explica Orchard. "El producto puede interactuar con una máquina, 10 máquinas, 15 máquinas. Hemos introducido un paradigma completamente nuevo".

Los defectos disminuyeron, pero la velocidad también. Los defectos se redujeron de 150 por millón a nueve, dijo Orchard. La mejora inicial de la calidad se produjo a expensas de la velocidad, ya que la fábrica examinó con rayos X cada producto para buscar componentes que faltaban y defectos de soldadura.

"Era una parte fundamental del proceso, pero lo ralentizaba todo", dijo Orchard. "Intentábamos hacer algo cada segundo. Los rayos X consumían una cantidad de tiempo considerable. Era un enorme cuello de botella".

Pero Siemens no estaba dispuesta a sacrificar la calidad. En lugar de ello, la empresa decidió ser más inteligente a la hora de elegir las piezas a radiografiar.

Siemens utilizó la analítica de datos para examinar los 30 millones de datos que la fábrica tenía de piezas radiografiadas en el pasado. La empresa también examinó unos 200

factores, como el proveedor, las máquinas utilizadas, los operarios específicos implicados, la temperatura, la humedad, la información sobre el mantenimiento de las máquinas, etc.

"Pudimos entrenar un algoritmo de aprendizaje automático y predecir, basándonos en todos los valores recogidos, si habría o no problemas de calidad", dijo Orchard. "Ahora no radiografiamos nada a menos que el algoritmo de aprendizaje automático diga que hay algo más que una pequeña posibilidad de que este producto pueda fallar. Hemos eliminado el cuello de botella. Podemos hacer funcionar la fábrica a toda velocidad y radiografiar sólo los pocos artículos que se considera que pueden tener problemas. Hemos conseguido equilibrar la calidad y la productividad".

Los gemelos digitales desempeñan un papel importante en las fábricas digitales

Por último, los gemelos digitales también desempeñan un papel en la optimización de la producción. Para empresas como Siemens, que fabrican y utilizan plataformas de fábricas digitales, un gemelo digital puede mostrar fácilmente a los clientes lo que la tecnología puede hacer por ellos.

Un empleado de Siemens describió el gemelo digital como "la fábrica en el bolsillo".

Siemens también está impulsando iniciativas de fabricación digital en sus proveedores. Cuando la fábrica tuvo continuos problemas con los contactos de sus buggies inteligentes, la empresa animó a su proveedor a utilizar la plataforma de conectividad inteligente de Siemens para recoger datos y vender un servicio de mantenimiento a la fábrica. Cuando los contactos empiezan a fallar, aunque sea levemente, el sistema desencadena una acción

para enviar el buggy a una estación de limpieza, en lugar de detener toda una línea de producción.

A la hora de buscar ofertas de máquinas para esta fábrica digital, Siemens insiste en que sus proveedores presenten sus ofertas a través de un gemelo digital. "Cada proveedor nos devuelve un modelo digital de una máquina que funciona. Podemos ver cómo funciona. Podemos predecir el par de torsión, el uso de la energía, los intervalos de mantenimiento, todo ello en el mundo virtual. Elegimos la mejor máquina, no sobre el papel, sino en estas predicciones tan detalladas".

Siemens recibe el gemelo digital de una nueva máquina aproximadamente un mes antes de recibir la máquina real y prácticamente pone en marcha el gemelo digital para probar la producción. Cuando llega la máquina real, la fábrica solo necesita 40 minutos para iniciar la producción completa.

"Podemos conectarlo y está listo para funcionar", dijo.

Los rezagados se preocupan por los riesgos y desafíos de la fabricación digital

A pesar de las claras ventajas de la tecnología de las fábricas digitales, el 49% de los fabricantes estadounidenses siguen estancados en el modo de lápiz y papel, según Deloitte. Si utilizan la analítica de datos, la información puede ser de hace meses.

Hay razones para esta reticencia. A los ejecutivos les preocupa cometer errores que detengan las líneas de producción; también les preocupan las brechas de seguridad. Estos temores legítimos ayudan a explicar por qué el 19% de los encuestados por Deloitte ni

siquiera están pensando en la transformación digital de la fábrica y el 30% están pensando en la idea, pero no planean avanzar.

Los primeros adoptantes han despejado el camino

Pero hay buenas noticias para quienes aún no se han embarcado en la transformación digital de la fábrica:

Los pioneros ya han identificado los puntos de tensión y los fallos más comunes. (¿Recuerdas el "fail fast" de GE?) Ahora, los tardíos pueden aprender de esas lecciones.

El costo de las plataformas digitales está bajando. El software de fábrica digital es posible ahora incluso para las tiendas más pequeñas.

La tecnología de la fábrica digital se integra más fácilmente entre los proveedores. Los proveedores entienden que los fabricantes no pueden romper y reemplazar todo en sus tiendas, por lo que están haciendo que sus plataformas funcionen bien con la tecnología existente.

La manufactura digital se entiende como el conjunto de procesos que comprende el diseño, la conformación y la fabricación de productos usando plataformas de softwares industriales que han sido creados para brindar un soporte especializado y cubrir las nuevas necesidades de las empresas.

Se basa en el uso de sistemas y herramientas digitales que permiten el análisis, la integración, el diseño y la producción de diversos productos. Además, contempla cada uno

de los materiales y equipos que están involucrados en los procesos manufactureros para lograr una óptima producción.

Surgimiento de la manufactura digital.

La industria 4.0 es la manufactura inteligente que integra nuevas tecnologías y saca provecho de la digitalización para llevar a cabo una producción más eficiente, incrementando la calidad de los productos y mejorando el modo operativo de la empresa.

Por lo tanto, la manufactura digital surge gracias a la evolución de la forma en la que se producen bienes de consumo, la cual comenzó con la mecanización de los procesos que se derivó de la introducción de la máquina de vapor. Años posteriores, ya se hablaba de las líneas de producción y montaje en masa que se beneficiaron del uso de la electricidad.

Más tarde, se logró globalizar las comunicaciones y los procesos de producción a través de la automatización, el uso de las computadoras y los sistemas inteligentes que dieron lugar a esta cuarta revolución industrial que incorpora innovación y vanguardia para renovar y mejorar la operatividad de las empresas, volviéndose más eficientes y productivas.

Ventajas de la manufactura digital

Aunque la manufactura digital ya es una realidad actual, aún no todas las empresas conocen de qué se trata y las ventajas que les puede brindar. Por ello, a continuación, se presentan las principales utilidades que se pueden conseguir a través de esta digitalización especial.

- Uso efectivo de los recursos y personalización

Los sistemas y herramientas de este tipo de manufactura se enfocan en darle el correcto uso a cada uno de los recursos que forman parte de la cadena de producción con la finalidad de aprovecharlos de manera optimizada y sólo los que realmente son necesarios y con ello, reducir gastos innecesarios o desperdicios a la hora de elaborar los productos.

Por otro lado, las empresas buscan satisfacer las necesidades de los clientes, pero ellos se inclinarán por aquella empresa que les ofrezca tiempos de respuesta rápidos, excelente calidad en bienes y una personalización de estos de acuerdo a los requerimientos específicos que solicitan.

- Costos de producción bajos

Cuando los gastos son mayores a las ganancias, se dice que la empresa está perdiendo rentabilidad, por lo que al integrar soluciones tecnológicas es posible no sólo aprovechar cada uno de los recursos; también es posible reducir los costos de producción gracias a la cantidad de información que se obtienen de ellas y permiten producir sólo lo necesario.

- Mejor relación con los clientes

Anteriormente, los consumidores tenían que esperar a que las empresas llevaran a cabo todos sus procesos productivos y posteriormente probar y determinar la calidad de los productos terminados antes de lanzarlos al mercado, lo cual generaba prolongados tiempos de respuesta a las necesidades.

No obstante, con la manufactura digital eso se erradicó debido a que se integran softwares que automatizan las actividades para fabricar bienes que cumplan con la más alta calidad y

satisfagan la demanda de los clientes y crear relaciones comerciales en las que exista el beneficio mutuo.

- Mayor competitividad

Una de las mayores ventajas que ofrece este tipo de manufactura es que provee a cualquier empresa que la implementa, nuevas competencias que las hacen capaces de responder a las crecientes exigencias del mercado y a los constantes cambios que se presentan en la industria.

Con ella es posible mejorar y crecer de manera continua, y lo mejor es que hay un sistema especializado para cada necesidad y con ello, se mejora la toma de decisiones y por lo cual repercute de manera positiva en cada una de las áreas internas de la empresa y, por ende, de forma global también (Deloitte's Research Center, 2019).

2.9 SOLIDWORKS

Se trata de un programa que permite realizar el proceso de diseño mecánico, desde la elaboración de los planos de la pieza ideada. A través de una interfaz del programa el diseñador puede utilizar todas las herramientas de diseño, modelar la pieza en 3D y realizar rápidamente las vistas necesarias para la concepción del ensamblaje. El programa de diseño asistido por computadora (Solidworks), otorga la formación integral a los estudiantes de nivel de ingeniería, esta formación otorga ventajas competitivas a nivel profesional, mismas que pueden ser ocupadas posteriormente para el desarrollo de innovaciones tanto en la

industria como para solucionar problemas que representen demandas sociales (Cetina López, 2016).

El software SolidWorks ayuda a diseñar mejores productos y con mayor rapidez, ya que las herramientas que nos proporciona el software hacen que se reduzca el tiempo gastado en el diseño, además permite el ahorro en costos de producción. La Figura 1. muestra una salida gráfica obtenida del Solidworks.

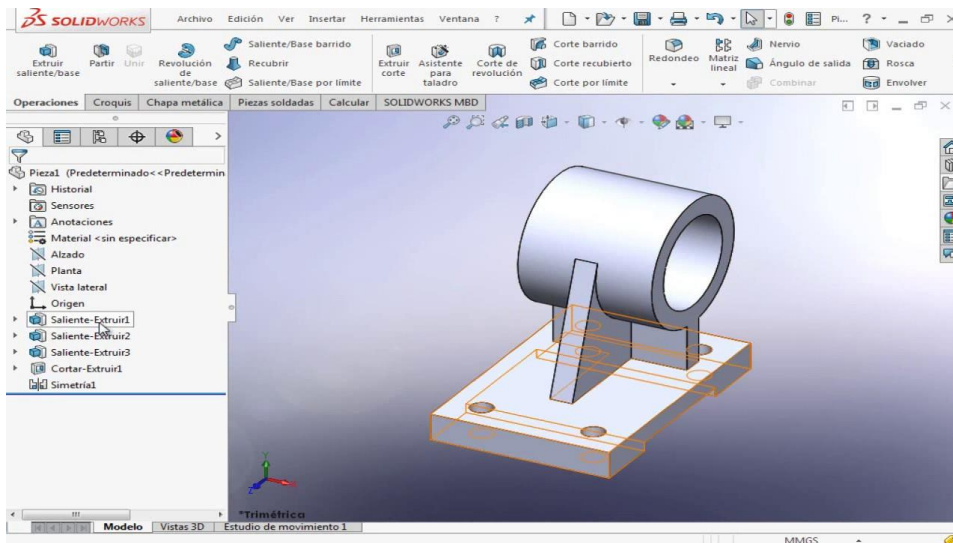


Figura 1. Salida gráfica de un diseño generado en Solidworks

Gracias al avance de la tecnología el software SolidWorks cuenta con unos complementos y herramientas para someter a los diseños a las condiciones a las que serán expuestas al mundo real, con la finalidad de mejorar la calidad y optimizar cada aspecto de la pieza, así reduciendo costos en producción hasta tener una pieza final lista para producir. La Figura

2. muestra una salida gráfica de una pieza sometida a un estudio estático mediante la herramienta Solidworks.

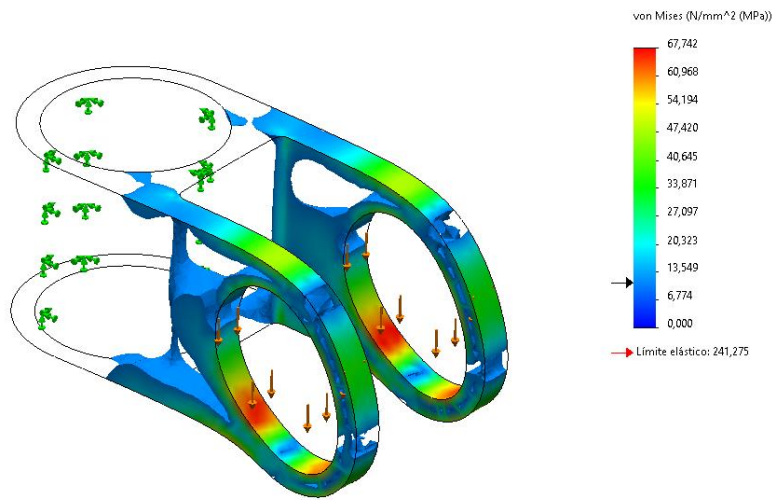


Figura 2. Salida gráfica de una pieza sometida a cargas externas.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología utilizada en este trabajo de tesis. Se propone el tipo y el diseño de la investigación, así como los instrumentos y el objeto de estudio, así como los procedimientos seguidos para el estudio digital del diseño y la manufactura de un componente mecánico mediante la herramienta Solidworks.

3.1 Tipo de investigación.

La investigación es de tipo descriptivo, debido a que se describirá la manera en que el Solidworks es capaz proporcionar una diversidad de estudios mecánicos y de manufactura sobre un componente. De acuerdo con Texson, (2005), la investigación tipo descriptiva

mide o evalúa diferentes aspectos, tamaños o elementos del fenómeno a investigar, el principal interés de este estudio es medir con la mayor precisión posible”. Se consideró también el enfoque cuantitativo, ya que hay datos que se analizan de la pieza con los cuales se generar los distintos modelos computacionales del objeto de estudio.

3.2 Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación se consideró del tipo no experimental y de corte transversal, debido a que los modelos digitales de la pieza en estudio solo serán generados y no profundizados, además, los datos geométricos y de manufactura de la pieza son recolectados de un proceso de ingeniería inversa que se desarrolló en otro estudio. García y Ruíz (2004), describen que este tipo de investigación “las variables no se manipulan intencionalmente, sino que sólo se observa y se analiza el fenómeno tal y como es en su contexto natural”, además, las autoras describen que en una investigación de corte transversal “se recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único, su propósito es describir variables y su incidencia de interrelación en un momento dado.”

3.3 Variables de estudio.

Variable de estudio	Definición conceptual de la variable
Pieza mecánica	Pieza de aluminio para propósitos didácticos.
Solidworks	Software de diseño asistido por computadora para modelar diseños mecánicos.
Estudios mecánicos	Son estudios en los que existan relaciones entre fuerzas, desplazamientos y cuerpos
Estudios de manufactura	Estudios de forma (disminución de la materia prima) y proceso de las piezas (maquinado)
Estudios de sustentabilidad	Estudios relacionados con la emisión de la huella del carbono.
Trayectoria	Es la línea geométrica que un cuerpo describe en su movimiento. (Fernández, s. f.)

Tabla 1. Variable de estudio (Espinoza, 2021)

3.4 Objetos de estudio.

El objeto de estudio de la presente investigación es una pieza mecánica a la cual se le realizarán diversos estudios de diseño, manufactura y sustentabilidad.

3.5 Materiales e instrumentos.

3.5.1 Materiales

Para está investigación se utilizó el Software Solidworks y una pieza de aluminio.

3.5.2 Instrumentos

El principal instrumento que se utilizó en esta tesis es una encuesta que se le realizó al responsable del taller de manufactura de la Universidad La Salle Noroeste, acerca del funcionamiento de los programas de control numérico.

3.6 Procedimiento

El procedimiento relacionado con esta investigación fue:

- 1) Análisis de datos de la ingeniería inversa de la pieza
- 2) Desarrollo de los modelos digitales de diseño
- 3) Análisis mecánico por medio de elemento finito de la pieza
- 4) Modelos digitales de sustentabilidad
- 5) Fabricación por CNC.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los estudios realizados a la pieza motivo de estudio en esta tesis.

4.1 Descripción de la pieza de estudio.

Para los estudios generales de las piezas en Solidworks, es necesario contar con dos clases de información:

- 1) La información geométrica y dimensional de las piezas en estudio.

- 2) La información no geométrica, generalmente descrita en términos de manufactura, como operaciones y procesos.

La información puede generarse de diversas maneras y depende de las condiciones del diseño, por ejemplo, la información puede provenir de una idea que busca ser un producto (este proceso se llama diseño directo) o bien la información puede generarse de un producto o pieza ya diseñado o fabricado (este proceso es comúnmente llamado ingeniería inversa). Para el caso de estudio de este trabajo se partió de un proceso de la ingeniería inversa el cual se le realizó a la pieza mostrada en la Figura 3.



Figura 3. Caso de estudio

4.2 Primer modelo digital (modelo de mediciones).

En esta sección se presenta un resumen del primer modelo digital el cual se asocia con un proceso de ingeniería inversa, esto es, con la tarea de obtener en forma sistemática las mediciones de la pieza mostrada en la Figura 4. Para realizar el proceso de la ingeniería inversa se aplicaron los procedimientos siguientes (Jiménez et al. 2012):

- a) Procedimiento 1: Del análisis preliminar a la generación de primitivas.

- b) Procedimiento 2: De la selección de los aparatos de medición al proceso de calibración de los instrumentos.
- c) Procedimiento 3: Operación de medición.
- d) Procedimiento 4: Del análisis de los datos a la representación de la información.
- e) Procedimiento 5. Validación estadística de la pieza.

Los procedimientos descritos anteriormente buscan sistematizar todo el proceso de medición de piezas mecánicas, desde el momento en que se tiene la pieza física hasta que la información dimensional obtenida sea validada con instrumentos estadísticos de confiabilidad.

La medición sistemática de piezas desde el contexto de la ingeniería inversa, requiere de todo un análisis completo si es que se quiere tener información confiable. Esto es importante mencionarlo porque en general las mediciones que se realizan en las universidades suelen limitarse al procedimiento número 3 relacionado con la operación de medir. Tal vez para talleres que solo requieren una aproximación de las medidas es válido hacerlo de esa manera, pero para productos industriales si se requiere obtener medidas correctas, para lo cual se utilizan herramientas de medición calibradas, estadística para procesar la información y normatividades. La síntesis del proceso de la ingeniería inversa dimensional y geométrica de la pieza de estudio se muestra a continuación:

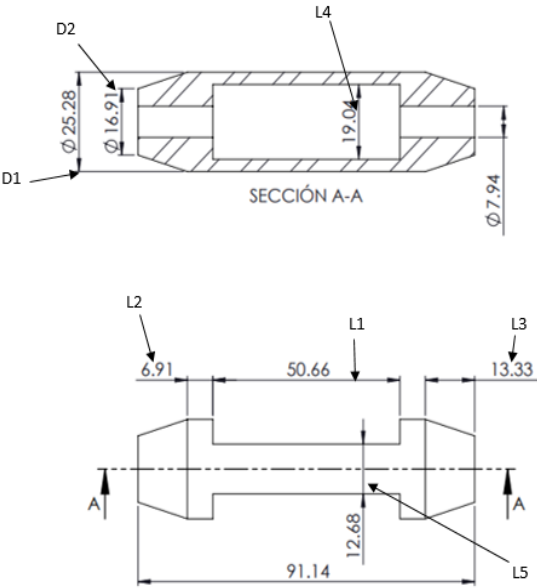


Figura 4. Simbolización de primitivas

LADO A: DERECHO								
Medidas	D1	D2	L1	L2	L3	L4	L5	P1
1	24.87	16.72	50.78	6.71	13.77	19.17	12.53	19.33
2	25.21	17.1	50.78	6.77	13.22	19.09	12.52	19.23
3	25.25	16.66	50.79	6.83	13.53	19	12.52	19.27
4	25.79	17.07	50.84	6.82	13.68	19.05	12.61	19.29
5	25.3	17.13	50.61	7.49	13.52	19.03	12.57	19.31
6	25.28	16.84	50.59	6.82	13.47	19.05	13.26	19.28
7	25.55	17.4	50.58	6.99	13.46	19.04	12.62	19.22
8	25.17	16.52	50.39	7.19	13.34	19.06	12.76	19.37
9	24.91	16.86	50.59	7.1	13.16	19.05	12.67	19.24
10	25.49	17.04	50.67	6.73	14.08	19.07	12.74	19.27
11	25.28	17.17	50.6	6.72	12.14	19.04	12.8	19.23
12	25.33	16.48	50.72	6.78	12.67	19.05	12.62	19.23

Tabla 2. Medición del lado A

LADO B: IZQUIERDO				
Medidas	D3	D4	P1	L5
1	25.43	16.25	18.94	12.9
2	25.36	16.58	18.94	12.9
3	25.38	16.94	18.97	12.91
4	25.38	16.46	18.94	12.9
5	25.4	16.5	18.93	12.9
6	25.41	16.45	18.94	12.91
7	25.42	16.28	18.97	12.88
8	25.44	16.69	18.96	12.94
9	25.41	16.6	19.02	12.92
10	25.39	16.54	18.97	12.92
11	25.41	16.63	18.94	13.17
12	25.41	16.73	18.97	12.78

Tabla 3. Medición del lado B

lado der.	D1	D2	L1	L2	L3	L4	L5	P1
Media aritmética:	25.2858333	16.9158333	50.6616667	6.9125	13.3366667	19.0583333	12.685	19.2725
Moda:	25.28	#N/A	50.78	6.82	#N/A	19.05	12.52	19.23
Mediana:	25.28	16.95	50.64	6.82	13.465	19.05	12.62	19.27
Des vest:	0.25271106	0.28240713	0.126838	0.23833227	0.51198958	0.04130449	0.20416126	0.04653933
Varianza:	0.06386288	0.07975379	0.01608788	0.05680227	0.26213333	0.00170606	0.04168182	0.00216591

lado izq.	D3	D4	P2	L5
Media aritmética:	25.4033333	16.5541667	18.9575	12.9191667
Moda:	25.41	#N/A	18.94	12.9
Mediana:	25.41	16.56	18.95	12.905
Des vest:	0.02269695	0.19004585	0.02490893	0.08836477
Varianza:	0.00051515	0.03611742	0.00062045	0.00780833

coef. De correlación	-0.37457653	-0.509494	-0.2086128
-----------------------------	-------------	-----------	------------

Tabla 4. Promedio, moda, mediana, varianza, desviación estándar de cada primitiva.

La información descrita en las Tablas anteriores representa el primer modelo digital de la pieza, ya que la información dimensional puede usarse para diversos propósitos. De la cantidad y la calidad correcta de la información generada depende la representatividad de los modelos de diseño, ingeniería y manufactura, por ese motivo es de fundamental importancia que el proceso de obtención de la información geométrica y de manufactura se lleve a cabo sistemáticamente, esto es, usando protocolos de medición, métodos y procesos estadísticos.

4.3 Modelos digitales de diseño.

Una vez obtenido el primer modelo digital asociado con las mediciones y de haber obtenido el material (proporcionado por un profesor), el siguiente paso es utilizar el software Solidworks para manejar la información geométrica y dimensional con el objetivo de construir modelos digitales de diseño. El paso de la información al software se puede realizar de manera manual o automatizada. Esta última opción hubiera sido posible si para

obtener la información dimensional de la pieza se hubiera empleado una Máquina de Medición por Coordenadas. Para nuestro caso la información fue pasada de forma manual al Solidworks. Existen diversos modelos digitales de diseño que pueden elaborarse en el paquete, algunos se pueden observar en la pantalla de computadora y otros se generan automáticamente, pero pueden ser accedidos con algunos procedimientos. Dos de los modelos digitales más comunes son:

- 1) El plano de fabricación.
- 2) Modelo en sólidos.

