



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN VIRTUAL DE UNA MHCN (CMV- CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL) Y SU INTEGRACIÓN EN LA APLICACIÓN SIEMENS NX

Autor: Álvaro Aragón Aragón

Director1: Mariano Jiménez Calzado

Director2: Javier Manini Gumz

Madrid

Julio de 2023

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
SIMULACIÓN VIRTUAL DE UNA MHCN (CMV- CENTRO DE MECANIZADO
VERTICAL) Y SU INTEGRACIÓN EN LA APLICACIÓN SIEMENS NX
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico ...2022/2023.... es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Álvaro Aragón Aragón

Fecha: 19/ 07/ 2023

Autorizada la entrega del proyecto
EL DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: 19/ 07/ 2023



Javier Manini Gumz



Mariano Jiménez Calzado

Índice general

DOCUMENTO I. MEMORIA	1
1. Planteamiento del trabajo	11
1.1. Objetivos	11
1.2. Metodología	12
1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	13
2. Descripción de las tecnologías	14
2.1. LaTeX	14
2.2. <i>Microsoft Excel</i>	14
2.3. <i>Siemens NX</i>	14
3. Estado de la cuestión	18
3.1. Desarrollo y evolución histórica de la industria	18
3.1.1. El siglo XVIII: Primera Revolución Industrial	19
3.1.2. Del siglo XIX al siglo XX: El desarrollo	20
3.1.3. Siglo XXI: Cuarta Revolución Industrial	22
3.2. La fábrica digital	23
3.2.1. <i>Big Data</i>	24
3.2.2. <i>Blockchain</i>	27
3.2.3. <i>Business Intelligence</i>	29
3.2.4. <i>Digital Twins</i>	31
3.2.5. Inteligencia Artificial	33
3.2.6. <i>Internet of Things</i>	35
3.3. Virtualización de una máquina	37
3.3.1. Caso 1: Máquina punzadora de láminas de metal (<i>CAD/CAM/CNC</i>)	37
3.3.2. Caso 2: Máquina de corte (<i>ToolMaker</i>)	40
3.3.3. Caso 3: Robot manipulador 7 grados de libertad (<i>Siemens NX</i>)	43
3.3.4. Premisas	44
4. Máquinas CNC	45
4.1. Descripción	45
4.2. Elementos principales	49
4.2.1. Estructura exterior	49
4.2.2. Husillo	49
4.2.3. Mesa de trabajo o bancada	49
4.2.4. Cambiador automático de herramientas	50
4.2.5. Sistemas de refrigeración	50
4.2.6. Ejes	50
4.2.7. Control	51
4.3. Tipologías	51
4.3.1. Tornos o centros de torneado	51

4.3.1.1.	Tornos de dos ejes	55
4.3.1.2.	Tornos de tres ejes	56
4.3.1.3.	Tornos de cuatro ejes	56
4.3.1.4.	Tornos de seis ejes	56
4.3.2.	Fresadoras o centros de mecanizado	57
4.3.2.1.	Fresadoras o centros de mecanizado horizontales	61
4.3.2.2.	Fresadoras o centros de mecanizado verticales	61
4.4.	CMV <i>Hartford HV-35</i>	63
4.4.1.	Estructura exterior	65
4.4.2.	Estructura interior	66
4.4.3.	Ejes	70
5.	Control CNC	72
5.1.	Descripción	72
5.2.	Elementos principales	76
5.2.1.	Panel de operador	76
5.2.2.	Pantalla de visualización y teclado	76
5.2.3.	Botonera manual o mando	77
5.2.4.	Código o lenguaje de programación	77
5.3.	Control <i>Siemens Sinumerik 828D</i>	78
5.4.	<i>Software VNCK</i>	81
6.	Virtualización del CMV <i>Hartford HV-35</i>	84
6.1.	Instalación	84
6.1.1.	<i>Siemens NX 1926</i>	84
6.1.2.	<i>VNCK v.4.7.4</i>	86
6.2.	Modelado	88
6.2.1.	Modelado de la máquina	88
6.2.1.1.	Estructura exterior	88
6.2.1.2.	Estructura interior	93
6.2.1.3.	Estructura exterior + Estructura interior	97
6.2.2.	Modelado de la pieza	99
6.3.	Creación del modelo cinemático	100
6.4.	Simulación del mecanizado	110
6.5.	Postprocesado	124
6.6.	Depuración del código NC	136
7.	Resultados y conclusiones	147
7.1.	Resultados	147
7.2.	Conclusiones	148
7.3.	Líneas futuras	149
	Bibliografía	152
	DOCUMENTO II. PLANOS	1
1.	Plano Máquina <i>Hartford</i>	3
2.	Plano Conjunto Estructura Máquina <i>Hartford</i>	4
3.	Plano Estructura Máquina <i>Hartford</i>	5
4.	Plano Puerta Frontal Izquierda Máquina <i>Hartford</i>	6
5.	Plano Puerta Frontal Derecha Máquina <i>Hartford</i>	7

6. Plano Puerta Lateral Máquina <i>Hartford</i>	8
7. Plano Control CNC Máquina <i>Hartford</i>	9
8. Plano Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	10
9. Plano Guías Lineales Verticales - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	11
10. Plano Torre - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	12
11. Plano Carro Transversal - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	13
12. Plano Carro Longitudinal - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	14
13. Plano Mesa de Trabajo - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	15
14. Plano Brazo del Cambiador de Herramientas - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	16
15. Plano Cambiador de Herramientas - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	17
16. Plano Placa de Apoyo - Pieza de Trabajo	18
DOCUMENTO III. ANEXOS	1
Anexo A: Objetivos de Desarrollo Sostenible	3
Anexo B: Estudio económico	4
Anexo C: Instrucciones instalación VNCK	8
Anexo D: Operaciones de mecanizado	15
Anexo E: Comandos Código NC	65
Anexo F: Archivo <i>.mtk</i>	74



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

SIMULACIÓN VIRTUAL DE UNA MHCN (CMV- CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL) Y SU INTEGRACIÓN EN LA APLICACIÓN SIEMENS NX

Autor: Álvaro Aragón Aragón

Director1: Mariano Jiménez Calzado

Director2: Javier Manini Gumz

Madrid

Julio de 2023

RESUMEN DEL PROYECTO

SIMULACIÓN VIRTUAL DE UNA MHCN (CMV- CENTRO DE MECANIZADO VERTICAL) Y SU INTEGRACIÓN EN LA APLICACIÓN SIEMENS NX

Autor: Aragón Aragón, Álvaro.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Director: Manini Gumz, Javier.

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas.

Este trabajo se enmarca dentro del campo del diseño mecánico CAD, la simulación CAD/CAM y la fabricación CAM. El objetivo principal es diseñar y simular con el *software Siemens NX* una máquina CNC real del LSITF del ICAI. Para ello, se utilizarán conocimientos y técnicas ya adquiridas en las asignaturas del MII “Diseño de Producto” y en “Tecnologías de Fabricación” del grado GITI.

Para la realización del mismo, se requerirá del manejo del programa *Siemens NX* para diseñar, modelar y simular el funcionamiento del CMV de tres ejes *Hartford* que se encuentra en el laboratorio de Sistemas Integrados y Tecnologías de Fabricación del ICAI. En concreto, se utilizarán los módulos: “Modelado” (diseño de la máquina), “Dibujo en plano” (planos de la máquina), “Constructor de máquinas herramienta” (creación del modelo cinemático de la máquina) y “Fabricación” (simulación del mecanizado, postprocesado, depuración y fabricación de la pieza). Con esto se consigue obtener una máquina virtualizada que posee algunas simplificaciones pero conserva el movimiento de la propia máquina física gracias a la creación del diseño de la máquina y del modelo cinemático. Además, los resultados obtenidos en este trabajo respaldan la calidad del modelo digital de la máquina *HV-35*, demostrando su capacidad para simular el movimiento y el mecanizado de la misma.

Introducción

La evolución de la tecnología de la información y su introducción en los procesos de producción está transformando la industria tradicional, llevándola a un nuevo nivel de desarrollo de organización. Con el fin de aprovechar los beneficios de estas tecnologías y fortalecer la competitividad en el mercado global, se está discutiendo un cambio de paradigma en la industria a nivel mundial. Industria 4.0 o fábrica digital son algunos de los términos utilizados para describir la implementación de dispositivos “inteligentes” que pueden comunicarse de forma autónoma a lo largo del proceso de fabricación. Así, ya en los inicios del siglo XXI, el mundo está presenciando la Cuarta Revolución Industrial y la transformación digital del modelo empresarial, véase Figura 4.

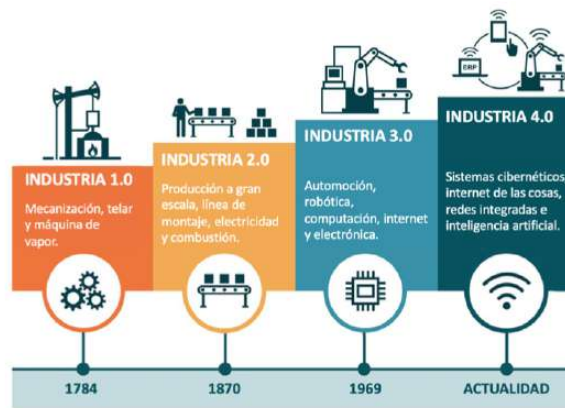


Figura 1. Revoluciones industriales a lo largo de la historia.

Dentro de esta última revolución industrial, la máquina virtual desempeña un papel esencial en asegurar que, al invertir en una nueva máquina o adaptar una máquina existente, se recupere la inversión lo más rápido posible. Esto se garantiza gracias a que se puede simular el mecanizado de una pieza de trabajo en una máquina virtual en el ordenador, mientras que la máquina real está disponible para otras tareas o para mecanizar otra pieza. Además, el usuarios de una máquina herramienta digital puede aumentar los tiempos de ciclo y no tiene que esperar a que la máquina física esté disponible para probar nuevas piezas de trabajo. Así, al comprender completamente cómo funciona el mecanizado se pueden realizar mejoras o modificaciones para optimizar su rendimiento, eficiencia y calidad.

La transformación digital otorga a los dispositivos analógicos y al trabajo manual una huella digital. Abarcando desde la cadena de suministro a través del proceso de fabricación hasta los productos finales, esta huella digital ofrece una amplia gama de iniciativas hacia una industria más competitiva, flexible y sostenible. Sin embargo, esta transformación hacia la fabricación integrada por ordenador sólo se ve coronada por el éxito cuando la simbiosis entre los dispositivos de *hardware*, los algoritmos de *software* y los seres humanos se intensifica en gran medida. Un paso esencial aquí es una representación virtual o digital del activo físico, el llamado gemelo digital o *Digital Twin* (DT), (véase [KRIT18]).



Figura 2. CMV de tres ejes HV-35 del LSITF del ICAI.

Un concepto importante para este trabajo será el de máquina CNC. En concreto, una máquina CNC es aquella en la cual se procesa una pieza de material (metal, plástico, madera, etc.) para cumplir con las especificaciones siguiendo instrucciones codificadas programadas, sin un operador manual que controle directamente la operación de mecanizado, véase Figura 2. Además, una máquina CNC posee un control numérico (control CNC) el cual dirige de manera automatizada las herramientas de mecanizado de la máquina (como taladros, tornos, fresadoras, etc.) por medio de un ordenador.

El objetivo principal será digitalizar y simular la máquina *Hartford HV-35* del LSITF del ICAI y hacer su simulación con la aplicación *Siemens NX*, véase Figura 2. Por tanto, este trabajo se enmarca dentro de los conceptos de la Industria 4.0 e ingeniería inversa y pretende ayudar a revolucionar la industria y acercarla a pequeñas y medianas empresas y a empresas con recursos limitados.

Metodología

En este proyecto se pretende diseñar, modelar y simular una máquina CNC mediante el *software Siemens NX* con el fin de que después dicho trabajo pueda ser extendido a otras máquinas y controles y ayude a pequeñas y medianas empresas a integrarse dentro de la Industria 4.0.

Para ello, se realiza un estudio detallado de la Industria 4.0, la fábrica digital y la ingeniería inversa. Además, se incluye una revisión bibliográfica de distintos ejemplos de digitalización, tanto de máquinas digitalizadas con *Siemens* como otras hechas con otros programas. Así, se consigue enmarcar y contextualizar el proyecto dentro del campo de la Industria 4.0, aprendiendo los conceptos y claves principales que se utilizan durante el desarrollo del proyecto.

Por otro lado, es necesario realizar un estudio detallado del CMV de tres ejes del LSITF del ICAI, para ello se ha acudido al propio laboratorio para tomar medidas y observar las características principales de la máquina. Con todo este estudio se diseña y se crea el modelo cinemático de la máquina digital con el programa *Siemens NX 1926*. Tras esto, se consigue simular el funcionamiento de la propia máquina y se comprueba reproduciendo el proceso de mecanizado de una pieza de trabajo.

El texto se ha procurado ordenar con el objetivo de mostrar, paso a paso, el estudio seguido para diseñar, modelar y simular la máquina y, también introducir, sin prisas, las herramientas y claves necesarias para su completo entendimiento.

Plan del proyecto

Ahora se pasarán a exponer brevemente los contenidos de esta memoria. Este trabajo está formado por tres documentos. El primero de ellos, “Documento I. Memoria”, es el que ocupa la mayor parte del trabajo y en él se expone muy detalladamente todo el estudio y el procedimiento seguido para diseñar, modelar y simular la máquina. También hay un segundo documento, “Documento II. Planos”, en el que incluimos los planos de todos los componentes y elementos de la máquina y de la pieza a mecanizar. Por último en el tercer documento, “Documento III. Anexos”, se incluyen seis anexos. El primero de ellos se corresponde con un documento relativo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, “Anexo A: Objetivos de Desarrollo Sostenible”. El segundo incluye un breve estudio económico relacionado con la virtualización de la máquina, “Anexo B: Estudio económico”. El tercer anexo contiene un breve tutorial sobre la instalación del *software VNCK*, “Anexo C: Instrucciones de instalación VNCK”. En cuanto al cuarto documento, “Anexo D: Operaciones de mecanizado”, incluye el código generado por el *software Siemens NX* relacionado con las operaciones de mecanizado utilizadas durante el proceso de simulación del

mismo. Además, se incluye otro anexo con los principales comandos del código NC que utiliza el control CNC, “Anexo E: Comandos Código NC”, y por último, se incluye un documento con el proceso de generación y las principales características de un archivo *.mtk* necesario para comprimir una máquina virtual de *Siemens NX*.

Por otro lado, el “Documento I. Memoria ” está formado por siete capítulos que ayudan al lector a entender, adentrarse y dar forma al estudio. En el Capítulo 1 se plantea el estudio a realizar, detallando los objetivos y metodologías de estudio. Siendo el principal objetivo del trabajo el de diseñar, modelar y simular el CMV de tres ejes *Hartford HV-35* del LSITF del ICAI, esto se hará mediante el estudio bibliográfico y mediante las visitas al propio laboratorio junto con los directores del proyecto. En el Capítulo 2, se hace una breve descripción de los diversos programas y *softwares* empleados en este proyecto, haciendo hincapié en el *software Siemens NX* fundamental para todo el proceso de creación de la máquina digital. Tras esto, en el Capítulo 3, se hace una revisión bibliográfica sobre el campo de la fábrica digital y su implementación y desarrollo histórico, analizando desde el punto de vista histórico, cómo ha ido evolucionando la industria desde sus orígenes con la Primera Revolución Industrial hasta la actualidad. También, se estudia la fábrica en la actualidad con sus nuevas características y conceptos. Además, se añade una última sección en la que se hace un estudio sobre proyectos de la bibliografía en los que ya se han desarrollado diversas máquinas virtuales.

Siguiendo con el desarrollo del proyecto, en el Capítulo 4 se hace un estudio sobre las máquinas CNC en general. Así se estudian desde el punto de vista teórico las principales características de estas máquinas, incluyendo los principales tipos y elementos estructurales más importantes de cada uno de ellos. Además, añade un estudio detallado sobre la máquina física que se encuentra en el LSITF del ICAI, incluyendo los principales elementos y modos de funcionamiento de la máquina a virtualizar los cuales deberán tenerse en cuenta durante el proceso de digitalización. En el Capítulo 5, se hace un estudio sobre el control de las máquinas CNC. Así se estudian desde el punto de vista teórico las principales características de estos controles, incluyendo las principales funciones de los mismos y los distintos tipos de control numérico que puede tener una máquina. Al igual que en el capítulo anterior, se añade un estudio detallado del control numérico de la máquina física que se encuentra en el LSITF del ICAI, y, por último, se habla del *software VNCK* necesario para la integración del control digital en la máquina virtual y su conexión con la parte física.

La parte principal del trabajo se lleva a cabo en el Capítulo 6, en el que se detalla el procedimiento seguido para la digitalización del CMV de tres ejes *Hartford HV-35* del LSITF del ICAI. Uno de los objetivos de este capítulo es ilustrar los pasos y seguidos para que este estudio pueda ayudar a otros a virtualizar otras máquinas. Es muy importante tener en cuenta que para este capítulo se necesitan todos los detalles y especificaciones anteriormente descritos. En concreto, en este capítulo, se empieza detallando cómo se realiza la instalación de los *softwares Siemens NX 1926* y *VNCK v.4.7.4*, necesarios para la correcta simulación e integración de la máquina virtual y la máquina física. Aunque en este trabajo la parte correspondiente al *software VNCK v.4.7.4* no se ha implementado, se ha dejado como línea futura del mismo y por eso se ha incluido la instalación de dicho programa. Una vez instalados los *softwares* se procede a detallar el modelado de la máquina, tanto de su estructura externa como de los componentes internos y su integración dentro de la estructura externa. Además, se incluye el modelado de la pieza de trabajo que luego se procede a mecanizar. Tras este modelado, se crea el modelo cinemático de la máquina en el que se incluyen los movimientos más característicos de sus elementos y después, se para a simular el mecanizado de la pieza de trabajo. Una vez obtenido el mecanizado de la misma, se procede a realizar el postprocesado y depuración del código para poder fabricar dicha pieza en la máquina real. Así, se termina el trabajo incluyendo en el Capítulo 8, los principales resultados, las conclusiones y líneas futuras de este proyecto.

Resultados

El principal resultado del trabajo es la obtención de la máquina virtualizada, véase Figura 3 y Figura 4.

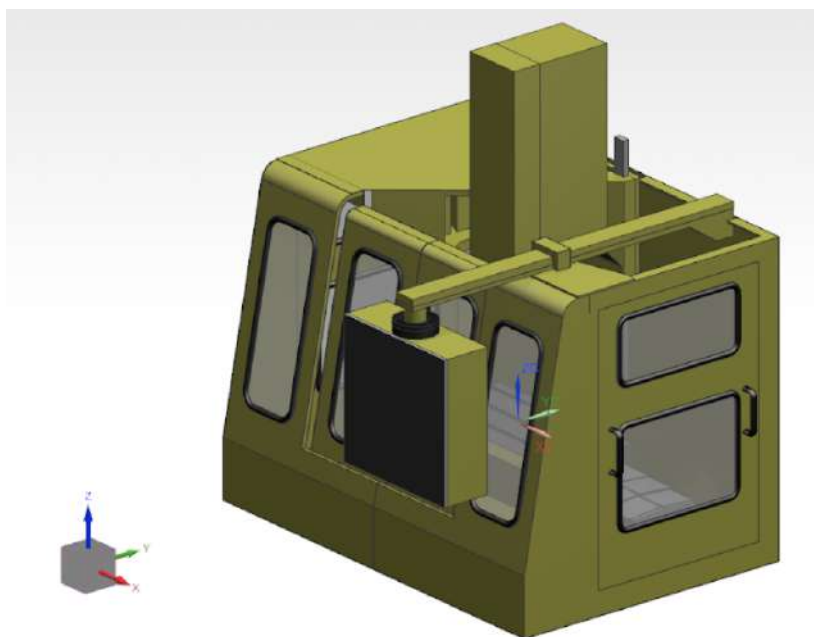


Figura 3. Modelo virtual CMV de tres ejes HV-35 del LSITF del ICAI.

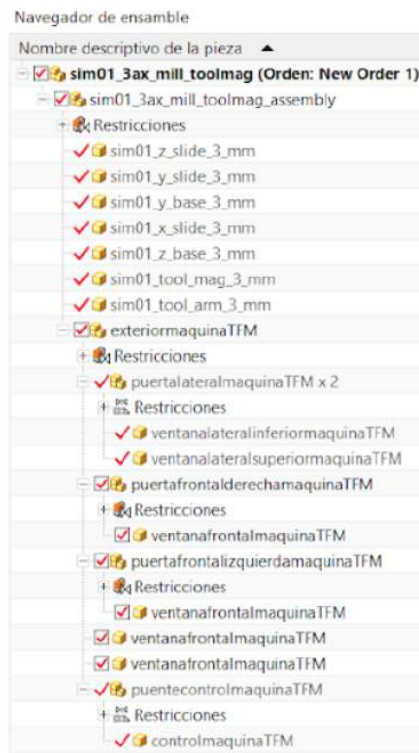


Figura 4. Árbol general del modelado la máquina.

Dicho modelo virtual posee algunas simplificaciones pero conserva el movimiento de la propia máquina física gracias a la creación del modelo cinemático, véase Figura 5.

Navegador de máquinas herramienta: Constructor de máquinas herramienta					
Nombre	Clasificación	Juntas	Nombre de eje	Valor inicial	Eje NC
HARTFORD					
└ MACHINE_BASE	.MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO*			
└└ Z_BASE		Z_BASE_JCT			
└└└ Z_AXIS			Z	518.5	✓
└└└└ SPINDLE	.DYNAMIC HOLDER	S*	S	0	
└ Y_BASE					
└└ Y_AXIS			Y	0	✓
└└ X_AXIS			X	0	✓
└ SET_UP	.SETUP_ELEMENT	SET_UP_JCT			
└└ PART	.PART_SETUP_ELEMENT				
└└ WORK_PIECE	.WORKPIECE_SETUP_ELEMENT				
└└ FIXTURE	.SETUP_ELEMENT				
└ TOOL_HOUSING					
└└ TOOL_ARM		TOOL_CHANGER	V	0	
└└ TOOL_MAGAZINE	.DEVICE		C	0	
└└└ POCKET_01	.STATIC HOLDER	T1			
└└└ POCKET_02	.STATIC HOLDER	T2			
└└└ POCKET_03	.STATIC HOLDER	T3			
└└└ POCKET_04	.STATIC HOLDER	T4			
└└└ POCKET_05	.STATIC HOLDER	T5			
└└└ POCKET_06	.STATIC HOLDER	T6			
└└└ POCKET_07	.STATIC HOLDER	T7			
└└└ POCKET_08	.STATIC HOLDER	T8			
└└└ POCKET_09	.STATIC HOLDER	T9			
└└└ POCKET_10	.STATIC HOLDER	T10			
└└└ POCKET_11	.STATIC HOLDER	T11			
└└└ POCKET_12	.STATIC HOLDER	T12			
└└└ POCKET_13	.STATIC HOLDER	T13			
└└└ POCKET_14	.STATIC HOLDER	T14			
└└└ POCKET_15	.STATIC HOLDER	T15			
└└└ POCKET_16	.STATIC HOLDER	T16			

Figura 5. Árbol general del modelo cinemático de la máquina.

Con todo esto, se consigue llevar a cabo la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo escogida, para comprobar y verificar el correcto funcionamiento de la máquina virtual.

Conclusiones

A la luz de los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo digital creado para la máquina *HV-35* es una primera representación precisa de la misma. A pesar de las simplificaciones realizadas, el modelo digital logra simular de manera efectiva el movimiento real de la máquina y además, como se observa en los resultados, el mecanizado de la pieza también se simula de manera adecuada. Estos hallazgos respaldan con confianza la afirmación de que el modelo digital es una primera representación de la máquina y puede ser utilizado para simular y realizar pruebas en un entorno virtual. Esta capacidad de simulación ofrece beneficios significativos al permitir ahorrar tiempo y dinero en la fase de diseño y desarrollo. Al tener un adecuado modelo digital de la máquina, se pueden evaluar y optimizar diferentes aspectos, como la configuración de herramientas, la secuencia de operaciones y la eficiencia del proceso de mecanizado, todo ello sin la necesidad de utilizar recursos físicos ni producir prototipos reales. Esto no solo agiliza el proceso de desarrollo, sino que también reduce los costos asociados con el mecanizado de piezas de prueba. En resumen, los resultados obtenidos respaldan la calidad del modelo digital de la máquina *HV-35*, demostrando su capacidad para simular el movimiento y el mecanizado de la misma y, por lo tanto, se ha cumplido el principal objetivo del trabajo. Cabe destacar que este modelo es una primera representación de la máquina virtual ya que como se detallará en las líneas futuras aún se puede seguir mejorando este modelo para acercarlo cada vez más al concepto de gemelo digital.

Este trabajo sirve pues como una primera aproximación a la aplicación de la Industria 4.0 y la ingeniería inversa, desarrollando el diseño mecánico CAD, la simulación CAD/CAM y la fabricación CAM mediante el *software Siemens NX*. Además, abre nuevas líneas de investigación para acercar dicho modelo a un gemelo digital más realista y fidedigno.

PROJECT SUMMARY

VIRTUAL SIMULATION OF A NCMT (VMC - VERTICAL MACHINING CENTER) AND ITS INTEGRATION INTO THE SIEMENS NX APPLICATION.

This work is framed within the field of CAD mechanical design, CAD/CAM simulation and CAM manufacturing. The main objective is to design and simulate with the Siemens NX software a real CNC machine of the LSITF of ICAI. For this, knowledge and techniques already acquired in the subjects of the MII “Product Design” and “Manufacturing Technologies” of the GITI degree will be used.

For the realization of the same, it will be required the use of the Siemens NX program to design, model and simulate the operation of the three-axis VMC Hartford that is located in the laboratory of Integrated Systems and Manufacturing Technologies of the ICAI. Specifically, the modules “Modeling” (machine design), “Drawing in plan” (machine drawings), “Machine tool builder” (creation of the kinematic model of the machine) and “Manufacturing” (simulation of machining, post-processing, debugging and manufacturing of the part) will be used. This results in a virtualised machine that has some simplifications but retains the movement of the physical machine itself thanks to the creation of the machine design and the kinematic model. Furthermore, the results obtained in this work support the quality of the digital model of the HV-35 machine, demonstrating its capacity to simulate the movement and machining of the machine.

Introduction

The evolution of information technology and its introduction into production processes is transforming traditional industry, taking it to a new level of organizational development. In order to take advantage of the benefits of these technologies and strengthen competitiveness in the global market, a paradigm shift in industry is being discussed worldwide. Industry 4.0 or digital factory are some of the terms used to describe the implementation of “smart” devices that can communicate autonomously throughout the manufacturing process. Thus, already at the beginning of the 21st century, the world is witnessing the Fourth Industrial Revolution and the digital transformation of the business model, see Figure 1.

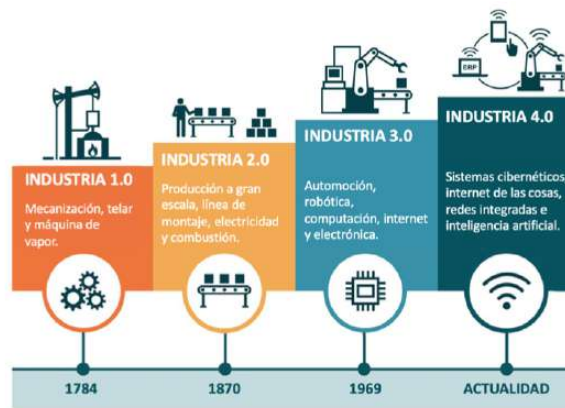


Figure 1. Industrial revolutions throughout historya.

Within this latest industrial revolution, the virtual machine plays an essential role in ensuring that, when investing in a new machine or retrofitting an existing machine, the investment is recouped as quickly as possible. This is ensured by the fact that the machining of a workpiece can be simulated on a virtual machine on the computer, while the real machine is available for other tasks or for machining another workpiece. In addition, the user of a digital machine tool can increase cycle times and does not have to wait for the physical machine to be available to test new workpieces. Thus, by fully understanding how machining works, improvements or modifications can be made to optimize its performance, efficiency and quality.

Digital transformation gives analog devices and manual labor a digital footprint. Spanning from the supply chain through the manufacturing process to the final products, this digital footprint offers a wide range of initiatives towards a more competitive, flexible and sustainable industry. However, this transformation towards computer-integrated manufacturing is only crowned with success when the symbiosis between hardware devices, software algorithms and humans is greatly intensified. An essential step here is a virtual or digital representation of the physical asset, the so-called, Digital Twin (DT), (see [KRIT18]).



Figure 2. VMC three-axis HV-35 of LSITF of ICAI.

An important concept for this work will be that of CNC machine. Specifically, a CNC machine is one in which a piece of material (metal, plastic, wood, etc.) is processed to meet

specifications by following programmed coded instructions, without a manual operator directly controlling the machining operation, see Figure 2. In addition, a CNC machine has a numerical control (CNC control) which drives in an automated way the machining tools of the machine (such as drills, lathes, milling machines, etc.) by means of a computer.

The main objective will be to digitize and simulate the machine Hartford HV-35 of the LSITF of ICAI and make its simulation with the application Siemens NX, see Figure ???. Therefore, this work is framed within the concepts of Industry 4.0 and reverse engineering and aims to help revolutionize the industry and bring it closer to small and medium-sized enterprises and companies with limited resources.

Methodology

The aim of this project is to design, model and simulate a CNC machine using Siemens NX software so that this work can later be extended to other machines and controls and help small and medium-sized companies to integrate into Industry 4.0.

For this purpose, a detailed study of Industry 4.0, the digital factory and reverse engineering is carried out. In addition, a bibliographic review of different examples of digitization is included, both of machines digitized with Siemens and others made with other programs. Thus, it is possible to frame and contextualize the project within the field of Industry 4.0, learning the main concepts and keys that are used during the development of the project.

On the other hand, it is necessary to carry out a detailed study of the three-axis CMV of the LSITF of ICAI, for this purpose we have gone to the laboratory itself to take measurements and observe the main characteristics of the machine. With all this study, the kinematic model of the digital machine is designed and created with the program Siemens NX 1926. After this, the operation of the machine itself is simulated and tested by reproducing the machining process of a workpiece.

The text has been arranged in order to show, step by step, the study followed to design, model and simulate the machine, and also to introduce, without haste, the tools and keys necessary for its complete understanding.

Project plan

The contents of this report will now be briefly outlined. This work is made up of three documents. The first of these, “Document I. Memory”, is the one that occupies most of the work and in it the whole study and the procedure followed to design, model and simulate the machine is set out in great detail. There is also a second document, “Document II. Drawings”, in which we include the drawings of all the components and elements of the machine and of the part to be machined. Finally, in the third document, “Document III. Annexes”, there are six annexes. The first of these corresponds to a document relating to the Sustainable Development Goals, “Annex A: Sustainable Development Goals”. The second includes a short economic study related to the virtualisation of the machine, “Annex B: Economic Study”. The third annex contains a short tutorial on the installation of the VNCK software, “Annex C: VNCK Installation Instructions”. As for the fourth document, “Annex D: Machining operations”, includes the code generated by the Siemens NX software related to the machining operations used during the machining simulation process. In addition, another annex is included with the main commands of the NC code used by the CNC control, “Annex E: NC Code Commands”, and finally, a document is included with the generation process and the main characteristics of a *.mtk* file needed to compress a virtual machine of Siemens NX.

On the other hand, the “Document I. Memory ” consists of seven chapters that help the reader to understand, understand and shape the study. Chapter 1 sets out the study to be carried out, detailing the objectives and methodologies of the study. The main objective of the work is to design, model and simulate the three-axis CMV Hartford HV-35 of the LSITF of the ICAI, this will be done through the bibliographic study and through visits to the laboratory itself together with the directors of the project. In Chapter 2, a brief description of the different programmes and software used in this project is given, with emphasis on the Siemens NX software, which is fundamental for the whole process of creating the digital machine. After this, in Chapter 3, a bibliographical review is made of the field of the digital factory and its implementation and historical development, analysing from a historical point of view, how industry has evolved from its origins with the First Industrial Revolution to the present day. It also looks at the factory today with its new features and concepts. In addition, a final section is added in which a study is made of projects in the literature in which various virtual machines have already been developed.

Continuing with the development of the project, Chapter 4 studies CNC machines in general. The main characteristics of these machines are studied from a theoretical point of view, including the main types and most important structural elements of each one of them. It also adds a detailed study of the physical machine found in the LSITF of the ICAI, including the main elements and operating modes of the machine to be virtualised, which must be taken into account during the digitisation process. In Chapter 5, a study is made on the control of CNC machines. From a theoretical point of view, the main characteristics of these controls are studied, including their main functions and the different types of numerical control that a machine can have. As in the previous chapter, a detailed study of the numerical control of the physical machine found in the LSITF of the ICAI is added, and finally, the software VNCK necessary for the integration of the digital control in the virtual machine and its connection with the physical part.

The main part of the work is carried out in Chapter 6, which details the procedure followed for the digitisation of the three-axis CMV Hartford HV-35 of the ICAI LSITF. One of the aims of this chapter is to illustrate the steps followed so that this study can help others to virtualise other machines. It is very important to note that all the details and specifications described above are needed for this chapter. Specifically, this chapter begins by detailing how to install the Siemens NX 1926 and VNCK v.4.7.4 software, which are necessary for the correct simulation and integration of the virtual machine and the physical machine. Although the part corresponding to the VNCK v.4.7.4 software has not been implemented in this work, it has been left as a future line of the same and that is why the installation of this program has been included. Once the software have been installed, the modelling of the machine is detailed, both of its external structure and of the internal components and their integration within the external structure. It also includes the modelling of the workpiece, which is then machined. After this modelling, the kinematic model of the machine is created in which the most characteristic movements of its elements are included and then the machining of the workpiece is simulated. Once the machining of the workpiece has been obtained, the code is post-processed and debugged in order to be able to manufacture the workpiece on the real machine. Chapter 8 concludes the work by including the main results, conclusions and future lines of this project.

Results

The main result of the work is the virtualised machine, see Figure 3 and Figure 4.

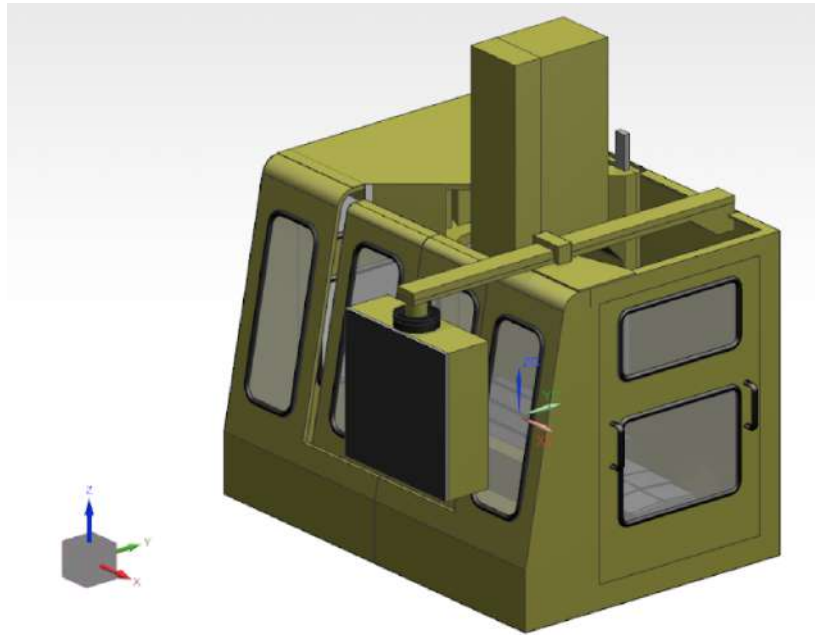


Figure 3. Virtual model of VMC three-axis HV-35 of LSITF of ICAI.

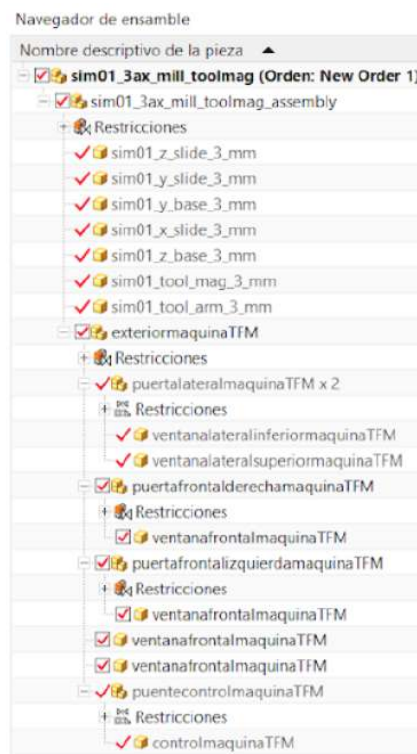


Figure 4. ÁGeneral tree of the machine model.

This virtual model has some simplifications but retains the motion of the physical machine itself thanks to the creation of the kinematic model, see Figura 5.

Navegador de máquinas herramienta: Constructor de máquinas herramienta

Nombre	Clasificación	Juntas	Nombre de eje	Valor inicial	Eje NC
HARTFORD					
MACHINE_BASE	.MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO*			
Z_BASE		Z_BASE_JCT			
Z_AXIS			Z	518.5	✓
SPINDLE	.DYNAMIC HOLDER	S*	S	0	
Y_BASE					
Y_AXIS			Y	0	✓
X_AXIS			X	0	✓
SET_UP	.SETUP_ELEMENT	SET_UP_JCT			
PART	.PART_SETUP_ELEMENT				
WORK_PIECE	.WORKPIECE_SETUP_ELE...				
FIXTURE	.SETUP_ELEMENT				
TOOL_HOUSING					
TOOL_ARM		TOOL_CHANGER	V	0	
TOOL_MAGAZINE	.DEVICE		C	0	
POCKET_01	.STATIC HOLDER	T1			
POCKET_02	.STATIC HOLDER	T2			
POCKET_03	.STATIC HOLDER	T3			
POCKET_04	.STATIC HOLDER	T4			
POCKET_05	.STATIC HOLDER	T5			
POCKET_06	.STATIC HOLDER	T6			
POCKET_07	.STATIC HOLDER	T7			
POCKET_08	.STATIC HOLDER	T8			
POCKET_09	.STATIC HOLDER	T9			
POCKET_10	.STATIC HOLDER	T10			
POCKET_11	.STATIC HOLDER	T11			
POCKET_12	.STATIC HOLDER	T12			
POCKET_13	.STATIC HOLDER	T13			
POCKET_14	.STATIC HOLDER	T14			
POCKET_15	.STATIC HOLDER	T15			
POCKET_16	.STATIC HOLDER	T16			

Figure 5. General tree of the kinematic machine model.

With all this, it is possible to carry out the simulation of the machining of the chosen workpiece, to check and verify the correct operation of the virtual machine.

Conclusions

In the light of the results obtained, it can be concluded that the digital model created for the machine is an accurate first representation of the machine. Despite the simplifications made, the digital model manages to effectively simulate the actual movement of the machine and furthermore, as can be seen from the results, the machining of the workpiece is also adequately simulated. These findings confidently support the assertion that the digital model is a first representation of the machine and can be used to simulate and test in a virtual environment. This simulation capability offers significant benefits by saving time and money in the design and development phase. By having a proper digital model of the machine, different aspects such as tool configuration, sequence of operations and efficiency of the machining process can be evaluated and optimised without the need to use physical resources or produce real prototypes. This not only speeds up the development process, but also reduces the costs associated with machining test parts. In summary, the results obtained support the quality of the digital model of the machine, demonstrating its ability to simulate the movement and machining of the machine and, therefore, the main objective of the work has been met. It should be noted that this model is a first representation of the virtual machine since, as will be detailed in future lines, this model can still be further improved to bring it ever closer to the concept of the digital twin.

This work serves as a first approach to the application of Industry 4.0 and reverse engineering, developing CAD mechanical design, CAD/CAM simulation and CAM manufacturing using Siemens NX software. It also opens up new lines of research to bring this model closer to a more realistic and reliable digital twin.

*Un poco de ciencia aleja de Dios,
pero mucha ciencia devuelve a Él.*

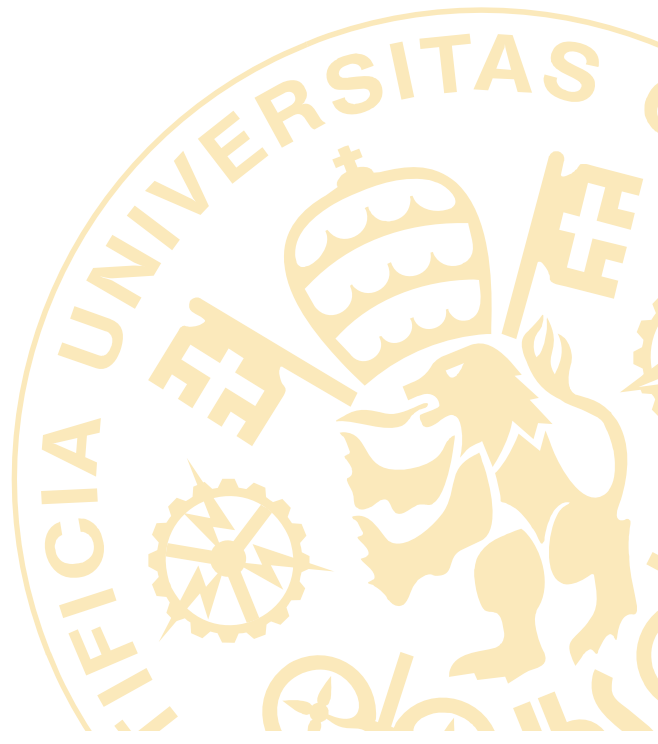
LOUIS PASTEUR

Agradecimientos

A mi madre, por guiarme desde Allí.
A mi padre, por estar siempre ahí.
A mis directores, por confiar en mí .
A mi novia, por darme lo mejor de sí.
A todos, por sacar lo mejor de mí.

DOCUMENTO I

MEMORIA



Índice

1. Planteamiento del trabajo	11
1.1. Objetivos	11
1.2. Metodología	12
1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	13
2. Descripción de las tecnologías	14
2.1. LaTeX	14
2.2. <i>Microsoft Excel</i>	14
2.3. <i>Siemens NX</i>	14
3. Estado de la cuestión	18
3.1. Desarrollo y evolución histórica de la industria	18
3.1.1. El siglo XVIII: Primera Revolución Industrial	19
3.1.2. Del siglo XIX al siglo XX: El desarrollo	20
3.1.3. Siglo XXI: Cuarta Revolución Industrial	22
3.2. La fábrica digital	23
3.2.1. <i>Big Data</i>	24
3.2.2. <i>Blockchain</i>	27
3.2.3. <i>Business Intelligence</i>	29
3.2.4. <i>Digital Twins</i>	31
3.2.5. Inteligencia Artificial	33
3.2.6. <i>Internet of Things</i>	35
3.3. Virtualización de una máquina	37
3.3.1. Caso 1: Máquina punzadora de láminas de metal (<i>CAD/CAM/CNC</i>)	37
3.3.2. Caso 2: Máquina de corte (<i>ToolMaker</i>)	40
3.3.3. Caso 3: Robot manipulador 7 grados de libertad (<i>Siemens NX</i>)	43
3.3.4. Premisas	44
4. Máquinas CNC	45
4.1. Descripción	45
4.2. Elementos principales	49
4.2.1. Estructura exterior	49
4.2.2. Husillo	49
4.2.3. Mesa de trabajo o bancada	49
4.2.4. Cambiador automático de herramientas	50
4.2.5. Sistemas de refrigeración	50
4.2.6. Ejes	50
4.2.7. Control	51
4.3. Tipologías	51
4.3.1. Tornos o centros de torneado	51
4.3.1.1. Tornos de dos ejes	55

4.3.1.2.	Tornos de tres ejes	56
4.3.1.3.	Tornos de cuatro ejes	56
4.3.1.4.	Tornos de seis ejes	56
4.3.2.	Fresadoras o centros de mecanizado	57
4.3.2.1.	Fresadoras o centros de mecanizado horizontales	61
4.3.2.2.	Fresadoras o centros de mecanizado verticales	61
4.4.	CMV <i>Hartford HV-35</i>	63
4.4.1.	Estructura exterior	65
4.4.2.	Estructura interior	66
4.4.3.	Ejes	70
5.	Control CNC	72
5.1.	Descripción	72
5.2.	Elementos principales	76
5.2.1.	Panel de operador	76
5.2.2.	Pantalla de visualización y teclado	76
5.2.3.	Botonera manual o mando	77
5.2.4.	Código o lenguaje de programación	77
5.3.	Control <i>Siemens Sinumerik 828D</i>	78
5.4.	<i>Software VNCK</i>	81
6.	Virtualización del CMV <i>Hartford HV-35</i>	84
6.1.	Instalación	84
6.1.1.	<i>Siemens NX 1926</i>	84
6.1.2.	<i>VNCK v.4.7.4</i>	86
6.2.	Modelado	88
6.2.1.	Modelado de la máquina	88
6.2.1.1.	Estructura exterior	88
6.2.1.2.	Estructura interior	93
6.2.1.3.	Estructura exterior + Estructura interior	97
6.2.2.	Modelado de la pieza	99
6.3.	Creación del modelo cinemático	100
6.4.	Simulación del mecanizado	110
6.5.	Postprocesado	124
6.6.	Depuración del código NC	136
7.	Resultados y conclusiones	147
7.1.	Resultados	147
7.2.	Conclusiones	148
7.3.	Líneas futuras	149
	Bibliografía	152

Índice de figuras

1.	Objetivos relacionados con el trabajo.	13
2.	Logotipo del programa <i>Siemens NX</i>	15
3.	Ventana de inicio del <i>software Siemens NX</i>	16
4.	Revoluciones industriales a lo largo de la historia.	18
5.	Máquina de vapor.	19
6.	Henry Ford y el motor de combustión.	20
7.	Thomas Edison y la bombilla.	21
8.	Tercera Revolución Industrial o Revolución Digital.	22
9.	Cuarta Revolución Industrial.	23
10.	Pilares de la Industria 4.0 o fábrica digital.	24
11.	4V <i>Big Data</i>	26
12.	Imagen digital de una cadena de bloques o <i>Blockchain</i>	27
13.	Ejemplo de una transacción con <i>Blockchain</i>	28
14.	Estructura de un sistema <i>business intelligence</i>	30
15.	Imagen gráfica de un gemelo digital de una máquina.	31
16.	Robot inteligente jugando una partida de ajedrez contra una persona.	34
17.	Imagen gráfica de las conexiones de la tecnología IoT.	37
18.	Máquina punzonadora a virtualizar.	38
19.	Máquina punzonadora virtualizada.	39
20.	Elementos de la máquina de corte.	40
21.	Digitalización de la máquina de corte con <i>ToolMaker</i>	42
22.	Robot virtualizado.	43
23.	Máquina CNC.	45
24.	Primera máquina herramienta.	46
25.	Máquina NC de 1955.	46
26.	Máquina CNC moderna.	47
27.	Ejemplo de una máquina CNC moderna.	48
28.	Ejes primarios y secundarios de una máquina CNC.	51
29.	Ejemplo de un torno CNC de dos ejes.	52
30.	Ejemplo de un torno CNC Horizontal.	54
31.	Ejemplo de un torno CNC Vertical.	55
32.	Ejemplo de un centro de mecanizado CNC de tres ejes.	57
33.	Ejemplo de una fresadora CNC moderna de tres ejes.	58
34.	Ejemplo de una fresadora CNC de cinco ejes.	59
35.	Ejemplo de una fresadora CNC Horizontal.	61
36.	Ejemplo de una fresadora CNC Vertical.	62
37.	Vista frontal del CMV HV-35 del LSITF del ICAI.	63

38.	Placa de características del CMV HV-35.	63
39.	Control CNC del CMV HV-35.	64
40.	Vista lateral del CMV HV-35.	66
41.	Guías lineales verticales del CMV HV-35.	67
42.	Torre del CMV HV-35.	67
43.	Carro transversal transversal del CMV HV-35.	68
44.	Carro longitudinal del CMV HV-35.	68
45.	Mesa de trabajo del CMV HV-35.	69
46.	Brazo del cambiador automático de herramientas del CMV HV-35.	69
47.	Cambiador automático de herramientas del CMV HV-35.	70
48.	<i>Pockets</i> y herramientas del CMV HV-35 del LSITF del ICAI.	70
49.	Ejes principales del CMV HV-35.	71
50.	Funciones principales de un control CNC.	73
51.	Ejemplo de una pantalla típica de un control CNC <i>Fanuc</i>	73
52.	Conexión entre control CNC del LSITF del ICAI y el ordenador.	74
53.	Ejemplo de un control CNC <i>Haas</i>	75
54.	Ejemplo de un panel de operador típico de un control <i>Fanuc</i>	76
55.	Ejemplo de un mando de un control CNC <i>Fanuc</i>	77
56.	Panel de operador OP 010 <i>Sinumerik</i> 828D.	79
57.	Panel de mando <i>Sinumerik</i> 828D.	80
58.	Interfaz usuario (Hombre-Máquina) <i>Sinumerik</i> 828D.	80
59.	Botonera manual <i>Sinumerik</i> 828D.	81
60.	Ejemplo de interfaz típica del VNCK.	81
61.	Integración de VNCK dentro del control CNC.	82
62.	Ejemplo de integración entre <i>Siemens NX</i> y VNCK.	83
63.	Instalador <i>Siemens NX</i> 1926.	85
64.	Ubicación <i>Siemens NX</i> 1926.	85
65.	Código del <i>script</i> con la preconfiguración de inicio del <i>Siemens NX</i> 1926.	86
66.	Instalación VNCK (I).	87
67.	Instalación VNCK (II).	87
68.	Aplicación “Modelado” del <i>software Siemens NX</i>	88
69.	Árbol general del modelado del <i>HV-35</i>	88
70.	Modelo de la carcasa o cubierta exterior.	89
71.	Modelo incorporando las ventanas frontales.	89
72.	Modelo incorporando las puertas frontales.	90
73.	Modelo incorporando las puertas laterales.	90
74.	Modelo incorporando el brazo del control.	91
75.	Modelo de la estructura exterior de la máquina.	91
76.	Árbol general del modelado de la estructura exterior.	92
77.	Lista de restricciones globales asociadas al ensamble de la estructura exterior.	92
78.	Modelo de las Guías Lineales Verticales.	93
79.	Modelo de la torre.	94
80.	Modelo del carro transversal.	94
81.	Modelo del carro longitudinal.	94
82.	Modelo de la mesa de trabajo.	95
83.	Modelo del brazo del cambiador automático de herramientas.	95
84.	Modelo del cambiador automático de herramientas.	95
85.	Modelo de la estructura interior de la máquina.	96

86. Árbol general del modelado del área de trabajo.	96
87. Lista de restricciones globales asociadas al ensamble de la estructura interior.	97
88. Modelo de la máquina.	97
89. Árbol general del modelado de la máquina.	98
90. Lista de restricciones globales asociadas al ensamble de la máquina.	98
91. Modelo de la pieza de trabajo: Placa de Apoyo.	99
92. Modelo del ensamble total Bloque - Pieza de trabajo.	99
93. Restricciones del ensamble total Bloque - Pieza de trabajo.	99
94. Aplicación “Constructor de máquinas herramientas” del <i>software Siemens NX</i>	100
95. Definición de la base y de la posición cero de la máquina.	101
96. Definición de la base del eje <i>Z</i> de la máquina.	101
97. Definición del componente de la máquina asociado al eje <i>Z</i>	102
98. Definición de los valores asociados al eje <i>Z</i> de la máquina.	102
99. Definición del origen de coordenadas del <i>spindle</i>	103
100. Definición de los valores asociados al eje <i>S</i> de la máquina.	103
101. Definición de la base del eje <i>Y</i> de la máquina.	104
102. Definición del componente de la máquina asociado al eje <i>Y</i>	104
103. Definición de los valores asociados al eje <i>Y</i> de la máquina.	105
104. Definición de los componentes de la máquina asociados al eje <i>X</i>	105
105. Definición de los valores asociados al eje <i>X</i> de la máquina.	106
106. Definición de configuración.	106
107. Definición de la base del cambiador automático de herramientas.	106
108. Definición del componente Brazo del Cambiador Automático de Herramientas.	107
109. Definición de los valores asociados al eje lineal <i>V</i> del brazo del cambiador.	107
110. Definición del componente Cambiador Automático de Herramientas.	108
111. Definición de los valores asociados al eje de rotación <i>C</i> del cambiador de herramientas.	108
112. Definición del <i>Pocket 1</i> del Cambiador Automático de Herramientas.	109
113. Árbol general del modelo cinemático de la máquina.	109
114. Modelo del ensamble total empleado para la simulación del mecanizado de la pieza.	110
115. Árbol del modelo del ensamble total empleado para la simulación del mecanizado de la pieza.	110
116. Modelo del tornillo de banco.	111
117. Lista de restricciones globales del ensamble total del tornillo de banco.	112
118. Lista de restricciones globales del ensamble total de la máquina, del útil de sujeción y de la pieza de trabajo.	112
119. Aplicación “Fabricación” del <i>software Siemens NX</i>	113
120. Asignación de la pieza de trabajo al elemento “PART”.	113
121. Asignación del bloque de aluminio al elemento “WORK_PIECE”.	113
122. Asignación del tornillo de banco al elemento “FIXTURE”.	114
123. Definición del sistema de coordenadas cartesianas global de la máquina.	114
124. Definición del sistema de coordenadas cartesianas local de la pieza de trabajo.	115
125. Asignación de la pieza de trabajo al elemento “Part”.	115
126. Asignación del bloque de aluminio al elemento “Blank”.	116
127. Árbol de la “Vista de Geometría” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.	116
128. Insertar una operación.	117
129. Definir los parámetros de la operación.	117
130. Árbol de la “Vista de método de mecanizado” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.	118

131. Seleccionar los parámetros de corte.	118
132. Generación de la trayectoria de la herramienta.	119
133. Verificación de la trayectoria de la herramienta.	119
134. Generación de la trayectoria de la herramienta.	119
135. Parámetros del simulado.	120
136. Parámetros dimensionales de las herramientas de corte.	123
137. Árbol de la “Vista de Orden del programa” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.	123
138. Árbol de la “Vista de la máquina herramienta” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.	123
139. Simulación del mecanizado de la pieza basado en el código NC de la máquina. . . .	124
140. Postprocesado del programa de mecanizado de la pieza.	125
141. Pieza de aluminio fabricada en la máquina del LSITF del ICAI.	137
142. Herramientas de la máquina del LSITF del ICAI (I).	150
143. Herramientas de la máquina del LSITF del ICAI (II).	150
144. Utillaje de sujeción de la máquina del LSITF del ICAI.	151

Índice de tablas

1.	Ejemplo de especificaciones generales de un torno CNC.	53
2.	Ejemplo de especificaciones generales de un centro de mecanizado CNC vertical y horizontal.	60
3.	Especificaciones generales del CMV HV-35	64
4.	Especificaciones de los ejes del CMV HV-35	71
5.	Características de las operaciones utilizadas en el simulado (I).	120
6.	Características de las operaciones utilizadas en el simulado (II).	121
7.	Características de las herramientas utilizadas en el simulado.	122

Acrónimos

<i>4IR</i>	Cuarta Revolución Industrial, del inglés <i>Fourth Industrial Revolution</i>
<i>AI</i>	Inteligencia Artificial del inglés <i>Artificial Intelligence</i>
<i>BI</i>	Inteligencia Empresarial, del inglés <i>Business Intelligence</i>
<i>CAD</i>	Diseño Asistido por Ordenador, del inglés <i>Computer-Aided Design</i>
<i>CAE</i>	Ingeniería Asistida por Ordenador, del inglés <i>Computer-Aided Engineering</i>
<i>CAM</i>	Fabricación Asistida por Ordenador, del inglés <i>Computer-Aided Manufacturing</i>
<i>CMV</i>	Centro de Mecanizado Vertical
<i>CNC</i>	Control Numérico por Ordenador, del inglés <i>Computer Numerical Control</i>
<i>DT</i>	Gemelo Digital, del inglés <i>Digital Twin</i>
<i>ETL</i>	Extraer, Transformar, Cargar, del inglés <i>Extract, Transform, Load</i>
<i>GITI</i>	Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales
<i>IoT</i>	Internet de las cosas, del inglés <i>Internet of Things</i>
<i>KPI</i>	Indicadores de calidad, del inglés <i>Key Performance Indicator</i>
<i>LSITF</i>	Laboratorio de Sistemas Integrados y Tecnologías de Fabricación
<i>MHCN</i>	Máquina Herramienta de Control Numérico
<i>MII</i>	Máster Universitario en Ingeniería Industrial
<i>NASA</i>	Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio, del inglés <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NC</i>	Control Numérico, del inglés <i>Numerical Control</i>
<i>P2P</i>	De igual a igual, del inglés <i>Peer to Peer</i>
<i>ODS</i>	Objetivos de Desarrollo Sostenible
<i>ONU</i>	Organización de las Naciones Unidas
<i>VR</i>	Realidad Virtual, del inglés <i>Virtual Reality</i>
<i>VNCK</i>	Núcleo del Control Numérico Virtual, del inglés <i>Virtual Numeric Control Kernel</i>
<i>TFM</i>	Trabajo Fin de Máster

Capítulo 1

Planteamiento del trabajo

EL desarrollo de este proyecto es al mismo tiempo muy desafiante y emocionante. En primer lugar, porque requiere el conocimiento de diferentes campos de la ingeniería, algunos conocidos, otros por descubrir y eso puede ser un desafío. Por ejemplo, el campo del diseño desde el análisis del sistema a la dinámica es crucial para el proyecto; y teniendo en cuenta que se accede a un campo totalmente novedoso, la mayor parte del trabajo está por hacer y desarrollar. Además, este objetivo tan novedoso motiva aún más el proyecto. Es emocionante pensar que se puede ayudar a otros usando estas habilidades y conocimiento y abrir así una línea de investigación que permita el desarrollo de la industria.

En segundo lugar, la idea de hacer un proyecto real innovador y útil, teniendo en cuenta todas las variables que juegan un papel en su diseño es muy apasionante. Así, se pretende desarrollar un proyecto desde sus inicios, estudiando bien lo que ya está hecho e intentando mejorarlo hasta intentar llegar a su aplicación y desarrollo para la máquina concreta del proyecto. Al final, será muy gratificante que todo este trabajo se pueda realizar y llevar a cabo, y así conseguir que, en un futuro, el proyecto ayude a otros a hacer lo mismo con sus máquinas antiguas y poder implementar una fábrica digital. Con este trabajo, se pondrán en práctica las habilidades adquiridas durante estos años de carrera. Por último, pero no menos importante, personalmente, pienso que es un gran privilegio poder tener la oportunidad de iniciarme, aunque sea muy levemente, en el mundo de la investigación y de la Industria 4.0 y es algo de lo que estoy profundamente agradecido.

1.1. Objetivos

Recogiendo todo lo mencionado anteriormente a continuación se detallará una lista con los principales objetivos del proyecto. Éstos están ordenados en función de su importancia dentro del trabajo, siendo el primero el más importante y los siguientes más secundarios.

- Digitalizar y simular la máquina *Hartford HV-35* del laboratorio de Sistemas Integrados y Tecnologías de Fabricación del ICAI y hacer su simulación con la aplicación *Siemens NX*. Este es el objetivo principal y se busca poder realizarlo teniendo en cuenta sus características físicas concretas para así poder simularla de la manera más fidedigna posible.
- Hacer un estudio detallado del funcionamiento de la máquina a virtualizar. Este segundo objetivo ayudará a conseguir el primero ya que con este estudio previo y teniendo en cuenta las consideraciones específicas importantes se podrá desarrollar un buen diseño virtual de la máquina que proporcione una buena simulación posterior. Para este objetivo se tendrá

que ir a la propia máquina y tomar medidas y observar el funcionamiento concreto de sus componentes.

- Hacer una revisión detallada de otros ejemplos de digitalización de máquinas y de los conceptos principales para la fábrica digital. También este objetivo junto con el segundo ayudará a conseguir el primero. Gracias a un buen estudio de otros ejemplos bibliográficos ya realizados, se podrá diseñar una buena máquina virtual que integre de alguna manera los diversos éxitos contemplados en la bibliografía.
- Acercar el modelo a los empresarios sin recursos o conocimientos. Este objetivo está muy relacionado con el décimo Objetivo de Desarrollo Sostenible de la ONU “Reducir las desigualdades?” Así se buscará que en la medida de lo posible el proyecto se pueda extrapolar a empresarios sin recursos de países empobrecidos. También se buscará darlo a conocer a pequeñas empresas con menos recursos y capacidades y maquinaria muy antigua. Este tipo de personas son las que estarían más necesitadas de el proyecto y les ayudaría a no tener que invertir muchos recursos para revolucionar su empresa y adaptarla al mundo actual.