El plano de fabricación es un modelo digital de enorme importancia, pues representa el corazón del diseño en términos de manufactura. Por lo tanto, su elaboración debe ser objetiva, sistemática y normada. De este modelo digital dependen los modelos de manufactura, por lo que es necesario utilizar los mejores conocimientos de dibujo técnico y de operaciones de manufactura.

El modelo digital asociado con el modelado de sólidos puede construirse desde la base de datos de la información dimensional, pero lo recomendable es que se construya desde el plano de fabricación, en otras palabras, en términos sistemáticos es preferible primero hacer el plano y luego el modelado de sólidos. Para generar este modelo digital, el Software Solidworks dispone de algoritmos basados en el álgebra de Boole cuyas operaciones de unión, diferencia e intersección son usadas para la construcción de los sólidos. Por lo tanto, cada vez que se genera un modelado de sólidos de una pieza o una máquina, se generan

diversos modelos dentro del software, como por el ejemplo el árbol de sólidos. Estos modelos pueden ser accesados si fuera necesario para el manejo de la información.

Las figuras 5 y 6. muestran dos planos de fabricación elaborados con dos normas: la ISO y la DIN, cuyas características y propiedades están incluidas en el Solidworks.

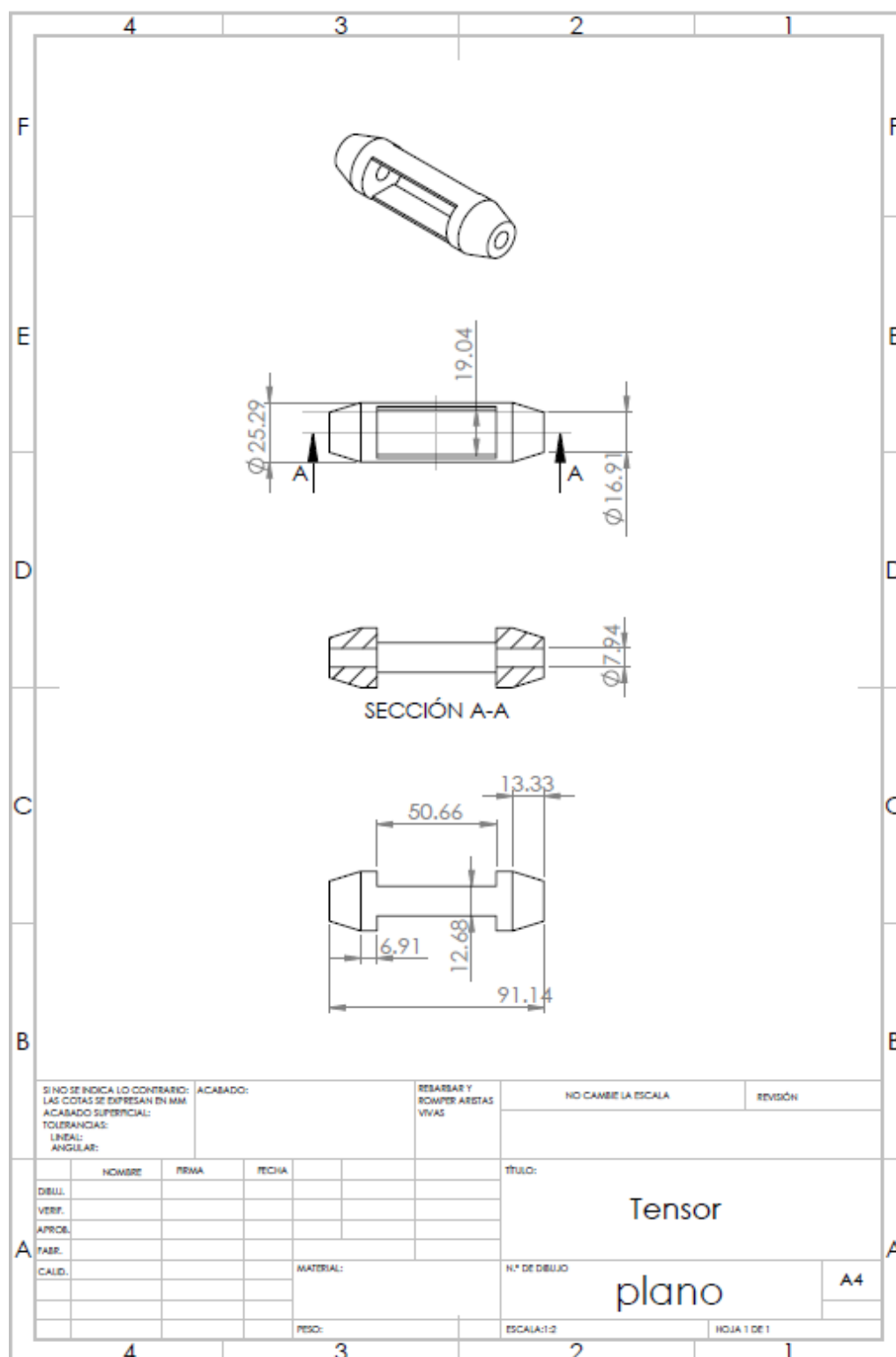


Figura 5. Plano de fabricación de la pieza en norma ISO.

Figura 6. Plano de fabricación de la pieza en norma DIN.

Aunque los planos de fabricación son la manera más común en las industrias de transmitir la información geométrica y dimensional de partes y componentes, existe una nueva forma de dimensionamiento que se relaciona con acotar en piezas de tres dimensiones que se denomina Diseño Basado en el Modelo (DBM) o DMD. Esta visión de dimensionado implica de cierto modo que el plano debe desaparecer. La Figura 7. muestra un modelo en sólidos de la pieza motivo de estudio dimensionada.

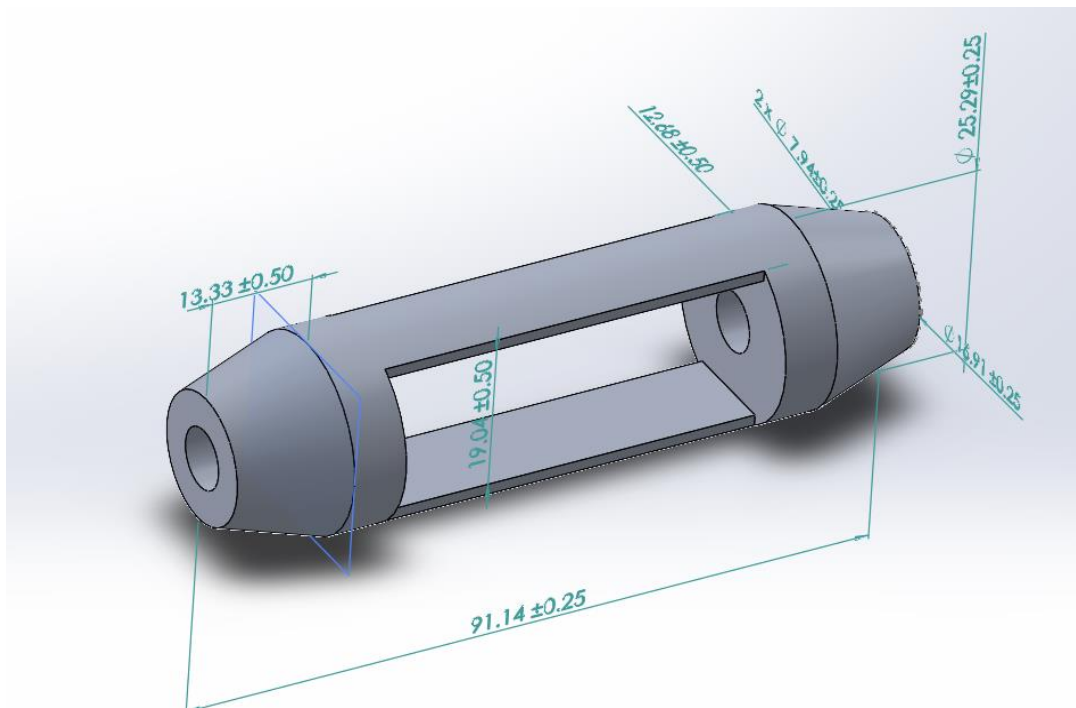


Figura 7. Dimensionamiento en sólidos.

El SolidWorks tiene una opción para desarrollar un modelo digital en MDB. Este modelo se muestra en la figura siguiente:

Logo

Part Number:

Date:

Comments:

Revision:

Designed By:

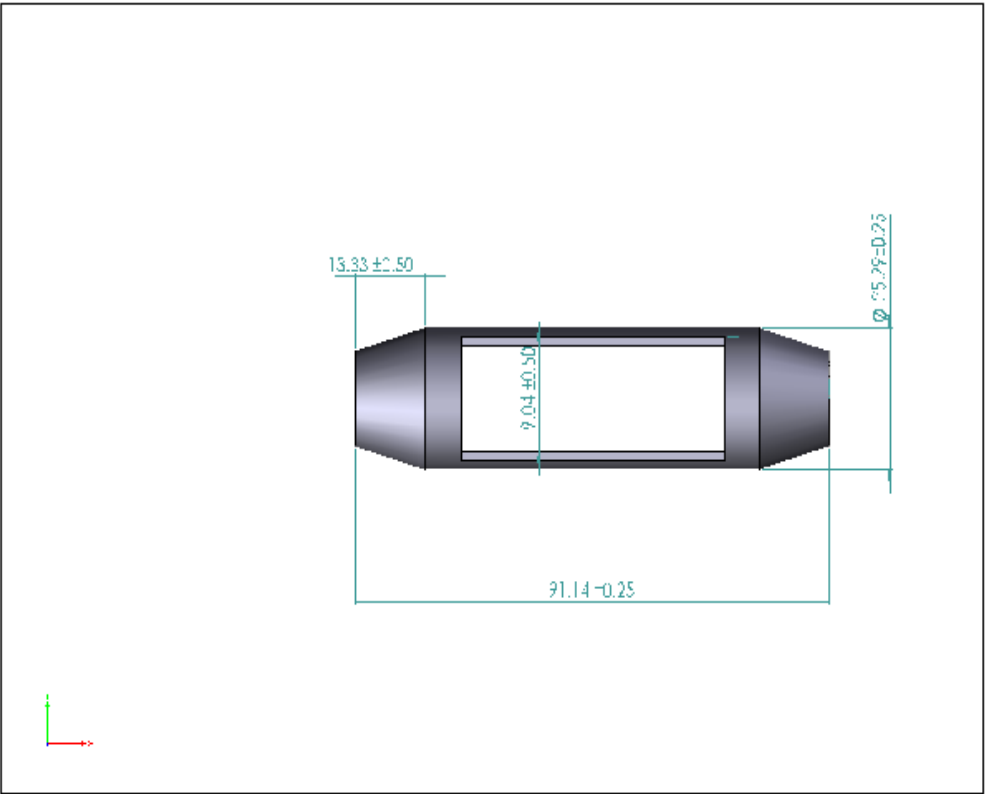
Material:

Weight:

APPROVALS		
TITLE	NAME	DATE
DRAWN		
CHECKED		
APPROVED		

GENERAL NOTES

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
MODEL IS REQUIRED TO COMPLETE PRODUCT DEFINITION
FOR ALL NON-DIMENSIONED FEATURES IN THIS DOCUMENT
ALL DIMENSIONS OBTAINED FROM THE MODEL ARE BASIC
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
THE GENERAL TOLERANCE FOR ALL UNTOLERANCED SURFACES = 0.2MM
INTERPRET DRAWING IN ACCORDANCE WITH ASME Y14.5-2009, AND ASME Y14.100-2013



Frontal

Lateral

Superior

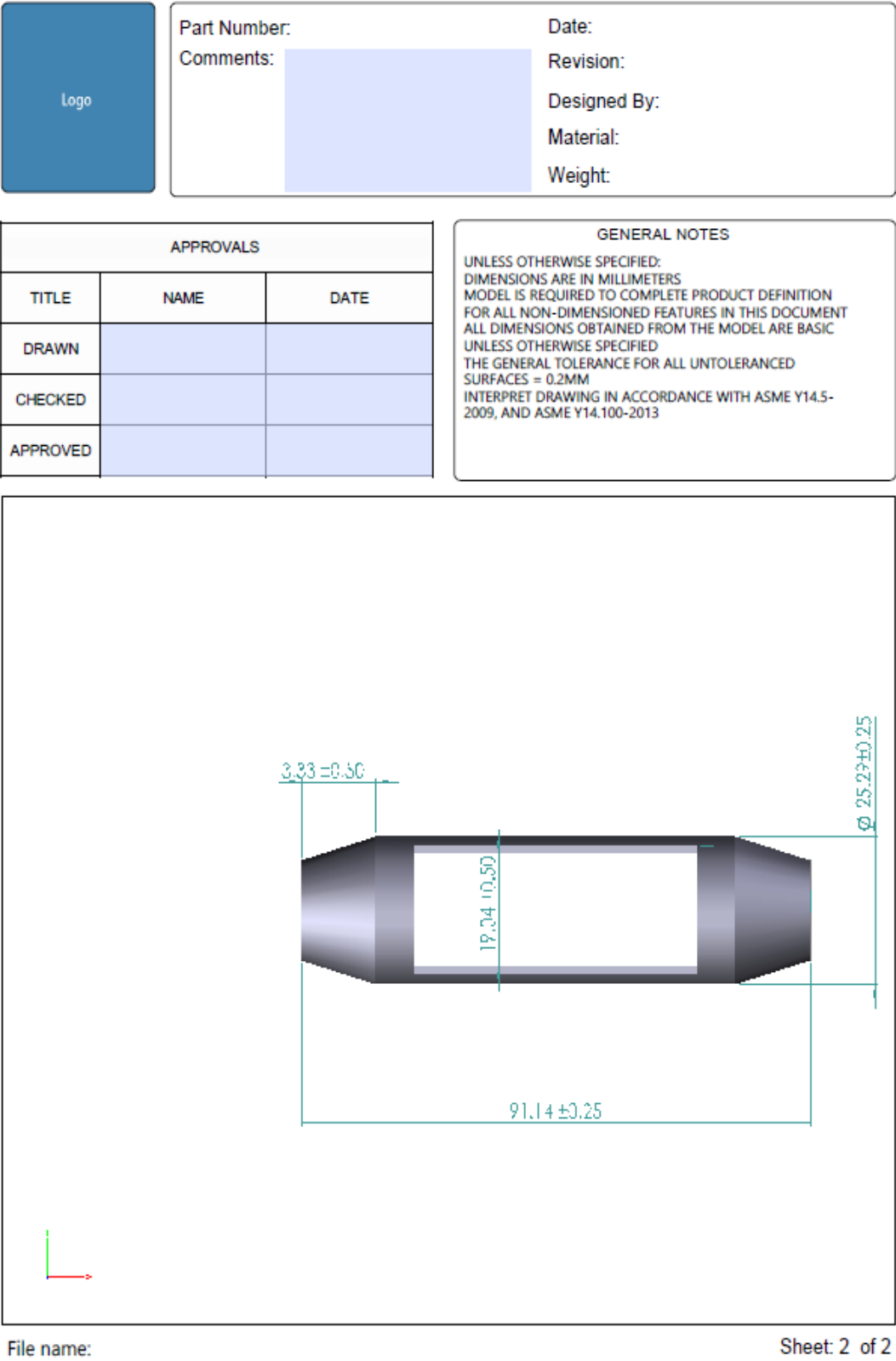


Figura 8. Dimensionamiento en MBD.

4.4 Modelos digitales de ingeniería.

Los modelos digitales de ingeniería (CAE, Computer Aided Engineering) se refieren al estudio computacional de diversos problemas que tiene que ver con atributos o propiedades de las piezas o componentes sujetas a condiciones externas y que alteran su comportamiento, por ejemplo, estudios mecánicos, térmicos, o estudios de movimiento, o bien estudios de sustentabilidad. Aunque existen diversos paquetes computacionales exclusivos para cada necesidad específica, SolidWorks posee algunos módulos de análisis y cálculo bajo el enfoque CAD/CAE, Módulos de Manufactura (CAD/CAM) y módulos de sustentabilidad para hacer estudios sobre la huella del carbono.

En esta sección se presentan dos modelos digitales de ingeniería; uno asociado con estudios por elemento finito de la pieza sometida a cargas externas y a un flujo de calor y otro relacionado con un estudio de sustentabilidad. Ambos modelos dependen del modelado de sólidos de la pieza.

4.4.1 Modelos digitales de elemento finito

La técnica de elemento finito consiste en resolver problemas de ingeniería mediante técnicas de interpolación. Para ello, es necesario que el problema sea modelado en términos de ecuaciones diferenciales. En términos generales, el elemento finito es una técnica de interpolación que se aplica para resolver problemas físicos y matemáticos que están en función de ecuaciones diferenciales. Los algoritmos de elemento finito vienen automatizados en Solidworks, y estos consisten en configurar y resolver un problema físico al someter la pieza en estudio a diversos estudios, que pueden ser dinámicos, estáticos, de

calor, de vibraciones, etc. En este trabajo de tesis se analizaron dos problemas relacionados con la pieza motivo de estudio: 1) Estático de elasticidad y 2) Térmico.

Para analizar los problemas es necesario conocer las cargas a las cuales se somete la pieza, posteriormente es necesario conocer y configurar las condiciones a la frontera, para luego realizar un proceso de discretizado de la pieza llamada partición y que computacionalmente se conoce como mallado. Es importante y necesario tener la información del material de la pieza para conocer las propiedades mecánicas o térmicas según sea el caso, ya que el software se configura con dicha información. Una vez configurado el problema se procede a realizar el cálculo y a obtener la información del análisis que generalmente se da en funciones. Esta información es procesada y se da términos de tablas o puede ser graficada para conocer cualitativa y cuantitativamente el comportamiento de la pieza según el estudio realizado. Esta información es usada posteriormente para diversos propósitos, por ejemplo, para el diseño o para mejorar una parte, o para estudiar el comportamiento térmico de la pieza.

A pesar de que el software Solidworks tiene incorporado diversos algoritmos de análisis en ingeniería es importante aclarar que no es un paquete especializado en problemas tipo CAE. Los usuarios de esta herramienta deben comprender que para hacer análisis más detallados y especializados deben usar otras herramientas diseñadas específicamente para los estudios de elemento finito. Del mismo modo, es importante aclarar que se requiere del dominio de la matemática tanto de modelación como de interpolación para poder hacer uso correcto del software. Las figuras siguientes muestran las salidas gráficas y el proceso

de configurado de los problemas estático-lineal y de calor realizados a la pieza motivo de estudio.