Todos estos son los objetivos que durante este trabajo se pretenderán desarrollar y alcanzar, sabiendo que en la consecución de cada uno de ellos habrá dificultades que no tienen por qué ser fáciles de resolver.

1.2. Metodología

Para alcanzar los objetivos anteriormente mencionados se seguirá una metodología de trabajo que se considera la más apropiada para el proyecto. Así se ha estructurado el trabajo en la siguientes partes:

1. Realizar un estudio detallado de la Industria 4.0 y la fábrica digital. Esta primera parte se basará principalmente en la búsqueda de información. Esta sección situará el proyecto y lo contextualizará para luego poder digitalizar la máquina. Es importante, comprender los conceptos principales y las claves de este campo para situar el trabajo dentro del campo actual de investigación. Para todo esto se buscará información en Internet y también en libros y revistas especializadas.
2. Análisis de distintos ejemplos de digitalización de máquinas. En esta segunda parte, se hará una revisión bibliográfica de distintos ejemplos de digitalización, en ella se incluirán tanto máquinas digitalizadas con *Siemens* como otras hechas con otros programas. Este estudio no será muy sencillo ya que encontrar ejemplos de digitalizaciones no es tarea fácil. Para ello, se utilizará principalmente Internet y revistas especializadas.
3. Realizar un estudio detallado de la máquina. En esta tercera parte se acudirá al propio LSITF del ICAI para tomar medidas y observar las características principales de la máquina. Para entender bien el funcionamiento y los detalles a tener en cuenta para digitalizar la máquina, se usarán los conocimientos adquiridos en las etapas anteriores para así facilitar al máximo la etapa posterior de diseño digital.
4. Diseñar la máquina digital con el programa *Siemens NX*. En esta etapa se usarán las medidas y características principales ya estudiadas anteriormente para así conseguir una máquina digital lo más parecida posible a la máquina real.

5. Simulación de la máquina digital y comprobación de errores. En este apartado se intentará optimizar el diseño para que la simulación sea lo más fiel posible a la realidad.

Todo esta metodología se llevará a cabo gracias a la revisión bibliográfica y la búsqueda de información en Internet y también, gracias a la ayuda de los programas informáticos vistos en el Capítulo 4.

1.3. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

En este apartado , se mencionarán específicamente cuáles son los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) que están relacionados con el trabajo, véase Figura 1.



Figura 1. Objetivos relacionados con el trabajo, [ONU23].

Principalmente, este proyecto está muy relacionado con el objetivo noveno “Industria, Innovación e Infraestructura” , ya que la finalidad es poder digitalizar una máquina de manera que mejore la industria tradicional y la lleve por el camino de la innovación hacia la Industria 4.0. Por otro lado, también lo relacionamos con el objetivo número 10 “Reducción de las desigualdades” ya que otro hecho importante de este trabajo es que el proyecto tenga un fin social, en el sentido que se pretende que sirva de ejemplo para que pequeñas empresas sin recursos o conocimientos puedan aplicar este ejemplo y así digitalizar sus máquinas más antiguas. Realmente, el proyecto puede convertirse en una herramienta esencial para que pequeñas empresas o empresas sin grandes recursos modernicen su fábrica y se incluyan dentro del nuevo modelo de Industria 4.0.

Por último, este proyecto también está relacionado con el objetivo número 12 “Producción y consumo responsable” ya que se busca colaborar en la modernización de las empresas de una manera ecológica evitando la compra de nuevas máquinas sólo por el hecho de tener un digitalización de la misma. Así, el proyecto promueve un consumo responsable e intenta a ayudar en la lucha contra el consumo desmedido muy común en la sociedad de hoy en día. Además se favorece una producción no basada en ensayo y error sino en simulación y luego su posterior producción.

Si se desea conocer más información sobre los ODS consultar el Anexo A del Documento Anexos.

Capítulo 2

Descripción de las tecnologías

ANTES de empezar a desarrollar propiamente el tema del trabajo se introducirá en este capítulo una breve explicación de los tres programas informáticos que se han utilizado a la hora de elaborar el proyecto: *LaTeX*, *Microsoft Excel* y *Siemens NX*.

2.1. LaTeX

LaTeX es un programa de composición de textos, orientado a la creación de documentos escritos que presenten una alta calidad tipográfica. Por sus características y posibilidades, se usa para escribir artículos y libros científicos que incluyen, entre otros elementos, expresiones matemáticas. En este caso se ha usado para componer el texto del trabajo. Se ha decidido usar *LaTeX* en vez de cualquier otro programa de composición de texto, como *Microsoft Word*, ya que *LaTeX* funciona muy bien a la hora de hacer referencias y crear índices de cualquier tipo.

2.2. Microsoft Excel

Microsoft Excel es un programa de hojas de cálculo y una herramienta avanzada de análisis y visualización de datos. Por todos es conocida su gran utilidad a la hora de hacer grandes tablas y gráficas. Por ello, en este proyecto se ha usado para hacer tablas y gráficos que detallen el funcionamiento de la máquina.

2.3. Siemens NX

Siemens NX, anteriormente conocido como *Unigraphics*, es un *CAD/CAM/CAE* avanzado de gama alta, propiedad de *Siemens PLM Software* desde 2007. En 2000, *Unigraphics* compró *SDRC I-DEAS* y comenzó un esfuerzo por integrar aspectos de ambos paquetes de *software* en un solo producto que se convirtió en *Unigraphics NX* o *NX*, (véase [SIEM22]).

Siemens NX es una potente plataforma de *software* de diseño, fabricación y simulación utilizada por empresas de diversas industrias, como automoción, aeroespacial, electrónica y fabricación de maquinaria. Con una amplia gama de herramientas y capacidades, *Siemens NX* proporciona una solución integral para todo el ciclo de vida de desarrollo de productos, desde la conceptualización y el diseño hasta la fabricación y el análisis.



Figura 2. Logotipo del programa *Siemens NX*.

Se utiliza, entre otras tareas, para: diseño (modelado paramétrico y directo de sólidos/superficies), análisis de ingeniería (estática, dinámica, electromagnética, térmica, por el método de los elementos finitos, y de fluidos, por el método de los volúmenes finitos) y para fabricación del diseño terminado mediante el uso de módulos de mecanizado incluidos. En concreto, se pueden distinguir los siguientes módulos de *Siemens NX*:

- **Diseño 3D:** *Siemens NX* ofrece herramientas avanzadas de diseño 3D que permite crear modelos precisos y detallados de productos. Con técnicas de modelado sólido, de superficies y síncrono, los usuarios pueden desarrollar geometrías complejas y realizar cambios rápidos y precisos en sus diseños.
- **Ensamblaje y gestión de datos:** *Siemens NX* facilita la creación y gestión de ensamblajes complejos. Los usuarios pueden definir relaciones de ensamblaje, simular el movimiento y realizar verificaciones de interferencias para garantizar la calidad y la funcionalidad del producto final. Además, el *software* permite una gestión eficiente de los datos de diseño, lo que facilita la colaboración y el intercambio de información entre los miembros del equipo.
- **Simulación y análisis:** *Siemens NX* ofrece una amplia gama de herramientas de simulación y análisis que permite evaluar el rendimiento de los productos en condiciones virtuales antes de la fabricación. Esto incluye análisis estructurales, térmicos, de flujo de fluidos y de movimiento, lo que permite identificar y resolver problemas potenciales, optimizar diseños y garantizar un rendimiento óptimo.
- **Fabricación asistida por computadora (CAM):** *Siemens NX* cuenta con módulos de fabricación asistida por computadora que permiten a los fabricantes generar trayectorias de herramientas y programar máquinas CNC de manera eficiente. Estas capacidades mejoran la productividad y la precisión en los procesos de fabricación, reduciendo los tiempos.

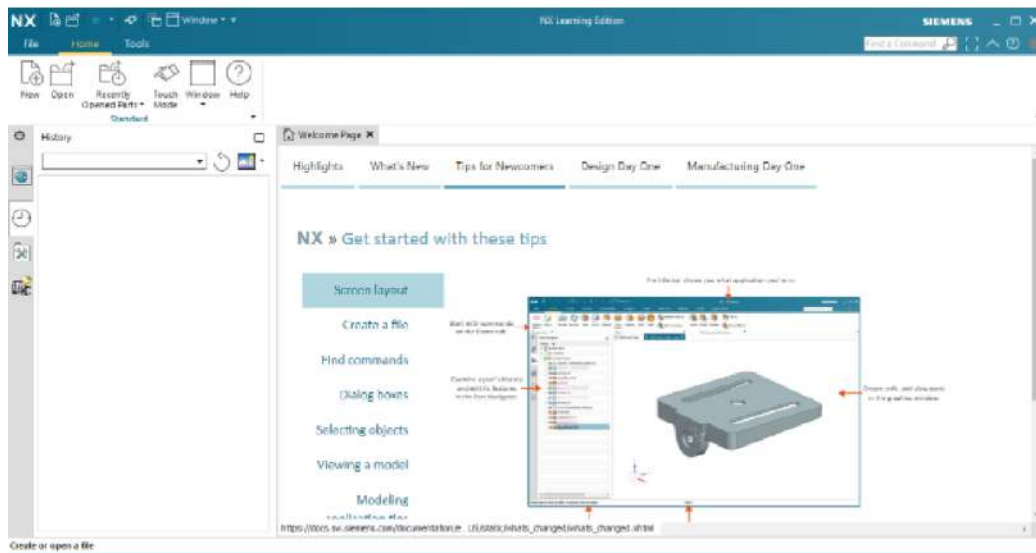


Figura 3. Ventana de inicio del programa *software Siemens NX*.

Herramientas de diseño

Las herramientas CAD de *Siemens NX PLM Software* son una de las herramientas más avanzadas en otros entornos CAD. Las herramientas de diseño 3D de *Siemens NX* proporcionan diseños muy detallados de diferentes piezas y ensamblajes. Por ejemplo, si se observa el comando “Extrusión” de *Siemens NX*, las características de este comando son muy detalladas incluso para un comando básico como extrusión. Si también se echa un vistazo a las otras herramientas de diseño 3D de *Siemens NX*, como “Revolución”, “Función de patrón”, “Agujero”, “Barrido”, etc., también se puede ver la profesión de detalle en estos comandos. El diseño de láminas metálicas, los ensamblajes, las herramientas de diseño de superficies de forma libre, las capacidades de modelado de sólidos paramétricos, el enrutamiento, las tuberías mecánicas y las herramientas de diseño de cableado eléctrico son los principales servicios del *software CAD* de *Siemens NX PLM*.

Herramientas de análisis

El *software Siemens PLM* también proporciona herramientas para llevar a cabo un análisis profesional de elementos finitos de piezas y ensamblajes diseñados. Con estas herramientas se puede realizar un análisis de ingeniería ya sea análisis electromagnético, análisis mecánico, tanto estáticos como dinámicos, análisis térmico y fluido utilizando el método de volúmenes finitos. Las herramientas de análisis de ingeniería del *software Siemens NX* también son muy avanzadas en comparación con otros programas similares.

Herramientas de fabricación

Las herramientas de fabricación del *software Siemens NX* también son muy eficaces. El diseño de moldes, el diseño de producción de láminas de metal y las herramientas CAM de *Siemens NX* son más eficientes en comparación con otras incluidas en *softwares* similares. En especial, las herramientas CAM de *Siemens NX* son una de las herramientas CAM más importantes y utilizadas entre otros *software CAM* en el mundo, ya que en este *software* están muy avanzadas y conseguidas. Así, puede realizar programación NC o CNC a un nivel avanzado.

En concreto, para la digitalización de la máquina se ha usado *Siemens NX* Version 1926 Series (Junio 2020). La elección de esta versión ha venido condicionada por el control de la máquina ya que es la única versión compatible con la digitalización del control (*VNCK*). Este aspecto se detallará más adelante en el Capítulo 6. Uno de los principales problemas que ha acarreado utilizar esta versión ha sido que ésta se encuentra obsoleta y ello ha generado numerosos problemas a la hora de poder instalarla y trabajar con ella. Dentro de este *software* se van a utilizar los siguientes módulos o aplicaciones del mismo: “Modelado” (diseño de la máquina), “Dibujo en plano” (planos de la máquina), “Constructor de máquinas herramienta” (creación del modelo cinemático de la máquina) y “Fabricación” (simulación del mecanizado, postprocesado, depuración y fabricación de la pieza). Otra característica distintiva de este *software* es que la extensión de todos los archivos que genera es “.prt”.

Capítulo 3

Estado de la cuestión

EN este capítulo se pretende hacer un primer estudio sobre el campo de la fábrica digital y su implementación y desarrollo histórico. Así se analiza, desde el punto de vista histórico, cómo ha ido evolucionando la industria desde sus orígenes con la Primera Revolución Industrial hasta la actualidad. Tras esto se pasará a estudiar la fábrica en la actualidad con sus nuevas características y conceptos. Además, se ha añadido una última sección en la que se hace un estudio sobre proyectos de la bibliografía en los que ya se han desarrollado diversas máquinas virtuales.

3.1. Desarrollo y evolución histórica de la industria

La evolución de la tecnología de la información y su introducción en los procesos de producción está transformando la industria tradicional, llevándola a un nuevo nivel de desarrollo de organización. Con el fin de aprovechar los beneficios de estas tecnologías y fortalecer la competitividad en el mercado global, se está discutiendo un cambio de paradigma en la industria a nivel mundial. Industria 4.0 o fábrica digital son algunos de los términos utilizados para describir la implementación de dispositivos “inteligentes” que pueden comunicarse de forma autónoma a lo largo del proceso de fabricación.

En los inicios del siglo XXI, el mundo está presenciando la Cuarta Revolución Industrial y la transformación digital del modelo empresarial (véase Figura 4).

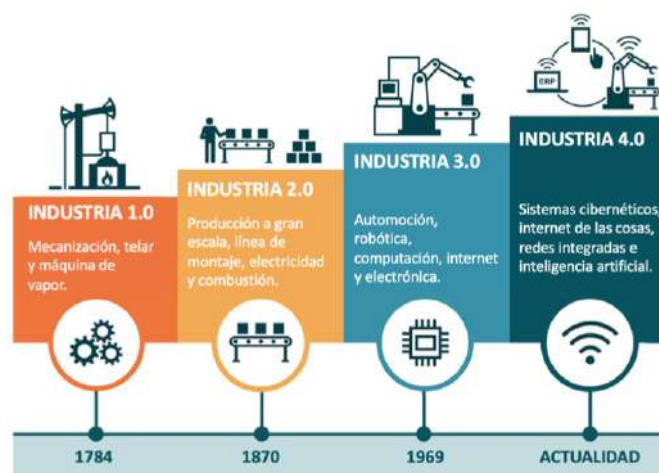


Figura 4. Revoluciones industriales a lo largo de la historia.

Ya desde la primera revolución industrial en el siglo XVIII, el sistema ha enfrentado el desafío de producir más bienes a partir de recursos naturales limitados y en agotamiento para satisfacer la demanda de consumo cada vez mayor, al tiempo que se intentan limitar los impactos ambientales y sociales negativos que éstos producen (véase [CHEN17]). La peculiaridad de esta nueva revolución reside principalmente en dos características: velocidad y alcance. Velocidad, en tanto en cuanto, todas las industrias tradicionales se ven afectadas y desplazadas si no se unen al cambio; y alcance, en cuanto a la cantidad de industrias de todos los sectores se ven afectados por la misma. Los cambios revolucionarios son identificables en distintos sectores, aunque el ritmo de reconocimiento de la Industria 4.0 y la transición de políticas varía de un país a otro (véase [PHIL19]).

3.1.1. El siglo XVIII: Primera Revolución Industrial

Los orígenes de la industria están intrínsecamente relacionados con la aparición del ser humano, desde sus primeros años de existencia, el hombre se ha visto en la obligación de transformar diferentes materias primas para mejorar su calidad de vida. Así, desde el comienzo del uso de los primeros ropajes y las armas que facilitaban el proceso de la caza, se ha realizado un proceso de transformación de los recursos que se puede encontrar en la naturaleza.

A pesar de este lejano origen, se puede afirmar que el concepto de industria en la actualidad se comienza a gestar durante la Primera Revolución Industrial.

Históricamente, la Primera Revolución Industrial comenzó en Inglaterra alrededor de 1750-1760 y duró hasta los años 1820-1840 (véase [DEAN79]). Durante este período, la tecnología de la época, basada en el trabajo humano y animal, se transformó en maquinaria, reduciendo así los costes y tiempos de fabricación y transporte. Es en este periodo cuando se inventan máquinas tan útiles en aquella época como la máquina de vapor, la máquina de hilar, la fundición de coque, la formación de charcos y procesos de laminación para la fabricación de hierro, etc. (véase Figura 5).



Figura 5. Máquina de vapor, [INDU22].

La revolución industrial ayuda a crear un nuevo mundo distinto del hasta entonces conocido, en el que se consigue aumentar la producción y el consumo de la gente común. Es una etapa en la que no sólo se mejora la industria como tal sino que también mejoran todos los sectores relacionados con ella, tales como los sistemas de comunicación (canales, carreteras, vías ferroviarias, etc.), o los sistemas económicos (bancos, sistemas financieros, etc.). La tasa de mortalidad infantil y de lactantes disminuyó y la tasa de fecundidad aumentó, como resultado, el crecimiento de la población cambió drásticamente.

Todos estos cambios afectaron también a su población ya que antes de dicha revolución, la mayoría de la gente vivía en pequeños pueblos, viajaban a pie o en caballos por pequeños

senderos y las enfermedades eran comunes y en su mayoría mortales debido a la alimentación inadecuada, la mala higiene, uso de agua contaminada, e inexistencia de sistema de alcantarillado. Así, tras estos años de cambios en las industrias se produjeron cambios sociales y urbanos que tuvieron como resultado más patente que la población aumentó debido principalmente a la mejora en las condiciones sanitarias y de vida, y a un aumento de la fertilidad y de la esperanza de vida.

Aunque esta primera revolución tuvo éxitos ilimitados, como los ya mencionados anteriormente, también tuvo algunos efectos negativos, como el aumento de trabajadores no calificados, el aumento del trabajo de mujeres y niños en situaciones anti-higiénicas y peligrosas o el aumento de la trata de esclavos y el rápido aumento de la contaminación ambiental (véase [MOAH19]).

A pesar de estos efectos negativos, se puede afirmar sin temor a equivocarnos que la Primera Revolución Industrial marcó el comienzo de una nueva era de invención e innovación y abrió la puerta a las sucesivas revoluciones industriales producidas a lo largo de la historia.

3.1.2. Del siglo XIX al siglo XX: El desarrollo

Un siglo después de la Primera Revolución Industrial, el progreso y la ciencia seguían avanzando hacia nuevos paradigmas haciendo que las fábricas y las industrias avanzaran de nuevo. Todo esto produjo que durante el siglo XIX y el siglo XX se llevaran a cabo dos revoluciones industriales más: la Segunda y Tercera Revolución Industrial.

La Segunda Revolución Industrial, comenzó a mediados del siglo XIX (1850-1970). Fue un período de crecimiento de las industrias preexistentes y expansión de las nuevas; como las relacionadas con los campos del acero, el petróleo y la electricidad. El desarrollo de las nuevas tecnologías llevó a la introducción de dos cosas que cambiarían el mundo: el transporte público y los aviones.



Figura 6. Henry Ford y el motor de combustión, [PARA22].

Así como la Primera Revolución Industrial estuvo impulsada por el carbón, la Segunda giró en torno al descubrimiento de la electricidad, el gas y el petróleo. Aunque la Segunda Revolución Industrial ocurrió solo unos años después de la Primera Revolución Industrial, fue un salto tan grande como su predecesor. La invención del motor de combustión fue de la mano con estas fuentes de combustible. (véase Figura 6). Tanto los productos a base de acero como los químicos ingresaron al mercado durante este tiempo. Los avances en la tecnología de la comunicación comenzaron con el telégrafo y más tarde con el teléfono. El transporte creció a pasos agigantados

con la invención del avión y el automóvil. La producción mecánica creció en velocidad con el advenimiento de la producción en masa.

Desde finales del siglo XIX hasta principios del XX, las ciudades principalmente de Estados Unidos, Reino Unido y Alemania, crecieron, las fábricas se expandieron y la vida de las personas quedó regulada por el reloj en lugar del sol. Los rápidos avances en la creación de acero, productos químicos y electricidad ayudaron a impulsar la producción, incluidos los bienes de consumo y las armas producidos en masa, (véase [HIST22, MOKY98]).

En las primeras décadas del siglo XIX, Faraday empezó a jugar con la idea de la electricidad. Luego, unos años más tarde, Edison y Swan perfeccionaron su diseño de una bombilla que era práctica para uso doméstico. Esto, sumado a la aparición de los primeros generadores eléctricos comerciales eficientes en la década de 1870, hizo posible la electricidad pública. (véase Figura 7) Además, Ford comenzó a desarrollar un nuevo modelo de producción basado en la fabricación en cadena y junto con el nuevo motor de combustión se hizo mucho más fácil moverse en trenes, automóviles y bicicletas. Al mismo tiempo, las ideas y las noticias se difundían a través de los periódicos, la radio y el telégrafo. Con lo cual, en esta nueva revolución, la vida se hizo mucho más rápida.

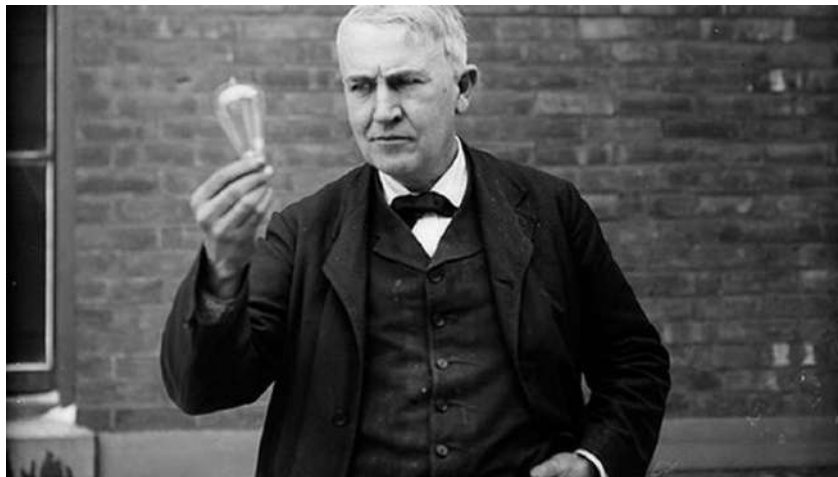


Figura 7. Thomas Edison y la bombilla, [MEDI22].

En la segunda mitad del siglo XX, comienza a surgir una nueva fuente de energía, sin explotar hasta ese momento, la energía nuclear. El desarrollo de esta nueva fuente de energía desata una nueva revolución industrial, la Tercera Revolución Industrial., véase [ROBE15]. Esta nueva revolución trajo consigo el surgimiento de la electrónica, de las telecomunicaciones y, por supuesto, de los ordenadores. Además, se abrieron las puertas a las expediciones espaciales, la investigación y la biotecnología a través de las nuevas tecnologías. Dentro de estas nuevas tecnologías, surgió el Internet, otro de los grandes pilares de esta nueva revolución.

La Revolución Digital o la Tercera Revolución Industrial es el cambio de la tecnología mecánica y electrónica analógica a la electrónica digital que comenzó en la segunda mitad del siglo XX, con la adopción y proliferación de ordenadores digitales y mantenimiento de registros digitales, que continúa hasta el día de hoy.

Consecuentemente, también se produjeron cambios radicales en la sociedad y el modo de vida de las personas provocados por la computación digital y las tecnologías de la comunicación (véase Figura 8). Con esta revolución se dio comienzo a nueva etapa histórica conocida como la Era de la Información.

El centro de esta revolución fue la producción en masa y el uso generalizado de lógica digital, transistores, chips de circuitos integrados y sus tecnologías derivadas, incluidos ordenadores,

microprocesadores, teléfonos móviles digitales e Internet. Estas innovaciones tecnológicas han transformado las técnicas tradicionales de producción y de negocios.



Figura 8. Tercera Revolución Industrial o Revolución Digital, [PROS22].

Las transformaciones que generó la Tercera Revolución Industrial cambió el modo de actuar, de producir y planificar. Esta nueva era marcó un desafío, ya que los límites y fronteras de la misma no están definidos por las dimensiones de espacio y tiempo, sino por la imaginación y el poder de la mente, saliendo de las limitaciones del espacio geográfico y abrazando las dimensiones del ciberespacio.

3.1.3. Siglo XXI: Cuarta Revolución Industrial

En enero de 2016, el fundador y presidente ejecutivo del Foro Económico Mundial, Klaus Schwab, publicó un libro titulado “La Cuarta Revolución Industrial”. Desde entonces, el término “Cuarta Revolución Industrial” (4IR) se ha utilizado para enmarcar y analizar el impacto de las tecnologías emergentes en casi toda la gama del desarrollo humano a principios del siglo XXI, desde la evolución de las normas sociales y las actitudes políticas nacionales hasta el desarrollo económico y relaciones internacionales (véase [PHIL19]).

El concepto de la Cuarta Revolución Industrial afirma que el cambio tecnológico es un motor de transformación relevante para todas las industrias y partes de la sociedad creándose así el otro gran concepto de Industria 4.0. o Fábrica Digital. Además, destaca la idea de que, en ciertas etapas de la historia, surgen conjuntos de tecnologías y se combinan de maneras que tienen impactos que van mucho más allá de los incrementos en la eficiencia, (véase Figura 9). Las revoluciones industriales son revoluciones en los sistemas que nos rodean, cambios escalonados en la compleja interacción entre humanos y tecnología, y transformaciones que dan como resultado nuevas formas de percibir, actuar y ser.

La idea de 4IR a menudo se considera sinónimo de “Industria 4.0”, una iniciativa que surgió en Alemania entre 2011 y 2015, centrada en la aplicación de tecnologías digitales a la fabricación. Estos dos términos están relacionados, pero describen diferentes cosas. La Industria 4.0 es un componente importante dentro del marco más amplio de 4IR con su enfoque más estrecho y vital en la relación entre la digitalización, la transformación organizacional y la mejora de la productividad en los sistemas de fabricación y producción.

Fundamentalmente, 4IR representa una serie de cambios significativos en la forma en que se crea, intercambia y distribuye el valor económico, político y social. Estos cambios de valores

están íntimamente relacionados con la aparición de nuevas tecnologías que abarcan los mundos digital, físico y biológico, y son más poderosas cuando se combinan y refuerzan entre sí.



Figura 9. Cuarta Revolución Industrial, [GRAD22].

El prefijo ordinal “cuarto” es importante porque esta revolución tiene como objetivo impulsar el diálogo estratégico más allá de la revolución digital, que ha sido descrita por otros como una transición de una era industrial a una era de la información, o identificada más claramente como la Tercera Revolución Industrial basada en tecnologías digitales de la información, como ya se ha mencionado.

La Cuarta Revolución Industrial se basa en el rápido intercambio de información hecho posible por los cimientos centrados en los datos de las tecnologías digitales de la Tercera Revolución Industrial, que a su vez se basaron en los sistemas de electricidad y telecomunicaciones en el corazón de la Segunda Revolución industrial. Por tanto, la superposición de dependencias es importante porque muestra que la 4IR es la más adecuada para examinar tecnologías y sistemas que dan por sentado el mundo digital.

Hoy en día, la combinación de potentes algoritmos de aprendizaje automático, sensores de bajo costo y actuadores avanzados permiten que las tecnologías se integren sin problemas en el entorno físico. Además, cuando se combinan con imágenes avanzadas, procesamiento de señales y enfoques de edición de genes, tienen el potencial de influir en la condición fisiológica y facultades cognitivas. Las tecnologías digitales son parte del tejido de la vida diaria y, dado que dan lugar a una nueva capa de tecnologías físicas y biológicas, es fundamental considerar las formas en que las nuevas tecnologías que emergen sobre ellas están ampliando las capacidades más allá de la funcionalidad inmediata de poder transmitir, almacenar y procesar cantidades de datos exponencialmente mayores.

Los resultados de la investigación, el desarrollo y la comercialización en curso, y la adopción de tecnologías emergentes son relevantes mucho más allá de los productos que facilitan la vida, reflejan un conjunto fundamental de cambios en la identidad humana y una reestructuración de las formas en que experimentar el mundo.

3.2. La fábrica digital

Todas las herramientas asistidas por ordenador necesarias para la planificación de nuevos productos y plantas de producción, así como para el funcionamiento de las fábricas, están conectadas en red a través de una base de datos central. Las nuevas estructuras en el desarrollo

de productos y los procesos de fabricación garantizan que se satisfaga el requisito de ingeniería simultánea. Así, toda la fábrica se simula en el ordenador como un modelo de realidad virtual (modelo VR) continuo y consistente, que luego se puede aplicar, sin interrupción, desde la idea del producto hasta el desmantelamiento final de las plantas de producción y los edificios. Este nuevo sistema de fabricación es lo que se conoce como fábrica digital o Industria 4.0 (véase [XUXU18]). En ella, un sistema automático de gestión de datos garantiza que los cambios den lugar a la actualización de los datos en todos los departamentos de la empresa afectados después. El acceso a toda la información necesaria es posible de forma permanente y los datos se pueden intercambiar entre sistemas sin conversión alguna, ya que la estructura abierta de las herramientas de *software* permite el acoplamiento de nuevos módulos específicos de la empresa y nuevas herramientas. Los sistemas de realidad virtual eficientes permiten una visualización de alto nivel de todas las situaciones en cualquier momento; por lo tanto, se hace posible la cooperación interdisciplinaria entre varios expertos.

Durante las fases de desarrollo, la fábrica digital funciona virtualmente de la misma manera que la fábrica real debería funcionar después de la implementación. Además, está permanentemente acoplada con el proceso de producción real después de la realización de los planes y, por lo tanto, se puede utilizar para monitorear, controlar y mejorar constantemente este proceso (véase [BRAC05]).

No se puede hablar de fábrica digital sin introducir conceptos propios de esta nueva revolución tales como *Big Data*, *Internet of Things*, et. A continuación, se van a explicar los principales conceptos de este nuevo mundo digital que de una manera directa intervienen en la creación de una Industria 4.0, (véase Figura 10).