A) Modelo estático-elástico

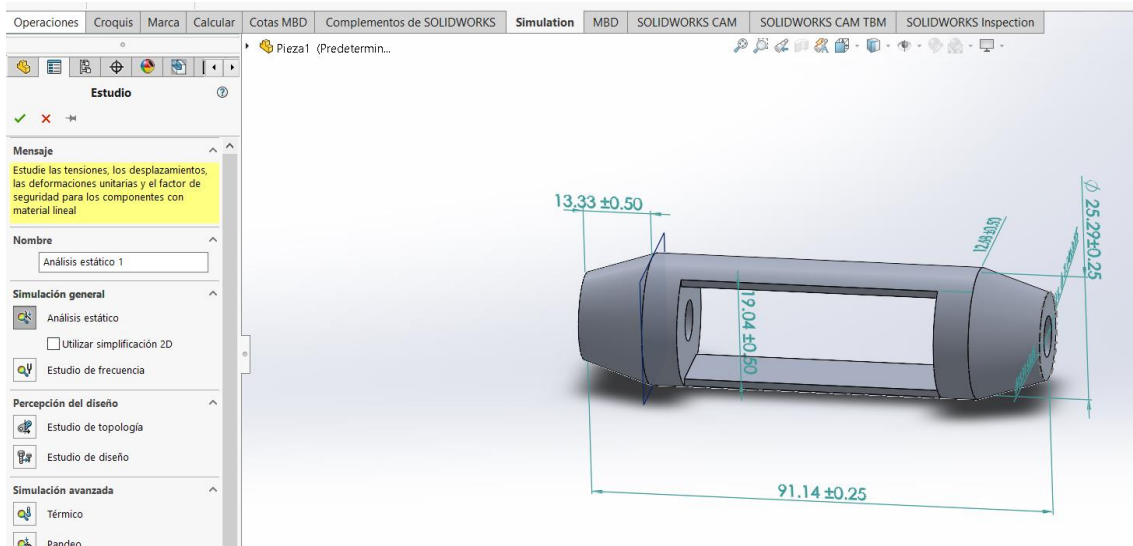


Figura 9. Configurando el problema estático-elástico en Solidworks

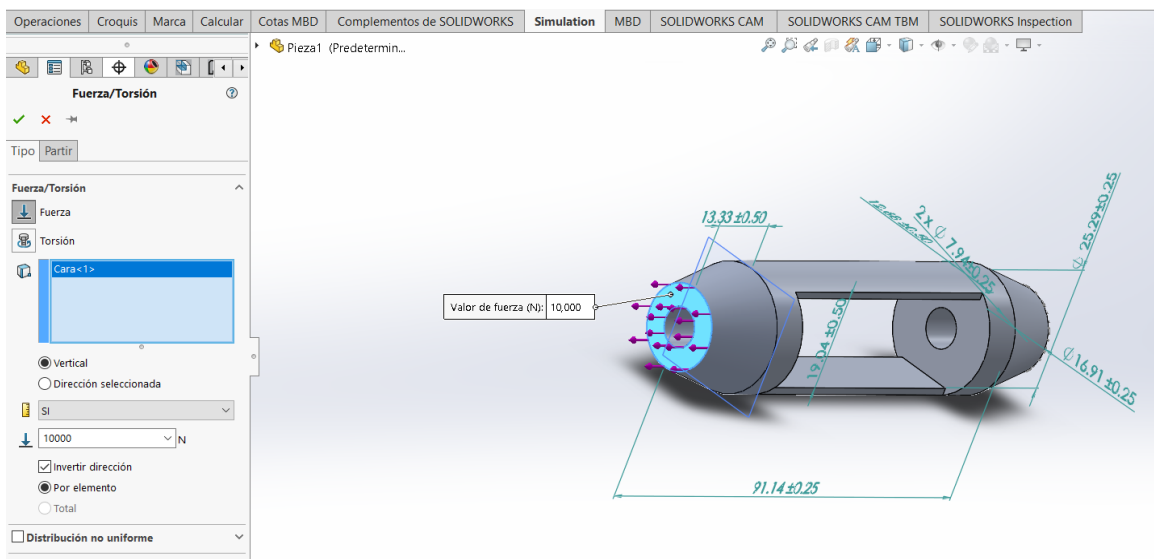


Figura 10. Asignación cargas de tensión y condiciones de frontera

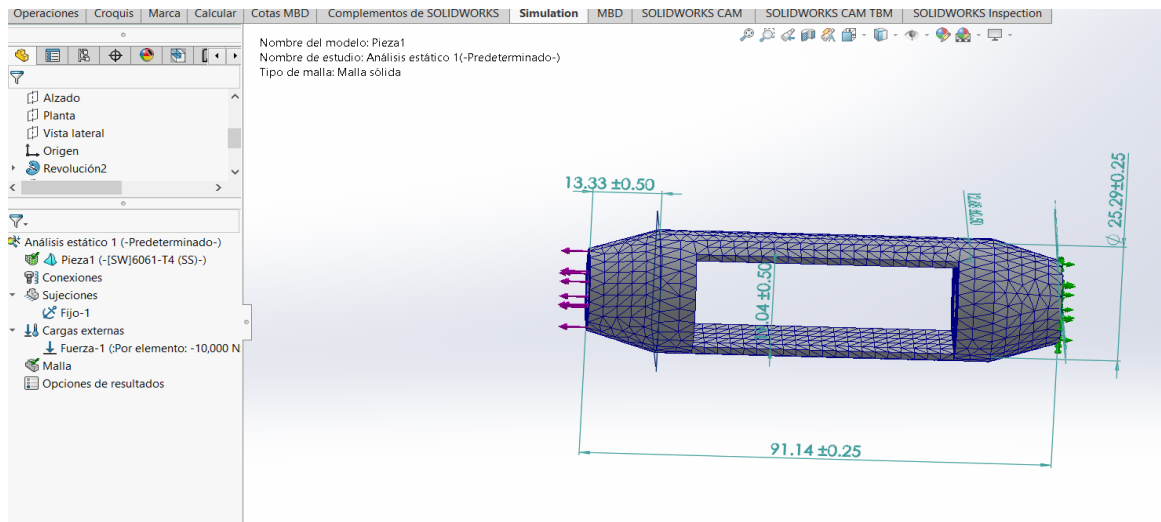


Figura 11. Proceso de mallado de la pieza

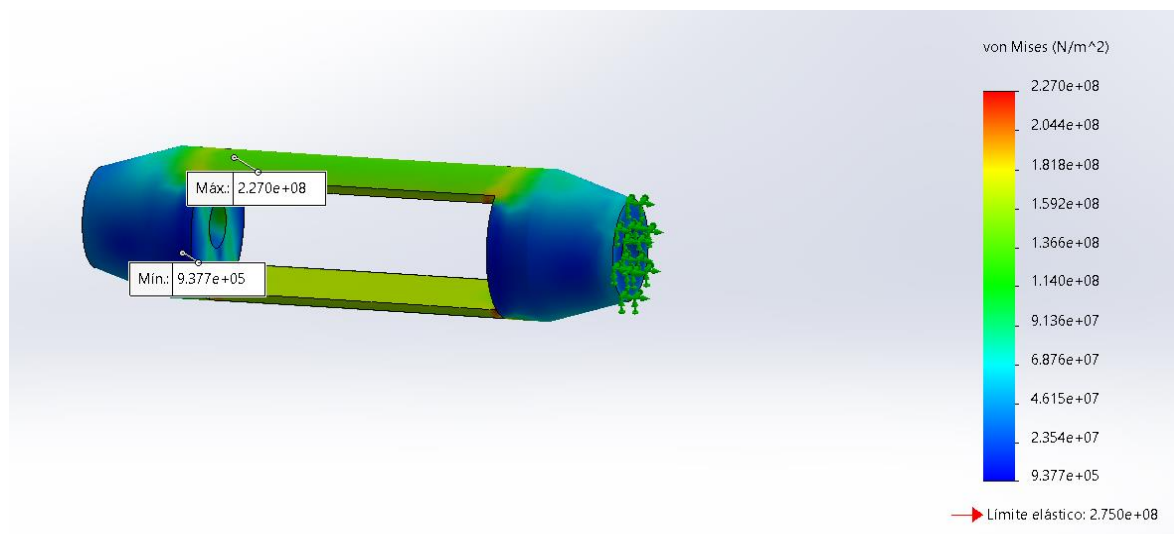


Figura 12. Cálculo y salida gráfica de los resultados

Cabe mencionar que es necesario configurar con sumo cuidado módulo para hacer los estudios de ingeniería, ya que una carga más puesta o una indefinición de las condiciones a la frontera darán como resultado un mal cálculo y problemas de interpretación. Del mismo modo, se requiere conocer los diferentes tipos de mallado y los diferentes tipos de

interpolación y métodos numéricos que existen para resolver los problemas. La interpretación de los resultados debe hacerse con mucho cuidado debido a que no necesariamente la visualización de los resultados en términos de colores da una respuesta correcta. Los análisis de elemento finito son complicados y requieren de mucha especialidad. En el caso del modelo estático-elástico, lo que se busca es conocer el comportamiento mecánico de la pieza sometida a cargas de tensión. El comportamiento mecánico implica el cálculo de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos. La Figura 12. muestra los resultados en colores en términos de los esfuerzos de Von Mises, o sea en términos de los esfuerzos principales. Los colores indican en general en donde se localiza el mayor esfuerzo.

B) Modelo térmico.

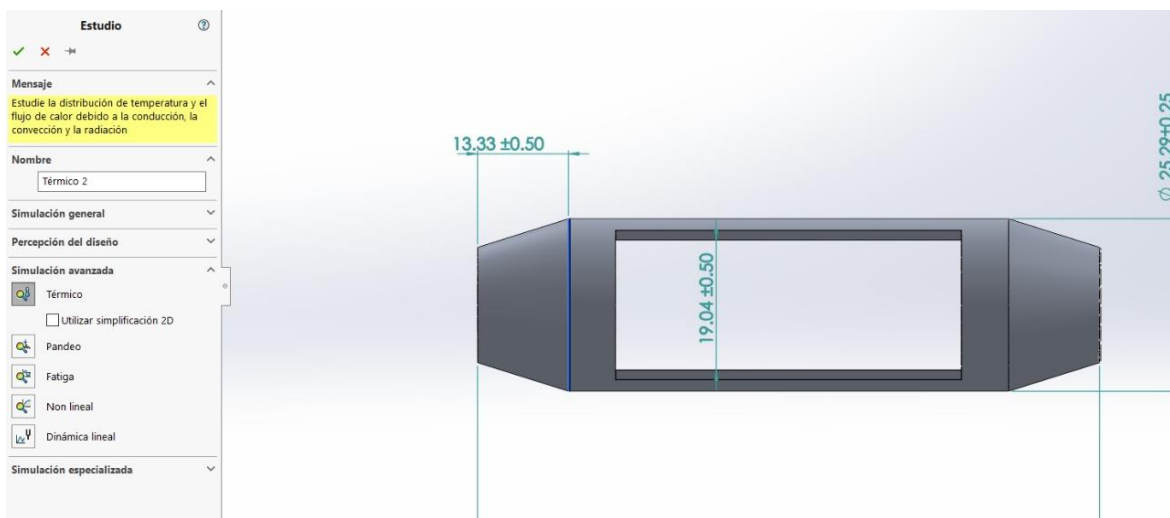


Figura 13. Configurando el problema térmico en Solidworks

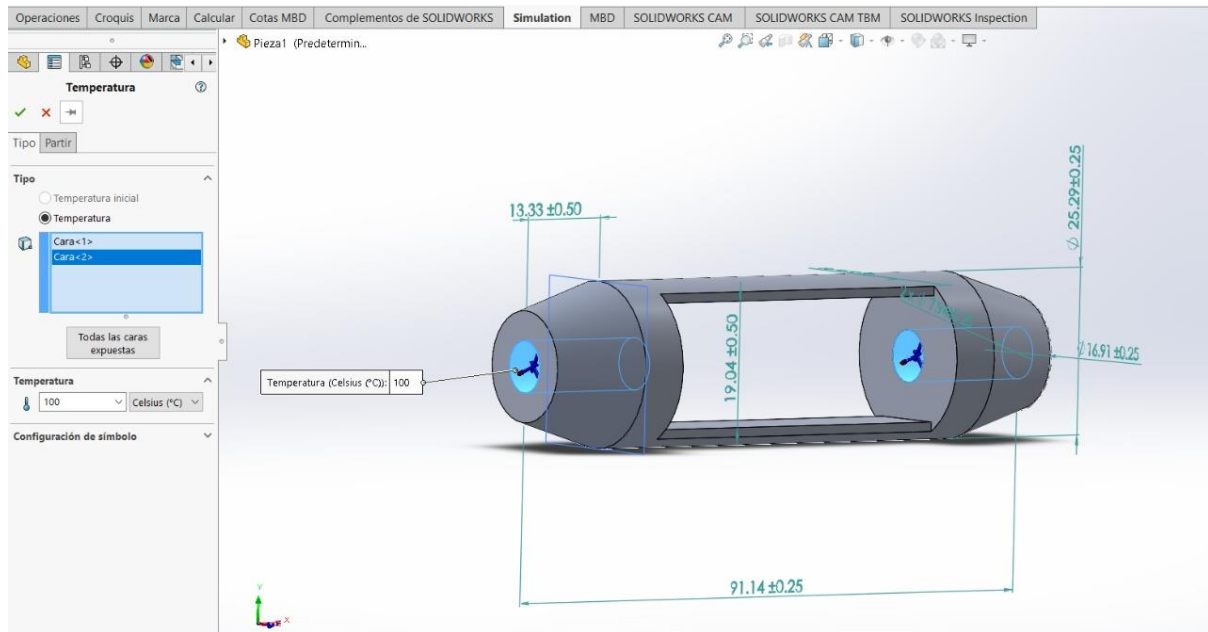


Figura 14. Asignación cargas térmicas y condiciones de frontera

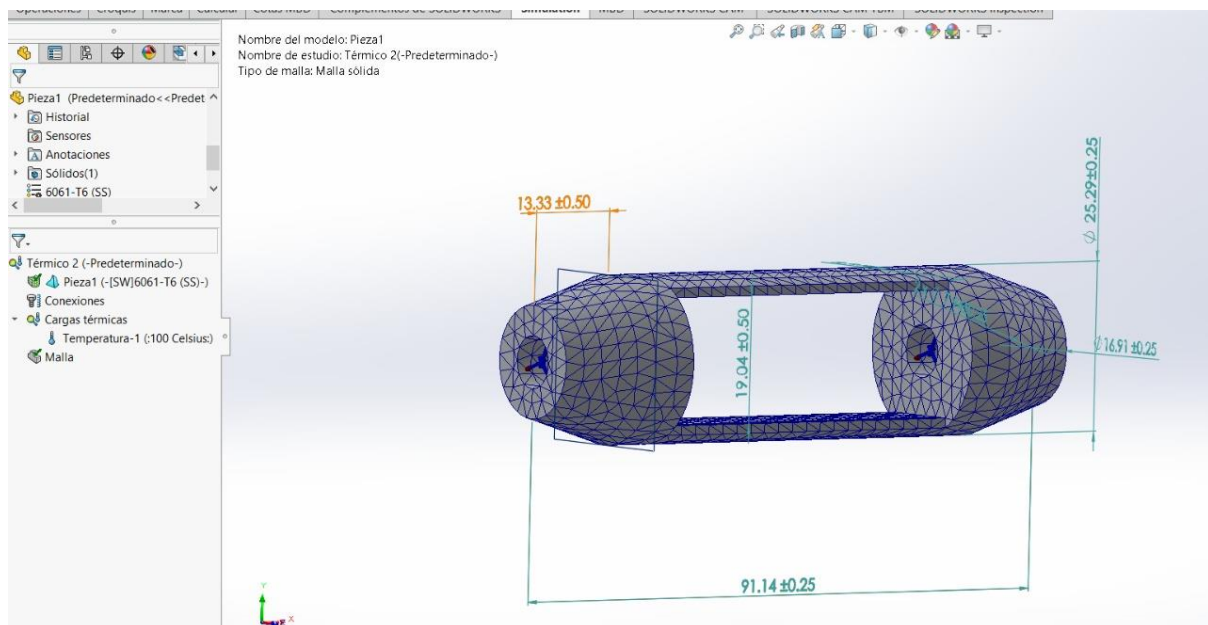


Figura 15. Proceso de mallado de la pieza para el problema térmico

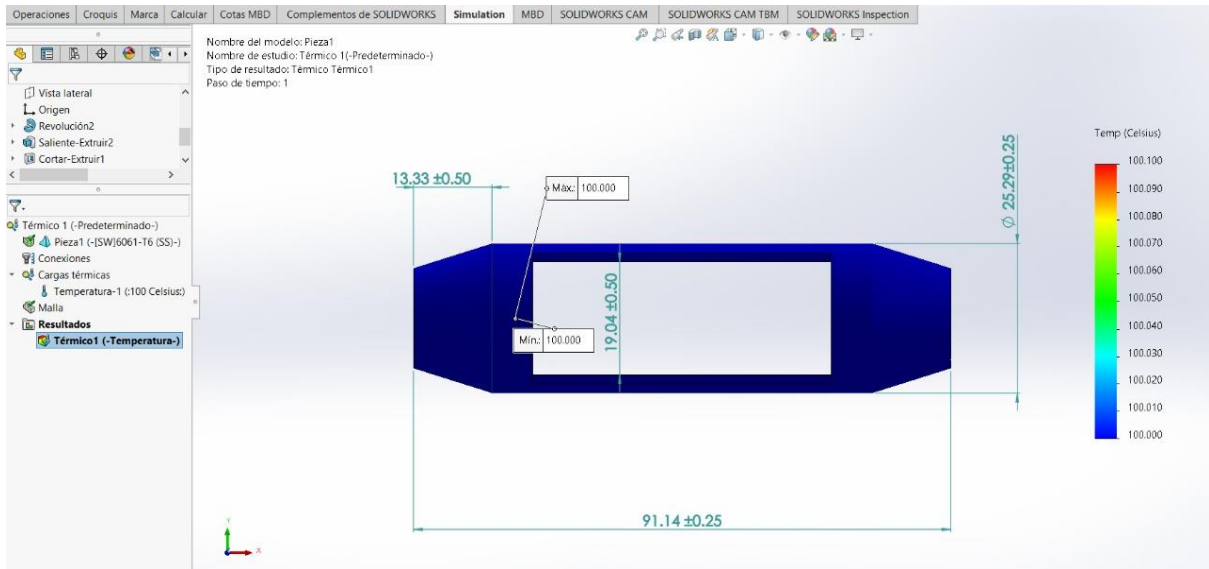


Figura 16. Cálculo y salida gráfica de los resultados para el estudio térmico.

El estudio térmico se refiere a conocer la distribución de temperaturas al someter a la pieza a una carga térmica. La Figura 16. muestra la distribución de temperaturas relacionadas con la carga térmica aplicada a la pieza de estudio.

4.4.2 Modelos digitales de sustentabilidad

El paquete Solidworks tiene integrado un módulo de estudio que analiza problemas de sustentabilidad. Estos estudios son de suma importancia debido a que es posible conocer el grado de contaminación que se genera al fabricar una pieza. El método de evaluación que tiene integrado el SolidWorks Sustainable es la Evaluación del Ciclo de Vida del Producto. Es posible realizar los siguientes estudios (parámetros de sustentabilidad) en SolidWorks:

- 1) Potencial de eutrofización.

- 2) Acidificación.
- 3) Huella del carbono.
- 4) Energía total consumida.

Cada estudio generado representa un modelo digital CAE o de ingeniería. Este módulo de solidworks requiere el modelado de sólidos de la pieza, el lugar de donde se traslada la materia prima, el material de la pieza y los procesos de manufactura a la que es sometida. Con esta información el software calcula los parámetros de sustentabilidad con los cuales es posible conocer por ejemplo la huella de carbono que representa los gases de efecto invernadero que se emitirán a la atmósfera, o para el caso de la energía total consumida, el software determina cuanta energía se requiere para la fabricación de la pieza. Para el caso de la acidez, el paquete determina cuánta acidez tiene el suelo (o cómo se modifica) debido a la deposición atmosférica de sustancias tales como sulfatos, nitratos y amoníaco. Finalmente, el software determina el impacto de eutrofización se produce debido a un aporte excesivo de nutrientes a los ecosistemas.

Los estudios de sustentabilidad son importantes porque es posible simular los diseños y la fabricación de piezas en términos de la menor reducción de contaminantes. Esto permite tener diseños sustentables y amigables para el medio ambiente. La tabla siguiente muestra un estudio de sustentabilidad realizado a la pieza motivo de estudio. En este caso el proceso de fabricación planteado fue un maquinado.

[company name here]

[city, state here]

[company url here]



SOLIDWORKS

Sustainability Report



Model Name: Pieza1

Material: 6061-T6 (SS)

Recycled content: 0.00 %

Weight: 47.74 g

Manufacturing process: Turned

Surface Area: 8002.74 mm²

Built to last: 5.0 year

Duration of use: 0.274 year



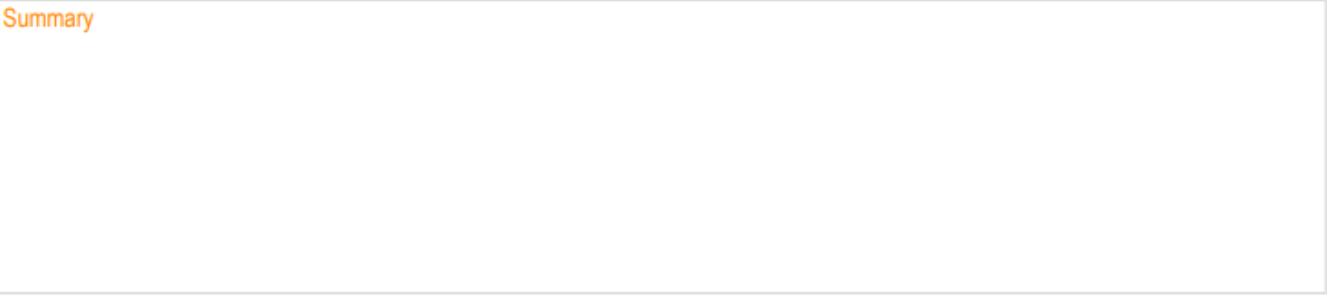
Manufacturing Region

The choice of manufacturing region determines the energy sources and technologies used in the modeled material creation and manufacturing steps of the product's life cycle.

Use Region

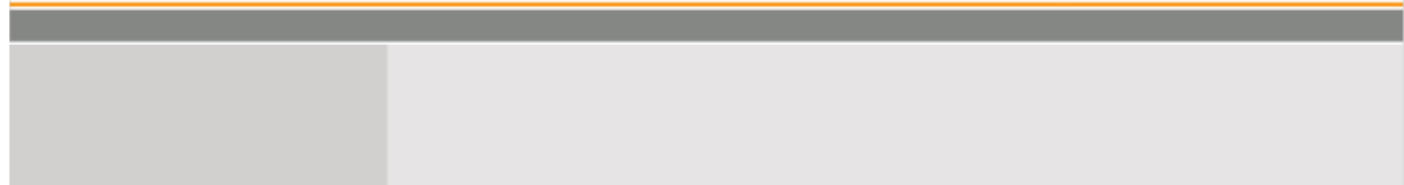
The use region is used to determine the energy sources consumed during the product's use phase (if applicable) and the destination for the product at its end-of-life. Together with the manufacturing region, the use region is also used to estimate the environmental impacts associated with transporting the product from its manufacturing location to its use location.

Summary



[Learn more about Life Cycle Assessment](#)

Sustainability Report



Model Name:	Pieza1	Material:	6061-T6 (SS)	Weight:	47.74 g	Manufacturing process:	
		Recycled content:	0.00 %	Surface Area:	8002.74 mm²		Turned
				Built to last:	5.0 year		
				Duration of use:	0.274 year		

Material 6061-T6 (SS) 0.00 %

Material Unit Cost 2.20 USD/kg

Manufacturing

Region:	North America
Process:	Turned
Electricity consumption:	4.2E-4 kWh/lbs
Natural gas consumption:	0.00 AutoTrace/lbs
Scrap rate:	9.9 %
Built to last:	5.0 year
Part is painted:	No Paint

Use

Region:	North America
Duration of use:	0.274 year

Transportation

Truck distance: 2600 km
 Train distance: 0.00 km
 Ship distance: 0.00 km
 Airplane Distance: 0.00 km

End of Life

Recycled: 33 %
 Incinerated: 13 %
 Landfill: 54 %

Comments

[Click here for alternative units such as 'Miles Driven in a Car'](#)

**Sustainability Report**

Model Name:	Pieza1	Material:	6061-T6 (SS)	Weight:	47.74 g	Manufacturing process:
				Surface Area:	8002.74 mm²	Turned
		Recycled content:	0.00 %	Built to last:	5.0 year	
				Duration of use:	0.274 year	

Environmental Impact (calculated using CML impact assessment methodology)

Carbon Footprint0.660 kg CO₂e

Material:	0.629 kg CO ₂ e
Manufacturing:	0.016 kg CO ₂ e
Transportation:	6.0E-3 kg CO ₂ e
End of Life:	8.4E-3 kg CO ₂ e

Total Energy Consumed

8.1 MJ

Material:	7.8 MJ
Manufacturing:	0.232 MJ
Transportation:	0.090 MJ
End of Life:	0.011 MJ

Air Acidification4.5E-3 kg SO₂e

Material:	4.4E-3 kg SO ₂ e
Manufacturing:	1.1E-4 kg SO ₂ e
Transportation:	2.7E-5 kg SO ₂ e
End of Life:	8.5E-6 kg SO ₂ e

Water Eutrophication1.5E-4 kg PO₄e

Material:	1.4E-4 kg PO ₄ e
Manufacturing:	4.0E-6 kg PO ₄ e
Transportation:	6.2E-6 kg PO ₄ e
End of Life:	1.6E-6 kg PO ₄ e

Material Financial Impact

0.10 USD

Comments

[Click here for alternative units such as 'Miles Driven in a Car'](#)



Glossary

Air Acidification - Sulfur dioxide, nitrous oxides other acidic emissions to air cause an increase in the acidity of rainwater, which in turn acidifies lakes and soil. These acids can make the land and water toxic for plants and aquatic life. Acid rain can also slowly dissolve manmade building materials such as concrete. This impact is typically measured in units of either **kg sulfur dioxide equivalent (SO₂)**, or **moles H⁺ equivalent**.

Carbon Footprint - Carbon-dioxide and other gasses which result from the burning of fossil fuels accumulate in the atmosphere which in turn increases the earth's average temperature. Carbon footprint acts as a proxy for the larger impact factor referred to as Global Warming Potential (GWP). Global warming is blamed for problems like loss of glaciers, extinction of species, and more extreme weather, among others.

Total Energy Consumed - A measure of the non-renewable energy sources associated with the part's lifecycle in units of megajoules (MJ). This impact includes not only the electricity or fuels used during the product's lifecycle, but also the upstream energy required to obtain and process these fuels, and the embodied energy of materials which would be released if burned. Total Energy Consumed is expressed as the net calorific value of energy demand from non-renewable resources (e.g. petroleum, natural gas, etc.). Efficiencies in energy conversion (e.g. power, heat, steam, etc.) are taken into account.

Water Eutrophication - When an over abundance of nutrients are added to a water ecosystem, eutrophication occurs. Nitrogen and phosphorous from waste water and agricultural fertilizers causes an overabundance of algae to bloom, which then depletes the water of oxygen and results in the death of both plant and animal life. This impact is typically measured in either **kg phosphate equivalent (PO₄)** or **kg nitrogen (N) equivalent**.

Life Cycle Assessment (LCA) - This is a method to quantitatively assess the environmental impact of a product throughout its entire lifecycle, from the procurement of the raw materials, through the production, distribution, use, disposal and recycling of that product.

Material Financial Impact - This is the financial impact associated with the material only. The mass of the model is multiplied by the financial impact unit (units of currency/units of mass) to calculate the financial impact (in units of currency).

[Learn more about Life Cycle Assessment](#) 

Tabla 5. Estudio de sustentabilidad en Solidworks.

El estudio arrojado por Solidworks con respecto a la determinación de los parámetros de sustentabilidad solo deben ser tomados como referencia, ya que para que la información sea considerada como objetiva esta debe ser actualizada constantemente.

4.5 Modelos digitales de fabricación.

La fabricación de componentes es una actividad crucial para las empresas. Esta puede hacerse a mano, por interpretación directa de los planos de fabricación, o automatizada mediante una integración CAD/CAM. Los modelos digitales de fabricación son esenciales, ya que es posible manejar la información para diversos estudios de manufactura, entre ellos la simulación computacional. El plano de fabricación es la base para la fabricación, sin embargo, para el caso del Solidworks este tiene un módulo en el que se puede simular la fabricación y generar un modelo digital de fabricación denominado CNC.

La simulación de la manufactura tiene diversos usos como, por ejemplo:

- 1) El estudio y análisis de las trayectorias de las herramientas.
- 2) Simplificación de los códigos de CNC.
- 3) Visualización de interferencias.

El paquete Solidworks integra una herramienta denominada SOLIDCAM que se puede utilizar para diversos propósitos de fabricación. Por ejemplo, para estimar los tiempos de procesos que son de suma importancia para la planeación de procesos asistida por computadora o CAPP por sus siglas en inglés. La Tabla ¿? muestra una hoja de proceso en la que los tiempos y las operaciones de maquinado fueron estimados con la herramienta SolidCAM.

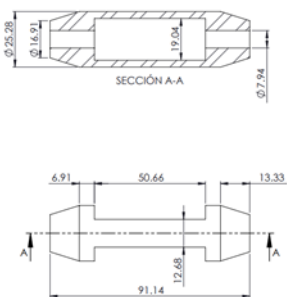
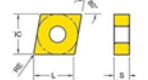
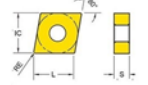
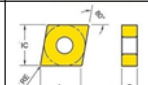
IIMM		Hoja de proceso					Nombre: Carolina Borjon Garcia				
Escala 1:1		Material Barra de Aluminio comercial	Denominación AL 6061-T6		Material Bruto SI		Curso:		Curso:		
											
F	O	Designación	Croquis	Herramientas	Imagen de la herramienta	Verificación	Nº de pasadas	Velocidad m/min	R.P.M.	Avance mm/rev	Tiempo (Seg.)
1	1.1	Refrentar	 Sujetar con <u>chuck</u>	CNMG 431 80DEG SQR HOLDER		Calibre	3	548	5000	0.31	3.6
2	2.1	Maquinado de conicidad	 Sujetar con <u>chuck</u>	CNMG 431 80DEG SQR HOLDER		Calibre	3	548	5000	0.31	3.6
3	3.1	Corte		3MM CUT-OFF BLADE (3 MM WIDE GROOVE INSERT 0.2MM RAD)		Calibre	1	377.95	5000	0.12	4.2
4	4.1	Refrentar		CNMG 431 80DEG SQR HOLDER		Calibre	3	548	5000	0.31	3.6
5	5.1	Maquinado de conicidad		CNMG 431 80DEG SQR HOLDER		Calibre	3	548	5000	0.31	3.6
6	6.1	Taladrado a centro		6MM X 60DEG HSS CENTERDRILL		Calibre	1	174.35	5000	0.06	2.4
	6.2	Taladrado ciego		7.9mm JOBBER DRILL		Calibre	1	252.68	5000	0.11	13.8
	6.3	Taladrado de centro		6MM X 60DEG HSS CENTERDRILL		Calibre	1	174.35	5000	0.06	2.4
	6.4	Taladrado ciego		7.9mm JOBBER DRILL		Calibre	1	252.68	5000	0.11	13.8
7	7.1	Fresado de aproximación 1		10MM CRB 2FL 22 LOC		Calibre	10.13	157.08	5000	0.06	19.2
	7.2	Fresado de acabado		6MM CRB 2FL 19 LOC Broca		Calibre	1	94.25	5000	0.07	1.89

Tabla 6. Hoja de proceso

La hoja de proceso es un modelo digital de manufactura y contiene información importante para planificar las operaciones en las máquinas herramientas. El diseño de la hoja de proceso es una de las tareas fundamentales en toda empresa que fabrica partes y componentes.

4.5.1 Modelos digitales de fabricación (simulación).

La simulación de la fabricación es trascendental en las empresas, y debe ser usada con regularidad antes de proceder a la manufactura real de partes y componentes. El SolidCAM se utilizó en este trabajo para simular dos operaciones genéricas de fabricación realizadas a la pieza motivo de estudio: 1) Torneado y 2) Fresado. Ambas operaciones requirieron de varias herramientas para lograr la conformación requerida en el plano de fabricación.

4.5.1.1 Torneado

Las figuras siguientes presentan el proceso de configuración y simulación de la operación genérica torneado, realizada a la pieza de trabajo motivo de estudio.

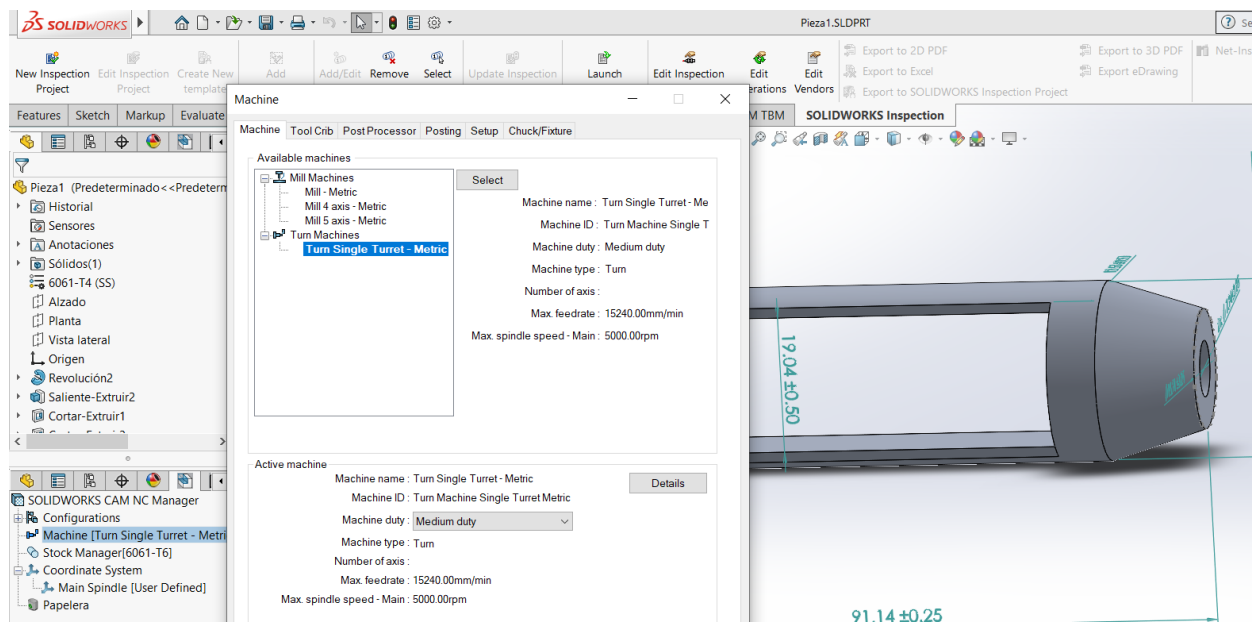


Figura 17. Configuración de torno simple en SolidCAM.

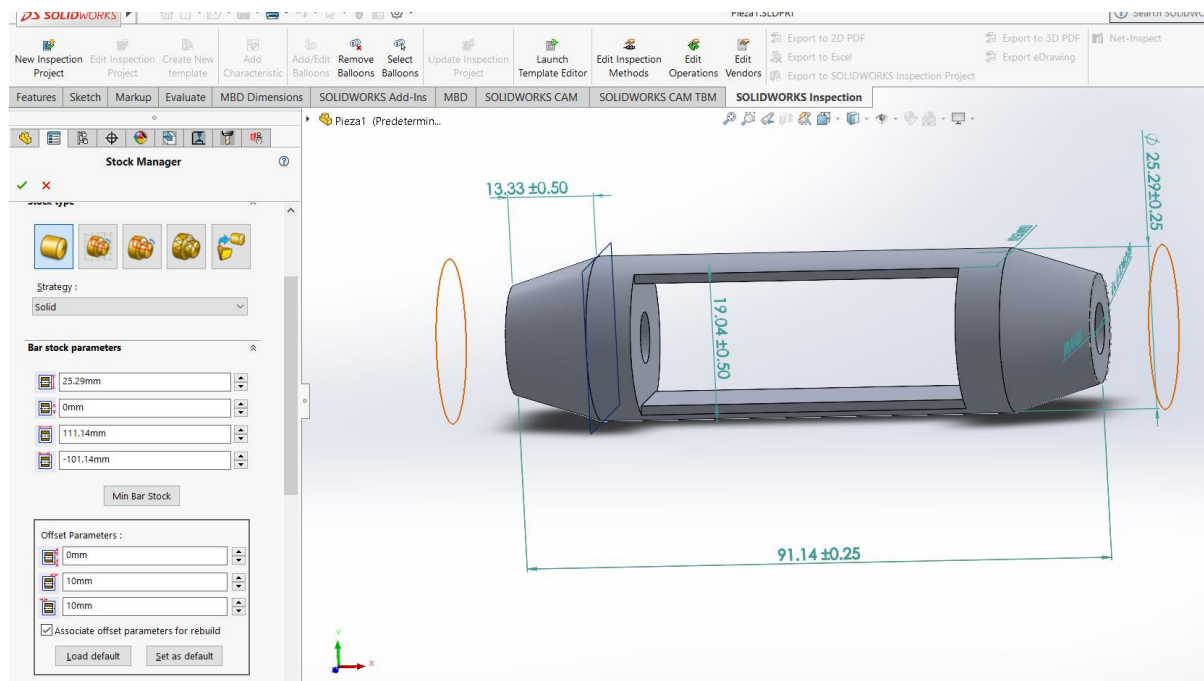


Figura 18. Se considera la opción de pieza completa con sobrante.

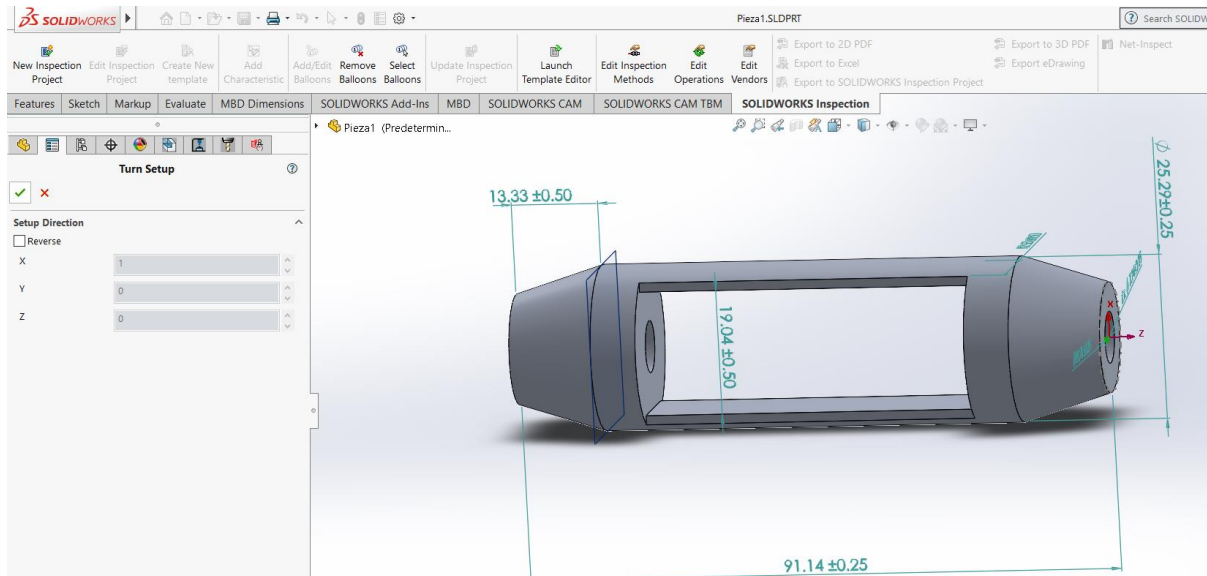


Figura 19. Se ubican las coordenadas del torneado.

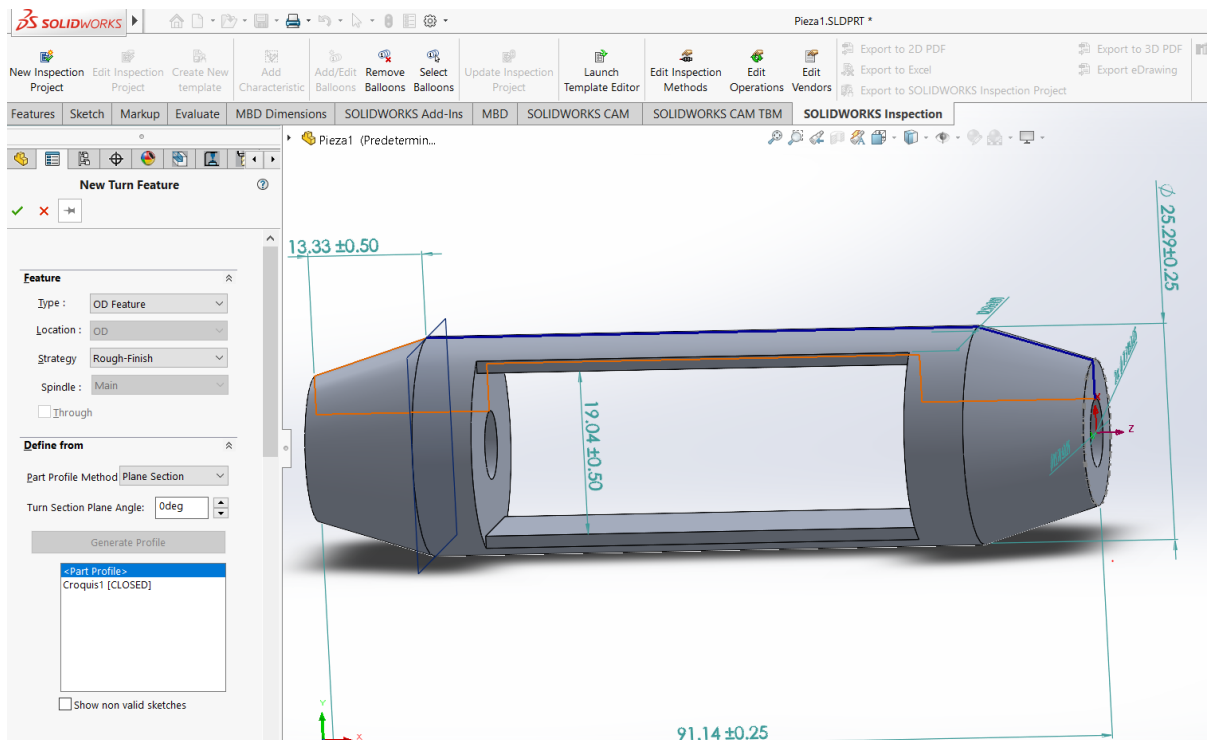


Figura 20. Se seleccionan las caras en donde se realizarán las operaciones.

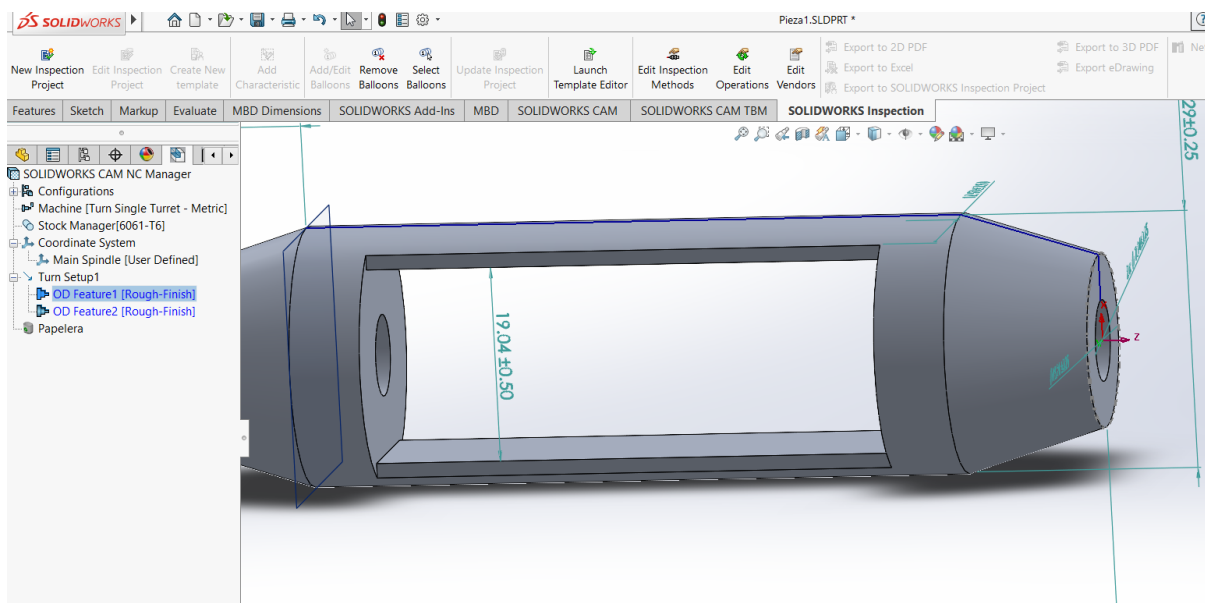


Figura 21. Se da de alta un cambio de herramienta.

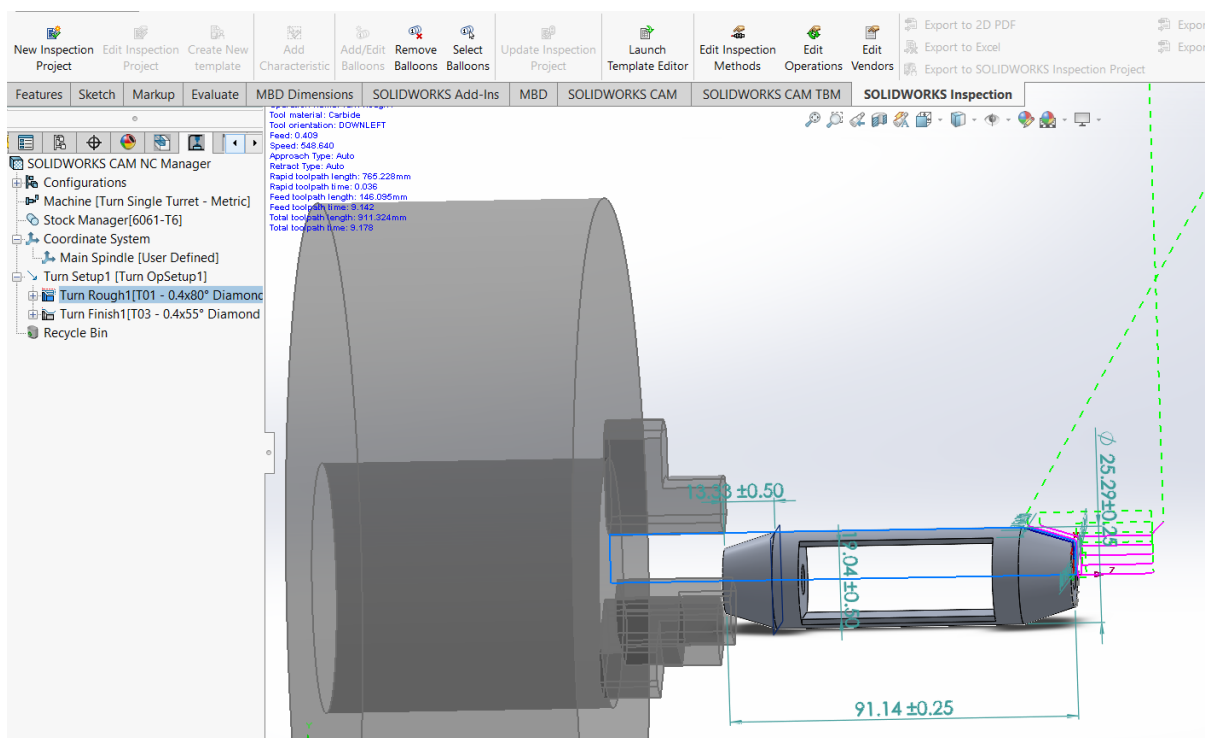


Figura 22. Se lleva a cabo la simulación de la operación.

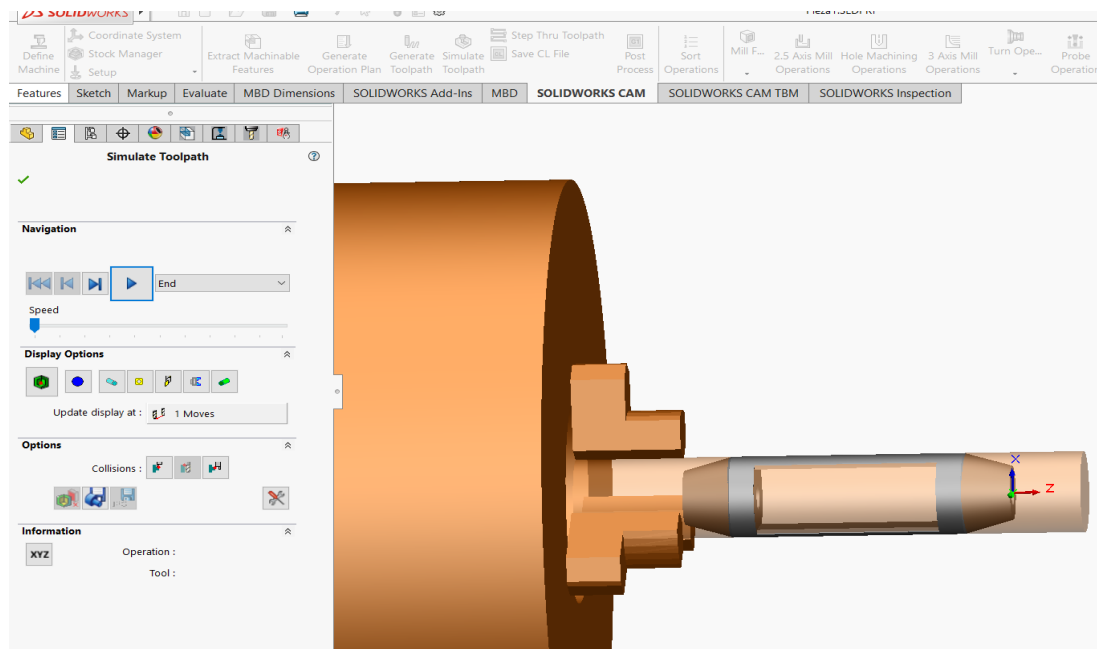


Figura 23. Proceso de simulación.