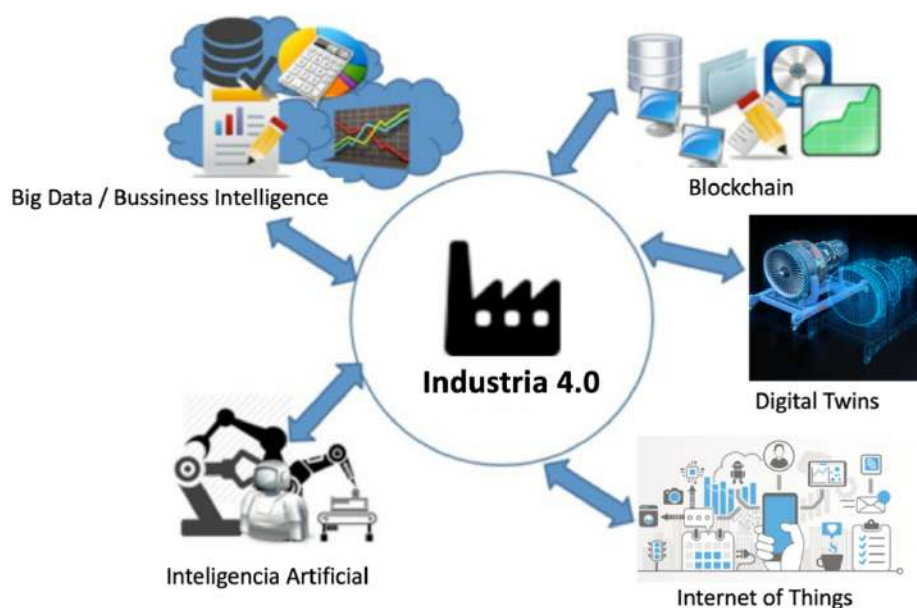


Figura 10. Pilares de la Industria 4.0 o fábrica digital.

3.2.1. *Big Data*

Aunque el término *Big Data* se ha vuelto popular, no existe un consenso general sobre lo que realmente significa. A menudo, muchos analistas de datos profesionales incluyen el proceso de extracción, transformación y carga para grandes conjuntos de datos dentro de la definición de *Big Data*.

Históricamente, el término *Big Data* ha sido un concepto bastante vago y mal definido. No es un término preciso y no tiene un significado particular que no sea la noción de su tamaño. La palabra “grande” es demasiado genérica; la pregunta de cuán grande es “grande” y cuán pequeño es pequeño es relativa al tiempo, al espacio y a las circunstancias. Desde una perspectiva evolutiva, el tamaño de *Big Data* siempre está evolucionando.

Por lo tanto, en la bibliografía, hay muchas formas de definir qué es *Big Data*, y probablemente por eso sigue siendo un concepto realmente difícil de entender. Hoy en día, alguien describe los grandes datos como un conjunto de datos por encima de un cierto umbral, por ejemplo, más de un terabyte, (véase [DRIS10]), otros como datos que bloquean las herramientas analíticas convencionales como Microsoft Excel. Sin embargo, trabajos más renombrados identificaron *Big Data* como datos que muestran características de Variedad, Velocidad y Volumen (3V), (véase [LANE01, MCAF12, MARR15]). Aunque todas son parcialmente ciertas, hay una definición que parece capturar mejor este fenómeno (véase [DUMB13, CORE16]): “el análisis de *Big Data* es un enfoque innovador que consiste en diferentes tecnologías y procesos para extraer valiosos conocimientos a partir de datos de bajo valor que no se ajustan, por ningún motivo, a los sistemas de bases de datos convencionales”. Siguiendo con esta última definición, se puede destacar tres claves principales para explotar bien el potencial del *Big Data*: elegir los datos correctos, centrarse en el mayor impulsor del rendimiento para optimizar el negocio y transformar las capacidades de la empresa.

Por lo tanto, se ha llegado a un modelo de industria y de empresa en el que los datos se están convirtiendo rápidamente en una nueva forma de capital, una moneda diferente y una fuente innovadora de valor que proporciona claves importantes a la hora de elegir un diseño de un producto, un modelo de fabricación o negocio, etc.

Un aspecto fundamental del *Big Data* es canalizar el poder de los grandes datos en una estrategia efectiva para administrar y hacer crecer la industria. Sin embargo, es difícil lograr un consenso sobre cómo y qué implementar y lo que se propone entonces es solo un enfoque posible del problema.

Siguiendo las pautas dadas por Doornik y Hendry (véase [DOOR15]), se encuentra una manera útil y eficiente de enfocar el problema de los datos. De hecho, reduce el tiempo, el esfuerzo y los costos asociados con la recopilación de datos, el análisis y las mejoras tecnológicas. La relevancia del marco radica en evitar las situaciones extremas opuestas, es decir, recopilar todos los datos o ninguno.

Superponiendo todas estas definiciones y características principales se puede empezar a intuir qué es esta nueva ciencia basada en datos. Teniendo en cuenta que hoy en día, debido al rápido desarrollo de Internet, se produce y se recopila diariamente una cantidad tan grande de información que su procesamiento y análisis está más allá de las capacidades de las herramientas tradicionales. Resulta totalmente necesario aplicar *Big Data* para realizar un buen análisis y procesar la información. Por tanto, no se puede hablar de un nuevo concepto de industria y, por consecuencia, de la fábrica digital sin incluir en ella este procesamiento de datos.

La tecnología discutida permite el análisis y la separación de lo importante de lo menos importante, lo que ayuda a sacar conclusiones y respalda la transferencia efectiva de conocimiento para llevar a cabo los nuevos objetivos industriales. Aunque en un principio se definía como una ciencia tridimensional (3V: Variedad, Velocidad y Volumen) ya se le está dando una nueva dimensión y se habla por tanto, de cuatro grandes características (4V, véase Figure 11):

- Volumen: se refiere a conjuntos de datos cuyo tamaño excede la capacidad de las herramientas ordinarias para la recopilación, el almacenamiento, la gestión y el análisis. Está relacionado con las capacidades tecnológicas para gestionar estos datos.

- Variedad: esta característica hace referencia a la variedad de fuentes, para obtener los datos. Éstas pueden ser sistemas transaccionales, sitios de redes sociales o Internet. Estos datos cambian dinámicamente y están muy desestructurados, lo que significa que no se adaptan a las formas tradicionales de análisis (incluyen, por ejemplo, imágenes, vídeos y contenido de sitios de redes sociales, etc.).
- Velocidad: el análisis de datos se lleva a cabo en *Big Data* casi en tiempo real, ya que las conclusiones correctas de los datos que fluyen y cambian constantemente deben implementarse de manera continua.
- Veracidad: el objetivo general es aislar toda la masa de información a lo que es más importante para nosotros; por eso es tan importante que los resultados reflejen las condiciones reales y conduzcan a las actividades más favorables.



Figura 11. 4V *Big Data* [TTHE22].

Big Data permite analizar los datos a un nivel más avanzado de lo que permitían las herramientas tradicionales. Con esta tecnología, incluso los datos recopilados en varios sistemas, bases de datos y sitios web mutuamente incompatibles se procesan y combinan para brindar una imagen clara de la situación en la que se encuentra una industria o empresa. Entre las fuentes del sistema de suministro se encuentra información de minoristas, transporte, facturas y más. Los datos de perfiles de clientes, perfiles de redes sociales, pedidos, pronósticos de mercado y esquemas geográficos también juegan un papel. Usando los datos de los clientes para analizar la información del sistema, las nuevas fábricas pueden cumplir con las expectativas de los clientes al anticipar su comportamiento y demanda. Se supone, por tanto, que las fábricas digitales tendrán en gran medida la capacidad de autoplanificarse y autoadaptarse. La existencia de un modelo de producto digital completo, junto con los métodos de su fabricación, modelo, fábrica inteligente con su representación real en sistemas ciberfísicos en red son condiciones clave para el éxito de la Cuarta Revolución Industrial.

3.2.2. *Blockchain*

El término *Blockchain* o cadena de bloques tiene su origen en el sector financiero de la mano de la criptomoneda *Bitcoin*. En este ámbito, se utiliza para codificar y guardar la información de documentos digitales de varios nodos de la red en una cadena de bloques de datos en los que las transacciones están vinculadas entre sí. *Blockchain* irrumpió en escena como la tecnología *Bitcoin* hace solo diez años. Fue el resultado de un *software* innovador, seguido de innovaciones de *hardware* a medida que se optimizaba la costosa computación de la confirmación de transacciones mineras, (véase [RIGH20]).

En el inicio de Internet se pensó muy poco en la seguridad de la red, por lo que desde entonces se ha trabajado mucho para ponerse al día en materia de seguridad. Además, a medida que más funciones de la sociedad se transfieren a Internet, su falta de seguridad se ha convertido en un problema social importante.

En este contexto de falta de seguridad y de un aumento de las transacciones por Internet, surgió la tecnología *blockchain*. La arquitectura original de Internet era *P2P* (*peer-to-peer*). Esto simplemente significa que cualquier nodo de Internet podría proporcionar servicios a otros nodos y/o pedirles que proporcionen servicios. Por ejemplo, el protocolo de transferencia de archivos era/es bidireccional: cualquier nodo puede enviar y/o recibir archivos. A medida que Internet maduró en las décadas de 1990 y 2000, surgieron servicios importantes que eran unidireccionales, por ejemplo, búsquedas en *Google*, compras en *Amazon* y amigos en *Facebook*. Estos servicios fueron proporcionados por nodos que se denominaron servidores, y los nodos que utilizaban esos servicios se denominaron clientes.

El modelo cliente-servidor está sujeto a varias brechas de seguridad, por ejemplo, los ataques de denegación de servicio distribuidos inundan un servidor con tantas solicitudes de servicio que se cierra. Además, la mayoría de los servidores requieren nombres de usuario y contraseñas de los clientes (y quizás números de tarjetas de crédito). Entonces, muchos usuarios tienen cientos de nombres de usuario y contraseñas, que se supone que debo recordar y nunca escribir. Y las brechas de seguridad de los servidores son innumerables, lo que les otorga a los estafadores millones de nombres de usuario, contraseñas y números de tarjetas de crédito (véase [HIRS19]). Dichos ataques son cada vez más importantes a medida que la banca en línea y otras transacciones importantes se realizan en línea.



Figura 12. Imagen digital de una cadena de bloques o *Blockchain*, [CAIX22].

La tecnología *Blockchain* es simplemente un libro mayor distribuido en una red *P2P* cuyas transacciones no se pueden borrar ni modificar (véase Figura 12). A medida que ocurren y se verifican nuevas transacciones, se copian en todas las copias del libro mayor. Además, este libro mayor compartido tiene varias características de seguridad. Primero, se copia en los ordenadores

de todas las empresas participantes, lo que hace que la pérdida de datos sea extremadamente improbable. En segundo lugar, una vez que se ha “acordado” una transacción, no se puede cambiar ni eliminar. Esto proporciona un nuevo nivel de “confianza tecnológica” que tradicionalmente había sido proporcionado por terceros. Por otra parte, en esta nueva tecnología se pueden realizar “contratos inteligentes” que automatizan varias funciones de seguimiento una vez que se ha completado una transacción (por ejemplo, pago automático una vez que se ha recibido un envío). Por lo tanto, se necesitarán menos pasos manuales que van mucho más allá de la gestión de transacciones, (véase [STRA19]).

Quizás aún más importante es que estos casos de uso suelen tardar una cantidad significativa de tiempo en completarse. El uso de *blockchain* puede reducir días y semanas a horas y minutos, y dado que el tiempo es dinero, el uso de esta tecnología puede ahorrar el doble de costos. Por supuesto, además de aumentar la eficiencia, también se podría mejorar la eficacia. La cadena de bloques puede reducir las fricciones de la red empresarial (información, interacción e innovación) de varias maneras. Los registros de acciones, las transacciones *P2P* y los contratos inteligentes se encuentran en el centro de esta innovación comercial.

A medida que ocurre cada transacción, se registra como un bloque de datos. Esas transacciones muestran el movimiento de un activo que puede ser tangible (un producto) o intangible (intelectual). El bloque de datos puede registrar la información de su elección: quién, qué, cuándo, dónde, cuánto e incluso la condición. Estos bloques forman una cadena de datos a medida que un activo se mueve de un lugar a otro o la propiedad cambia de manos. Los bloques confirman la hora exacta y la secuencia de transacciones, y los bloques se vinculan de forma segura para evitar que se altere cualquier bloque o que se inserte un bloque entre dos bloques existentes. Las transacciones se bloquean juntas en una cadena irreversible: una cadena de bloques. Cada bloque adicional fortalece la verificación del bloque anterior y, por lo tanto, de toda la cadena de bloques. Esto hace que la cadena de bloques sea a prueba de manipulaciones, brindando la fuerza clave de la inmutabilidad y elimina la posibilidad de manipulación por parte de un actor malicioso y crea un libro de transacciones en el que todos los miembros de la red pueden confiar, (véase Figura 13, en la que se ilustra el funcionamiento con un ejemplo concreto).

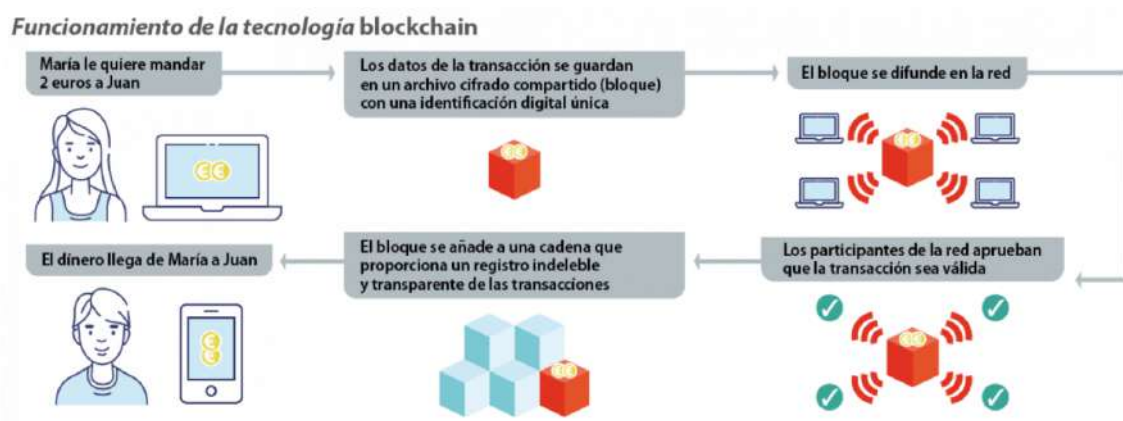


Figura 13. Ejemplo de una transacción con *Blockchain*, [CAIX22].

En un informe reciente de *blockchain* (véase [IBM22]) basado en 2965 conversaciones con ejecutivos de *C-suite*. *IBM* informó que más de un tercio de las organizaciones de todas las industrias y regiones ya están considerando o participan activamente en *blockchain*, y el 66 % de los primeros usuarios tienen la intención de adoptar un nuevo modelo de negocio de plataforma que rompa los límites de los intercambios de mercado tradicionales.

3.2.3. *Business Intelligence*

“La respuesta a mi problema está oculta en mis datos... ¡pero no puedo desenterrarla!” Esta declaración popular ha existido durante años cuando los gerentes de negocios recopilaban y almacenaban cantidades masivas de datos con la creencia de que contenían información valiosa. Pero, finalmente descubrieron que los datos sin procesar rara vez son de algún beneficio y que su valor real depende de la capacidad de una organización para analizarlos. Por lo tanto, surgió la necesidad de sistemas de *software* capaces de recuperar, resumir e interpretar datos para los usuarios finales, estos fueron llamados *business intelligence*.

Esta necesidad impulsó el surgimiento de cientos de empresas de inteligencia empresarial que se especializaron en proporcionar sistemas de *software* y servicios para extraer conocimiento de datos sin procesar. Estos sistemas de *software* analizaran los datos operativos de una empresa y proporcionarían conocimiento en forma de tablas, gráficos, tartas, diagramas y otras estadísticas. En consecuencia, el objetivo general de la mayoría de los sistemas de inteligencia comercial es: (1) acceder a datos de una variedad de fuentes diferentes; (2) transformar estos datos en información y luego en conocimiento; y (3) proporcionar una interfaz gráfica fácil de usar para mostrar este conocimiento. En otras palabras, un sistema de inteligencia empresarial o *business intelligence* se encarga de recopilar y digerir los datos y presentar el conocimiento de una manera amigable, mejorando así la capacidad del usuario final para tomar buenas decisiones.

La inteligencia empresarial o *business intelligence* puede definirse como un conjunto de modelos matemáticos y metodologías de análisis que explotan los datos disponibles para generar información y conocimiento útil para procesos complejos de toma de decisiones. En cualquier empresa las decisiones se toman de manera continua. Tales decisiones pueden ser más o menos críticas, tener efectos a largo o corto plazo e involucrar a personas y roles en varios niveles jerárquicos. La capacidad de los trabajadores (*knowledge workers*) para tomar decisiones, tanto como individuos como como comunidad, es uno de los principales factores que influyen en el desempeño y la fuerza competitiva de una organización determinada.

Un sistema de *business intelligence* proporciona información y conocimiento extraído de los datos, mediante la aplicación de modelos matemáticos y algoritmos, (véase [MICH06]). En algunos casos, esta actividad puede reducirse a cálculos de totales y porcentajes, representados gráficamente por histogramas simples, mientras que los análisis más elaborados requieren el desarrollo de modelos avanzados de optimización y aprendizaje.

En términos generales, la adopción de un sistema de *business intelligence* tiende a promover un enfoque científico y racional de la gestión de empresas y organizaciones complejas. El enfoque racional propio de un análisis de *business intelligence* se puede resumir esquemáticamente en las siguientes características principales:

- Primero, se identifican los objetivos del análisis y se definen los indicadores de desempeño que se utilizarán para evaluar las opciones alternativas.
- Luego se desarrollan modelos matemáticos explotando las relaciones entre las variables de control del sistema, los parámetros y las métricas de evaluación.
- Finalmente, se realiza un análisis what-if para evaluar los efectos sobre el desempeño determinados por variaciones en las variables de control y cambios en los parámetros.

Aunque su objetivo principal es mejorar la eficacia del proceso de toma de decisiones, la adopción de modelos matemáticos también ofrece otras ventajas, que pueden apreciarse especialmente a largo plazo. Primero, el desarrollo de un modelo abstracto fuerza a los tomadores de decisiones a enfocarse en las características principales del dominio analizado, induciendo así una comprensión más profunda del fenómeno bajo investigación. Además, el conocimiento sobre

el dominio adquirido al construir un modelo matemático puede transferirse más fácilmente a largo plazo a otros individuos dentro de la misma organización, lo que permite una preservación más precisa del conocimiento en comparación con los procesos empíricos de toma de decisiones. Finalmente, un modelo matemático desarrollado para una tarea específica de toma de decisiones es tan general y flexible que en la mayoría de los casos se puede aplicar a otras situaciones subsiguientes para resolver problemas de tipo similar.

La estructura de un sistema de inteligencia empresarial o *business intelligence* incluye tres componentes principales: fuente de datos, procesamiento de datos y extracción de conocimientos (véase Figura 14).

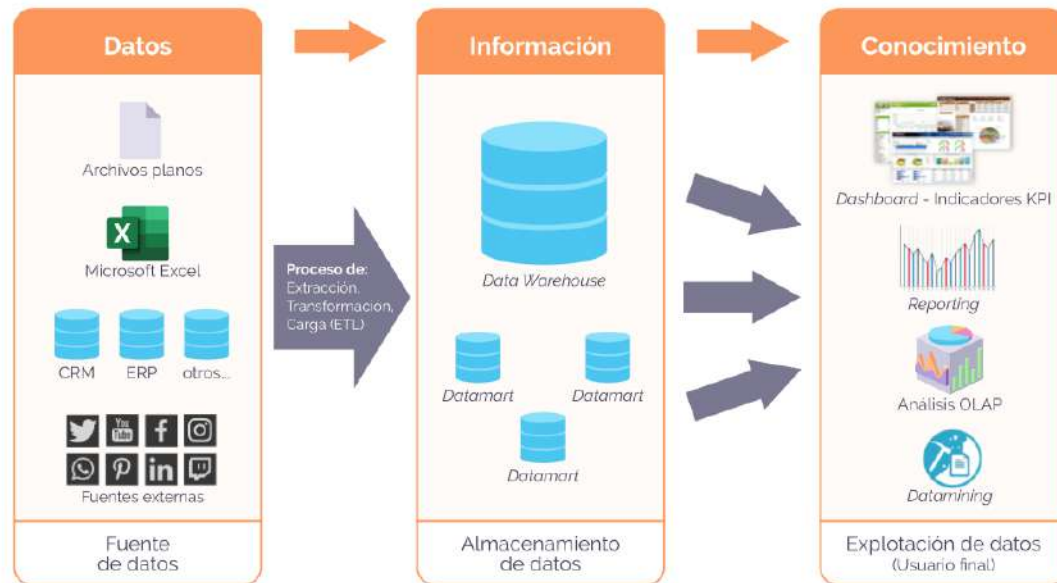


Figura 14. Estructura de un sistema *business intelligence*, [FAED22].

Fuentes de datos

En una primera etapa, es necesario recopilar e integrar los datos almacenados en las distintas fuentes primarias y secundarias, que son de origen y tipo heterogéneos. Las fuentes consisten en su mayor parte en datos pertenecientes a sistemas operativos, pero también pueden incluir documentos no estructurados, como correos electrónicos y datos recibidos de proveedores externos. En términos generales, se requiere un gran esfuerzo para unificar e integrar las diferentes fuentes de datos.

Data warehouses y data marts

Utilizando herramientas de extracción y transformación conocidas como *extract, transform, load* (ETL), los datos provenientes de las diferentes fuentes se almacenan en bases de datos destinadas a soportar análisis de inteligencia empresarial. Estas bases de datos generalmente se denominan almacenes de datos y mercados de datos.

Conocimiento y toma de decisiones

Finalmente, se procede a la elección y la adopción real de una decisión específica, y de alguna manera representa la conclusión natural del proceso de toma de decisiones. Incluso cuando las metodologías de inteligencia empresarial están disponibles y adoptadas con éxito, la elección de una decisión pertenece a los tomadores de decisiones, quienes también pueden aprovechar la información informal y no estructurada disponible para adaptar y modificar las recomendaciones y las conclusiones alcanzadas mediante el uso de modelos matemáticos. A medida que se avanza, los sistemas de inteligencia empresarial ofrecen herramientas de soporte cada vez más avanzadas

y de tipo activo. Incluso los roles y las competencias cambian. En un principio, las competencias requeridas son proporcionadas en su mayor parte por los especialistas en sistemas de información dentro de la organización, generalmente denominados administradores de bases de datos. Los analistas y expertos en modelos matemáticos y estadísticos son los responsables de las fases intermedias. Finalmente, las actividades de los tomadores de decisiones responsables del dominio de la aplicación aparecen como dominantes.

3.2.4. *Digital Twins*

La transformación digital otorga a los dispositivos analógicos y al trabajo manual una huella digital. Abarcando desde la cadena de suministro a través del proceso de fabricación hasta los productos finales, esta huella digital ofrece una amplia gama de iniciativas hacia una industria más competitiva, flexible y sostenible. Sin embargo, esta transformación hacia la fabricación integrada por ordenador sólo se ve coronada por el éxito cuando la simbiosis entre los dispositivos de *hardware*, los algoritmos de *software* y los seres humanos se intensifica en gran medida. Un paso esencial aquí es una representación virtual o digital del activo físico, el llamado gemelo digital o *Digital Twin* (DT), (véase [KRIT18]).

En términos de fabricación, el gemelo digital consiste en una representación virtual de un sistema de producción, que está sincronizado con todas las fuentes de datos relevantes para el proceso del sistema real y es capaz de ejecutar simulaciones, predicciones, optimizaciones y otras acciones basadas en diferentes modelos matemáticos y algoritmos, (véase Figura 15). Esta integración y sincronización con el sistema real y su aplicación específica convierte los objetos digitales (un modelo de proceso con flujo de datos manual) en un gemelo digital, (véase [KRIT18]). A medida que los objetos digitales evolucionan cada vez más hacia gemelos digitales completamente integrados, (véase [LIM19, NEGR17]), la digitalización tiene un impacto sustancial y el potencial de transformar aún más la fabricación.



Figura 15. Imagen gráfica de un gemelo digital de una máquina, [JOBW22].

Las aplicaciones de los gemelos digitales en el campo de la fabricación pueden ser beneficiosas a lo largo de toda la cadena de desarrollo del proceso. Durante el desarrollo temprano del proceso, se pueden usar modelos mecanicistas simples, (véase [DAUM20]), para la evaluación de datos y para planificar los primeros diseños experimentales, incluido el proceso crítico potencial. parámetros. Luego, se puede agregar nuevo conocimiento del proceso al modelo básico mediante términos basados en datos o, si es posible, mecanicistas. Después de probar e incluir todos los parámetros potencialmente influyentes en el modelo, éste puede verse como un gemelo digital y usarse para diseño experimental, optimización de procesos y, posteriormente, para monitoreo de procesos y control en el proceso en ejecución.

Gracias al uso del gemelo digital a lo largo de la cadena de desarrollo del proceso, los tiempos y costos de fabricación pueden reducirse reemplazando los enfoques de prueba y error por experimentos optimizados “in silico” específicos. La identificación del espacio de diseño puede contribuir a una comprensión más completa de las restricciones en los sistemas de procesos complejos. Las aplicaciones de supervisión y control permiten prácticas de producción ágiles, así como una mejor reproducibilidad y confiabilidad del proceso mediante una respuesta eficiente a las desviaciones del mismo; especialmente para las industrias que se enfrentan a una presión competitiva cada vez mayor.

En la era de la Industria 4.0, los gemelos digitales se presentan habitualmente como el corazón de la fábrica digital y los conceptos centrales de las estrategias de transformación digital. Sin embargo, a pesar de que lo que hoy en día se entiende como *digital twins* se describió por primera vez hace menos de dos décadas, (véase [GRIE19]). En las misiones *Apolo*, que datan de principios de la década de 1960, los ingenieros de la NASA enfrentaron desafíos sin precedentes y tuvieron que idear soluciones para diagnosticar y controlar de forma remota la nave espacial, muchas partes de las cuales son inaccesibles para los astronautas. Además, se tuvieron que construir simuladores precisos que pudieran alimentarse con datos reales para ejecutar escenarios hipotéticos. Estos simuladores jugaron un papel fundamental durante el famoso accidente del Apolo 13 y ayudaron decisivamente a la sala de mando en la gestión de misiones en tiempo real y en la resolución de crisis, (véase [ROSE15]).

Construir un gemelo digital equivale a desarrollar el activo virtual y establecer la conectividad entre el activo virtual y el físico. El desarrollo de un *digital twin* requiere la integración global de equipos ampliamente multidisciplinarios que construyen los diferentes componentes. El proceso general de desarrollo comprende nueve principales pasos, no del todo secuenciales:

1. Definir las necesidades y funcionalidades a través de talleres multidisciplinarios.
2. Desarrollar la tecnología analítica del proceso.
3. Diseñar, implementar y validar la Infraestructura del gemelo digital.
4. Desarrollar, entrenar y validar los modelos matemáticos.
5. Garantizar el procesamiento de datos en tiempo real y la integridad de los mismos.
6. Construir la automatización y modelar el control predictivo.
7. Diseñar la interfaz de usuario.
8. Documentar los esfuerzos.
9. Integrar la solución en una estrategia empresarial digital y de datos más amplia.

Obsérvese que los primeros ocho pasos de la lista confirman son inherentemente multidisciplinarios y requieren colaboración y cooperación entre equipos de experiencia y conocimientos muy diferentes. Además, promover y lograr un compromiso activo entre los diferentes actores al principio de la trayectoria de desarrollo de un gemelo digital es fundamental para el éxito.

Es importante recalcar que son los modelos matemáticos los que constituyen el corazón de los gemelos digitales porque su capacidad operativa proporcionará la capacidad predictiva de los modelos empleados. Por esta razón, maximizar la capacidad predictiva del gemelo digital requiere una elección juiciosa y una combinación de metodologías de modelado. Sorprendentemente, esta elección no la pueden hacer los modeladores solos porque las entradas de los modelos serán alimentadas por los instrumentos experimentales disponibles y, por lo tanto, la entrada del equipo de desarrollo de procesos más familiarizado con el sistema y la instrumentación disponible es

crucial. En consecuencia, la elección de metodologías de modelado apropiadas debe hacerse caso por caso y podría comprender modelos mecanicistas, modelos empíricos, modelos híbridos, aprendizaje automático, inteligencia artificial o cualquier combinación de los mismos.

El último paso de la lista anterior debe ser particularmente enfatizado. Integrar todos los componentes de gemelo digital en un producto final es un proceso engorroso que debe diseñarse a priori y revisarse y revisarse regularmente durante la duración del desarrollo del proyecto y potencialmente extenderse al ciclo de vida de gemelo digital. Si no se hace, probablemente se tendrá como resultado una fase final en la que se habrán construido todos los componentes, pero no se podrán integrar a menos que se sometan a modificaciones sustanciales.

Por último, es importante destacar que un gemelo digital se puede aplicar tanto a un producto o máquina que se desee como a la propia industria o fábrica digital.

3.2.5. Inteligencia Artificial

La Inteligencia Artificial comenzó en serio con la aparición del ordenador moderna durante las décadas de 1940 y 1950. Fue la capacidad de estas nuevas máquinas electrónicas para almacenar grandes cantidades de información y procesarla a velocidades muy altas lo que les dio a los investigadores la visión de construir sistemas que pudieran emular algunas habilidades humanas.

Un objetivo amplio de la Inteligencia Artificial es meterse debajo de la superficie del comportamiento humano; descubrir los procesos, sistemas y principios que hacen posible el comportamiento inteligente, (véase [PATE21]). Se necesitan ordenadores como herramientas para modelar estos estados y procesos mentales.

Los ordenadores han superado a las personas en muchas tareas, como cálculos numéricos, almacenamiento de información y operaciones repetitivas, que son mecánicas y poco inteligentes. Es decir, se ha conseguido que los ordenadores sean esencialmente máquinas para obedecer reglas con rapidez y precisión. Pero aún hay multitud de tareas “inteligentes” que no se han logrado conseguir del todo sólo con ordenadores sino que sigue haciendo falta la inteligencia humana, como por ejemplo: el reconocimiento de patrones, el movimiento en un espacio lleno de obstáculos dinámicos la demostración de teoremas matemáticos, el razonamiento, la predicción, etc.

Si se estudia a fondo la inteligencia humana, se pueden establecer las siguientes características como esenciales para tener inteligencia:

- Responder a situaciones con mucha flexibilidad.
- Dar sentido a mensajes ambiguos o erróneos.
- Dar importancia relativa a los elementos de una situación.
- Aprender de los ejemplos, de lo que se dice, del pasado experiencias, a través del razonamiento y de los hechos.

Los diccionarios definen la inteligencia como la capacidad de adquirir, comprender y aplicar conocimientos, o la capacidad de ejercitar el pensamiento y la razón. Por supuesto, la inteligencia es más que esto, ya que incorpora todos los conocimientos y logros, tanto conscientes como inconscientes, que se ha adquirido a través del estudio y de la experiencia: percepción visual y auditiva altamente refinada; pensamiento; imaginación; la capacidad de conversar, leer, escribir, conducir un automóvil, escribir programas, memorizar y recordar hechos, expresar y sentir emociones; participar en el sentido común razonamiento y mucho más. La inteligencia, por tanto, es la suma integrada de esas hazañas que nos da la capacidad de recordar una cara que no se ve

desde hace muchos años o más, o de construir y enviar cohetes a la Luna. Son esas capacidades las que distinguen a los humanos de otras formas de seres vivos. El alimento de esta inteligencia es el conocimiento.

Los seres humanos funcionan por intuición de una manera que los psicólogos aún no comprenden del todo. Se descubre que si se pide que memorizar conscientemente más que un pequeño número de elementos o reglas, no se puede hacer. Pero, por el contrario, el ser humano es capaz de resolver problemas que no se pueden dividir en reglas simples y traer a la mente todo tipo de información de la experiencia de la vida que pueda ser de ayuda.



Figura 16. Robot inteligente jugando una partida de ajedrez contra una persona, [SEMA22].

En el campo de la Inteligencia Artificial, hay dos grandes obstáculos que superar. El primero de ellos está relacionado con el conocimiento y su integración dentro de la Inteligencia Artificial. El salto que se debe dar para que un ordenador conozca e integre la información no es fácil ya que hay que buscar formas de tomar el conocimiento informal y expresarlo en los términos formales requeridos por la notación lógica. En segundo lugar, hay una gran diferencia entre ser capaz de resolver un problema “teóricamente” y hacerlo en la práctica. Incluso los problemas con solo unas pocas docenas de hechos pueden agotar los recursos computacionales de cualquier ordenador a menos que tenga alguna guía sobre qué pasos de razonamiento probar primero. Ya se han desarrollado sistemas para realizar muchos tipos de tareas inteligentes, como sistemas que pueden aprender de ejemplos, de ser contados, de experiencias pasadas relacionadas y, a través del razonamiento, resolver problemas matemáticos complejos, programar muchas tareas diversas, encontrar configuraciones óptimas del sistema, en la planificación de estrategias complejas para el ejército y los negocios, en el diagnóstico de enfermedades médicas, “entiende” gran parte de los lenguajes naturales, ve lo suficientemente bien como para “reconocer” objetos de fotografías, cámaras de video y otros sensores, razona con hechos incompletos e inciertos, generar código de computadora automáticamente, buscando y emparejando, sistemas de instrucción inteligente que ayudan a acelerar el aprendizaje de un estudiante y monitorear el progreso del estudiante, editores “inteligentes” que ayudan a los usuarios a construir bases de conocimientos especiales y sistemas que pueden aprender para mejorar su desempeño. Pero todavía no se han podido producir sistemas autónomos y coordinados que posean algunas de las habilidades básicas de un niño de 3 años. Estos incluyen la capacidad de reconocer y recordar numerosos objetos diversos en una escena, aprender nuevos sonidos y asociarlos con objetos y conceptos, y adaptarse rápidamente a muchas situaciones nuevas y diversas.

La Inteligencia Artificial no es el estudio y la creación de sistemas informáticos convencionales. Aunque se puede argumentar que todos los programas exhiben algún grado de inteligencia,

un programa de Inteligencia Artificial va más allá y demuestra un alto nivel de inteligencia en un grado que iguala o supera la inteligencia requerida de un ser humano para realizar alguna tarea. Así, la Inteligencia Artificial busca una mejor comprensión de la inteligencia y los procesos de detección del ser humano. Y su principal objetivo es desarrollar sistemas de trabajo que sean verdaderamente capaces de realizar tareas que requieren altos niveles de inteligencia, (véase [PATE21]). Este trabajo sólo puede realizarse con éxito si se combina con otras disciplinas que implican un estudio de la mente humana.

A medida que la Inteligencia Artificial ha ido avanzando y desarrollándose, se ha ido pidiendo cada vez más inteligencia a dichos ordenadores. Así, se ha pasado de estar satisfechos con sólo un ordenador jugando un juego de ajedrez a pedir que un robot se siente frente al como oponente, visualice el tablero real y haga los movimientos correctos en el mundo físico, (véase Figura 16). Se debe apreciar el hecho de que comprender el concepto de Inteligencia Artificial también nos ayuda a comprender cómo funciona la inteligencia natural.

3.2.6. *Internet of Things*

Con el término Internet de las cosas (IoT) se refiere a las tecnologías innovadoras que comunican el mundo a través de dispositivos u objetos dinámicos e inteligentes con el fin de recopilar y compartir sin problemas cualquier tipo de datos desde cualquier lugar, en cualquier momento y a través de cualquier medio de su entorno. La utilización propuesta de la tecnología IoT es construir la vida de manera elegante y segura con un identificador excepcional para cada objeto.

El Internet de las cosas (IoT) combina miles de millones de dispositivos (*things*) que pueden comunicarse a través de Internet (por ejemplo, dispositivos portátiles, teléfonos inteligentes, sensores, máquinas industriales, etc.) y pueden detectar el mundo físico y enviar datos de observación. En 2014, IoT cubría el 13 % del negocio y aumentó al 25 % en 2019. Según un informe publicado en noviembre de 2019 por *Statista Research Development*, se prevé que la cantidad total de dispositivos IoT conectados sea de 75 440 millones en todo el mundo para 2025, que es un aumento de cinco veces en cinco años. Según el informe de *McKinsey* sobre el impacto económico global de IoT, en 2025, el impacto económico anual de IoT estará en el rango de 2,7 a 6,2 trillones de dólares (véase [MANY13]).

Es una realidad, por tanto, que el IoT está creciendo rápidamente y está encontrando aplicaciones sustanciales en industrias como el transporte, la atención médica, la fabricación y el comercio minorista. En estas industrias, IoT ayuda en el monitoreo de procesos detallados, la generación de información y recomendaciones valiosas para la toma de decisiones e incluso la puesta en práctica de decisiones a través de la actuación. Por ejemplo, el dominio de fabricación ha visto una influencia significativa de IoT, ya que sustenta la visión de la Industria 4.0, que se centra en las prácticas basadas en datos en la fabricación (véase [GEOR16]). La Industria 4.0 se utiliza para mejorar la eficiencia de las operaciones de la planta a través de la reducción de los tiempos de inactividad de la producción y la mejora de la consistencia del producto, lo que aumenta la capacidad del fabricante para ser ágil y satisfacer las demandas fluctuantes de los clientes.

Los productos alimenticios como mermeladas, pastas alimenticias, etc. se consideran un ejemplo de caso del uso de sistemas IoT dentro de una Industria 4.0.; ya que requieren procesamiento para garantizar que cumplan con los atributos de calidad del producto objetivo, un componente importante de los cuales es la consistencia. El procesamiento de alimentos implica el uso de una máquina que realiza la ebullición o la evaporación para lograr la consistencia de la pasta deseada, que en sí misma se determina en función de los indicadores clave de rendimiento (KPI) de la planta de fabricación y los requisitos del producto. Una aplicación IoT

en este escenario puede ayudar a lograr la consistencia de la pasta objetivo automáticamente mediante: la recopilación de los datos de los sensores de la máquina y otros sensores como refractómetros, el análisis de estos datos para extraer conocimiento de alto nivel y la utilización de este conocimiento para proporcionar actuación (ajustes de la máquina) al evaporador/caldera.

Cuando las aplicaciones de IoT se desarrollan e implementan para respaldar casos de uso de aplicaciones de Industria 4.0, a menudo es difícil para un diseñador de aplicaciones evaluar la calidad que ofrece la aplicación (por ejemplo, la capacidad de cumplir con la consistencia de la pasta según lo especificado a través de KPI y especificaciones de calidad del producto) debido a múltiples razones (véase [KANE21]). En primer lugar, normalmente no hay comentarios humanos disponibles en función de los cuales se pueda estimar la aplicación en tiempo real de los IoT, ya que los KPI de fabricación normalmente no se miden durante la producción. Además, dado que el resultado producido por la aplicación IoT, es decir, la consistencia de la pasta, no es solo de la actuación (es decir, aplicar configuraciones específicas a la máquina del evaporador), sino que es el resultado de otros componentes de IoT, que incluyen los datos del sensor recopilados en tiempo real. Además del análisis de datos realizado con los datos de sensores recopilados, la evaluación de cómo los componentes individuales impactan en la calidad de la aplicación final es un gran desafío. El caso de uso de procesamiento de alimentos descrito es un buen ejemplo de una aplicación de IoT autónoma que implica una actuación automatizada basada en análisis de datos.

Como se discutió en el caso de uso anterior de la aplicación de procesamiento de alimentos en la Industria 4.0, obtener la consistencia deseada no es sólo un resultado de la activación de la máquina, sino que involucra otros componentes de una aplicación de IoT, como los datos detectados en la etapa de detección. Además, los datos detectados se recopilan y envían a una nube distante o a un dispositivo de borde cercano para su análisis, (véase Figura 17). En base a la información analizada, la configuración de la máquina se ajusta para obtener la consistencia deseada que se define a través de KPI. Tales aplicaciones de IoT implican detección, análisis y actuación. Esta naturaleza distribuida y autónoma de las aplicaciones de IoT hace que sea un desafío medir de manera efectiva la calidad de sus resultados frente a los KPI definidos.

En las aplicaciones de IoT, los dispositivos de IoT, como máquinas o sensores, realizan análisis de datos para extraer información de alto valor de los datos detectados por estos dispositivos de IoT. El conocimiento extraído es fundamental para impulsar sus actuaciones. La actuación es la capacidad de un dispositivo IoT para operar y realizar cambios en el entorno físico, a diferencia de la detección, que se ocupa de medir el entorno físico. Por ejemplo, en la aplicación de procesamiento de alimentos, las máquinas interactúan entre sí y recopilan datos de los sensores de las máquinas, (véase [KANE21]). Estos datos se analizan para predecir la configuración de la máquina que puede conducir a la consistencia deseada del producto alimenticio. Dichos avances en las técnicas para realizar análisis de datos predictivos y prescriptivos y la mayor disponibilidad de datos a través de los dispositivos de IoT están cambiando el IoT a la actuación impulsada por análisis. Es decir, las aplicaciones de IoT se están desarrollando cada vez más para extraer conocimiento de alto valor de los datos de IoT que les permite tomar medidas en nombre de las personas.



Figura 17. Imagen gráfica de las conexiones de la tecnología IoT, [REVI22].

Hay varias partes interesadas en un ecosistema de IoT (que se describe como un sistema de sistemas). Éstos incluyen proveedores de red y nube, desarrolladores de aplicaciones, usuarios finales, así como los propios dispositivos IoT (por ejemplo, máquinas en el caso de Industria 4.0). Por ejemplo, la aplicación de procesamiento de alimentos (discutida anteriormente) implica la interacción de máquina a máquina en la etapa de detección, análisis de datos sobre los datos recopilados en la nube o en el borde. Los datos recopilados por los sensores de la máquina se envían a una nube distante a través de la red o un dispositivo de borde cercano y, finalmente, la actuación se realiza ajustando automáticamente la configuración de la máquina para obtener la consistencia deseada de la pasta alimenticia. Estas aplicaciones se denominan aplicaciones IoT autonómicas.

Por lo tanto, dentro de la red de IoT, existe la capacidad de implantar una gran cantidad de dispositivos para construir el acceso a la gran escala de datos. Puede verse como una red de dispositivos que pueden distribuir *software* e información a través de Internet. La red IoT ayuda a la variedad de datos completos en la misma red mediante el uso de la computación en la nube para acumular los datos para monitorear fácilmente los detalles actualizados de una fábrica digital.

En la actualidad, resulta indispensable que las empresas e industrias sean lo más “inteligentes” posibles y se adapten a la naturaleza variable de las cadenas de suministro digitales. Todo esto es posible aprovechando la tecnología IoT y aplicándola en el escenario de la Industria 4.0.

3.3. Virtualización de una máquina

A continuación, se pasará a detallar diversos ejemplos que se encuentran en la bibliografía de máquinas virtualizadas dentro del entorno de la fábrica digital.

3.3.1. Caso 1: Máquina punzadora de láminas de metal (CAD/CAM/CNC)

En este segundo trabajo se puede ver cómo se ha creado el gemelo digital de una máquina punzadora de chapa, basado en el trabajo de *Moreno et al* (véase [MORE17]). En este artículo se presenta el proceso para construir un gemelo digital para una punzonadora de láminas de metal

para respaldar el diseño interactivo de programas óptimos de mecanizado *NC*. Los resultados muestran que esta entidad consigue simular de forma interactiva el comportamiento básico de la máquina de chapa real: movimientos, operaciones de mecanizado y conectividad con brazos robóticos. Utilizando el protocolo de comunicación *Ethernet/IP*, los gemelos digitales se pueden conectar y cooperar para simular líneas de producción virtuales. El artículo concluye con la necesidad de profundizar en la virtualización del proceso de mecanizado de chapa, añadiendo comportamientos físicos más realistas (transferencia de calor, aceleraciones...) y conectando el gemelo digital con piezas mecánicas reales bajo nuevas herramientas de simulación.

En concreto, la máquina que se pretende digitalizar es un punzonadora. El punzonado es un proceso de formación de metal que utiliza una punzonadora para forzar una herramienta, llamada punzón, a través de la lámina de metal para crear un agujero o una cierta deformación. El punzonado suele ser el método más económico para crear orificios en chapas de metal en volúmenes de producción medios a altos. La punzonadora está controlada por un *CNC*, que automatiza el proceso ejecutando un mecanizado previamente programado, (véase Figura 18).



Figura 18. Máquina punzonadora a virtualizar, [MORE17].

El caso de estudio presentado en este trabajo se centra en la creación de un simulador 3D de una punzonadora de chapa. En otras palabras, el objetivo principal es crear un gemelo digital de la máquina física. Dicho gemelo de la punzonadora física está compuesto por: (1) los modelos virtuales 3D, (2) el comportamiento mecánico (movimientos de los ejes) y (3) las operaciones de mecanizado de chapa. Además, se requiere el modelado de las capacidades de interoperación de la máquina con otros sistemas. En este caso de estudio, se utiliza un brazo de elevación robótico para extraer las piezas producidas durante o después del proceso de mecanizado. Además, se puede incrustar un mecanismo de trampa en la mesa de punzonado para permitir la extracción de piezas.

En este caso, el proceso de virtualización se ha dividido en varias etapas:

1. Modelado en 3D las partes individuales de la máquina, las partes del brazo robótico y cualquier otro elemento 3D necesario.
2. Extracción del comportamiento de la máquina y creación de un conocimiento representación de borde, esto último está relacionado con el gemelo digital.

3. Modelado de la interacción entre la punzonadora y otros elementos móviles e integrarlo al conocimiento representación.
4. Modelado las operaciones de mecanizado y los efectos sobre la hoja de metal.
5. Diseño y desarrollo de un simulador donde todos los elementos virtuales cooperan para llevar una experiencia virtual lo más cerca posible del comportamiento de mecanizado físico.

A continuación se pasará a detallar cómo se realizó el modelado de la máquina ya que es la parte más afín al proyecto que vamos a realizar.

Antes de comenzar es importante tener en cuenta que los modelos 3D proporcionan el mayor impacto visual en cuanto a la exactitud de la virtualización. Cuanto más cerca de la máquina física esté, más realista será la simulación posterior. En este caso, como el modelo virtual se usará en simulaciones interactivas, éste debe ser lo suficientemente liviano para usarse con ordenadores y dispositivos móviles estándar en aplicaciones nativas o a través de una interfaz web.

Para producir los modelos 3D apropiados, los modelos CAD de la máquina se han segmentado en partes 3D separadas, con el objetivo de sólo modelar los elementos necesarios y visibles de cada parte. Por ejemplo, toda la electrónica incrustada en las cajas de control se puede desechar modelando solo sus contenedores. Para los objetos modelados, se lleva a cabo un proceso de texturizado y simplificación de polígonos para reducir su número de polígonos y que coincida con las capacidades interactivas del simulador y proporcione una buena apariencia de la máquina.

En concreto, para una representación de la punzonadora dada, los objetos 3D modelados se ensamblan en un gráfico de escena, donde el nodo raíz representa toda la máquina y cada nodo interno representa grupos móviles o ejes de la punzonadora. Usando esta representación gráfica de escena, mover un nodo o eje de transformación interno traducirá todos sus elementos secundarios, (véase Figura 19).

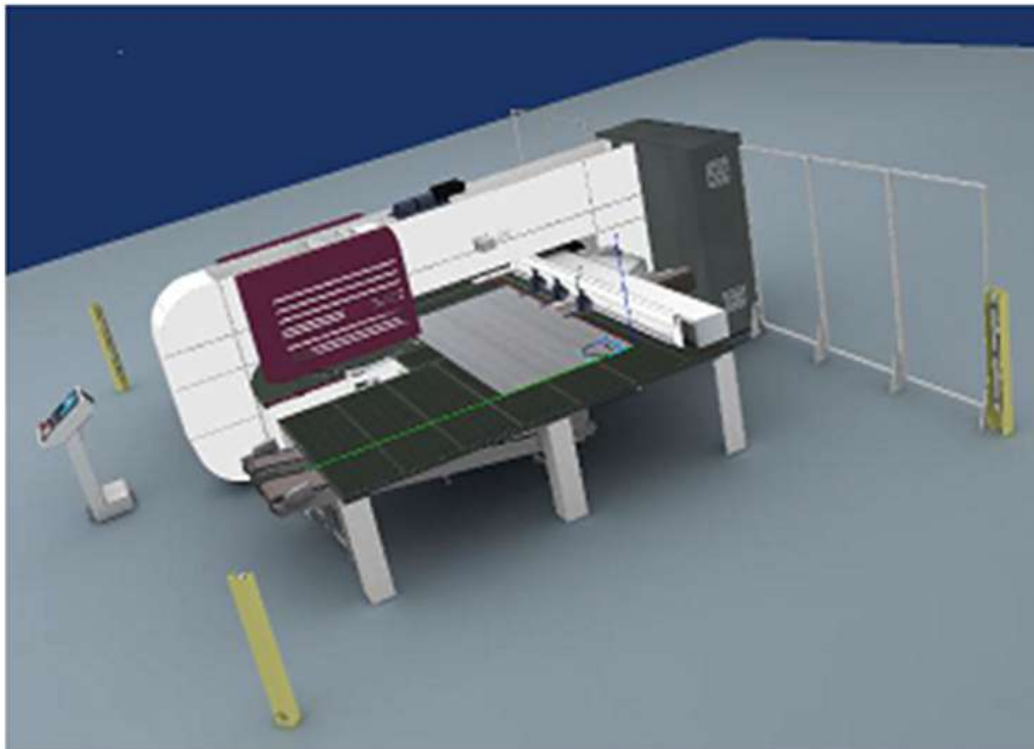


Figura 19. Máquina punzonadora virtualizada, [MORE17].

Una vez modelada se procede a la creación del gemelo digital para ello el simulador creará una escena virtual 3D leyendo una de las configuraciones de máquinas 3D. Al cargar estos archivos, se cargan y organizan todos los objetos individuales en 3D y se preparan las estructuras internas requeridas para acceder e interactuar con los ejes móviles de la máquina.

Así, con este artículo se consigue crear un gemelo digital de una punzonadora comercial que se puede utilizar como herramienta de ayuda en el diseño interactivo de programas *CNC* para las punzonadoras. Los resultados obtenidos muestran una clara semejanza con los resultados de los procesos de mecanizado físico, aunque hay espacio para mejorar. Por ejemplo, no se tienen en cuenta los parámetros físicos del proceso. La implementación actual puede punzonar chapas de cualquier grosor con la misma fuerza de punzonado. La incorporación continua de nuevos comportamientos físicos en el simulador acercará al gemelo digital a la máquina física, cerrando la brecha entre la realidad y la virtualidad.

3.3.2. Caso 2: Máquina de corte (*ToolMaker*)

Este primer trabajo se centra en diseñar un gemelo digital de una herramienta de corte como réplica digital de una herramienta física, conservando su formato y estructura de datos, los flujos de información y de gestión, así como posibilidades de posteriores aplicaciones y análisis de la productividad. Está basado en el trabajo *Botkina et al.*, (véase [BOTK18]).

En este caso los autores se han dedicado a modelar y digitalizar su máquina en cuestión para después crear el gemelo digital de la misma, a través del cual consiguen almacenarlo, refinarlo y propagarlo a la planificación del proceso para una solución de mecanizado optimizada.

En concreto la máquina de corte sobre la que han trabajado tiene los siguientes elementos, (véase Figura [?]):

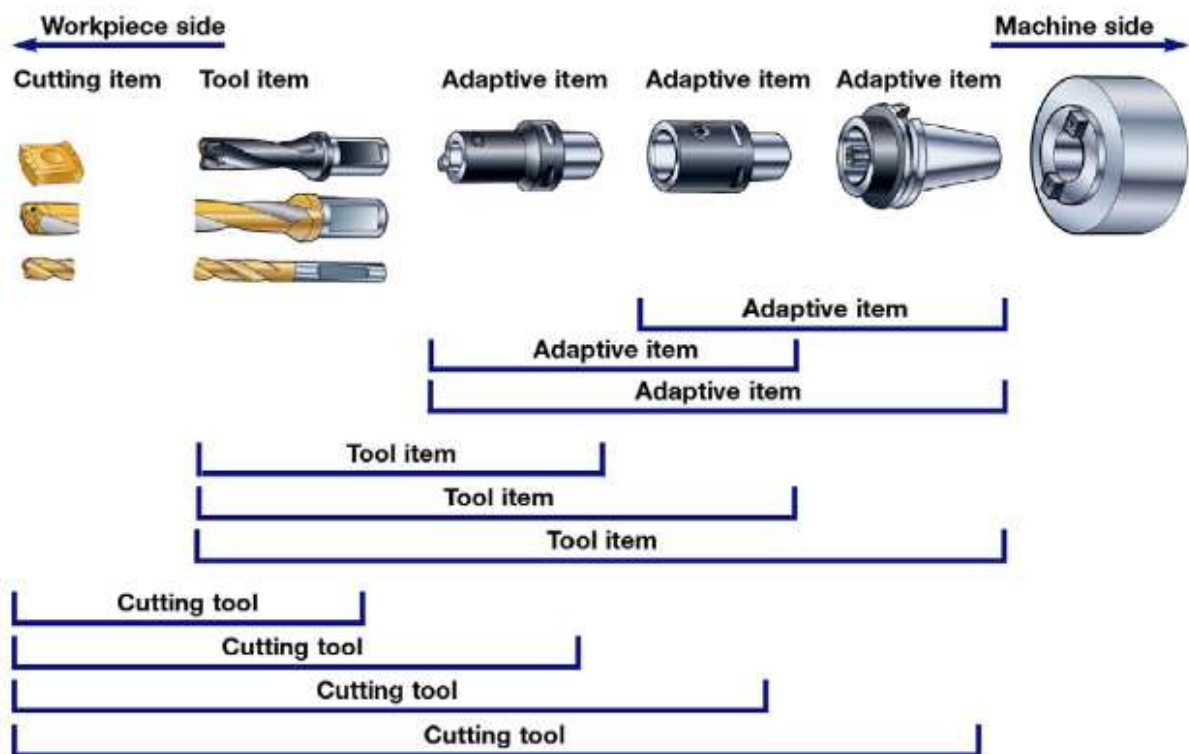


Figura 20. Elementos de la máquina de corte, [BOTK18].

- Elemento de corte.: éstos son los que forman el filo de corte de una herramienta, es decir, insertos y cabezas de herramientas sólidas.
- Elemento de herramienta: están formados por las portaherramientas de elementos de corte, es decir, barra sólida o cabezal sólido que se utiliza para sujetar los insertos.
- Elemento adaptativo: son todos aquellos adaptadores que contiene la máquina, es decir, conexiones adaptativas entre la cortadora y la propia máquina.
- Elemento de unión y ensamblaje: son todas aquellas juntas pequeñas, es decir, componentes que unen diferentes partes del conjunto (tornillos, abrazaderas, etc.).

Para realizar el gemelo digital en su totalidad los autores han dividido el trabajo en varias partes, que son:

1. Definición y estudio de los elemento de la máquina. En esta primera etapa, los autores ha estudiado la máquina en cuestión (versión, definición, propiedades, relación mutua entre sí, etc.).
2. Diseño y montaje de las herramientas de la máquina digital. Este segundo paso incluye la definición, propiedades, instrucciones de montaje, datos adicionales para *software* de modelo 3D (*CAD*, *CAM/CNC*), en este caso para *ToolMaker*.
3. Soporte de información de la herramienta nominal al *CAM* y al cuarto de herramientas. En esta tercera etapa, los autores han ido detallando las diversas características de funcionamiento de las piezas. Además, información de herramientas físicas entre el cuarto de herramientas y el *CNC*. Este paso es específico de este trabajo ya que se debe a los requerimientos del *software* utilizado, ya que es un *software* con piezas de corte ya diseñadas de forma general a las que después se le van añadiendo especificaciones concretas .
4. Referencias a documentos externos y creación del gemelo digital con el *software LISA*. En esta cuarta etapa se añaden otro tipo de documentos ya que en el trabajo no se pretende sólo virtualizar la máquina sino hacer su gemelo digital y por tanto introduce toda la teoría anteriormente detallada relacionada con el análisis de datos.

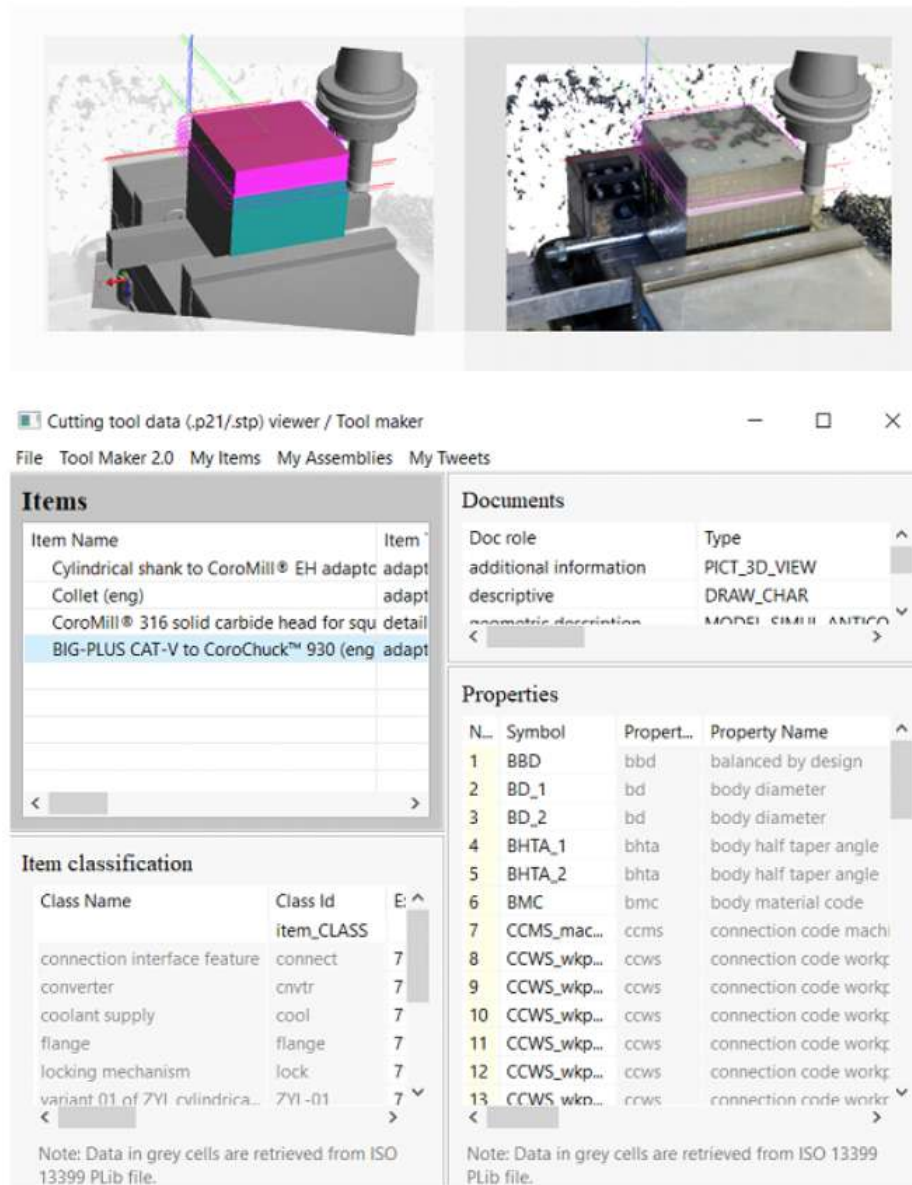


Figura 21. Digitalización de la máquina de corte con *ToolMaker*, [BOTK18].

Como se puede observar, en el trabajo se utiliza el *software ToolMaker* para digitalizar la máquina. Éste es un programa especializado en las herramientas de corte y todos sus elementos. Funciona trabajando desde un catálogo general a través del cual el usuario va seleccionando las piezas que desea incluir. La ventaja de usar este *software*, en este caso, es que el propio programa ya incluye las piezas de corte cumpliendo la normativa específica y el usuario únicamente añade características posteriores a dicho elemento. *ToolMaker* proporciona una interfaz conveniente y eficiente para la representación de la información de la herramienta de forma estructurada. Los usuarios pueden crear una biblioteca de elementos y herramientas necesarios; estos archivos se pueden utilizar para crear un ensamblaje. El ensamblaje se puede exportar como modelo 3D y archivo de propiedades, (véase Figura 21).