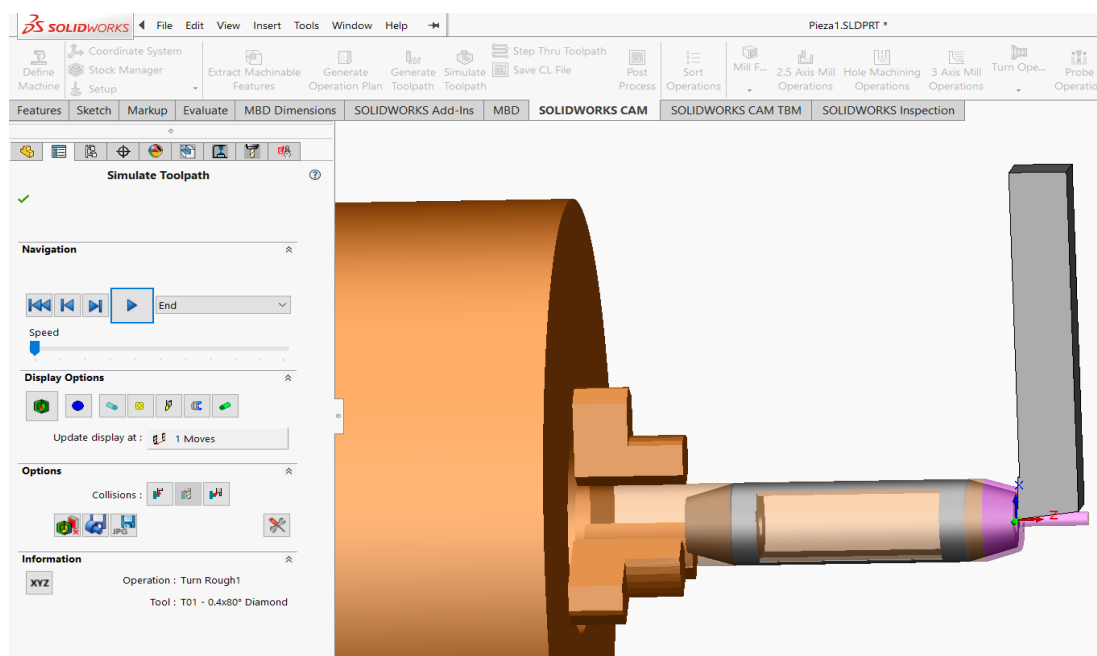


Figura 24. Resultado final del desbaste.

A continuación, se presenta el proceso de taladrado.

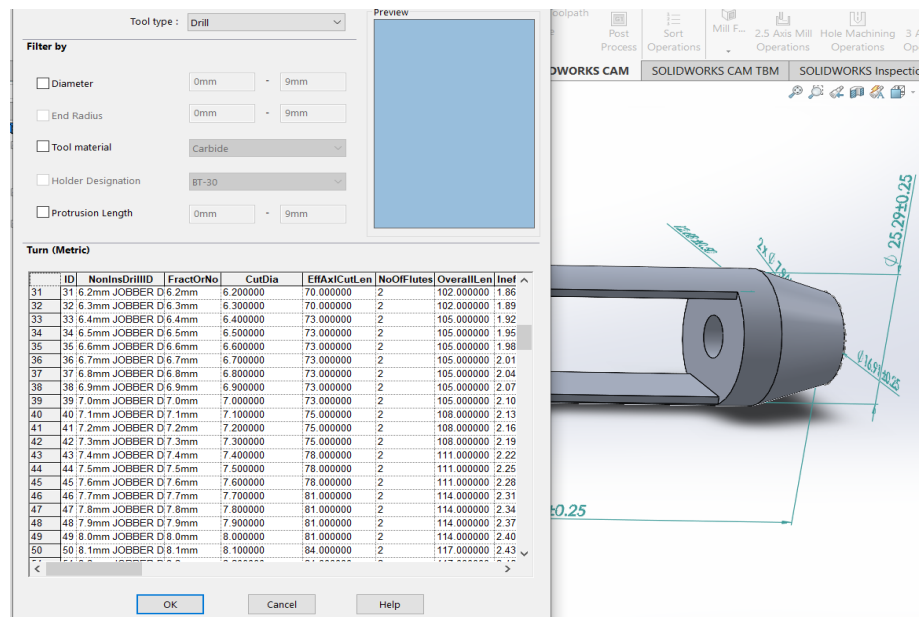


Figura 25. Se selecciona una nueva herramienta

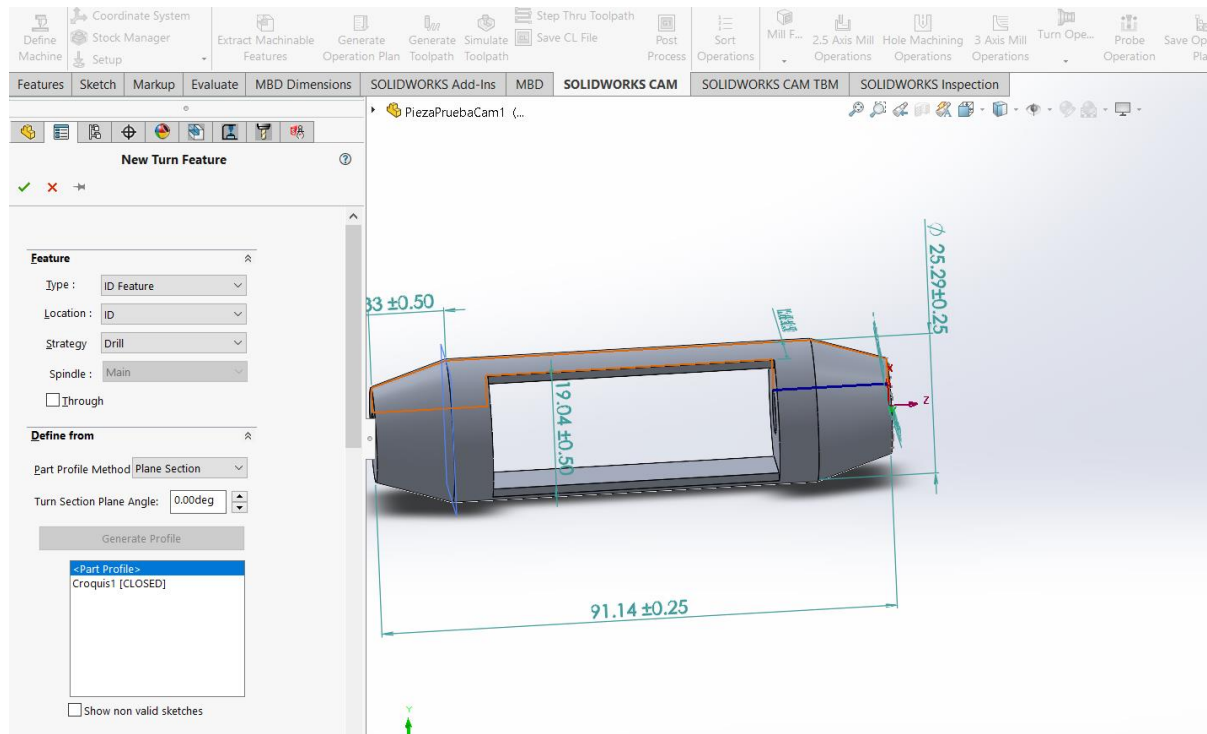


Figura 26. Se localiza el área de trabajo.

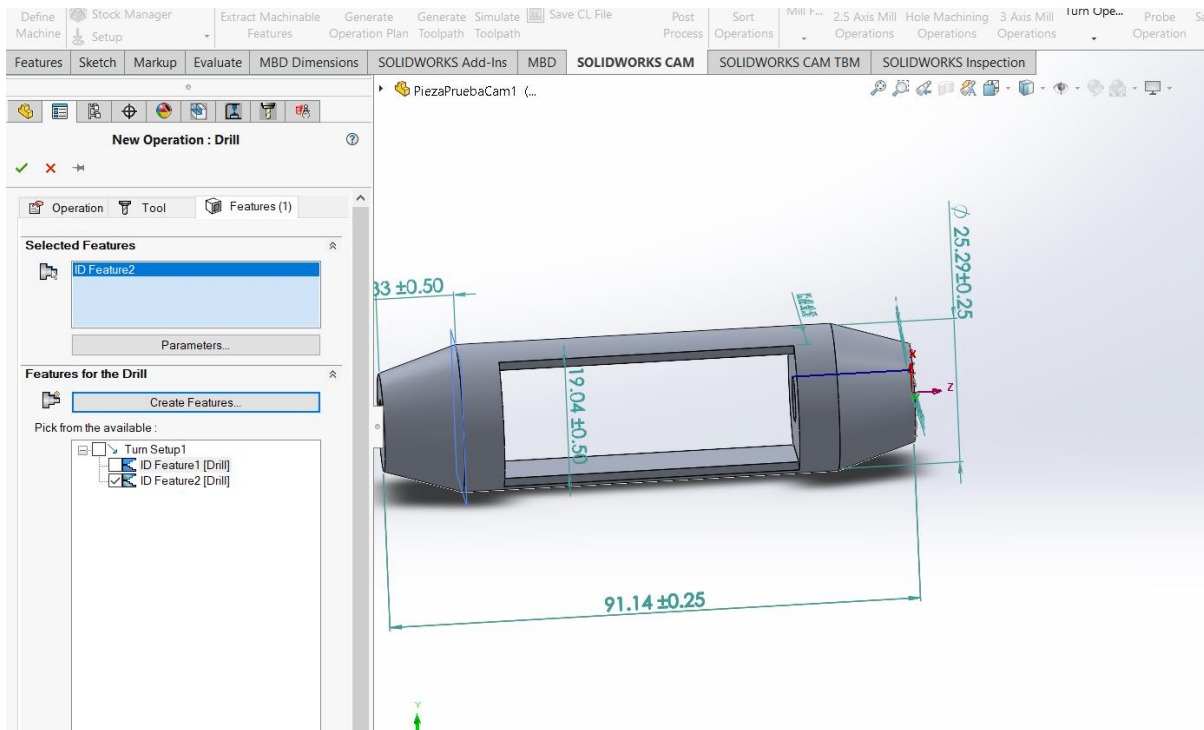


Figura 27. Se selecciona la configuración creada

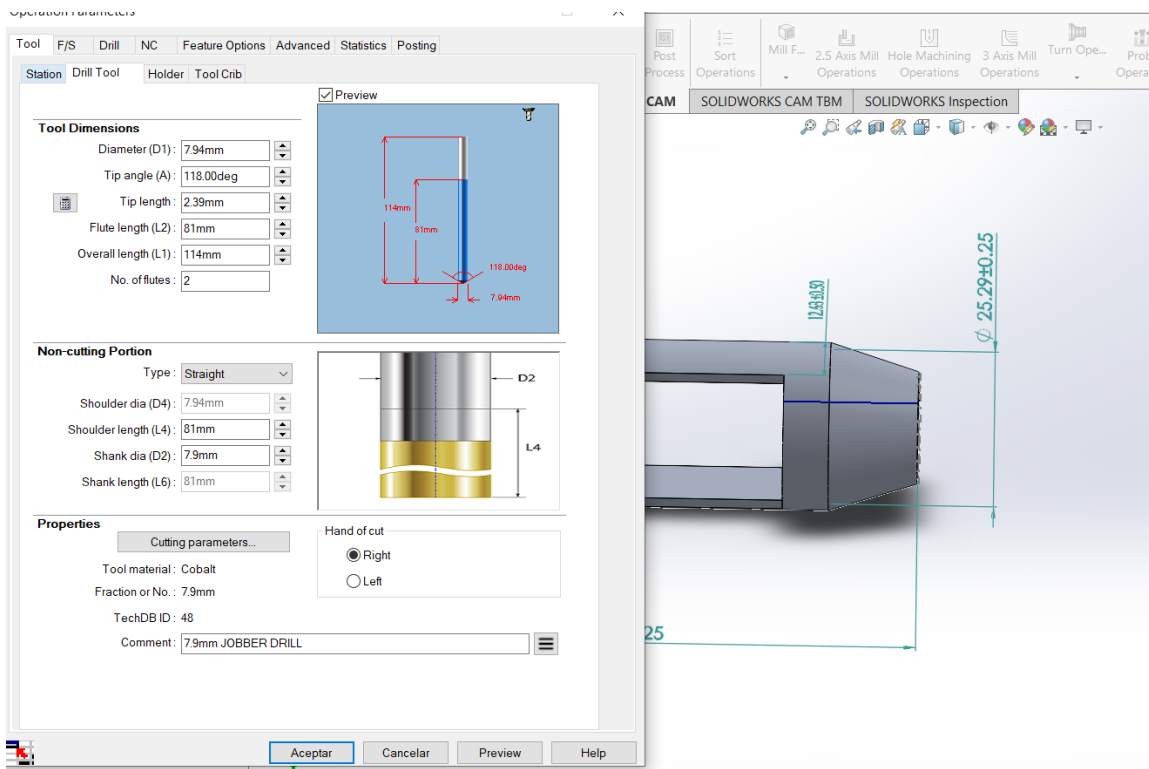


Figura 28. Se configuran los parámetros de la herramienta

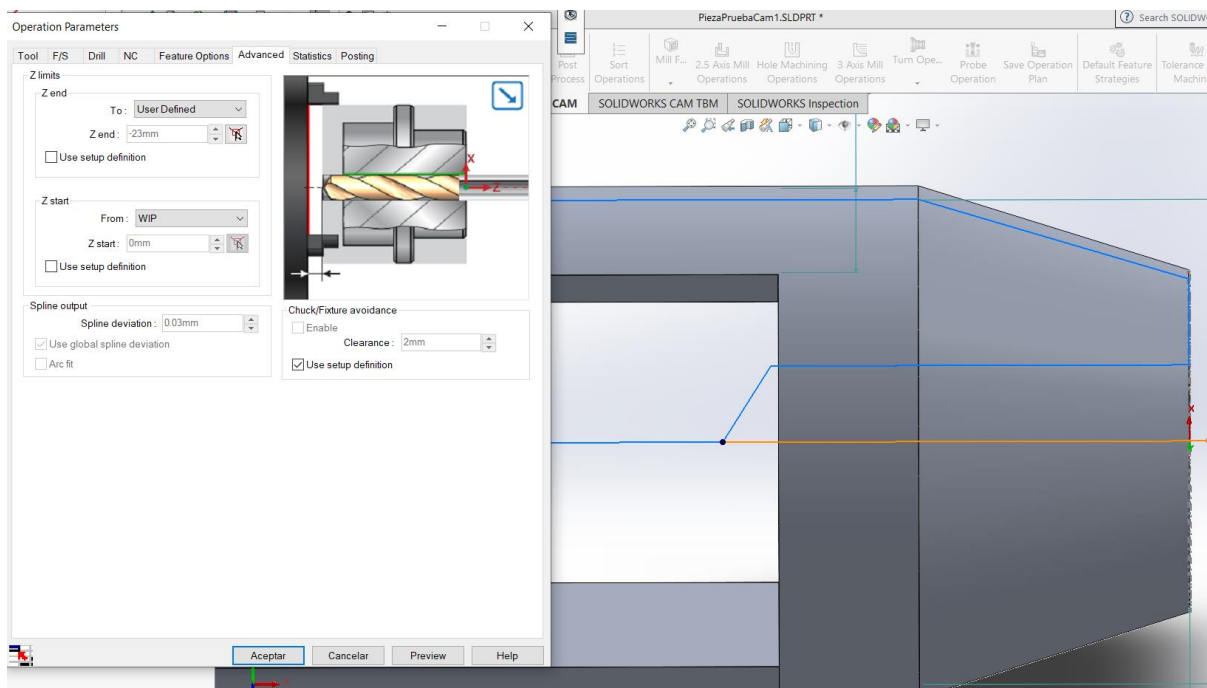


Figura 29. Se establece la profundidad de la operación

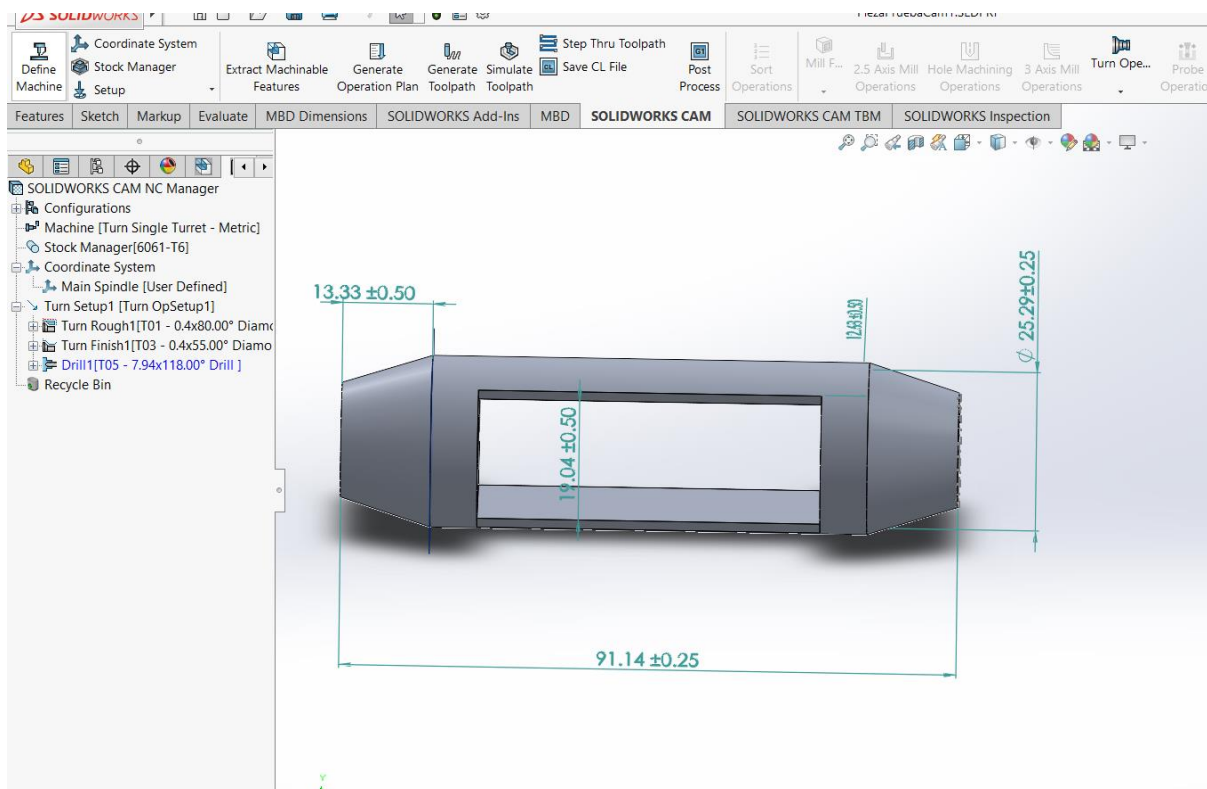


Figura 30. Se configura la trayectoria de la herramienta

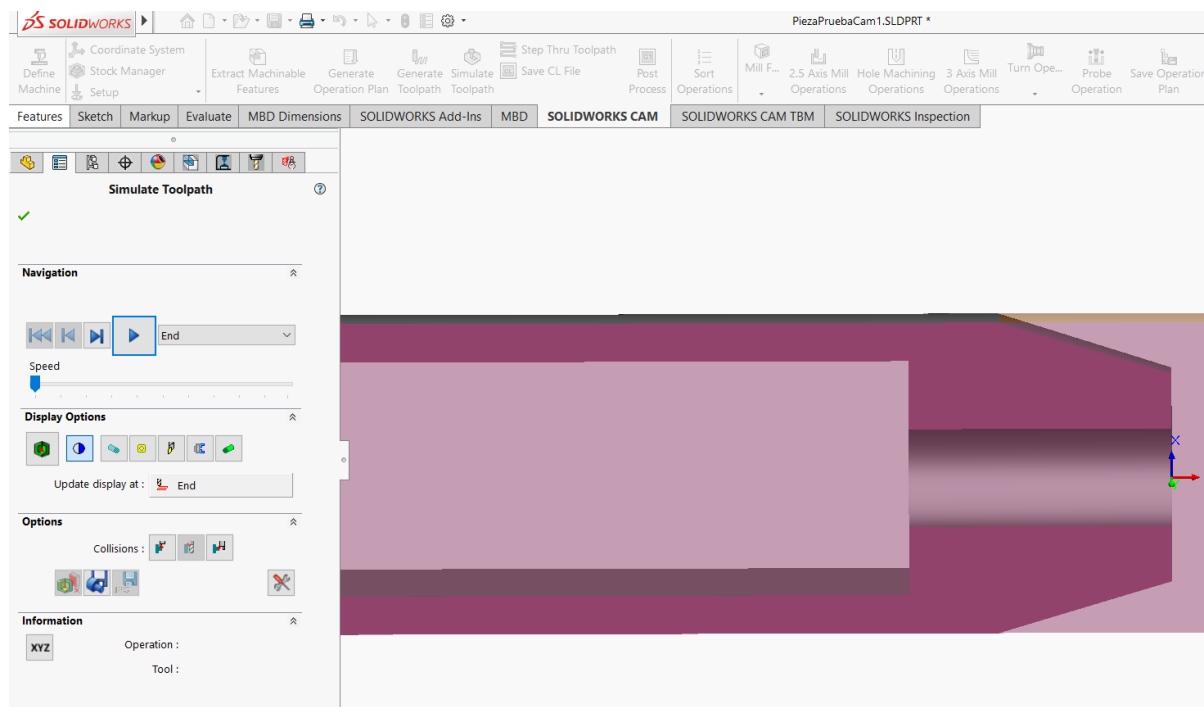


Figura 31. Se lleva a cabo la simulación.

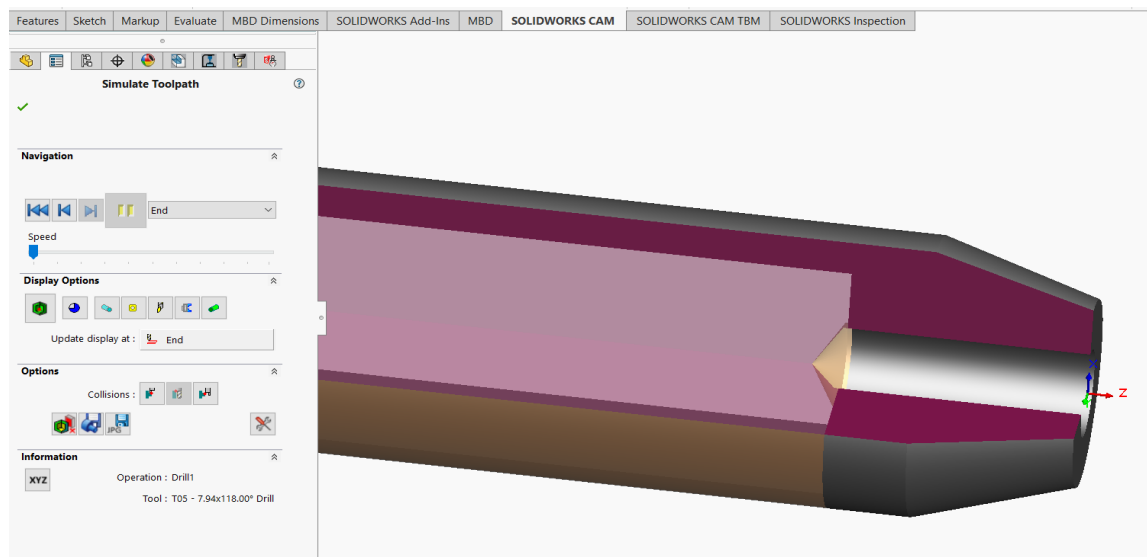


Figura 32. Se observa el resultado final de las operaciones y se realiza la misma operación del lado opuesto.

4.5.1.2 Fresado

Las siguientes figuras muestran el proceso de fresado realizado a la pieza motivo de estudio.