Así, en este trabajo se consigue el gemelo digital de una herramienta de corte usando la herramienta de diseño *ToolMaker* y la arquitectura del sistema de información de línea *LISA*. Con todo esto, se desarrolla un modelo de información que recopila datos estandarizados de forma automática y permite un ajuste continuo del modelo digital. El ajuste se realiza por medio de una máquina de tweets que alimenta los datos de la línea de producción y ayuda a la evolución

de la herramienta digital desde la instancia “cómo se diseñó”, pasando por la instancia cómo se realizó”, finalmente, hasta cómo se usó”. El modelo ajustado representa con precisión las propiedades de la herramienta de corte, y es aplicable a la simulación, el control y el análisis de procesos precisos, lo que finalmente conduce a la mejora continua del proceso de producción.

3.3.3. Caso 3: Robot manipulador 7 grados de libertad (*Siemens NX*)

Por último, se va a estudiar un caso en el que se simula un robot de 7 grados de libertad, el trabajo sigue la digitalización realizada por Nizamuddin y Velardi, (véase [NIZA16]). En este trabajo se modela y simula un manipulador redundante de 7 grados de libertad, (véase Figura 22). El modelo CAD del robot se desarrolla en *Siemens NX* y la simulación del manipulador se realiza en el *software Virtual Robot Experimentation Platform*.

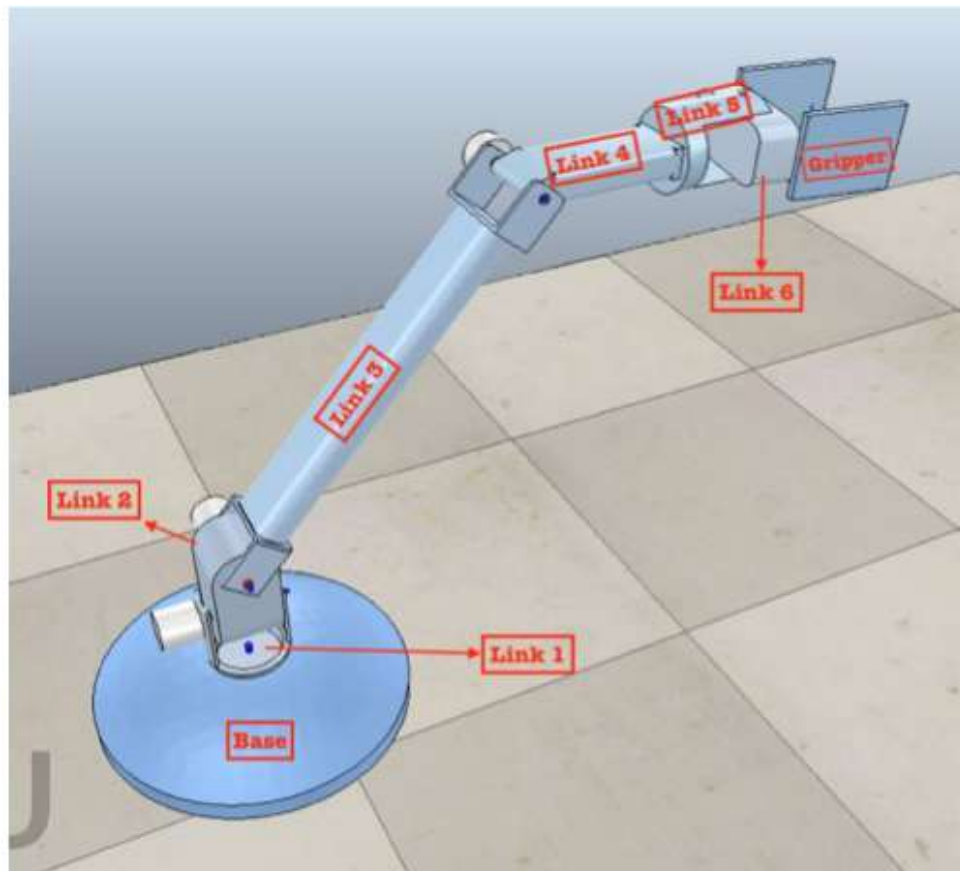


Figura 22. Robot a virtualizado, [NIZA16].

El objetivo de este proyecto es modelar y analizar un robot manipulador redundante de 7 grados de libertad. Para ello se han utilizado herramientas de ingeniería y diseño asistido por ordenador, que han demostrado ser valiosas herramientas en el campo de la robótica. Inicialmente, el modelado de los eslabones rígidos del brazo robótico se llevó a cabo utilizando técnicas de modelado sólido disponibles a través del paquete *Siemens NX 10*. Estos modelos sólidos luego se importan a *Virtual Robot Experimentation Platform*. La simulación se lleva a cabo con el fin de comprobar el rendimiento del diseño.

Para el modelado digital se divide el robot en cuestión en segmentos. formados por los enlaces rígidos del brazo robótico. Estos enlaces se modelan mediante modelado sólido en *SIEMENS NX 10* y se importan a *Virtual Robot Experimentation Platform* y se ensamblan, (véase Figura 22).

Con este trabajo se consigue que el robot simulado pueda evitar obstáculos con un grado adicional de libertad y teniendo en cuenta los límites de las articulaciones. La simulación se ha llevado a cabo con éxito y los resultados muestran claramente que el modelo realiza todas las operaciones de manera efectiva sin movimientos repentinos o no contabilizados.

3.3.4. Premisas

Una vez estudiados diversos casos de digitalización de la bibliografía se pueden sacar las siguientes premisas para aplicar en el trabajo y dividir la digitalización en las siguientes etapas:

- Se debe realizar un buen estudio teórico de la máquina a virtualizar, obteniendo sobre todo los detalles de diseño que luego se necesitarán para digitalizar.
- Una vez realizado el estudio de la máquina se puede intentar dividirla en segmentos para así ir diseñando en 3D los distintos segmentos que luego se unirán para crear la máquina.
- Estudiar el comportamiento y parámetros de funcionamiento de la máquina. En este paso se pueden obviar distintos elementos del diseño como la electrónica interna de la máquina que no se necesitará introducir en el diseño ya que esto no afectará a la digitalización.
- Simular el funcionamiento de la máquina virtual y ajustar los errores para que sea lo más realista posible. Aunque en este punto también se pueden introducir simplificaciones de la máquina de manera que aunque la máquina virtualizada sea más simple sigue conservando las características principales de la máquina. Es importante saber que a la hora de hacer simplificaciones éstas no pueden alterar el funcionamiento real de la máquina.

Capítulo 4

Máquinas CNC

EN este capítulo se pretende hacer un estudio sobre las máquinas CNC en general. Así se estudiarán desde el punto de vista teórico las principales características de estas máquinas, incluyendo los principales tipos y elementos estructurales más importantes de cada uno de ellos, para más información véase [SMID03].

Además, se ha añadido una última sección en la que se hace un estudio detallado sobre la máquina física que se encuentra en el LSITF del ICAI y que se pretende virtualizar. Este estudio será muy importante ya que detallará los principales elementos y modos de funcionamiento de la máquina a virtualizar los cuales deberán tenerse en cuenta en la posterior digitalización.

4.1. Descripción

Una máquina CNC es aquella máquina en la cual se procesa una pieza de material (metal, plástico, madera, etc.) para cumplir con las especificaciones siguiendo instrucciones codificadas programadas, sin un operador manual que controle directamente la operación de mecanizado, véase Figura 23. Además, una máquina CNC posee un control numérico (control CNC) el cual dirige de manera automatizada las herramientas de mecanizado de la máquina (como taladros, tornos, fresadoras, etc.) por medio de un ordenador.



Figura 23. Máquina CNC, [MOKO22].

La tecnología de control numérico, como se la conoce hoy en día, surgió a mediados del siglo XX aunque no se aplicó en la fabricación de producción hasta principios de la década de 1960, véase Figura 24. El verdadero auge llegó alrededor del año 1972, y una década más tarde con la introducción de las micro-computadoras asequibles.

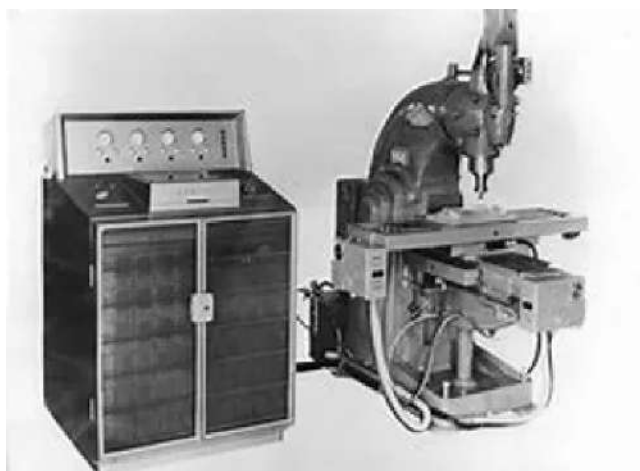


Figura 24. Primera máquina herramienta, [INTE22].

En el campo de la fabricación, y en particular en el área de la metalurgia, la tecnología de Control Numérico ha causado una especie de revolución. De hecho, las máquinas herramienta equipadas con el sistema de Control Numérico encontraron su lugar especial en los talleres mecánicos y la reciente evolución de la microelectrónica y el incesante desarrollo de la informática, ha supuesto cambios significativos en el sector de la fabricación en general y en la industria metalúrgica en particular.

Una máquina CNC recibe una serie de instrucciones en forma de un programa secuencial que luego ejecuta. El programa puede ser escrito por una persona o, con mucha más frecuencia, generado por un *software* de diseño gráfico asistido por computadora (CAD) o de fabricación asistida por computadora (CAM), en el caso del proyecto se generará con *Siemens NX*. El conjunto de todas las instrucciones necesarias para mecanizar una pieza se denomina programa CNC o programa de piezas. Dicho programa puede almacenarse para un uso futuro y usarse repetidamente para lograr resultados de mecanizado idénticos en cualquier momento.



Figura 25. Máquina NC de 1955, [INTE22].

En su origen, las máquinas CNC empezaron llamándose máquinas NC (*Numerical Control*), véase Figura 25. Siguiendo estrictamente la terminología, existe una diferencia en el significado

de las abreviaturas NC y CNC, véase [SMID03]. Sin embargo, en la práctica, CNC es la abreviatura preferida. Para aclarar el uso correcto de cada término, observe las principales diferencias entre los sistemas NC y CNC. Ambos sistemas realizan las mismas tareas, a saber, la manipulación de datos con el fin de mecanizar una pieza. En ambos casos, el diseño interno del sistema de control contiene las instrucciones lógicas que procesan los datos. En este punto termina la similitud entre ambas, puesto que el sistema NC (a diferencia del sistema CNC) utiliza funciones lógicas fijas, aquellas que están integradas y conectadas permanentemente dentro de la unidad de control. Estas funciones no pueden ser modificadas por el programador ni por el operador de la máquina. Debido al cableado fijo de la lógica de control, el sistema de control NC es sinónimo del término “cableado”. Así, las máquinas NC podían interpretar un programa de pieza, pero no permitían ningún cambio en el programa, utilizando las funciones de control. Todos los cambios necesarios debían realizarse fuera del control, normalmente en un entorno de oficina. Además, el sistema NC requiere el uso obligatorio de cintas perforadas para la entrada de la información del programa.



Figura 26. Máquina CNC moderna, [INTE22].

Pero con el paso de los años y la extensión de las máquinas NC, éstas avanzaron hacia sistemas más complejos que se denominaron máquinas CNC, véase Figura 26. Estas máquinas más modernas tienen una computadora integrada que contiene registros de memoria y almacenan una variedad de rutinas permitiéndoles manipular funciones lógicas. Eso significa que el programador de piezas o el operador de la máquina puede cambiar el programa en el control mismo (en la máquina), con resultados instantáneos. Esta flexibilidad es la mayor ventaja de las máquinas CNC y probablemente el elemento clave que contribuyó a un uso tan amplio de la tecnología en la fabricación moderna. Los programas CNC y las funciones lógicas se almacenan en chips informáticos especiales, como instrucciones de *software*, en lugar de ser utilizadas por el *hardware* conexiones, como cables, que controlan las funciones lógicas.

En un mecanizado convencional, el operador de la máquina configura la máquina y mueve cada herramienta de corte, usando una o ambas manos, para producir la pieza requerida. El

diseño de una máquina herramienta manual ofrece muchas funciones que ayudan en el proceso de mecanizado de una pieza: palancas, manijas, engranajes, diales, etc. En este caso, el operador repite los mismos movimientos corporales para cada parte del lote. Sin embargo, la palabra “igual” en este contexto realmente significa “similar”, en lugar de “idéntico”. Esto se debe a que ningún ser humano es capaz de repetir cada proceso exactamente igual en todo momento. Por tanto, las piezas resultantes de una máquina convencional tendrán algunas diferencias e inconsistencias dentro de cada lote de piezas y las partes no siempre serán exactamente iguales. Con lo cual, mantener las tolerancias dimensionales y la calidad del acabado superficial son los problemas más típicos del mecanizado convencional.

En este sentido, el mecanizado bajo control numérico elimina la mayoría de las inconsistencias ya que no requiere la misma implicación física que el mecanizado manual. En concreto, las máquinas CNC no necesitan palancas, diales o manijas, al menos no en el mismo sentido que el mecanizado convencional. Y una vez que se ha probado el programa de pieza, se puede utilizar cualquier número de veces, siempre arrojando resultados consistentes. Eso no significa que no haya factores limitantes ya que las herramientas de corte se desgastan, el material en bruto de un lote no es idéntico al material en bruto de otro lote y las configuraciones pueden variar, etc. Estos factores deben tenerse en cuenta y compensarse siempre que sea necesario.



Figura 27. Ejemplo de una máquina CNC moderna, [INTE22].

El surgimiento de la tecnología de control numérico no significa una desaparición instantánea, ni siquiera a largo plazo, de todas las máquinas manuales. Hay momentos en que un método de mecanizado tradicional es preferible a un método computarizado. Por ejemplo, un trabajo simple de una sola vez se puede realizar de manera más eficiente en una máquina manual que en una máquina CNC. Ciertos tipos de trabajos de mecanizado se beneficiarán del mecanizado manual o semiautomático, en lugar del mecanizado controlado numéricamente. Las máquinas herramienta CNC no están destinadas a reemplazar todas las máquinas manuales, sino solo a complementarlas. En muchos casos, la decisión de si cierto mecanizado se realizará en una máquina CNC o no, se basa en la cantidad de piezas requeridas. Aunque el volumen de piezas mecanizadas como lote es siempre un criterio importante, nunca debe ser el único factor. También se debe tener en cuenta la complejidad de la pieza, sus tolerancias, la calidad requerida del acabado de la superficie, etc. Es importante saber qué áreas de mecanizado se beneficiarán y cuáles se realizan mejor de forma convencional. Es absurdo pensar que una fresadora CNC de dos caballos ganará trabajos que actualmente se realizan en una fresadora manual veinte veces más potente. Igualmente irrazonables son las expectativas de grandes mejoras en las velocidades de corte y las tasas de avance con respecto a una máquina convencional. Si las condiciones de mecanizado y utillaje son las mismas, el tiempo de corte será muy próximo en ambos casos.

Como era de esperar, las principales ventajas de las máquinas CNC frente a las convencionales son: la significativa reducción del tiempo de configuración y del tiempo de fabricación de la

pieza, la precisión y posibilidad de repetición del proceso, la consecución de contorneado de formas complejas y el incremento general de la productividad. Todo esto ha provocado que de manera generalizada a la hora de producir piezas en serie se utilicen máquinas CNC en vez de máquinas convencionales.

4.2. Elementos principales

Dado que cualquier componente en particular puede requerir el uso de varias herramientas diferentes (taladros, sierras, etc.), las máquinas CNC modernas a menudo combinan varias herramientas en una sola estructura llamada cambiador automático de herramientas. También, se utilizan varias máquinas diferentes con un controlador externo y operadores humanos o robóticos que mueven el componente de una máquina a otra. En cualquier caso, la serie de pasos necesarios para producir cualquier pieza está altamente automatizada y produce una pieza que cumple con todas las especificaciones del dibujo CAD original, donde cada especificación incluye una tolerancia. Así, las dimensiones mecánicas de la pieza se definen mediante el *software* CAD y luego se traducen en directivas de fabricación mediante el *software* de fabricación asistida por computadora (CAM). Las directivas resultantes se transforman (mediante un *software* de “postprocesador”) en los comandos específicos necesarios para que una máquina en particular produzca el componente y luego se cargan en la máquina CNC. El movimiento de la máquina controla múltiples ejes, normalmente al menos dos (X e Y) y un husillo de herramientas que se mueve en el eje Z. La posición de la herramienta es impulsada por motores paso a paso de accionamiento directo o servomotores para proporcionar movimientos de alta precisión, o en diseños más antiguos, motores a través de una serie de engranajes reductores.

En general, las máquinas CNC están tienen varios elementos que a continuación se van a detallar. Cabe destacar que la configuración y los componentes pueden variar según el tipo y la aplicación específica de la máquina CNC, ya sea un centro de mecanizado, un torno CNC u otra variante de máquina CNC.

4.2.1. Estructura exterior

La estructura exterior de una máquina CNC es la carcasa de la misma la cual protege la zona de trabajo y las herramientas del sistema. Así, la estructura exterior suele estar compuesta por una chapa de acero tratada mediante el pintado o galvanizado. Además, esta estructura es la base sólida de la máquina que proporciona estabilidad y soporte para los demás componentes. Por ello, debe ser robusta y rígida para soportar las fuerzas generadas durante las operaciones de mecanizado.

4.2.2. Husillo

El husillo es el componente principal que realiza el movimiento de corte y puede ser accionado por un motor eléctrico o un motor de husillo integrado y proporciona la velocidad de rotación requerida para las herramientas de corte, como fresas, brocas o mandriles.

4.2.3. Mesa de trabajo o bancada

La mesa de trabajo o bancada es la superficie plana donde se coloca la pieza y puede tener características como ranuras en T, orificios roscados y sistemas de sujeción para asegurar la pieza de trabajo durante el mecanizado. En concreto, la bancada o mesa de trabajo suele estar hecha de fundición gris o hierro fundido gris ya que tiene una óptima resistencia al impacto, es decir,

posee una buena capacidad de absorción de vibraciones. Este hecho es realmente importante en estas máquinas ya que la zona de trabajo está muy expuesta a recibir continuamente impactos debido al proceso de fabricación.

4.2.4. Cambiador automático de herramientas

El cambiador automático de herramientas es el elemento de máquina CNC en el cual se encuentran todas las herramientas de las que dispone el sistema para trabajar. Éstas, como fresas, brocas, mandriles, etc., se montan en el husillo y se utilizan para realizar operaciones de corte, taladrado, fresado y otras operaciones de mecanizado en la pieza de trabajo. Cada herramienta se encuentra en un *pocket* o bolsillo del cambiador. El número de herramientas de cada máquina varía pero podemos encontrar máquinas CNC con un número elevado de *pockets* o bolsillos del cambiador lo que permitirá un ahorro en el tiempo de mecanizado a la hora de fabricar piezas complejas. Por ejemplo, hay máquinas CNC más simples en las que el cambiador posee sólo unos pocos bolsillos hasta máquinas más complejas que poseen más de cien. Este número es muy variable y dependerá del fabricante, del modelo y de las necesidades propias del usuario.

4.2.5. Sistemas de refrigeración

Las máquinas CNC suelen estar equipadas con sistemas de refrigeración, por aire o líquido, para mantener las herramientas de corte y la pieza de trabajo a temperaturas adecuadas durante el mecanizado. En el caso de la máquina del LSITF del ICAI el sistema de refrigeración es por líquido.

4.2.6. Ejes

Una máquina CNC de cualquier tipo posee unos ejes de primarios o principales sobre los que se van a desarrollar los principales movimientos de la máquina y sobre los que se determina el sistema de referencia de los mismos, X , Y , Z . Estos ejes forman un sistema de coordenadas estándar de ejes lineales ortogonales cuyas direcciones siguen la regla de la mano derecha. Las posiciones de los tres mecanismos de movimiento lineal se expresan usando coordenadas en estos ejes.

Además, la máquina se puede diseñar con uno o más ejes adicionales, normalmente designados como ejes secundarios usando las letras U , V y W . Estos ejes normalmente son paralelos a los ejes primarios X , Y y Z respectivamente.

Para aplicaciones rotatorias o de indexación, los ejes adicionales se definen como ejes A , B y C , girando alrededor de los ejes X , Y y Z , nuevamente en su orden respectivo. La dirección positiva de un eje giratorio (o de indexación) es la dirección requerida para hacer avanzar un tornillo de mano derecha en el eje positivo X , Y o Z . Por ejemplo, el eje A sirve para rotación, el eje B para inclinación y el eje C para el giro, permitiendo un mayor grado de libertad y posibilidades de mecanizado. La relación de los ejes primario y secundario se muestra en la Figura 28.

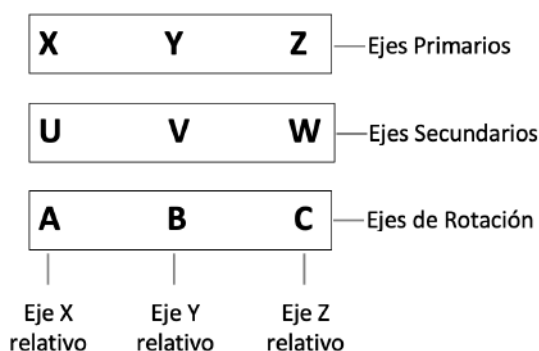


Figura 28. Ejes primarios y secundarios de una máquina CNC.

4.2.7. Control

El último elemento para comprender los elementos generales de una máquina CNC es el control. En este sentido este elemento es tan relevante para la máquina que se va a dedicar el siguiente capítulo a su estudio.

4.3. Tipologías

De manera general, se puede afirmar que hay muchos tipos de máquinas CNC y éstas van en aumento debido al auge que está teniendo esta tecnología dentro de la industria. Así, las máquinas CNC se pueden clasificar según diferentes criterios: función, ejes de movimientos, aplicación, etc. Desde el punto de vista funcional, los sistemas CNC se pueden agrupar en: tornos o centros de torneado, fresadoras o centros de mecanizado, máquinas de perforación, máquinas de electroerosión, perfiladoras, etc. En este caso sólo se van a detallar los dos subgrupos más importantes de máquinas: tornos o centros de torneado y fresadoras o centros de mecanizado. De hecho, en concreto la máquina del laboratorio se corresponde con una fresadora o centro de mecanizado. Aún así si se desea saber más sobre algún tipo de máquina CNC puede consultarse en [SMID03].

Los centros de mecanizado y los tornos dominan el número de instalaciones en la industria y comparten el mercado casi por igual. Hay que recordar que hay muchos tipos diferentes de tornos e igualmente muchos tipos diferentes de centros de mecanizado. Sin embargo, hay una gran cantidad de aplicaciones generales y el proceso de programación es generalmente el mismo.

4.3.1. Tornos o centros de torneado

Un torno de motor convencional es una máquina común en casi todos los talleres mecánicos y se usa para mecanizar piezas cilíndricas o cónicas, como ejes, anillos, ruedas, orificios, roscas, etc., véase Figura 29. La operación de torno más común es la eliminación de material alrededor de la pieza, usando una herramienta de torneado para corte externo. También se puede utilizar un torno para operaciones internas como taladrado, así como para ranurado, roscado, etc. Un torno de motor tiene a menudo solo una o dos herramientas de corte montadas a la vez.



Figura 29. Ejemplo de un torno CNC de dos ejes, [DIRE23].

El trabajo de torno típico controlado por un sistema CNC utiliza máquinas conocidas en la industria como centros de torneado CNC, o más comúnmente, tornos CNC. El término “centro de torneado” es bastante impopular, pero es una descripción general precisa de un torno computarizado (un torno CNC) que se puede utilizar para una gran cantidad de operaciones de mecanizado durante una sola configuración. Por ejemplo, además de las operaciones de torno estándar, como torneado y mandrinado, un torno CNC se puede utilizar para taladrar, ranurar, roscar, moletear e incluso pulir. También se puede utilizar en diferentes modos, como trabajo con mandril, trabajo con pinza, alimentador de barras o entre centros. Los tornos CNC están diseñados para albergar varias herramientas en torretas especiales, pueden tener un accesorio de fresado, un mandril indexable, un husillo secundario, un contrapunto, una luneta y muchas otras características que no siempre se asocian con un diseño de torno convencional. En la siguiente tabla, véase Tabla 1, pueden consultarse un ejemplo sobre las especificaciones generales de un torno.

Description	Specification
Number of axes	Two (X, Z) or three (X, Z and C)
Maximum swing over bed	560 mm 22.05 inches
Maximum turning diameter	350 mm 13.76 inches
Maximum turning length	550 mm 21.65 inches
Spindle bore	65 mm 3.34 inches
Bar capacity	71 mm 2.79 inches
Number of tools	12
Tool size square	25 mm 1 inch
Tool size round	Ø40 mm Ø1.57 inches
Indexing time	0.1 second
Axis travel in X axis	222 mm 8.75 inches
Axis travel in Z axis	635 mm 25 inches
Rapid traverse rate X axis	16000 mm/min 629 in/min
Rapid traverse rate Z axis	24000 mm/min 944 in/min
Cutting feedrate	0.01 - 500 mm/rev .0001 - 19.68 in/rev
Chuck size	254 mm 10 inches
Main spindle motor	AC 15/11kW AC 20/14.7HP
Spindle speed	35 - 3500 rpm
Minimum input increment	0.001 mm .0001 inch
Motorized head:	
Number of rotating tools	12
Rotating tool speed	30 - 3600 r/min
Milling motor	AC 3.7/2.2 kW AC 5/2.95 HP
Collet size	1 - 16 mm .04 - .63 inches
Tap size	M3 - M16 metric #5 - 5/8 inches

Tabla 1. Ejemplo de especificaciones generales de un torno CNC, [SMID03].

Además, los tornos pueden tener varios ejes, de hecho los tornos con más de cuatro ejes también son comunes. Con los avances constantes en las tecnologías de máquinas herramienta, aparecen en el mercado más tornos CNC que están diseñados para realizar una serie de operaciones en una sola configuración, muchos de ellos tradicionalmente reservados para una fresadora o un centro de mecanizado.

Básicamente, los tornos CNC se pueden agrupar según el tipo de diseño y el número de ejes. Así, los dos tipos básicos son el torno CNC vertical y el torno CNC horizontal, véase Figura 30 y Figura 31. De los dos, el tipo horizontal es, con mucho, el más común en la fabricación y los talleres mecánicos. Un torno CNC vertical es algo menos común pero es insustituible para un trabajo de gran diámetro., véase 30.



Figura 30. Ejemplo de un torno CNC Horizontal [DIRE23].

Desde el punto de vista de la programación CNC, no existen diferencias significativas en el enfoque de programación entre los dos tipos de torno. La principal diferencia entre un torno CNC vertical y horizontal reside en el número de ejes de cada uno. La distinción más común de diferentes tornos CNC es por el número de ejes programables. En este sentido, los tornos CNC verticales suelen tener dos ejes programables mientras que los tornos horizontales CNC también pueden disponer de tres, cuatro o seis ejes, lo que agrega flexibilidad adicional a la fabricación de piezas más complejas. Además, un torno CNC horizontal incluye un tipo único de bancada inclinada cuyo diseño permite que las virutas de corte caigan lejos del operador CNC y, en caso de accidente, obliga a la pieza a caer en un área segura, hacia el transportador de virutas. A pesar de estas diferencias entre ambos, el método más simple y común de identificación de los tornos suele ser el número de ejes, que es elemento que determina la capacidad para realizar piezas más o menos complejas.



Figura 31. Ejemplo de un torno CNC Vertical, [DIRE23].

Un torno CNC típico está diseñado con dos ejes: el eje X y el eje Z . Ambos son perpendiculares entre sí y representan los típicos movimientos de torno de dos ejes, (recorrido transversal y longitudinal, respectivamente). Además, las herramientas de corte están montadas en una torreta (un almacén de herramientas especial) y pueden ser externas o internas. Debido a este diseño, la torreta cargada con todas las herramientas de corte se mueve a lo largo de los ejes X y Z , lo que significa que todas las herramientas están en el área de trabajo. Así el único eje de máquina capaz de realizar un agujero por métodos de taladrado, mandrinado, perforado o punzonado, es el eje Z . La orientación tradicional del eje para un tipo de torno horizontal es un movimiento hacia arriba y hacia abajo para el eje X , y un movimiento hacia la izquierda y hacia la derecha para el eje Z , cuando se mira desde la posición del maquinista. El movimiento en un torno CNC vertical es esencialmente el mismo que en el torno horizontal al que se le aplica un giro de 90° .

4.3.1.1. Tornos de dos ejes

Este es el tipo más común de tornos CNC. Las herramientas de corte se mantienen en una torreta de indexación especialmente diseñada que puede contener cuatro, seis, ocho, diez, doce y más herramientas. Muchos de estos tornos también tienen dos torretas. Los diseños avanzados de máquinas herramienta incorporan el almacenamiento de herramientas fuera del área de trabajo, similar al diseño de los centros de mecanizado. Se pueden almacenar y utilizar decenas, incluso cientos, de herramientas de corte para un solo programa CNC. Muchos tornos también incorporan un sistema de herramientas de cambio rápido.

4.3.1.2. Tornos de tres ejes

El torno de tres ejes es esencialmente un torno de dos ejes con un eje adicional. Este eje tiene su propia designación, normalmente como eje *C* en modo absoluto y es totalmente programable. Normalmente, el tercer eje se usa para operaciones de fresado transversal, corte de ranuras, perforación de orificios circulares, caras hexagonales, caras laterales, ranuras helicoidales, etc. Este eje puede reemplazar algunas operaciones simples en una fresadora, reduciendo el tiempo de configuración para el trabajo. Algunas limitaciones se aplican a muchos modelos, por ejemplo, las operaciones de fresado o taladrado pueden tener lugar solo en posiciones que se proyectan desde la línea central de la herramienta hasta la línea central del husillo (dentro de un plano de mecanizado), aunque otros ofrecen ajustes fuera del centro.

El tercer eje tiene su propia fuente de alimentación, pero la potencia nominal es relativamente menor en comparación con la mayoría de los centros de mecanizado. Otra limitación puede ser el incremento más pequeño del tercer eje, particularmente en los primeros tornos de tres ejes. Habitualmente los tornos de tres ejes ofrecen un incremento radial muy fino que permite un movimiento rotatorio simultáneo.