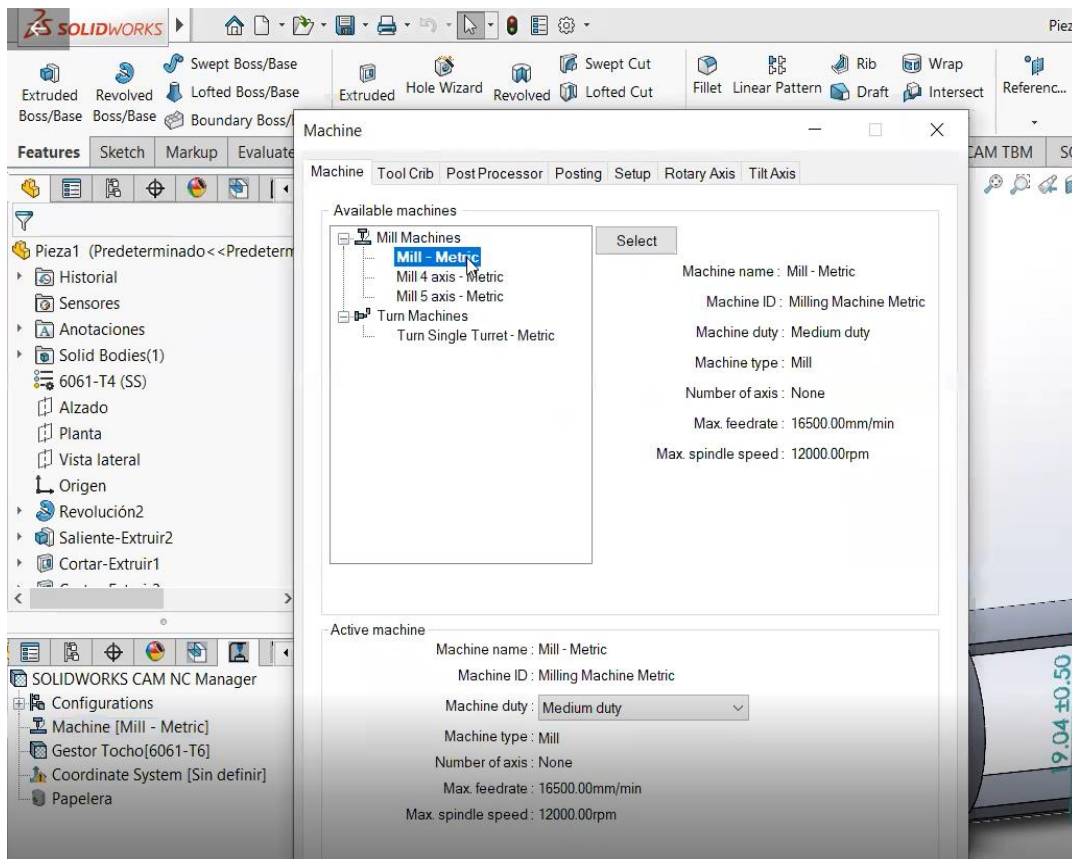


Figura 33. Se selecciona la operación de fresado.

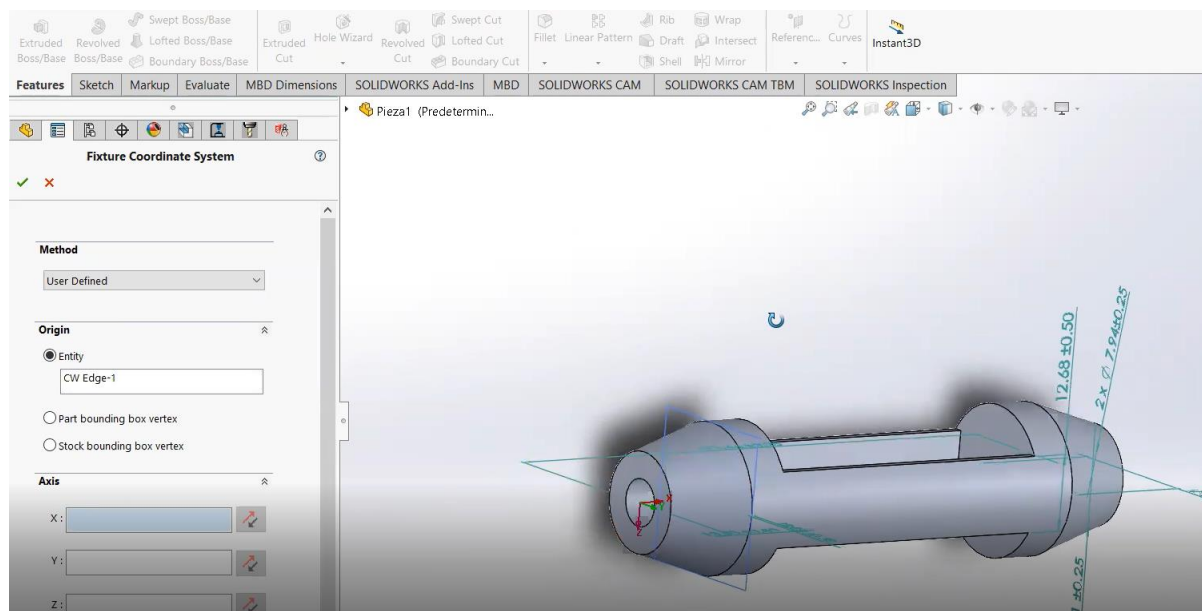


Figura 34. Se seleccionan las coordenadas del origen

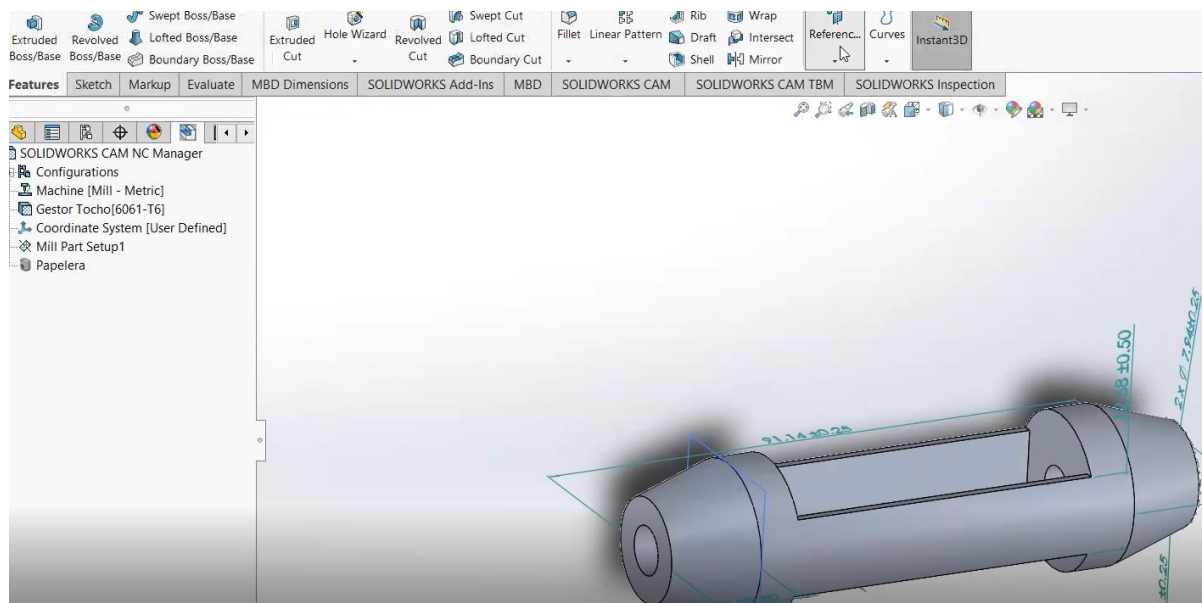


Figura 35. Se establece una zona de trabajo en base a un plano coordenado

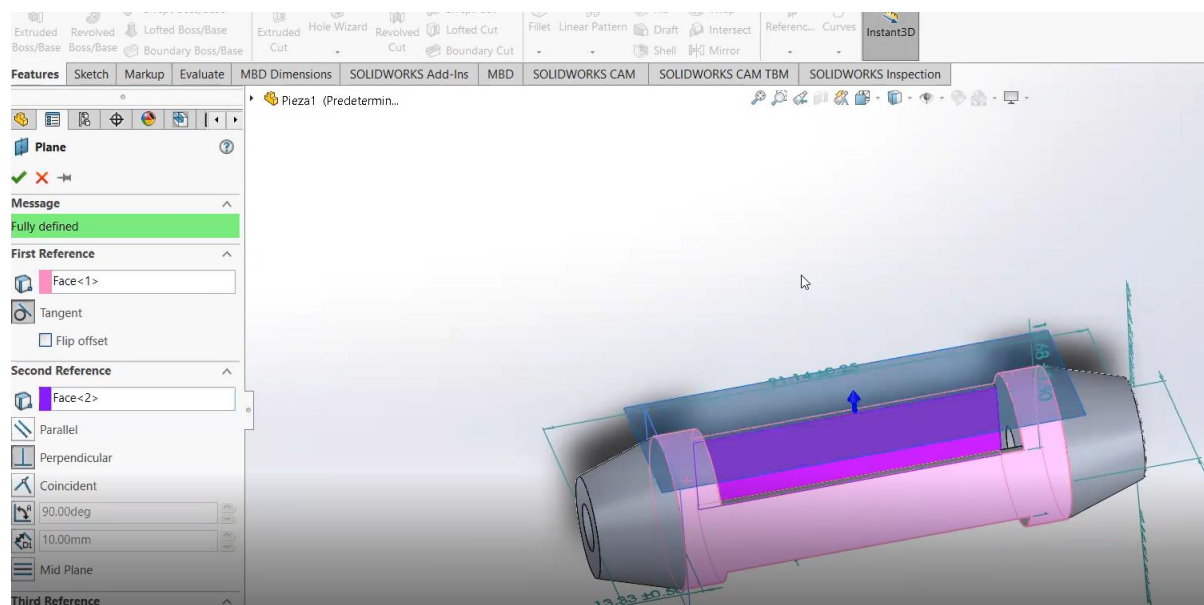


Figura 36. Se crea un plano para realizar el croquis.

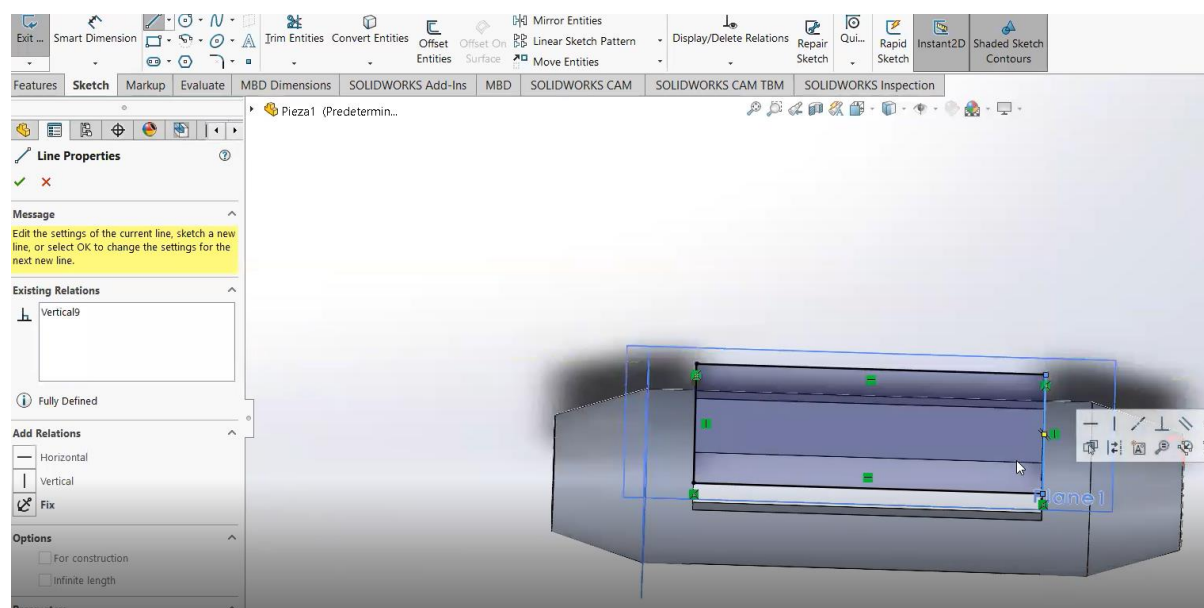


Figura 37. Se elabora el croquis para la operación de desbaste.

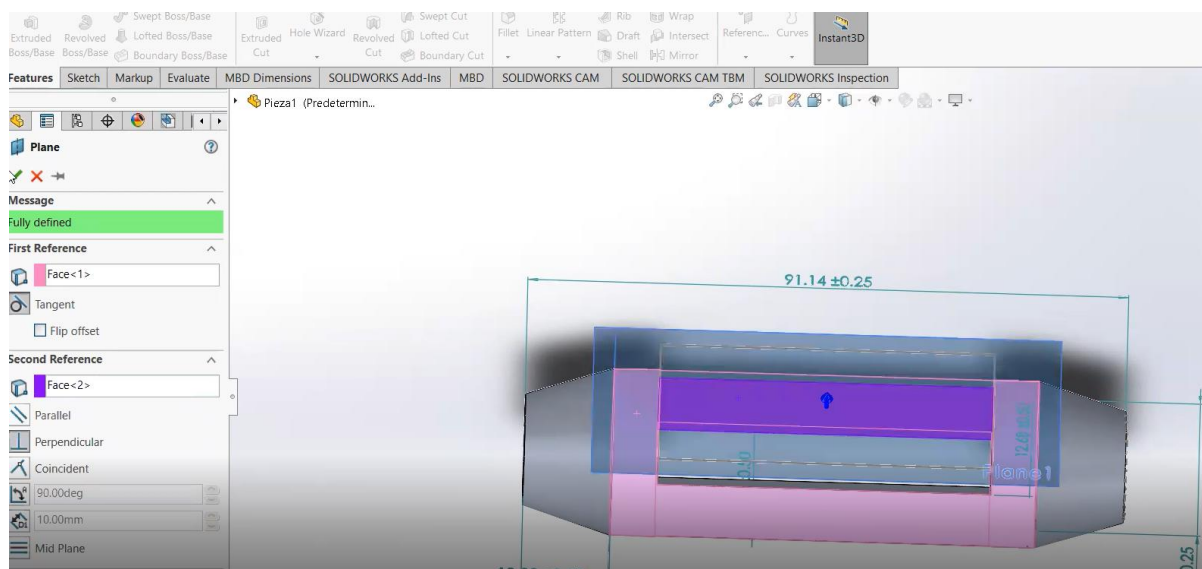


Figura 38. Se crea otro plano para la siguiente operación.

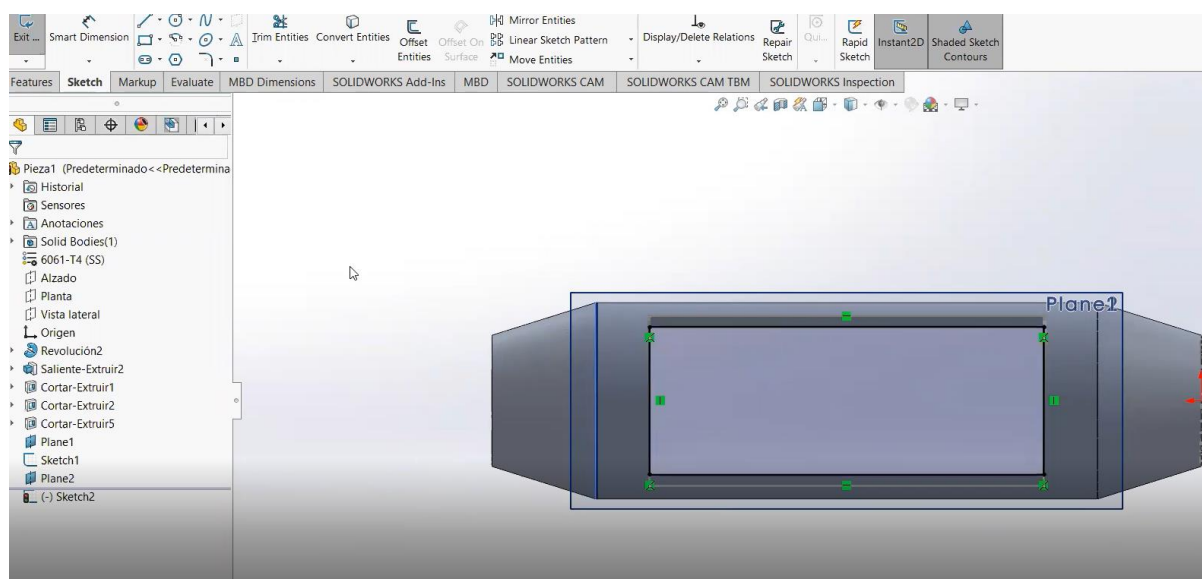


Figura 39. Se elabora el croquis para la operación de caja.

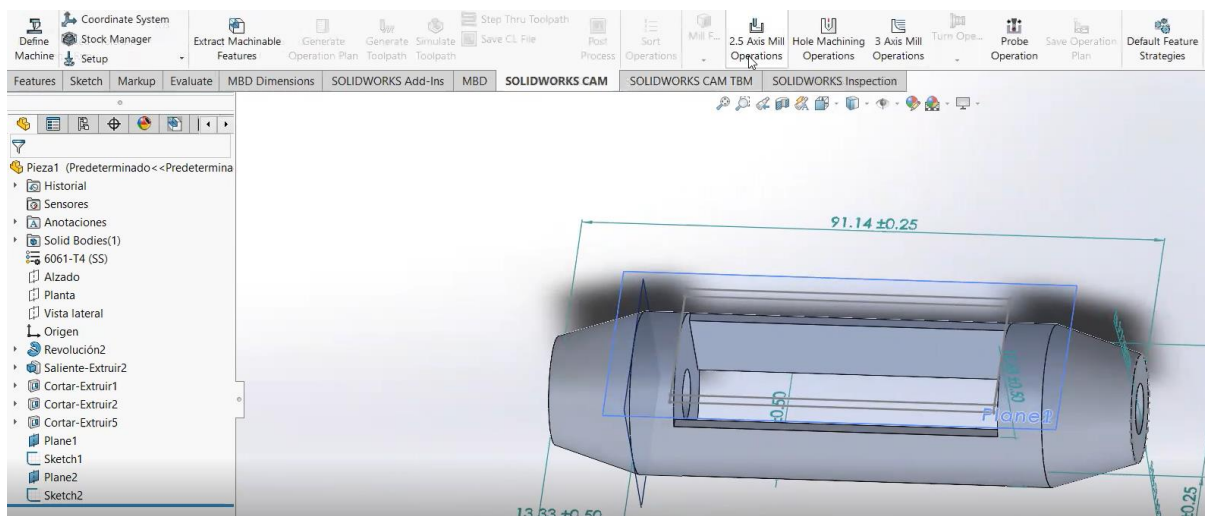


Figura 40. Se empieza con la parte de manufactura.

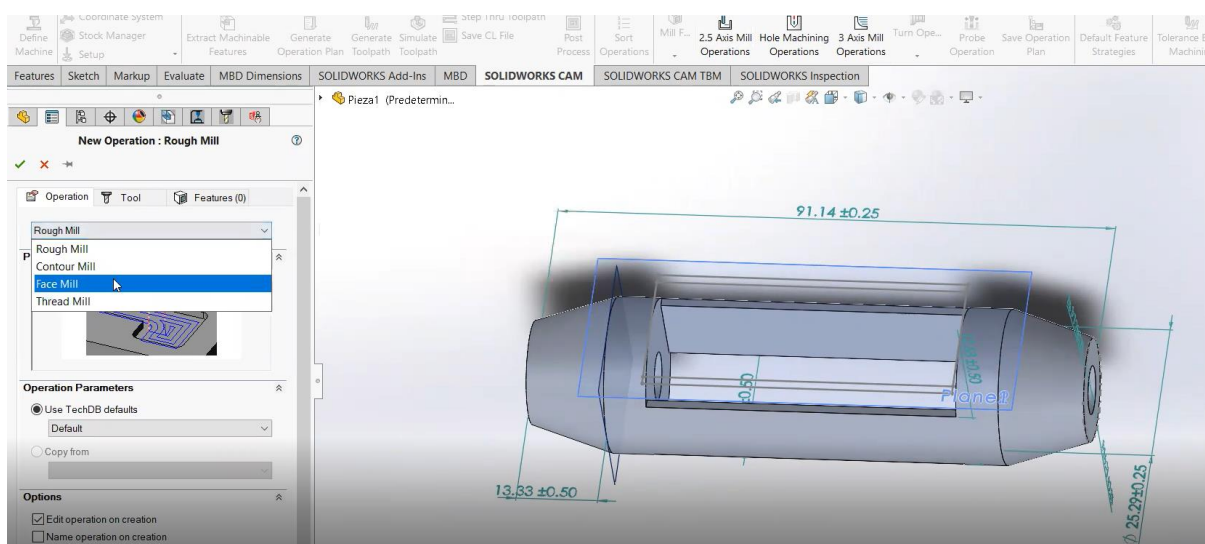


Figura 41. Se selecciona la opción de desbaste.