4.3.1.3. Tornos de cuatro ejes

Un torno CNC de cuatro ejes es un concepto totalmente diferente a un torno de tres ejes. De hecho, programar un torno de cuatro ejes no es más que programar dos tornos de dos ejes al mismo tiempo. En realidad, en estos tornos hay dos controles (y dos conjuntos de ejes *XZ*), uno para cada par de ejes. Dado que un torno de cuatro ejes puede trabajar con cada par de ejes de forma independiente se pueden mecanizar y realizar dos operaciones diferentes simultáneamente. Las claves principales para una programación exitosa de un torno de 4 ejes son la coordinación de las herramientas y sus operaciones y la sincronización de los movimientos de la herramienta..

Aunque se pueden realizar dos operaciones al mismo tiempo ambos pares de ejes no pueden funcionar todo el tiempo de manera continua. Debido a esta restricción, se requieren funciones de programación especiales como códigos de espera sincronizados (típicamente “Función miscelánea”), la capacidad de estimar cuánto tiempo requiere cada herramienta para completar cada operación, etc. Otra restricción importante de los tornos de 4 ejes es la velocidad del husillo la cual es única para todas las herramientas y todos los ejes aunque la velocidad de avance es independiente para ambos pares de ejes. Esto significa que algunas operaciones de mecanizado simplemente no se pueden realizar simultáneamente. No todos los trabajos de torno se benefician del mecanizado de 4 ejes. Hay casos en los que es más costoso ejecutar un trabajo en un torno de 4 ejes de manera ineficiente y puede ser muy eficiente ejecutar el mismo trabajo en un torno CNC de 2 ejes.

4.3.1.4. Tornos de seis ejes

Los tornos CNC de seis ejes son tornos especialmente diseñados con una torreta doble y un conjunto de tres ejes por torreta. Este diseño incorpora muchas estaciones de herramientas, muchas de ellas motorizadas, así como capacidades de mecanizado posterior. Programar estos tornos es similar a programar dos veces un torno de tres ejes. El sistema de control proporciona sincronización automáticamente, cuando es necesario. Un torno CNC de seis ejes de tamaño pequeño a mediano es una opción popular de los talleres de mecanizado de tornillos y las industrias con piezas pequeñas similares y aplicaciones de gran volumen.

4.3.2. Fresadoras o centros de mecanizado

La descripción de las fresadoras o centros de mecanizado CNC es muy amplia ya que en esta categoría se pueden incluir todas las máquinas herramienta, desde una simple fresadora de rodilla hasta una perfiladora de cinco ejes. Varían en tamaño, características, idoneidad para determinados trabajos, etc., pero todas tienen un denominador común: sus ejes principales son los ejes X e Y , y por esta razón se denominan máquinas XY . Así, la fresadora o centro de mecanizado CNC es una máquina capaz de realizar un movimiento de corte simultáneo, utilizando una fresa de extremo como herramienta de corte principal, a lo largo de al menos dos ejes al mismo tiempo, véase Figura 33. Esta definición elimina, por ejemplo, todas las prensas de taladro CNC, ya que su diseño cubre el posicionamiento pero no el perfilado.



Figura 32. Ejemplo de un centro de mecanizado CNC de tres ejes, [DIRE23].

Al igual que en los tornos CNC, los centros de mecanizado pueden ser de muchos tipos y se pueden agrupar siguiendo diferentes criterios como son: el número de ejes, la orientación de los mismos, el número de herramientas, etc. En concreto, según la orientación de los ejes se pueden distinguir centros de mecanizado horizontales o verticales. Así, las fresadoras cuyo movimiento del husillo es hacia arriba y hacia abajo se clasifican como máquinas verticales, mientras que las fresadoras en las que el movimiento del husillo es hacia adentro y hacia afuera se clasifican como máquinas horizontales. En el caso de la máquina del laboratorio es un centro de mecanizado vertical.

La industria de las fresadoras CNC está en constante cambio y muchos fabricantes de todo el mundo diseñan y producen máquinas nuevas y más potentes, con más funciones. La mayoría de las fresadoras CNC modernas son capaces de realizar multitud de tareas de mecanizado, no solo el fresado tradicional, véase Figura ?? . Estas máquinas también son capaces de realizar muchas otras operaciones de remoción de metal, principalmente taladrado, escariado, mandrinado, roscado, perfilado y muchas otras. Pueden estar equipados con un cambiador de herramientas

completamente automático y un poderoso control CNC. Algunos modelos de máquinas pueden tener características adicionales, como control adaptativo, interfaz de robot, carga y descarga automática, sistema de sondeo, características de mecanizado de alta velocidad y otras maravillas de la tecnología moderna.

Siguiendo el curso de la historia y de la evolución de las fresadoras y los centros de mecanizados, se puede decir que existen algunas diferencias entre ambos, que son:

- La velocidad de husillo. En una fresadora el husillo puede llegar a alcanzar entre 4000 y 5000 revoluciones por minuto mientras que el de un centro de mecanizado alcanza más de 8000.
- El cambiador de herramientas. En el caso de un centro de mecanizado el cambiador de herramientas es automático mientras que en el caso de las fresadoras el cargador es manual y por tanto los tiempos desempeñados para el cambio de herramientas son muy diferentes en ambos casos.
- La fresadora está montada sobre una bancada común, mientras que los centros de mecanizado están montados sobre guías lineales lo que proporciona mayor robustez.

Así, se puede decir que los centros de mecanizados son fresadoras CNC avanzadas y por ello, a pesar de las diferencias históricas y evolutivas, en la actualidad, se puede afirmar que una fresadora CNC moderna es equivalente a un centro de mecanizado CNC.



Figura 33. Ejemplo de una fresadora CNC moderna de tres ejes, [DIRE23].

Así, como ya se ha mencionado, los centros de mecanizado tienen al menos tres ejes: X , Y y Z . aunque pueden incluir algunos más en el caso de máquinas más complejas como ocurre en los tornos CNC, véase Figura 34. Con lo cual, las máquinas se vuelven más flexibles si tienen un cuarto eje, generalmente un eje indexado o giratorio (el eje A para los modelos verticales o el eje

B para los modelos horizontales) e incluso se puede encontrar un mayor nivel de flexibilidad en máquinas con cinco o más ejes. Una máquina simple con cinco ejes puede ser un centro de mecanizado que tiene tres ejes principales, además de un eje giratorio (generalmente el eje *B*) y un eje paralelo al eje *Z* (generalmente el eje *W*). Por ejemplo, un centro de mecanizado de cinco ejes, es complejo y flexible y se utiliza sobre todo en la industria aeronáutica, donde se necesita un movimiento de corte simultáneo de varios ejes para mecanizar formas complejas y alcanzar cavidades y varios ángulos. En ocasiones también se puede utilizar la expresión máquina de dos ejes y medio o máquina de tres ejes y medio. Estos términos se refieren al tipo de máquinas, donde el movimiento de corte simultáneo de todos los ejes tiene ciertas limitaciones. Por ejemplo, una máquina vertical de cuatro ejes tiene los ejes *X*, *Y* y *Z* como ejes primarios, además de una mesa de indexación, designada como eje *A*. La mesa de indexación se utiliza para el posicionamiento, pero no puede girar simultáneamente con el movimiento de los ejes primarios. Ese tipo de máquina a menudo se denomina máquina de tres ejes y medio. Por el contrario, una máquina más compleja pero similar que está equipada con una mesa totalmente giratoria está diseñada como una máquina de cuatro ejes. En este caso, la mesa giratoria puede moverse simultáneamente con el movimiento de corte de los ejes primarios y por eso se denomina como centro de mecanizado de cuatro ejes.



Figura 34. Ejemplo de una fresadora CNC de cinco ejes, [DIRE23].

Los métodos de programación no varían demasiado en función del tipo de fresadora, a excepción de los accesorios y opciones especiales. Algunas de las principales diferencias serán la orientación de los ejes de la máquina, el eje adicional para indexación o movimiento rotatorio completo y el tipo de trabajo adecuado para modelos individuales. El tipo más común de centro de mecanizado es el centro de mecanizado vertical como es el caso de la máquina del LSITF del ICAI. A continuación, se van a describir los dos tipos de fresadoras que hay en función de la orientación de sus ejes.

Como en el caso de los tornos CNC, cada centro de mecanizado CNC se describe mediante sus especificaciones proporcionadas por el fabricante de la máquina, véase Tabla 2. El fabricante enumera muchas especificaciones como método rápido de comparación entre una máquina y otra. Las especificaciones están una al lado de la otra en dos columnas, estrictamente por conveniencia,

no para propósitos de comparación. Estos son dos tipos de máquinas diferentes y la comparación no es posible para todas las características. Para comparar máquinas herramienta individuales éstas deben estar dentro de una misma categoría. Estas especificaciones contienen una lista de datos verificables, principalmente de naturaleza técnica, que describen la máquina individual por sus características principales.

Se puede hacer una comparación justa y precisa entre dos centros de mecanizado CNC verticales o entre dos centros de mecanizado CNC horizontales. En un cuadro de especificaciones de una máquina típica, se pueden enumerar datos adicionales, no incluidos en la Tabla 2, ya que en este caso la atención se centra únicamente en aquellas especificaciones que son de interés para el programador y el operador de CNC.

Vertical and Horizontal Machining Center - Typical Specifications		
Description	Vertical Machining Center	Horizontal Machining Center
Number of axes	3 axes (XYZ)	4 axes (XYZB)
Table dimensions	780 x 400 mm 31 x 16 inches	500 x 500 mm 20 x 20 inches
Number of tools	20	36
Maximum travel - X axis	575 mm 22.5 inches	725 mm 28.5 inches
Maximum travel - Y axis	380 mm 15 inches	560 mm 22 inches
Maximum travel - Z axis	470 mm 18.5 inches	560 mm 22 inches
Table indexing angle	N/A	0.001 degree
Spindle speed	60-8000 rpm	40 - 4000 rpm
Spindle output	AC 7.5/5.5 kW AC 10/7 HP	AC 11/8 kW AC 15/11 HP
Spindle nose-to-table distance - Z axis	150 - 625 mm 6 - 24.6 inches	150 - 710 mm 6 - 28 inches
Spindle center-to-column distance - Y axis	430 mm 17 inches	30 - 560 mm 1.2 - 22 inches
Spindle taper	No. 40	No. 50
Tool shank size	BT40	CAT50
Feedrate range	2 - 10000 mm/min 0.100 - 393 in/min	1 - 10000 mm/min 0.04 - 393 in/min
Rapid traverse rate	30000 mm/min (XY) - 24000 mm/min (Z) 1181 in/min (XY) - 945 in/min (Z)	30000 mm/min (XY) - 24000 mm/min (Z) 1181 in/min (XY) - 945 in/min (Z)
Tool selection	Random memory	Random memory
Maximum tool diameter	80 mm (150 w/empty pockets) 3.15 inches (5.9 w/empty pockets)	105 mm 4.1 inches
Maximum tool length	300 mm 11.8 inches	350 mm 13.75 inches
Maximum tool weight	6 kg 13 lbs	20 kg 44 lbs

Tabla 2. Ejemplo de especificaciones generales de un centro de mecanizado CNC vertical y horizontal, [SMID03].

4.3.2.1. Fresadoras o centros de mecanizado horizontales

Los centros de mecanizado CNC horizontales se utilizan principalmente para la fabricación de piezas cúbicas, donde la mayoría del mecanizado debe realizarse en más de una cara. Hay muchas aplicaciones en esta área, los ejemplos comunes son piezas grandes, como carcasas de bombas, cajas de engranajes, colectores, bloques de motores, etc. Los centros de mecanizado horizontales siempre incluyen una mesa de indexación especial y, por lo general, están equipados con un cambiador de herramientas y otras características, véase Figura 36. La gran diferencia que existe entre una fresadora horizontal y vertical es que en el caso de las horizontales, éstas utilizan fresas cilíndricas que se montan sobre un eje horizontal accionado por el cabezal de la máquina y apoyado por un extremo sobre dicho cabezal y por el otro sobre un rodamiento situado en el puente deslizante llamado carnero; mientras que las verticales lo harán sobre un eje vertical.



Figura 35. Ejemplo de una fresadora CNC Horizontal [DIRE23].

Debido a su flexibilidad y complejidad, los centros de mecanizado CNC horizontales tienen un precio significativamente más alto que los centros de mecanizado CNC verticales. Desde el punto de vista de la programación, existen varias diferencias únicas, principalmente relacionadas con el cambiador automático de herramientas, la mesa de indexación y, en algunos casos, con los accesorios adicionales. Todas las diferencias son relativamente menores y en general, escribir un programa para los centros de mecanizado horizontales no difiere mucho de escribir un programa para los centros de mecanizado verticales.

4.3.2.2. Fresadoras o centros de mecanizado verticales

Los centros de mecanizado vertical se utilizan principalmente para el tipo de trabajo plano, como placas, donde la mayoría del mecanizado se realiza en una sola cara de la pieza. En estas fresadoras, el eje del husillo está orientado verticalmente, perpendicular a la mesa de trabajo

y las fresas de corte se montan en el husillo y giran sobre su eje, véase Figura ???. En general, puede desplazarse verticalmente, bien el husillo, o bien la mesa, lo que permite profundizar el corte.



Figura 36. Ejemplo de una fresadora CNC Vertical [DIRE23].

También se puede utilizar un centro de mecanizado CNC vertical con un cuarto eje opcional, normalmente un cabezal giratorio montado en la mesa principal. El cabezal giratorio se puede montar tanto vertical como horizontalmente, según los resultados deseados y el tipo de modelo. Este cuarto eje se puede utilizar para la indexación o un movimiento rotatorio completo. En combinación con un contrapunto (generalmente suministrado), el cuarto eje en la configuración vertical se puede utilizar para mecanizar piezas largas que necesitan apoyo en ambos extremos. La mayoría de los centros de mecanizado vertical suelen ser de tres ejes.

Desde la perspectiva de la programación, hay al menos dos elementos que vale la pena mencionar. Primero, en un centro de mecanizado vertical la programación siempre se realiza desde el punto de vista del cabezal, no del operador. Eso significa que la vista es como mirar directamente hacia abajo, a noventa grados hacia la mesa de la máquina para el desarrollo del movimiento de la herramienta. Por tanto, los programadores siempre ven la parte superior de la pieza. Segundo, varios marcadores ubicados en algún lugar de la máquina muestran el movimiento positivo y negativo de los ejes de la máquina. Estos indican direcciones de operación, no direcciones de programación. De hecho, normalmente las direcciones de programación son exactamente opuestas a los marcadores en la máquina herramienta.

4.4. CMV *Hartford HV-35*

A continuación, se van a detallar las características generales de la máquina física del LSITF del ICAI que se pretende virtualizar. En concreto, la máquina es un centro de mecanizado vertical con tres ejes de la marca *Hartford* y el modelo es *HV-35*, véase Figura 37. Además se corresponde con un CMV de banco fijo o de bancada, es decir, que en este caso la mesa de trabajo se mueve de manera perpendicular al husillo mientras que el husillo se mueve paralelamente a su propio eje.



Figura 37. Vista frontal del CMV HV-35 del LSITF del ICAI.

Así, el centro de mecanizado vertical de tres ejes *Hartford HV-35* es una máquina herramienta de alta precisión y rendimiento diseñada para realizar operaciones de mecanizado en piezas metálicas. Posee todas las características ya descritas para los centros de mecanizado vertical y las especificaciones concretas descritas en la Tabla 3, véase Figura 38.

Model	HV-35
A.C.	220V $\pm$ 10 %
Phase	3P
Freq.	50/60 HZ
Power	20 KVA
Hyd.	
Air	6.5kg/cm ² (92psi)
Wgt	4200KG

Figura 38. Placa de características del CMV HV-35.

ESPECIFICACIONES GENERALES DEL C.M.V. <i>Hartford</i>	
Marca	<i>Hartford</i>
Modelo	HV-35
País Fabricación	Taiwán
Año Fabricación	1995
Tipología	Centro de Mecanizado Vertical (C.M.V.)
Estructura	De banco fijo o de bancada
Nº Ejes Principales	3 (X, Y, Z)
Dimensiones Brutas	1800 x 1240 x 1415 mm
Peso	4200 kg
Dimensiones Mesa de Trabajo	810 x 400 mm
Máximas Revoluciones Husillo	8000 rpm
Nº Herramientas Cambiador	16
Tensión/Voltaje	220V $\pm$ 10% (A.C.)
Fase	Trifásico (R-S-T-N)
Frecuencia	50 Hz (ó 60Hz)
Potencia	20 KVA
Presión Aire	6.5 kg/cm ²
Control CNC	<i>Siemens Sinumerik 828D</i> (Curso 2017-2018)

Tabla 3. Especificaciones generales del CMV HV-35.

La máquina se apoya sobre una base trapezoidal que conduce las virutas del mecanizado hacia un cajón en el cual se almacenan para después poder desecharlas. Por otro lado, el centro de mecanizado *Hartford HV-35* cuenta con un sistema de control CNC avanzado que permite la programación y el control preciso de las operaciones de mecanizado, véase Figura 39. Este control varía en función del comprador ya que pueden integrarse diferentes controles a este mismo modelo. En todos ellos, el operador puede programar las coordenadas, velocidades de corte, avances y otros parámetros utilizando un *software* específico, lo que proporciona una mayor flexibilidad y repetibilidad en la producción de piezas. En el siguiente capítulo se detallará con mayor precisión el control de la máquina del LSITF del ICAI y su *software*.



Figura 39. Control CNC del CMV HV-35.

Con respecto al sistema de refrigeración la máquina posee un circuito por el que circula el líquido refrigerante que en normalmente en estos casos se utiliza taladrina. La taladrina desempeña un papel fundamental en el proceso de mecanizado ya que se utiliza tanto para lubricar como para enfriar la herramienta de corte y la pieza de trabajo durante el mecanizado. Uno de los principales beneficios de la taladrina es su capacidad para actuar como una barrera entre la herramienta de corte y la pieza de trabajo, reduciendo la fricción y el desgaste. Esto no solo prolonga la vida útil de la herramienta, sino que también mejora la calidad del mecanizado al reducir el riesgo de astillamiento o roturas. Además, absorbe eficientemente el calor producido por las operaciones de mecanizado y evita el sobrecalentamiento tanto de la herramienta como de la pieza. Esto es esencial para mantener la integridad de las piezas y prevenir deformaciones o daños térmicos. Por otro lado, la taladrina posee una gran capacidad para eliminar las virutas y partículas generadas durante el proceso de mecanizado y actúa como un agente de enjuague, transportando y eliminando las virutas de manera efectiva. Esto es crucial para evitar obstrucciones y mantener una operación fluida y eficiente. Otro de los beneficios de la taladrina es que reduce la vibración durante el mecanizado y mejora la precisión y la calidad del acabado logrando tolerancias más ajustadas y acabados más suaves en las piezas. La composición exacta de la taladrina puede variar según las necesidades y requisitos específicos de la aplicación. Por lo general, está compuesta por una combinación de aceites, aditivos y agua. La proporción de agua puede ajustarse para alcanzar el nivel de enfriamiento deseado. Por otro lado, la máquina posee un circuito eléctrico y un circuito de aire comprimido que proporcionan la potencia y la energía necesarias para que la máquina pueda funcionar y realizar el mecanizado.

La máquina se puede dividir en dos partes principales: la estructura exterior o envoltorio de la máquina y la parte interior compuesta por el área de trabajo o zona de corte.

4.4.1. Estructura exterior

En cuanto a los principales elementos estructurales que forma la capa exterior cabe destacar que este modelo en concreto cuenta con una estructura sólida y rígida que proporciona estabilidad y rigidez durante las operaciones de mecanizado. Esta estructura o carcasa garantiza una mayor precisión y una menor vibración durante el proceso de corte, véase Figura 37 y 40 y protege el área de trabajo. Sobre esta cubierta se apoyan los demás elementos estructurales, básicamente puertas y ventanas. En concreto hay dos ventanas frontales insertas en la propia estructura y dos puertas frontales izquierda y derecha que se abren para facilitar el ajuste y se cierran durante el proceso de mecanizado para que no se escape ningún resto o elemento durante el proceso de mecanizado. Además, posee dos puertas laterales idénticas que permiten seguir el proceso de mecanizado y facilitan la manipulación en el área de trabajo. Todos estos elementos pueden observarse tanto en la figura de la vista frontal, véase Figura 37, así como en la vista lateral de la máquina, véase Figura 40.



Figura 40. Vista del perfil izquierdo del CMV HV-35.

En cuanto a los materiales de fabricación, la estructura exterior esta hecha de chapa de acero de dos milímetros de espesor a la que se le ha realizado un acabado superficial con una pintura satinada en tonos *beige* o marfil que sirve para proteger la superficie de la máquina. Otros materiales que se encuentran en el exterior de la máquina son polímeros para los tiradores de las puertas y ventanas, vidrio templado para las ventanas y puertas y caucho para el marco de las mismas.

4.4.2. Estructura interior

Con respecto al interior de la máquina cabe destacar los siguientes elementos:

Guías lineales verticales

Son la base del eje *Z*. Se trata de unas guías lineales verticales y fijas fabricadas en fundición gris y ancladas a la pared interior trasera de la máquina mediante un súper acabado denominado cola de milano, véase Figura 41. Su función, como su propio nombre indica, es servir de guía para que la torre deslice verticalmente a lo largo del eje *Z*.



Figura 41. Guías lineales verticales del CMV HV-35.

Torre

Consiste en una torre que desliza verticalmente a lo largo del eje Z , en cuya base se encuentra el cabezal donde se insertan las herramientas de trabajo, véase Figura 42. La torre está compuesta por una chapa de acero de dos milímetros de espesor mientras que el cabezal es de fundición gris para garantizar la precisión. Este elemento se desliza por el eje Z y en él está el husillo que proporciona la rotación del cabezal a través del eje de S , *spindle*, en torno al cual se produce el movimiento de rotación de la herramienta utilizada en cada momento del mecanizado. El husillo puede alcanzar velocidades de rotación ajustables para adaptarse a diferentes materiales y requisitos de mecanizado.



Figura 42. Torre del CMV HV-35.

Carro transversal

Consiste en unas guías horizontales fijas en los extremos y que se pliegan unas sobre otras en la dirección transversal generando el desplazamiento absoluto en el eje Y , véase 43. De nuevo, para favorecer la precisión de la máquina, estas guías están fabricadas en fundición gris.



Figura 43. Carro transversal del CMV HV-35 .

Carro longitudinal

Se trata de unas guías horizontales fijas en los extremos que se pliegan unas sobre otras en la dirección longitudinal generando el desplazamiento relativo en el eje X , véase Figura 44. Al igual que en carro transversal, para favorecer la precisión de la máquina, estas guías están fabricadas en fundición gris. La característica principal de este carro es que está montado sobre el carro transversal y gracias a este acoplamiento entre ambos permiten el movimiento a lo largo del todo el plano XY .



Figura 44. Carro longitudinal del CMV HV-35 .

Mesa de trabajo

Este elemento de fundición gris está anclado al carro longitudinal. Su movimiento se desarrolla a lo largo del plano XY y posee tres ranuras en “T” con dos elementos o utillajes de sujeción que aseguran la pieza de trabajo durante las operaciones de mecanizado, véase Figura 45. Gracias al acoplamiento entre los ejes X e Y , se permite el movimiento de la mesa a lo largo de todo el plano XY manteniendo siempre fija la cota vertical en el eje Z . Por esta razón la estructura de este CMV se denomina de banco fijo o de bancada.



Figura 45. Mesa de trabajo del CMV HV-35.

Brazo del cambiador automático de herramientas

Consiste en una estructura conformada en chapa de acero de dos milímetros de espesor anclada a la esquina izquierda trasera de la máquina. En su extremo terminal está unida al cambiador automático de herramientas y su función es la de proteger el cambiador, soportar su peso y desplazarlo hacia el cabezal de la torre cuando sea necesario realizar un cambio de herramientas, véase Figura 46. Todos estos movimientos se realizan siempre en la misma cota del eje Z.



Figura 46. Brazo del cambiador automático de herramientas del CMV HV-35.

Cambiador automático de herramientas

Este modelo está equipado con un cambiador automático que permite la rápida y eficiente sustitución de las herramientas de corte, véase Figura 47. Esto reduce el tiempo de inactividad entre operaciones y mejora la productividad general de la máquina. En concreto, este cambiador es una estructura de forma circular fabricada en fundición gris formada por dieciséis *pockets* o bolsillos donde se introducen y cargan las herramientas de corte.



Figura 47. Cambiador automático de herramientas del CMV HV-35.

Además, estos bolsillos o *pockets* en los que se encuentran potentes herramientas que proporcionan una gran variedad de operaciones para realizar en la pieza de trabajo, véase Figura 48. Esta es una de las restricciones principales de la máquina ya que al tener sólo dieciséis únicamente se pueden intercambiar dieciséis herramientas por lo que si durante el proceso de mecanizado hicieran falta más herramientas habría que detener el proceso y cambiar las herramientas necesarias dentro de los *pockets* para que el cambiador automático las pueda seleccionar al continuar con el proceso de mecanizado. Como es lógico pensar esto añade un tiempo extra superior al proceso de fabricación que se podría reducir considerablemente si la máquina tuviera más bolsillos. Para el cambio de herramientas, el cambiador presenta un movimiento de rotación sobre su eje el cual permite posicionar el bolsillo de manera adecuada para producir el cambio.

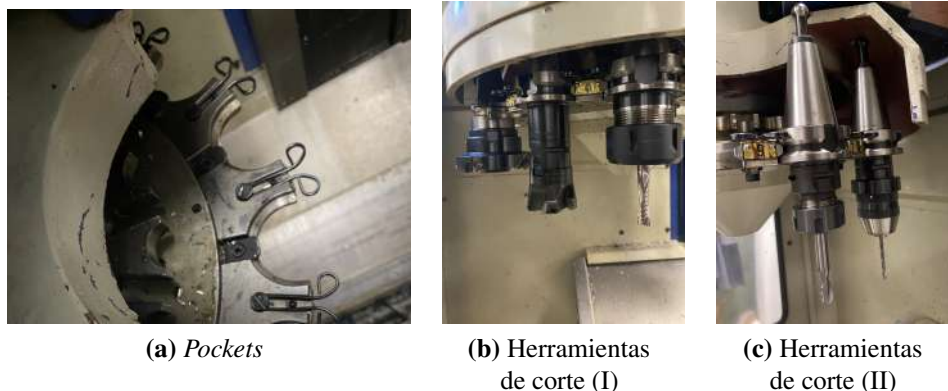


Figura 48. *Pockets* y herramientas del CMV HV-35 del LSITF del ICAI.

4.4.3. Ejes

Los tres ejes de la máquina X , Y , Z definen la cinemática de la misma. En este caso, el eje Z subyace a lo largo de la dirección vertical de la máquina siendo el sentido positivo hacia arriba y el sentido negativo hacia abajo, véase Figura 49. Además, se apoya sobre las guías de la torre que marcan su dirección y a lo largo de él se mueve la propia torre que está insertada en dichas guías.

Por otro lado, el eje Y subyace en la dirección transversal o lado corto de la máquina. Se considera el sentido positivo del movimiento si éste tiene lugar hacia el interior de la máquina y sentido negativo si éste es hacia el exterior, véase Figura 49. Además, este eje se apoya sobre

una base conformada por unas guías que deslizan longitudinalmente y mueven los elementos apoyados sobre él.

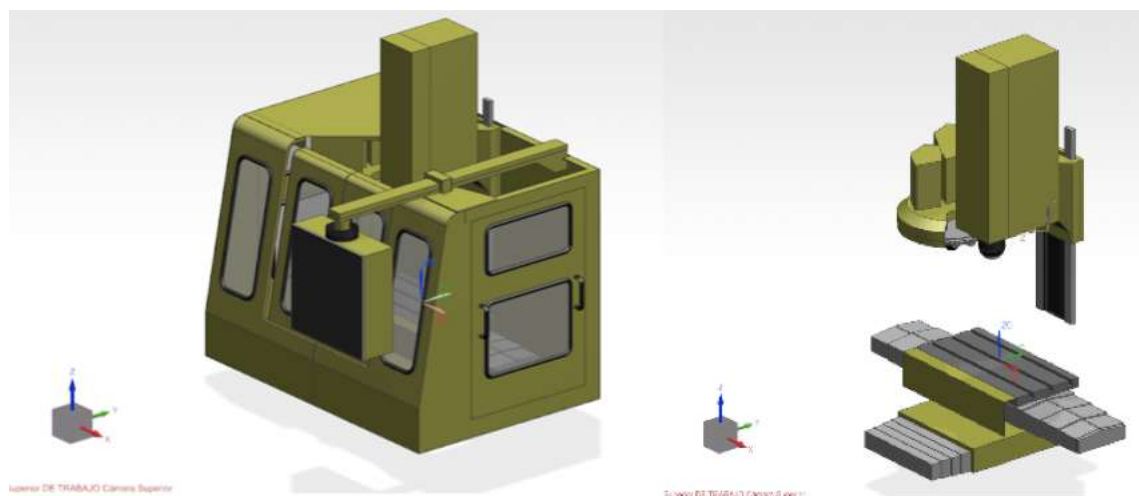


Figura 49. Ejes principales del CMV HV-35.

De manera análoga, el eje X subyace a lo largo de la dirección longitudinal o lado largo de la máquina. En este caso, se considera el sentido positivo hacia la derecha y el sentido negativo hacia la izquierda, siempre viendo la máquina desde la parte frontal, véase Figura 49. Además, este eje está montado sobre el eje Y y sobre él está anclada la mesa de trabajo. Gracias al acoplamiento entre estos dos ejes se puede desplazar la mesa a cualquier punto de alcance de la máquina, véase Tabla 4.

ESPECIFICACIONES DE LOS EJES DEL C.M.V. <i>Hartford</i>				
Nº Ejes Principales	3			
Denominación Ejes Principales	X, Y, Z			
Tipología Ejes Principales	Lineales			
LÍMITES DE LOS EJES DEL C.M.V. <i>Hartford</i>				
EJE	Límite Superior (L ⁺)	Límite Inferior (L ⁻)	Recorrido Teórico (R _T)	Recorrido Real (R _R)
Eje X	156.000 mm	673.000 mm	500.000 mm	517.000 mm
Eje Y	30.000 mm	430.000 mm	400.000 mm	400.000 mm
Eje Z	116.300 mm	639.500 mm	510.000 mm	523.200 mm

Tabla 4. Especificaciones de los ejes del CMV HV-35.

Capítulo 5

Control CNC

EN este capítulo se pretende hacer un estudio un poco más detallado sobre el control de las máquinas CNC. Así se estudiarán desde el punto de vista teórico las principales características de estos controles, incluyendo las principales funciones de los mismos y los distintos tipos de control numérico que puede tener una máquina. Además, se ha añadido una sección en la que se detalla el control numérico de la máquina física que se encuentra en el LSITF del ICAI y que se pretende virtualizar. Y por último, se habla del *software VNCK* necesario para la integración del control digital en la máquina virtual y su conexión con la parte física.