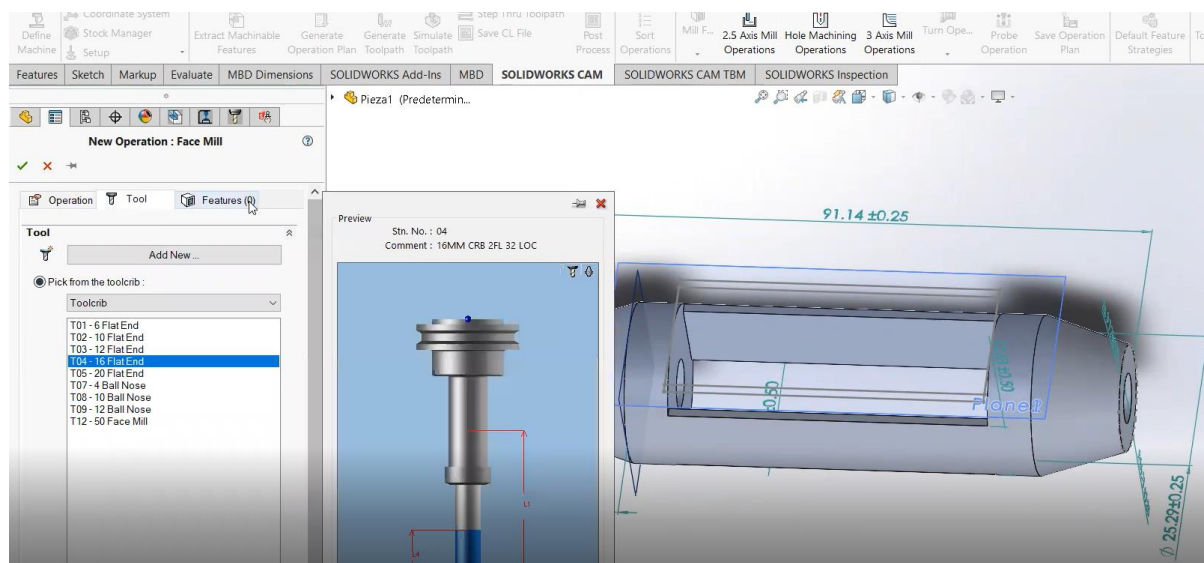


Figura 42. Se selecciona la herramienta de corte

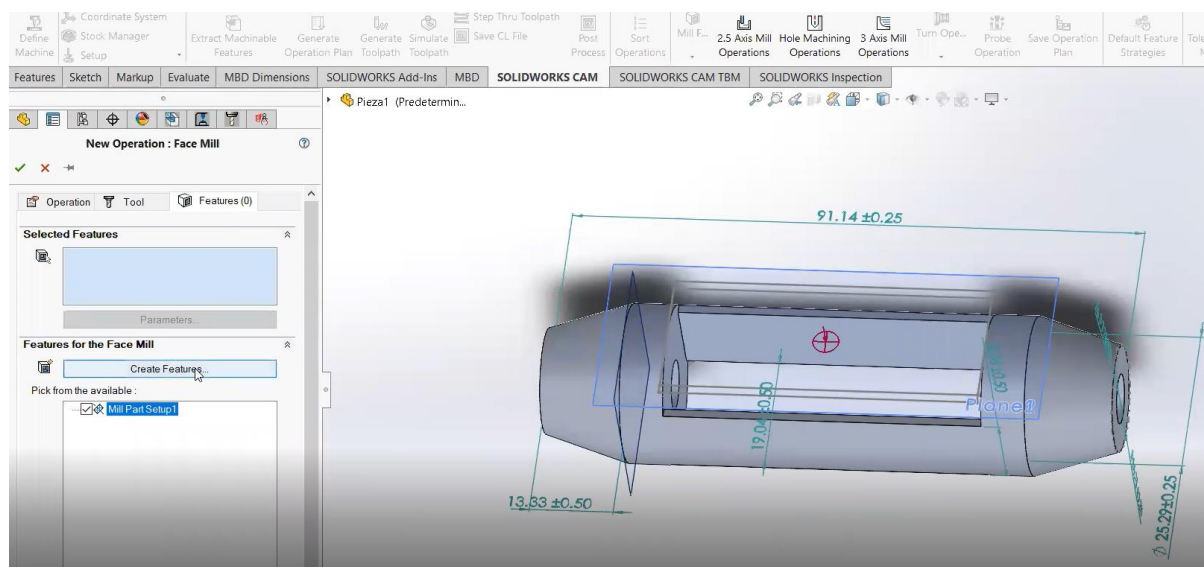


Figura 43. Se selecciona la configuración para crear un rasgo de 2.5 ejes.

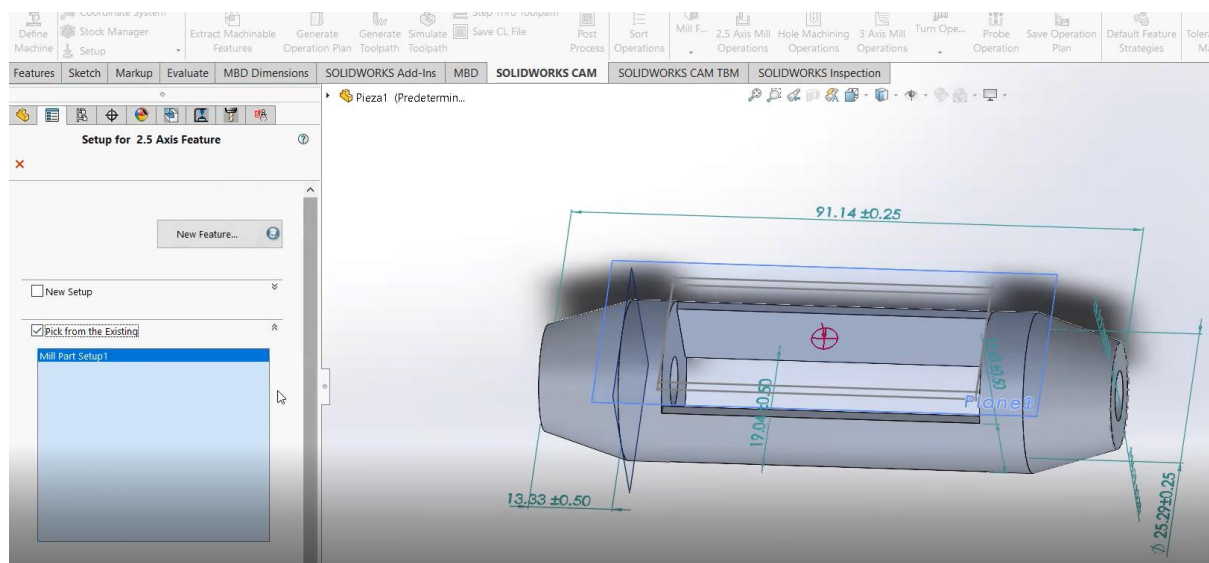


Figura 44. Se activa la casilla de un plano existente

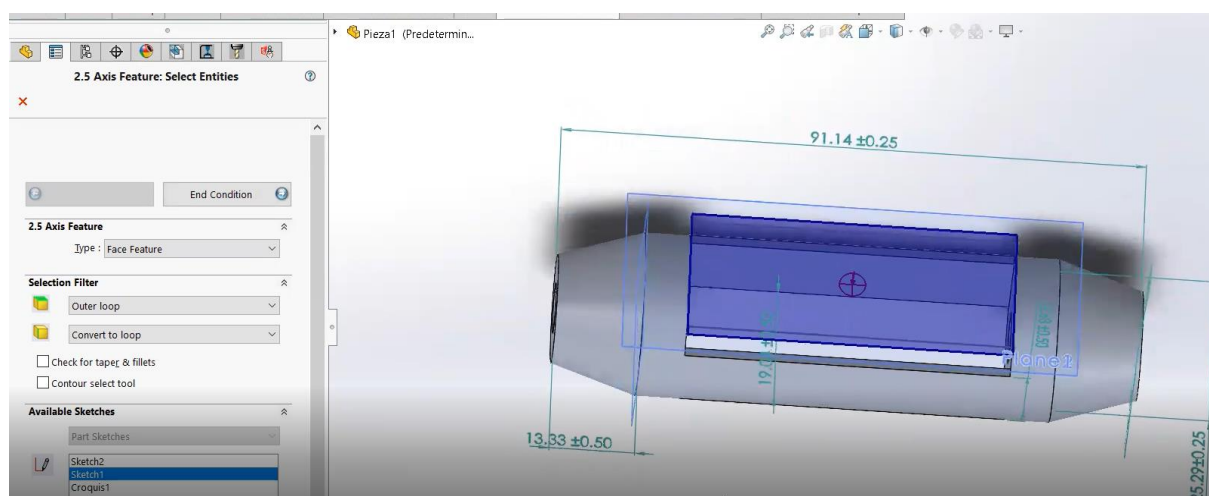


Figura 45. Se selecciona el tipo de operación (desbaste) y se selecciona el primer plano de trabajo que se creó.

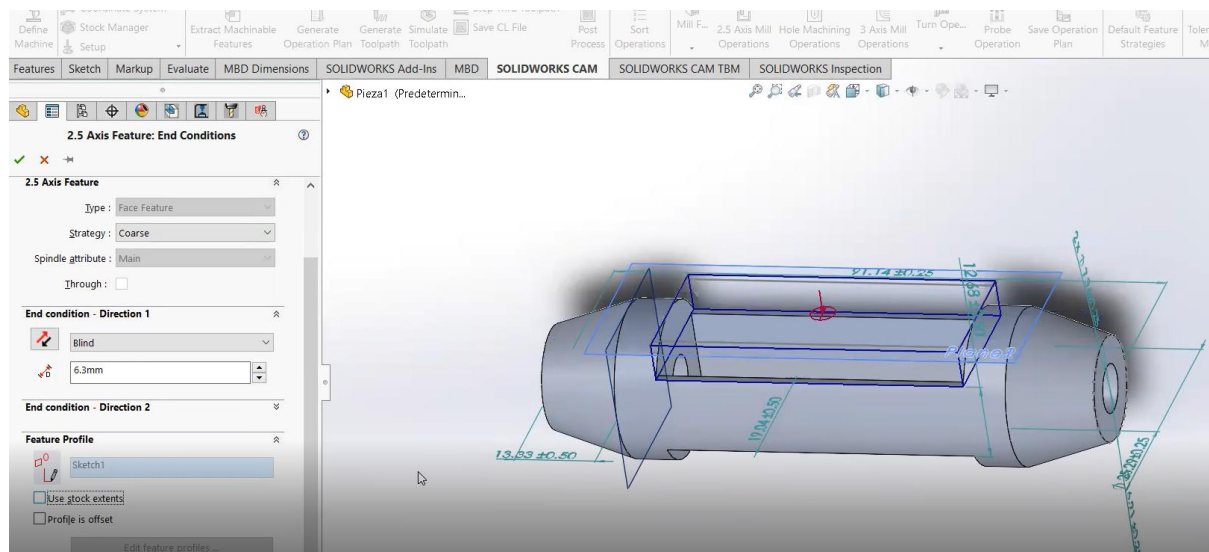


Figura 46. En condición final se selecciona la opción (Coarse), y también la profundidad del desbaste. Se desactiva la opción (Stock extents) esto para que no se extienda el área de trabajo.

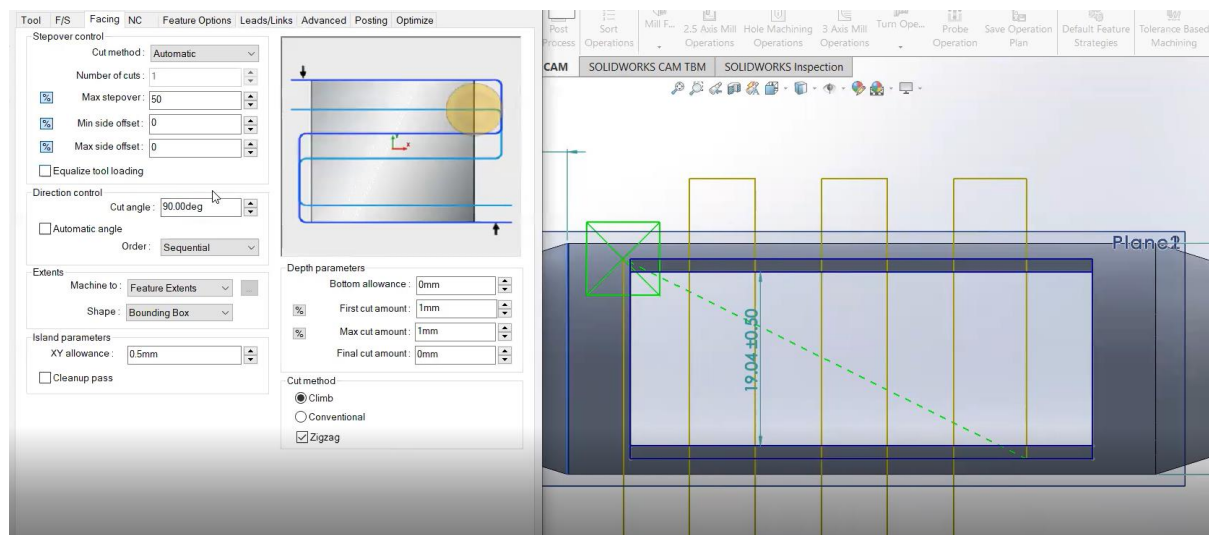


Figura 47. Una vez se acepte el Rasgo creado, se configura el trabajo, con un ángulo de 90° y un máximo paso de 50.

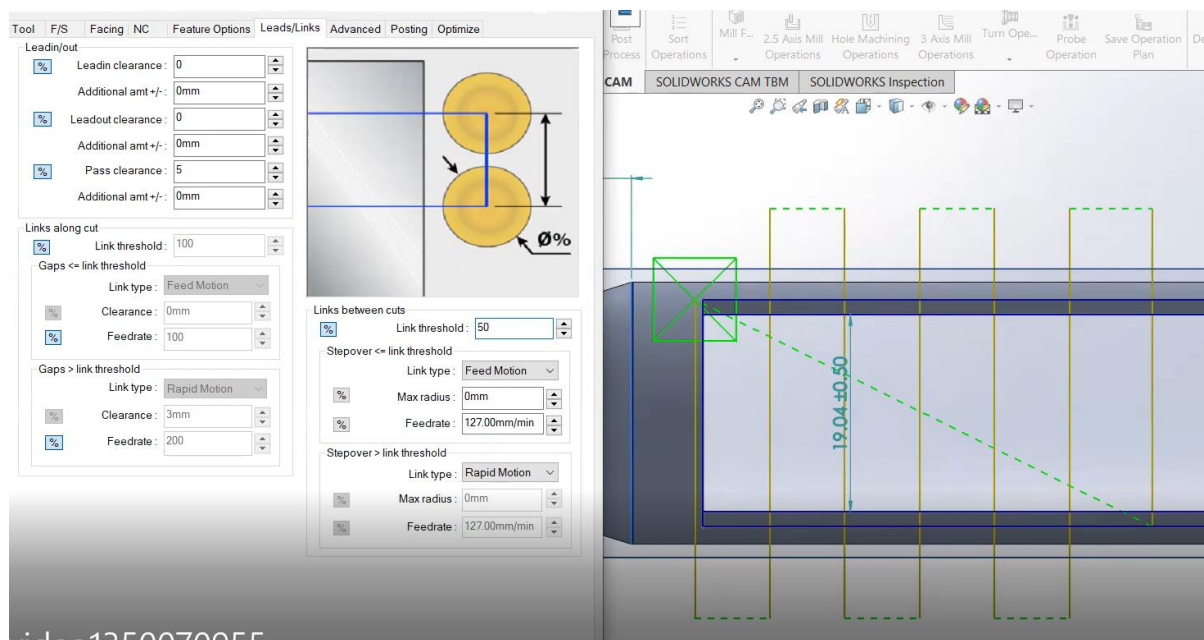


Figura 48. En la pestaña leads/links, en el umbral de enlace se establece en 50.

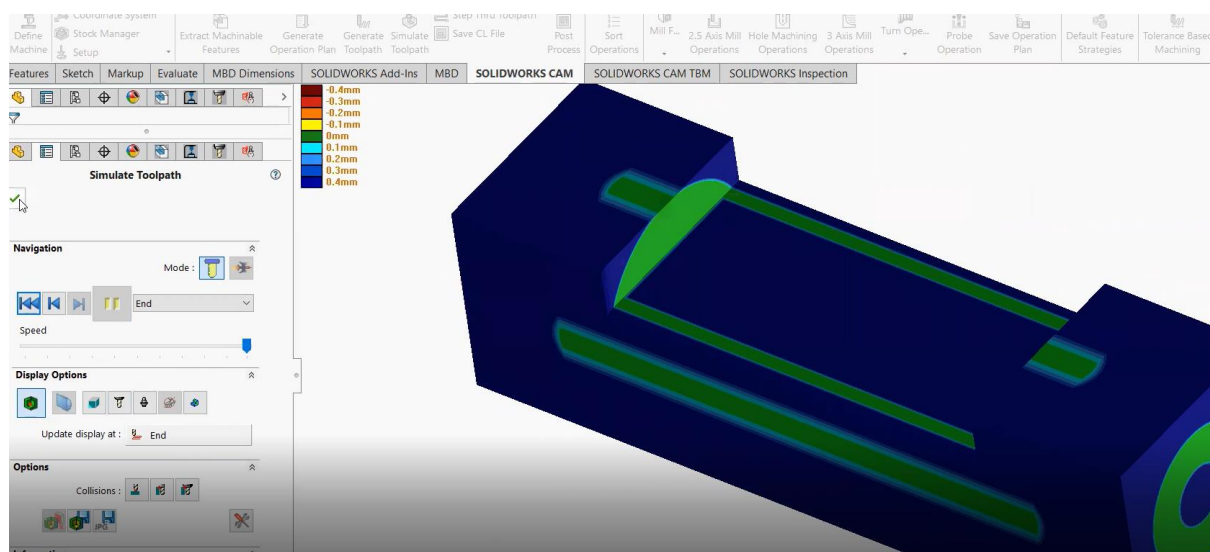


Figura 49. Se simula la operación para observar si el trabajo realizado fue el correcto.

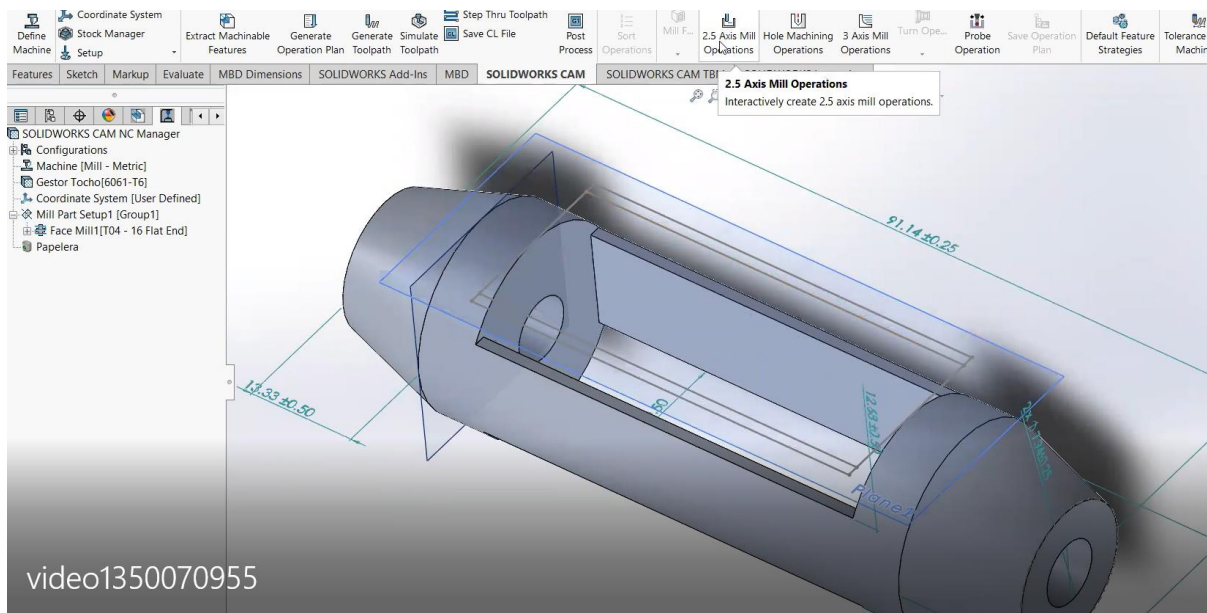


Figura 50. Para maquinar la caja se selecciona la operación de 2.5 ejes.

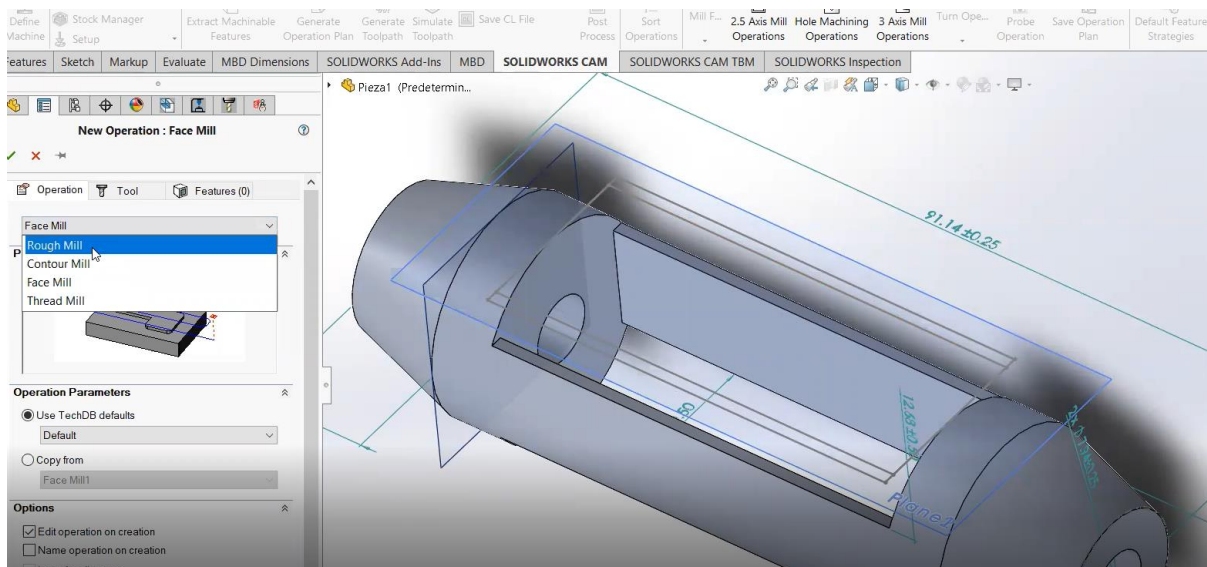


Figura 51. Se selecciona la opción rough mill para el desbaste.

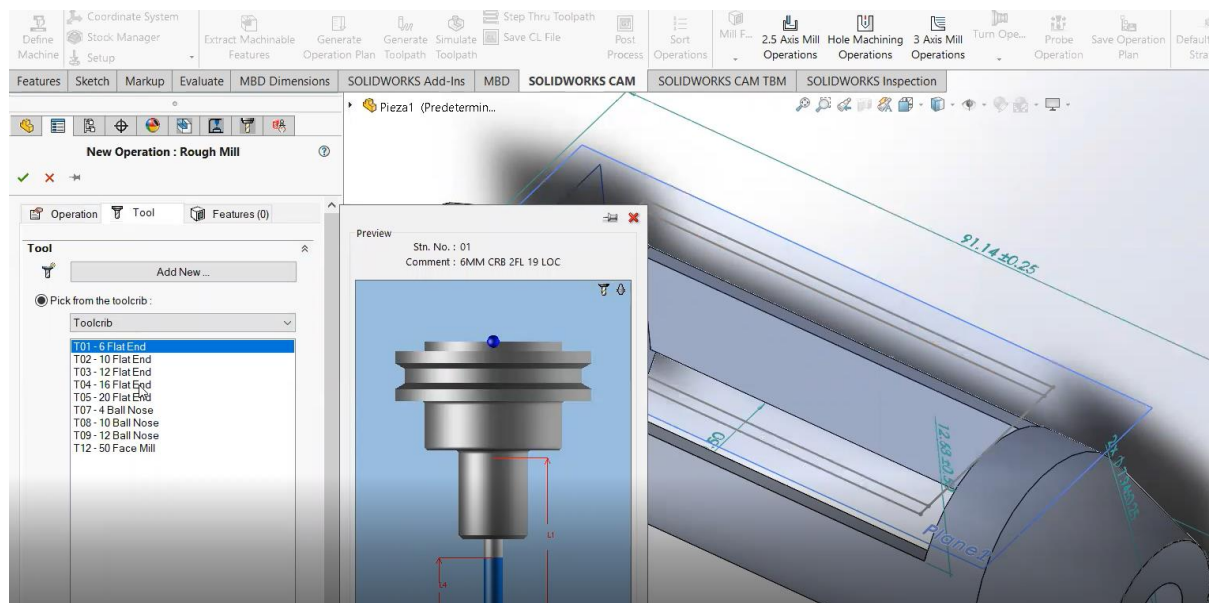


Figura 52. Se selecciona la herramienta.

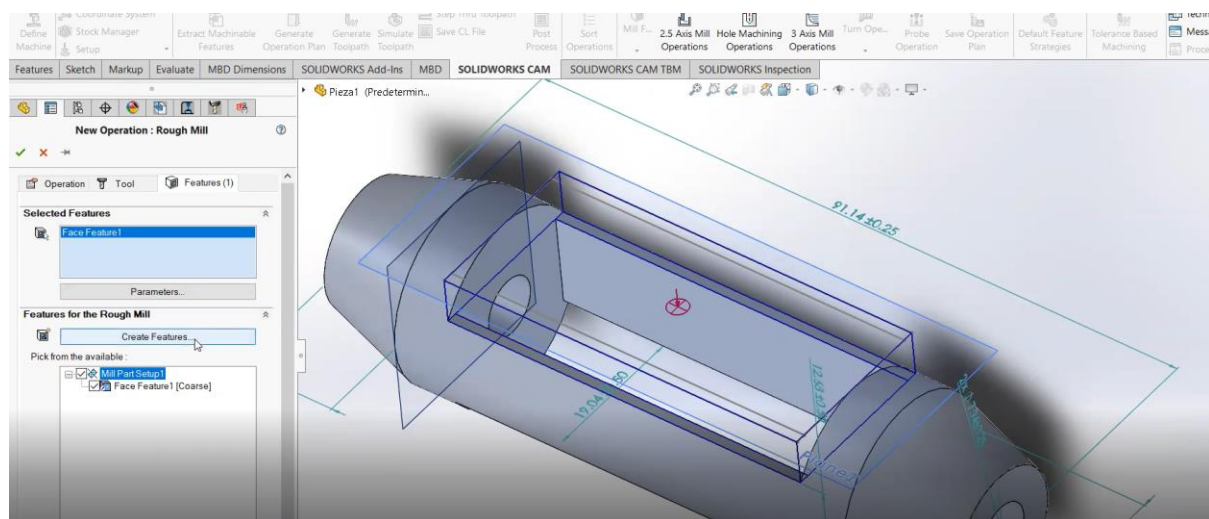


Figura 53. Se selecciona la configuración creada.

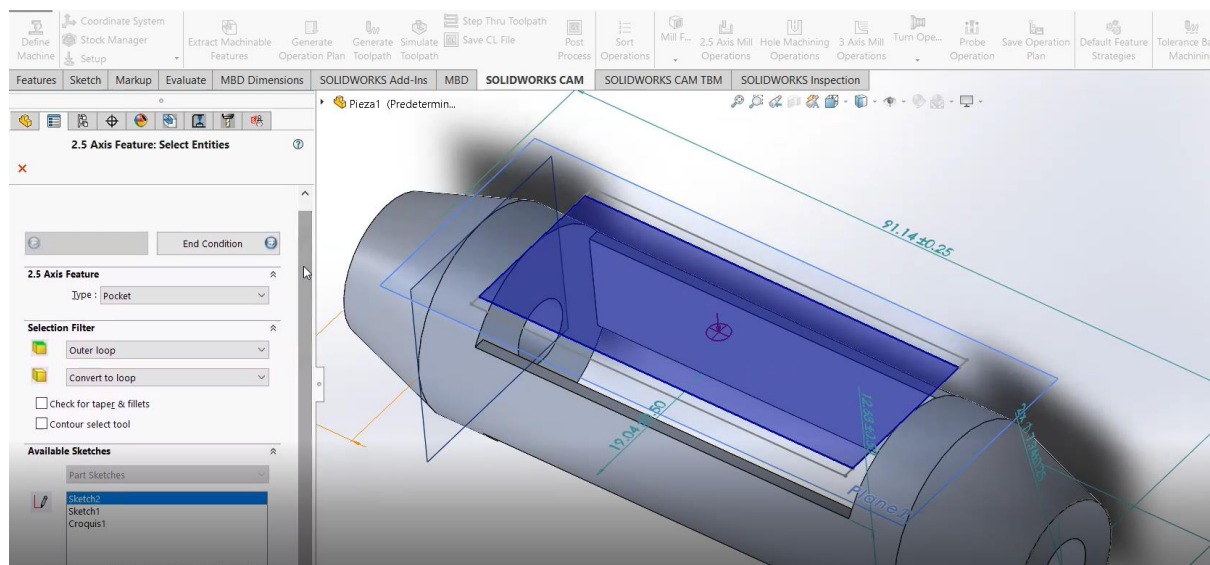


Figura 54. Se selecciona la opción de caja y el segundo croquis que se realizó.

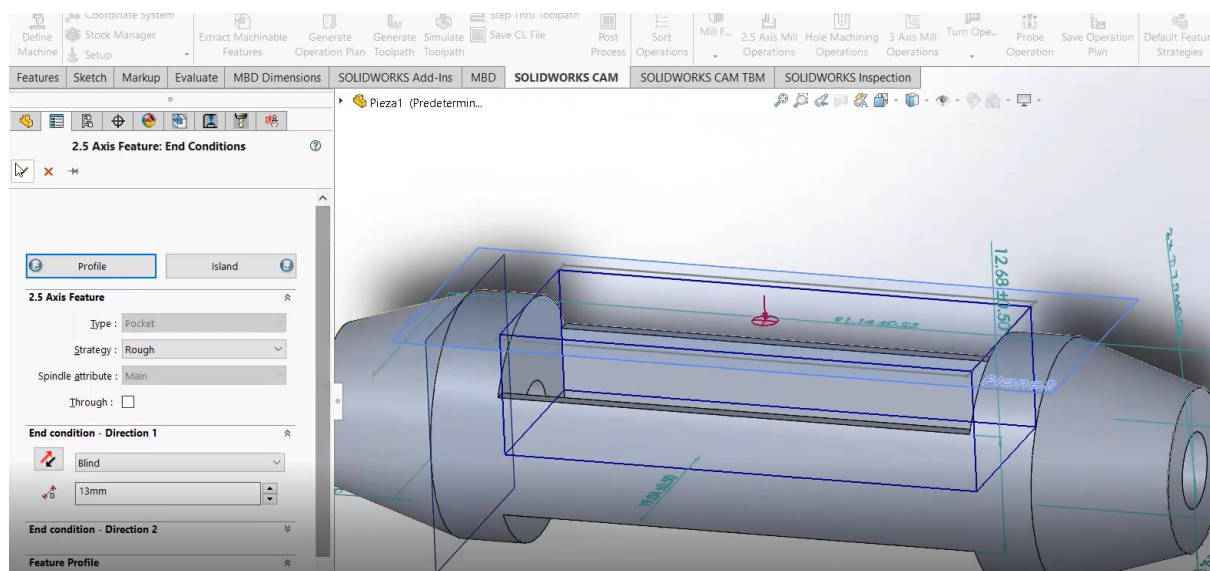


Figura 55. Se selecciona la opción de desbaste, y se asigna la profundidad a trabajar.

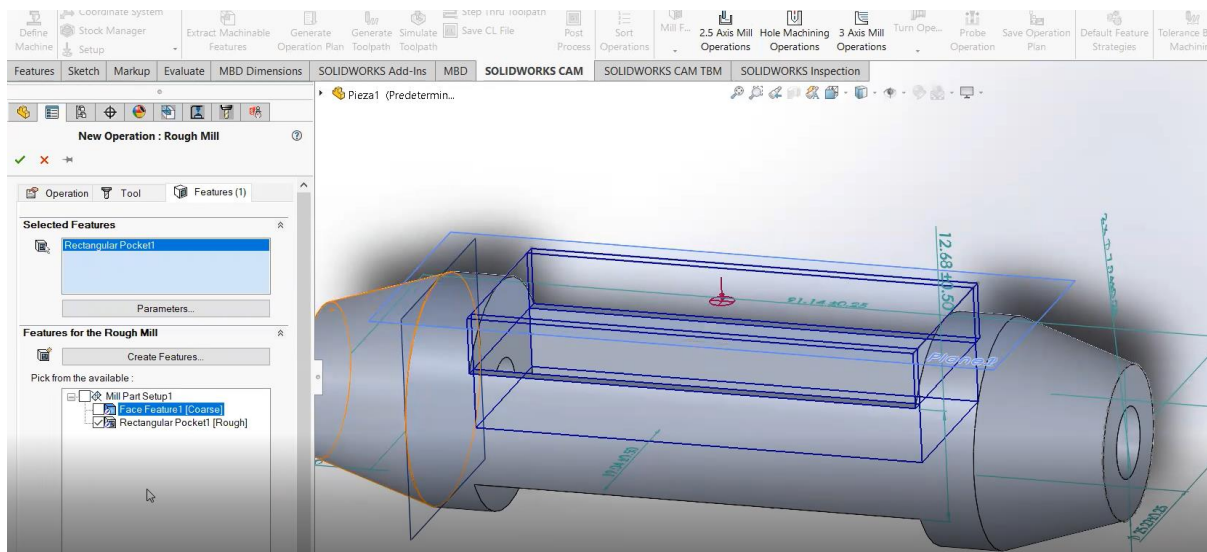


Figura 56. Se desactiva el primer rasgo para trabajar con el nuevo rasgo.

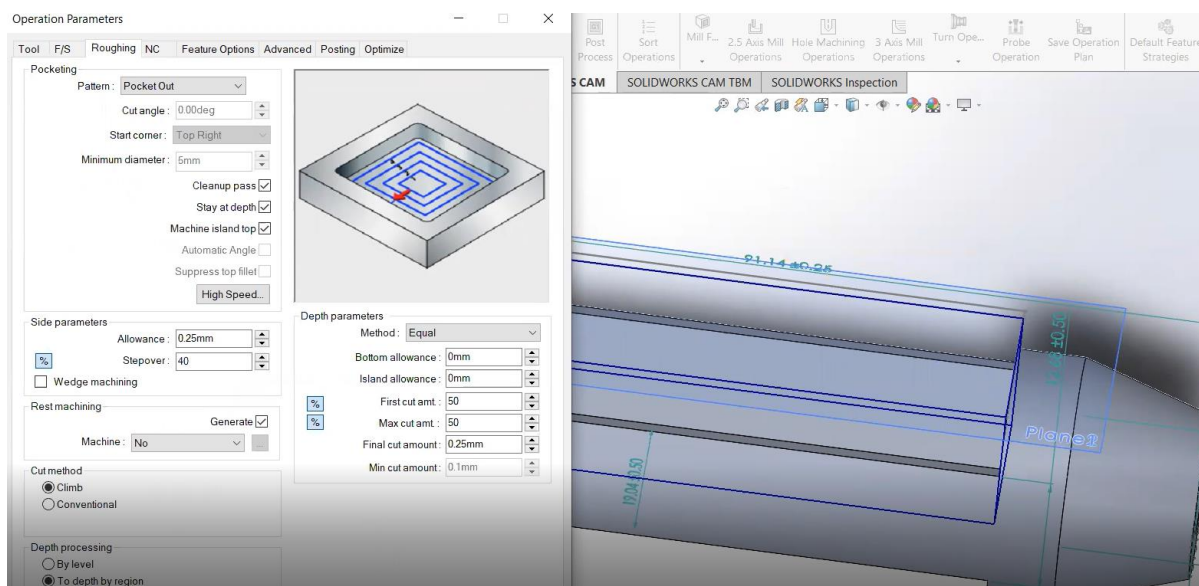


Figura 57. Se establecen los parámetros adecuados del desbaste.

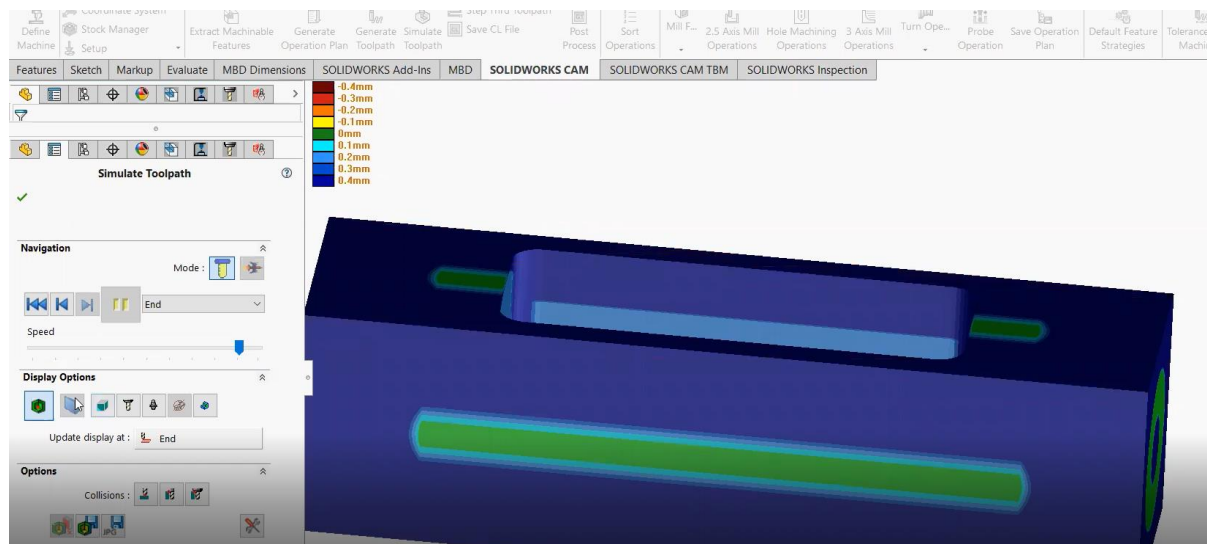


Figura 58. Se simula la operación para revisar el trabajo realizado.

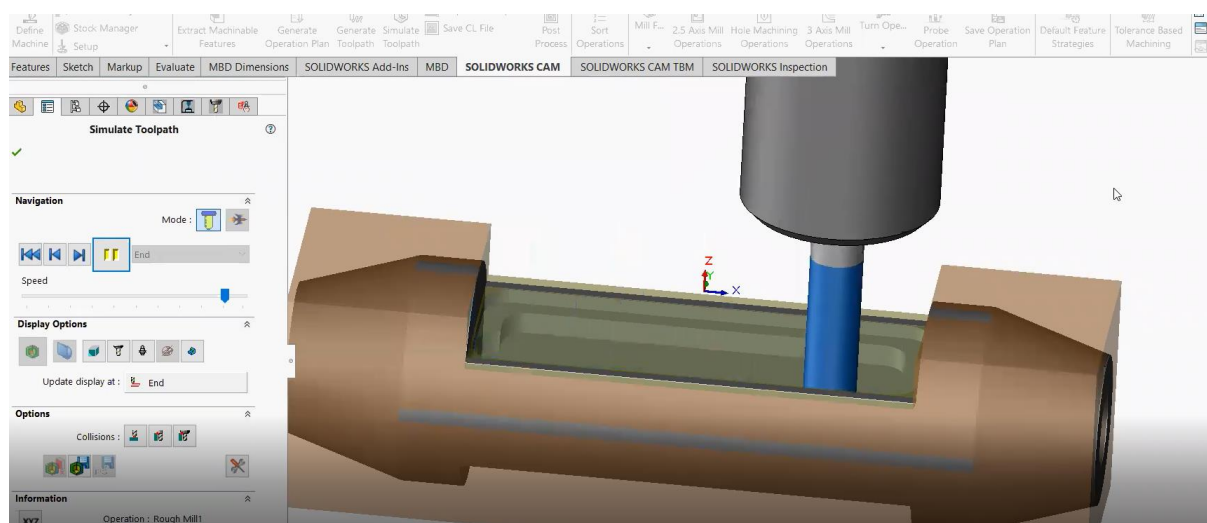


Figura 59. Se simulan las dos operaciones juntas para revisar el trabajo y se realiza el mismo método del lado opuesto.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se desarrollaron diversos modelos digitales de una pieza didáctica usando el paquete Solidworks. Las principales conclusiones se resumen en los puntos siguientes:

- 1) El paquete Solidworks es una herramienta de alto poder digital que asiste a los ingenieros para diseñar piezas. Es sumamente necesario que los ingenieros mecatrónicos dominen esta herramienta computacional para poder hacer frente a los desafíos de la industria 4.0.
- 2) Un modelo esencial que sirve como base para todos los modelos digitales es aquél relacionado con las medidas de las piezas. Es de suma importancia que los ingenieros mecatrónicos sean capaces de obtener de forma sistemática la información geométrica

de las partes, piezas o componentes porque de la cantidad y calidad de la información dependen los modelos digitales de diseño, ingeniería y manufactura.

- 3) El modelado de sólidos es un modelo digital de mucho valor, ya que con es posible realizar diversos estudios de ingeniería, en especial estudios en 3 dimensiones. El modelado de sólidos no solo tiene una expresión visual, sino que tiene diversos modelos digitales asociados, como el modelo de representación de frontera y arboles lógicos, entre otros.
- 4) A pesar de que el Solidworks puede modelar problemas de manufactura y de e ingeniería, no se debe de olvidar que dicho paquete está centrado en el diseño, es decir, en la filosofía CAD, por lo que resulta necesario utilizar como red de paquetes a otras especialidades en fabricación, sustentabilidad e ingeniería.

Algunas reconvencciones relacionadas con el presente trabajo se enlistan a continuación:

- 1) El uso del software debe complementar las actividades de diseño y no tomar al paquete como el centro del desarrollo.
- 2) Se recomienda usar al Solidworks como un paquete que opera en co-simulación con otros softwares para que tenga aplicaciones mecatrónicas.
- 3) Se recomienda que los alumnos aprendan y conozcan los diferentes formatos y protocolos con la que se emite y recibe la información entre los diferentes paquetes computacionales que asisten el diseño, la ingeniería y la manufactura.

REFERENCIAS

Amstead, B., Ostwald, P., y Begeman, M. (2012). Procesos de manufactura. Primera edición. Grupo Editorial Patria. México.

Angulo, P. (2001). Desarrollo de una aplicación para la gestión integral y el control de una célula de fabricación flexible. Proyecto fin de carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Valladolid.

Asrin, G. (2022). Manufactura digital, la evolución de la industria. QAD. Recuperado el 14 de mayo de 2022, de: <https://www.qad.com/es-ES/blog.es/-/blogs/manufactura-digital-la-evolucion-de-la-industria#:~:text=Por%20su%20parte%2C%20la%20manufactura>

Balamurugan, S. y Balamurugan, S. (2021). CAD/CAM/CNC in Manufacturing - Current Trends in Manufacturing (System) Engineering. Recuperado el 13 de julio de 2022, de: <https://ssrn.com/abstract=3767525> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3767525>

Bawa, H. (2007). Procesos de manufactura. Primera edición. Mc Graw Hill. México.

Canfora, G. y M. Di Penta, (2007). New Frontiers of Reverse Engineering, IEEE Future of Software Engineering, pp. 326 – 341

Contreras, S. (2020). Sistemas de manufactura: tipos y características principales. Lifeder. Recuperado el 24 de Agosto de 2022, de: <https://www.lifeder.com/sistemas-manufactura/#:~:text=Los%20sistemas%20de%20manufactura%20son>

Deloitte's Insights. (2019). Deloitte and MAPI Smart Factory Study Capturing value through the digital journey. Recuperado el 18 de mayo de 2022, de:

https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6276_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study/DI_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study.pdf

Domínguez, H. (2011). Sesión 8 de tipos de sistemas de manufactura. Recuperado el 5 de marzo de 2022 de: <https://sistemasmanufactura.files.wordpress.com/2011/08/sesion-8-02-2011.pdf>

Fonseca, A. (2016). Automatización en la manufactura. Universidad Autónoma del estado de México. Recuperado el 10 de septiembre de 2020 de:

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/64008/secme-30349.pdf?sequence=1#:~:text=¿QUÉ%20ES%20LA%20AUTOMATIZACIÓN%3F&text=habilitación%20de%20las%20maquinas%20para,controlan%20los%20procesos%20de%20manufactura>.

Gálvez, P. (2011). Manufactura Integrada por Computador (CIM). Recuperado el 11 de agosto de 2022, de: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1682&ni=manufactura-integrada-por-computador-40cim41>

Garavito. J. (2013). Computer Aided Process Planning. Google. Escuela Colombiana de Ingeniería. Recuperado el 12 de agosto de 2022, de <https://sites.google.com/site/solusoft20132/soluciones2/computer-aided-process-planning>

Groover, M. P. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. Tercera edición. Mc Graw Hill. México.

Jiang, Z., Zhang, H y Sutherland, J.W. (2012). Development of an environmental performance assessment method for manufacturing process plans, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 58, pp783–790

Jiménez, E., González, M. et al., L. (2013). Aplicaciones didácticas de la sincronización global de líneas de producción seriales en sistemas MPS. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013)" Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity" August 14 - 16, 2013 Cancun, Mexico. pp. 1-10.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Quinta edición. Pearson Educación, México

Koshy, K. (2020). ¿Por qué es importante la Industria 4.0 en manufactura? Capgemini México. Recuperado el 9 de Agosto de 2020 de:

<https://www.capgemini.com/mx-es/2020/05/por-que-es-importante-la-industria-4-0-en-manufactura/>

Mata, G., Méndez, A., Cardillo, J. y Chacón, E. (2016). Análisis de sistemas de manufactura conteniendo una exclusión mutua usando redes de Petri. *Revista Ingeniería UC*, 23 (1), pp. 30-40

Millar, H.H y Rusell, S. (2011). The adoption of sustainable manufacturing practices in the Caribbean, *Business Strategy and the Environment*, 20, pp. 512-526

Queen, K. (2020). ¿Qué es la fabricación digital? ¿Y cómo la aprovechan las empresas? El fabricante. Recuperado el 12 de septiembre de 2022, de:

<https://www.themanufacturer.com/articles/what-is-digital-manufacturing/>

Schey, J. A. (2002). Procesos de manufactura. Tercera Edición. Mc Graw Hill. México.

SIEMENS. (2021). Ingeniería asistida por ordenador (CAE). SIEMENS. Recuperado el 12 de octubre de 2021, de: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-engineering-cae/13112>

Siderka, J. y Jadaan K. (2018). Cloud Manufacturing: A Service-Oriented Manufacturing Paradigm. A Review Paper, Engineering Management in Production and Services, 10 (1), pp. 204-222.

Socconini, L. (2019). Lean Manufacturing Paso a Paso (20-21). Primera edición. Alfaomega Marge. España.

Rieradevall, J., Doménech, X., Bala, A., & Gazulla, C. (2000). Ecodiseño de envases : el sector de la comida rápida. (1 ed.).

Rodríguez, J. (2020). Manufactura celular: “El rumbo a la manufactura de clase mundial” | SPC Consulting Group. SPCGROUP. Recuperado el 4 de agosto de 2022, de: <https://spcgroup.com.mx/manufactura-celular-el-rumbo-a-la-manufactura-de-clase-mundial/>

Universidad de Carabobo venezuela. (2011). Análisis de sistemas de manufactura conteniendo una exclusión mutua usando redes de Petri. Recuperado el 12 de junio de 2022, de: <https://www.redalyc.org/pdf/707/70745478005.pdf>

Universidad de Huelva. (2016). Automatización Industrial. Recuperado el 15 de mayo de 2022, de: http://fcaenlinea1.unam.mx/anexos/1566/1566_u6_act2.pdf

Universidad País Vasco. (2019). Módulo III: Mecanizado por arranque de viruta tema 19: Fabricación Asistida por Ordenador CAM. Recuperado el 4 de marzo de 2022 de: http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/425_ca.pdf

Veigler Buisness School. (2021). Funcionamiento y ventaja competitiva del Sistema MRP. Recuperado en 20 de agosto de 2022, de: <https://veigler.com/sistema-mrp/>

Yuan, M., Deng, K., y Chaovalitwongse, W.A. (2017). Manufacturing Resource Modeling for Cloud Manufacturing, International Journal of Intelligent Systems, 32(4), pp. 414-436.