5.1. Descripción

Uno de los elementos principales de una máquina CNC es el control CNC. Éste es el que dirige de manera automatizada los movimientos de la máquina y por tanto, la fabricación de las diferentes piezas. Así, el control numérico interpreta el código generado mediante un ordenador y ordena ejecutar la secuencia de órdenes a la máquina CNC. En estos sistemas, la posición de la herramienta se define mediante un conjunto de instrucciones denominado programa de pieza. El control de posicionamiento se maneja mediante un sistema de circuito abierto o de circuito cerrado. En un sistema de lazo abierto, la comunicación tiene lugar en una sola dirección: desde el controlador hasta el motor. En un sistema de circuito cerrado, se proporciona retroalimentación al controlador para que pueda corregir los errores de posición, velocidad y aceleración, que pueden surgir debido a variaciones en la carga o la temperatura. Los sistemas de circuito abierto son generalmente más baratos pero menos precisos. Los motores paso a paso se pueden usar en ambos tipos de sistemas, mientras que los servomotores solo se pueden usar en sistemas cerrados.

En una analogía con el cuerpo humano, se puede afirmar que el control CNC es el cerebro de la máquina CNC, su centro neurálgico. Todas las velocidades de la máquina, avances, movimientos de los ejes y cientos de otras tareas están programadas por un programador CNC y controladas por una computadora que es una parte importante de la unidad CNC, véase Figura 50. Hacer un programa para una máquina herramienta CNC significa hacer un programa para el sistema de control. Es cierto que la máquina herramienta también es una consideración importante, pero es la unidad de control la que determina el formato del programa, su estructura y su sintaxis.

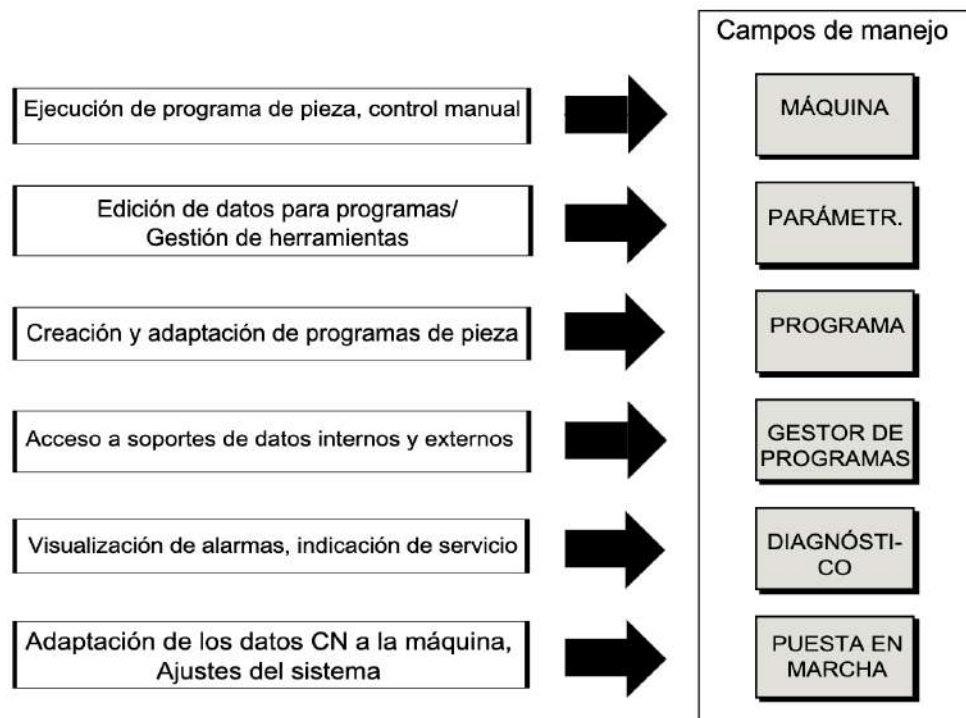


Figura 50. Funciones principales de un control CNC, [SIEM17].

Para comprender completamente el proceso de programación CNC, es importante comprender no solo las complejidades de cómo mecanizar una pieza, qué herramientas seleccionar, qué velocidades y avances usar, cómo configurar el trabajo y muchas otras características. Así, es igualmente importante saber cómo funciona realmente el control CNC. Los fabricantes de máquinas agregan su propio panel de operación, con todos los interruptores y botones necesarios para operar la máquina CNC y todas sus funciones, véase Figura 51. Todo esto dependerá del fabricante del control y del modelo que normalmente es independiente de la máquina, así los principales fabricantes son: *Fanuc*, *Siemens Sinumerik*, etc.

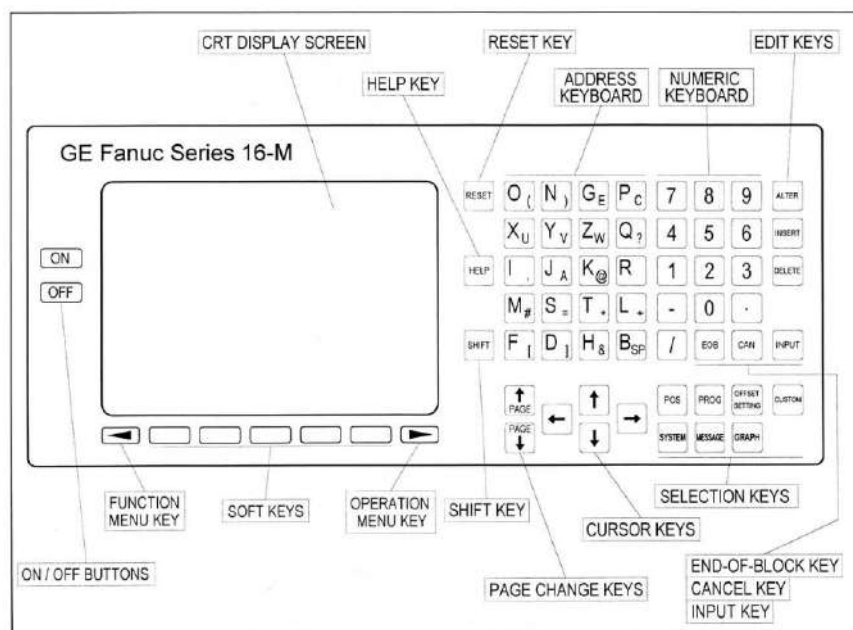


Figura 51. Ejemplo de una pantalla típica de un control CNC *Fanuc*, [SMID03].

La información que establece la conexión integrada entre el control CNC y la máquina se almacena como datos especiales en registros internos, llamados parámetros del sistema. Cuando se muestra la pantalla de parámetros, muestra el número de parámetro con algunos datos en una fila. Cada fila de números representa un *byte*. Muchos ajustes de parámetros almacenados en el control en el momento de la compra han sido ajustados por el fabricante aunque éstos se pueden modificar si el operario lo desea. El conjunto de valores de parámetros establecidos en el momento de la instalación se denomina configuración predeterminada. Algunas configuraciones se pueden personalizar cambiando la configuración de un parámetro, tales configuraciones se volverán permanentes y crearán un nuevo “predeterminado”.

Los programas CNC se pueden almacenar en la memoria de control y su tamaño varía en función del modelo y del fabricante. Esta capacidad de memoria se mide de varias maneras, originalmente como la longitud equivalente de cinta en metros o pies, últimamente como el número de bytes capaz de almacenar. La capacidad de memoria del sistema de control debe ser lo suficientemente grande como para almacenar regularmente el programa CNC más largo esperado.



Figura 52. Conexión entre control CNC del LSITF del ICAI y el ordenador.

En la actualidad, aunque se ha aumentado considerablemente la capacidad de memoria del control ésta se suele sustituir por la de un ordenador, véase Figura 52. Así, se necesita establecer una conexión entre el control y el ordenador, y gracias a ella se puede enviar el código al control sin necesidad de que éste tenga que almacenar el mismo. Para esta operación, se requiere un *software* de comunicación y cableado que conecte el ordenador con el control CNC. Este método a menudo se denomina “alimentación por goteo” o “entrada *bit a bit*”. Cuando se opera desde la computadora personal, el programa CNC puede ser tan largo como la capacidad del dispositivo de almacenamiento, generalmente el disco duro; lo cual permite almacenar códigos más pesados.

Como toda máquina, el control CNC posee varios sistemas de emergencia que interrumpen un programa en medio del procesamiento, véase Figura 53. Los métodos más comunes son los interruptores de palanca o pulsadores para una operación de un solo bloque, la retención de alimentación y la parada de emergencia. Todos estos siguen los cánones usuales de seguridad de las máquinas y permiten que el proceso de fabricación sea fiable y duradero.

Entre los principales controles CNC de *Fanuc* se encuentran los modelos: *Serie Fanuc Oi*, *Serie Fanuc 30i/31i/32i* y *Serie Fanuc Oi Mate*. El primero de ellos, se corresponde con un modelo más general y se utiliza en una amplia gama de máquinas CNC; mientras que el segundo

se utiliza en máquinas más complejas y avanzadas y el último es un modelo más compacto y económico para máquinas de menor tamaño y sencillas.

Por otro lado, *Siemens Sinumeric* ha desarrollado dos modelos principales: 840D sl y 8282D. En este caso, el primero se corresponde con un modelo de control CNC de alto rendimiento para aplicaciones de mecanizado complejas, como torneado, fresado y rectificado; mientras que el segundo es un control CNC versátil para máquinas de tamaño medio, con funciones avanzadas y capacidad de programación sencilla. Este último modelo es el control que utiliza la máquina del LSITF del ICAI.

Otro fabricante de controles CNC a destacar es *Heidenhain*, el cual ha desarrollado principalmente dos modelos: TNC 640 y TNC 620. El primero es un control avanzado con capacidades de interpolación de alta velocidad, control adaptativo y programación conversacional mientras que el segundo modelo es un control de alto rendimiento para aplicaciones generales de mecanizado, con capacidad de programación sencilla y funciones avanzadas.



Figura 53. Ejemplo de una pantalla típica de un control CNC *Haas*, [AIMH23].

Hay muchos otros fabricantes de controles CNC como son *Mitsubishi Electric*, *Haas Automation*, etc., véase Figura 53. Todos éstos fabrican sus propios modelos que también se utilizan en diversas máquinas CNC aunque en menor medida que los modelos de los fabricantes anteriormente descritos.

Estos son solo algunos ejemplos de los principales fabricantes de controles CNC y los tipos de controles asociados a cada uno de ellos. Cada fabricante puede ofrecer diferentes modelos y variantes de controles CNC, adaptados para diferentes aplicaciones y necesidades de mecanizado. Es importante consultar las especificaciones y características específicas de cada modelo de control CNC según el fabricante correspondiente para obtener información más detallada.

En general, se puede afirmar que a la hora de crear una máquina virtual y simular la fabricación de una pieza el control no va a tener un gran impacto. Pero cuando este proceso simulado se quiera realizar sobre la máquina física y llevar, por tanto, lo simulado a la realidad, es muy importante tener un buen acoplamiento entre el gemelo digital y el control numérico y aquí surgen la mayoría de complicaciones. En la mayoría de los casos, el paso de lo simulado a la realidad tiene su gran dificultad en la integración del máquina digitalizada y el control virtual y es un aspecto fundamental que hay que tener en cuenta a la hora de diseñarlos. Por ello, es muy importante que la versión del *software* de diseño sea compatible con el *software* del control CNC para que esa integración pueda realizarse sin grandes dificultades.

5.2. Elementos principales

5.2.1. Panel de operador

Independientemente del fabricante, un control CNC tiene dos componentes básicos: el panel de operador, con interruptores y botones pulsadores (véase Figura 54), y una pantalla de visualización con un teclado o un teclado numérico. Dependiendo del tipo de control CNC, existen algunas pequeñas diferencias en el funcionamiento del panel de operaciones de un centro de mecanizado CNC y un torno CNC, pero ambos paneles de operador son similares. Al igual que con cualquier libro de referencia general, siempre es una buena idea verificar las especificaciones y recomendaciones del fabricante. Incluso, muchos sistemas de control tienen características únicas que el operador debe conocer y programar.

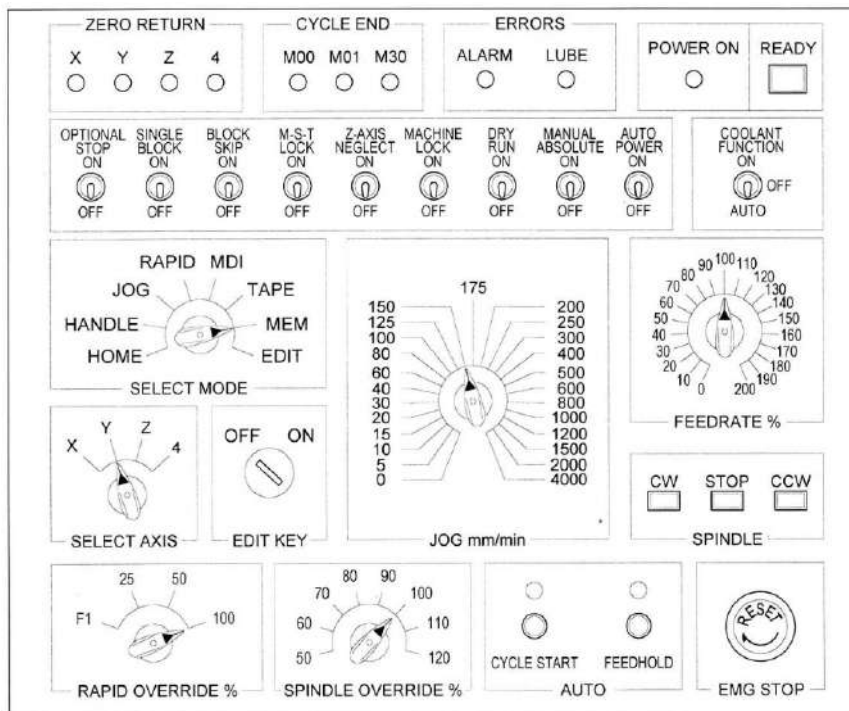


Figura 54. Ejemplo de un panel de operador típico de un control *Fanuc*, [SMID03].

5.2.2. Pantalla de visualización y teclado

El otro elemento principal de un control CNC es la pantalla de visualización con teclado. Así, la pantalla es la “ventana” del control al ordenador. En ella se puede ver cualquier programa activo, incluido el estado del control, la posición actual de la herramienta, varias compensaciones, parámetros e incluso una representación gráfica de la trayectoria de la herramienta. Como es habitual en toda máquina con pantalla de visualización, es posible configurar la misma según las preferencias del operador y así ajustar detalles como el color, el tamaño, el idioma, etc., para tener la visualización deseada en cualquier momento, utilizando las teclas de entrada.

El teclado se utiliza para ingresar instrucciones al control. Los programas existentes se pueden modificar, eliminar o agregar nuevos programas usando el teclado. Además, desde estas teclas se puede controlar el movimiento de los ejes de la máquina, la velocidad del cabezal, la velocidad de avance, e incluso cambiar los parámetros internos y evaluar varios diagnósticos. Así, el teclado y la pantalla se utilizan para establecer el origen del programa y conectarse a dispositivos externos, como una conexión con otro ordenador.

5.2.3. Botonera manual o mando

A efectos de configuración, cada control CNC tiene un mando giratorio que puede seleccionar y mover un eje con el mínimo incremento del sistema de control, véase Figura 55. Asociado con el mando está el interruptor de selección de eje (a menudo duplicado en el panel de operación así como en el mando) y el rango de incremento (que es el incremento mínimo $X1$, $X10$ y $X100$). La letra X en este caso es el multiplicador y significa “ X veces” y moverá el eje seleccionado por X veces el incremento mínimo de las unidades de medida activas.

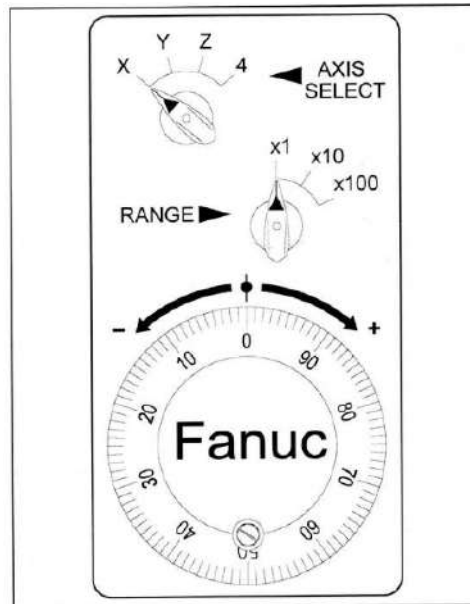


Figura 55. Ejemplo de un panel de operaciones típico de un control CNC *Fanuc*, [SMID03].

5.2.4. Código o lenguaje de programación

Un aspecto importante del control CNC es el programa o código que ordena los movimientos del mismo y aunque no sea esencialmente un aspecto estructural sí que es un elemento primordial del control. El desarrollo de cualquier programa CNC comienza con un proceso cuidadosamente planificado. Dicho proceso comienza con el dibujo de ingeniería (impresión técnica) de la pieza requerida liberada para la producción. Antes de mecanizar la pieza, se deben considerar y evaluar cuidadosamente varios pasos. Cuanto más esfuerzo se ponga en la etapa de planificación del programa, mejores resultados se pueden esperar al final.

El código NC, también conocido como código numérico, es un lenguaje de programación utilizado en máquinas CNC para instruir a la máquina sobre las operaciones de mecanizado que debe realizar en una pieza. Este lenguaje utiliza una serie de comandos y códigos alfanuméricos para describir los movimientos y las acciones que la máquina CNC debe llevar a cabo.

El código NC es generado por un *software* CAM, que toma un modelo o diseño de pieza en formato digital y genera automáticamente las instrucciones de mecanizado necesarias para producir esa pieza. El código NC se compone de una serie de líneas de instrucciones, donde cada línea representa una acción específica, como movimientos de la herramienta de corte, cambios de velocidad, cambios de herramienta, operaciones de corte, entre otros.

Cada máquina CNC tiene su propio conjunto de códigos y comandos específicos que entiende, por lo que el código NC generado por el *software* CAM debe ser compatible con el control de la máquina en la que se realizará el mecanizado. Es en este punto donde entra en juego el

postprocesador, que traduce el código NC generado por el *software* CAM en un formato que la máquina CNC específica pueda entender y ejecutar correctamente.

El principal código de programación NC que se usa en los controles CNC es el código G o *G-code* aunque generalmente se combina con otros tipos de códigos cuya estructura es similar al *G-code*. Este lenguaje permite especificar las operaciones de mecanizado y controlar el movimiento de la herramienta en una máquina CNC. El código G es esencial para controlar el movimiento y el mecanizado en una máquina CNC. Con una comprensión sólida de su estructura y funcionalidades, los programadores pueden utilizar el código G de manera efectiva para crear programas de mecanizado precisos y eficientes. Este lenguaje se compone de una letra G seguida de un número que representa una función o comando específico. Por ejemplo, el comando G00 se utiliza para realizar movimientos rápidos de la herramienta de corte de una posición a otra sin realizar operaciones de mecanizado. Proporciona una forma eficiente de mover la herramienta en la máquina CNC sin perder tiempo en el mecanizado. Además de los movimientos básicos, el código G también permite realizar movimientos circulares utilizando los comandos G02 y G03. El G02 se utiliza para movimientos circulares en sentido horario, mientras que el G03 se utiliza para movimientos en sentido antihorario. Es importante tener en cuenta que los comandos y su sintaxis pueden variar ligeramente según el fabricante y el control CNC específico. Consultar la documentación del fabricante o el manual del control CNC proporcionará una lista completa de los códigos G compatibles y sus funcionalidades específicas.

Otro aspecto importante del código son las coordenadas que éste utiliza para especificar las posiciones y los movimientos de la herramienta de corte en los ejes X, Y y Z. Estas coordenadas se definen en relación con un sistema de referencia establecido en la máquina CNC. Así, las coordenadas del código representan las distancias en cada eje desde un punto de referencia. Este punto de referencia puede ser un origen absoluto, que es una ubicación fija y predeterminada en el espacio de trabajo de la máquina, o un punto de referencia relativo, que se establece durante la operación y se basa en una posición inicial específica. Esto lo podrá ajustar el programador según su conveniencia. El sistema de referencia utilizado en un control CNC se establece mediante los comandos G54, G92 o G92.1.

Además, existen funciones auxiliares M y H definidas por el fabricante de la máquina que entregan parámetros al control y producen allí las reacciones definidas por el fabricante de la máquina.

En resumen, el código NC es el término general que engloba cualquier lenguaje de programación numérica utilizado en máquinas CNC. El código G es un subconjunto específico del código NC que se centra en los comandos y códigos utilizados para controlar los movimientos y operaciones de corte en una máquina CNC. Otros códigos, como el código M (para funciones misceláneas) y el código T (para cambios de herramienta), también forman parte del código NC y complementan el código G para proporcionar instrucciones detalladas a la máquina CNC. Para más información sobre los comandos del código G o de otros códigos puede consultarse el manual del Control *Sinumerik* 828D, véase Anexo E.

5.3. Control *Siemens Sinumerik* 828D

A continuación, se detallará e ilustrarán las características principales del control CNC concreto de la máquina del ICAI: Control *Siemens Sinumerik* 828D. Para este apartado se utilizará el “Manual del usuario” del control, véase [SIEM17].

Como ya se ha comentado, el control de la máquina del laboratorio es el modelo 828D del fabricante *Siemens Sinumerik*, véase Figura 39. Éste es un sistema de control de alta gama que ofrece una amplia gama de funcionalidades y características avanzadas para el mecanizado de precisión.

Una de las grandes ventajas de este control es que posee una interfaz clara e intuitiva que se complementa con una programación conversacional y una gran capacidad de conectividad con sistemas de gestión de la producción, intercambio de datos y monitoreo remoto de las máquinas herramienta. El hecho de usar una programación conversacional es muy relevante ya que dicha programación proporciona una serie de opciones y preguntas que guían al operador a través del proceso de programación, en lugar de tener que escribir todas y cada una de las líneas del código G manualmente. Estas opciones pueden incluir selecciones de herramientas, velocidades y profundidad de corte, puntos de referencia, trayectorias, etc. Así, el operador puede seleccionar las opciones relevantes y proporcionar los parámetros requeridos en un formato más fácil de entender y utilizar. Además, este control es capaz de controlar múltiples ejes simultáneamente, lo que permite operaciones de mecanizado complejas y precisas en piezas de trabajo tridimensionales.

Los elementos principales de este control son: la consola de visualización, integrada a su vez por el panel de operador u operaciones, el panel de mando y la interfaz de usuario (Hombre-Máquina), y la botonera manual o mando.

Panel de operador OP 010, véase Figura 56.

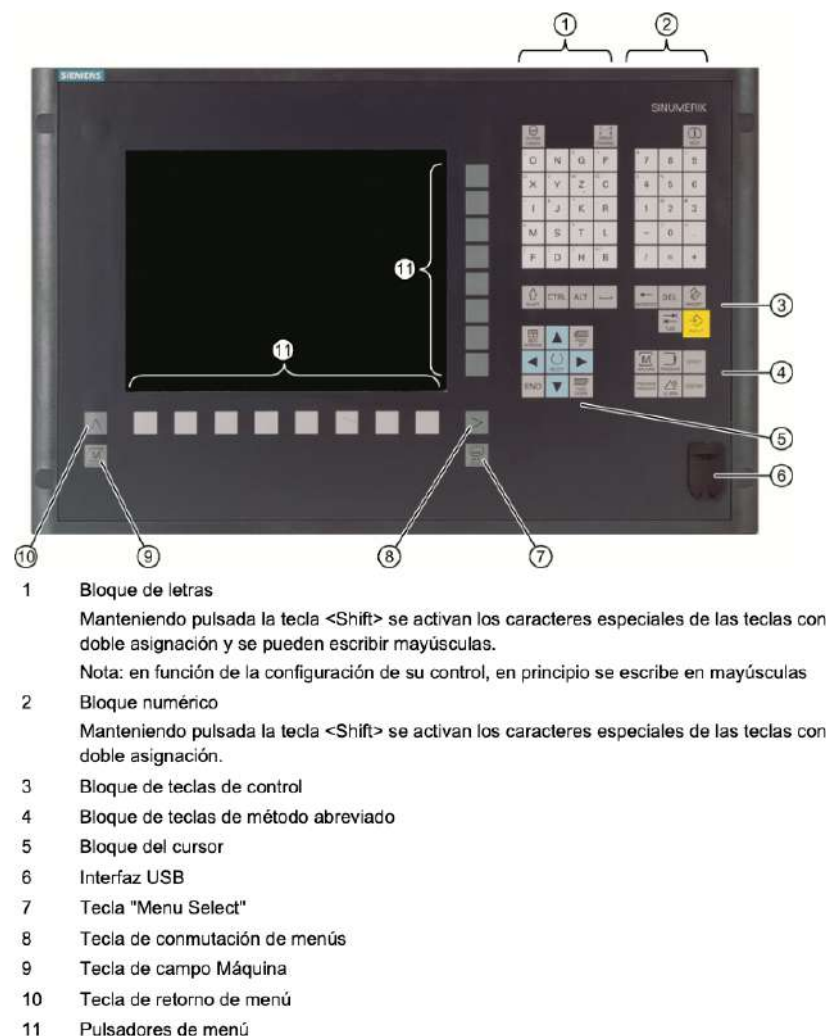


Figura 56. Panel de operador OP 010 Sinumerik 828D, [SINU23].

Panel de mando, véase Figura 57.



Figura 57. Panel de mando *Sinumerik* 828D, [SINU23].

Interfaz usuario (Hombre-Máquina), véase Figura 58.

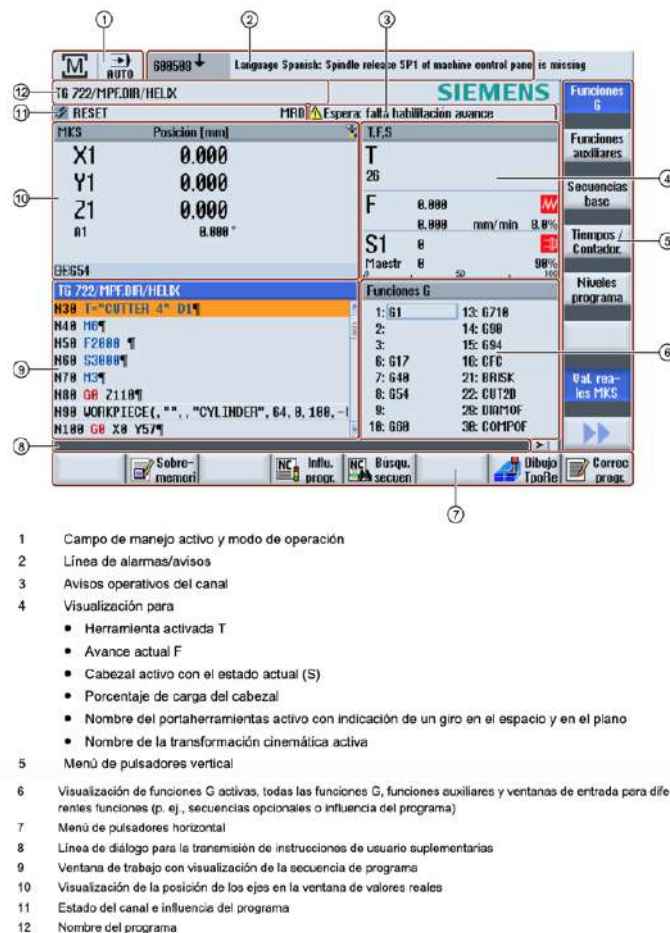


Figura 58. Interfaz usuario (Hombre-Máquina) *Sinumerik* 828D, [SINU23].

Botonera manual, véase Figura 59. Este mando, el cual está unido a la consola de visualización mediante un cable, complementa las operaciones del panel de operador y del

panel de mando para facilitar la labor del operario. En concreto, posee una rueda giratoria en la parte inferior para mover los componentes cinemáticos, un selector de ejes en la parte superior izquierda y un par de botoneras para seleccionar la velocidad de desplazamiento en los ejes en la parte superior derecha. Además, posee varios botones con funciones adicionales preconfiguradas por el usuario. También, incluye una seta de emergencia en su canto superior para realizar una parada de emergencia en caso de que fuera necesario.



Figura 59. Botonera manual, [SINU23].

5.4. Software VNCK

VNCK es un *software* desarrollado por *Siemens* para su sistema de control numérico CNC *Sinumerik* y forma el núcleo virtual del *software* que se ejecuta en el control CNC que se encarga de la interpretación y ejecución de los programas de mecanizado, véase Figura 60. Básicamente, se puede afirmar que el programa actúa como un intermediario entre los códigos de mecanizado y el *hardware* del control CNC.

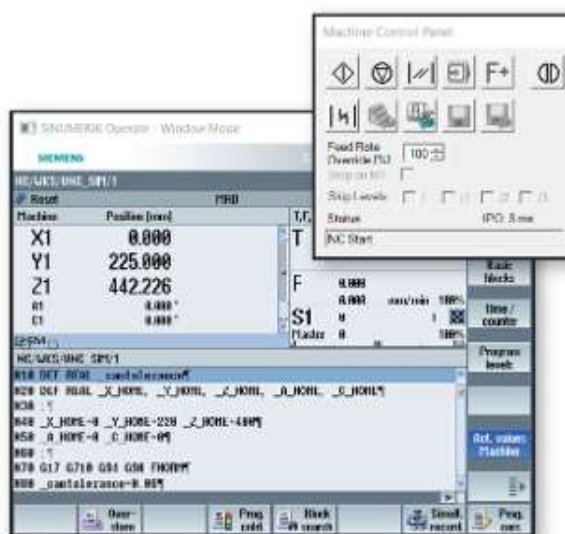


Figura 60. Ejemplo de interfaz típica del VNCK.

Por ello, este *software* recibe los programas de mecanizado, que generalmente están escritos en código G, y los interpreta para controlar los movimientos y operaciones de la máquina herramienta. También, se encarga de funciones críticas como el control de ejes, la interpolación de movimientos, la sincronización de movimiento y el monitoreo de condiciones de seguridad, proporcionando así una interfaz de comunicación eficiente entre el *software* de programación y el *hardware* del control CNC, véase Figura 61.

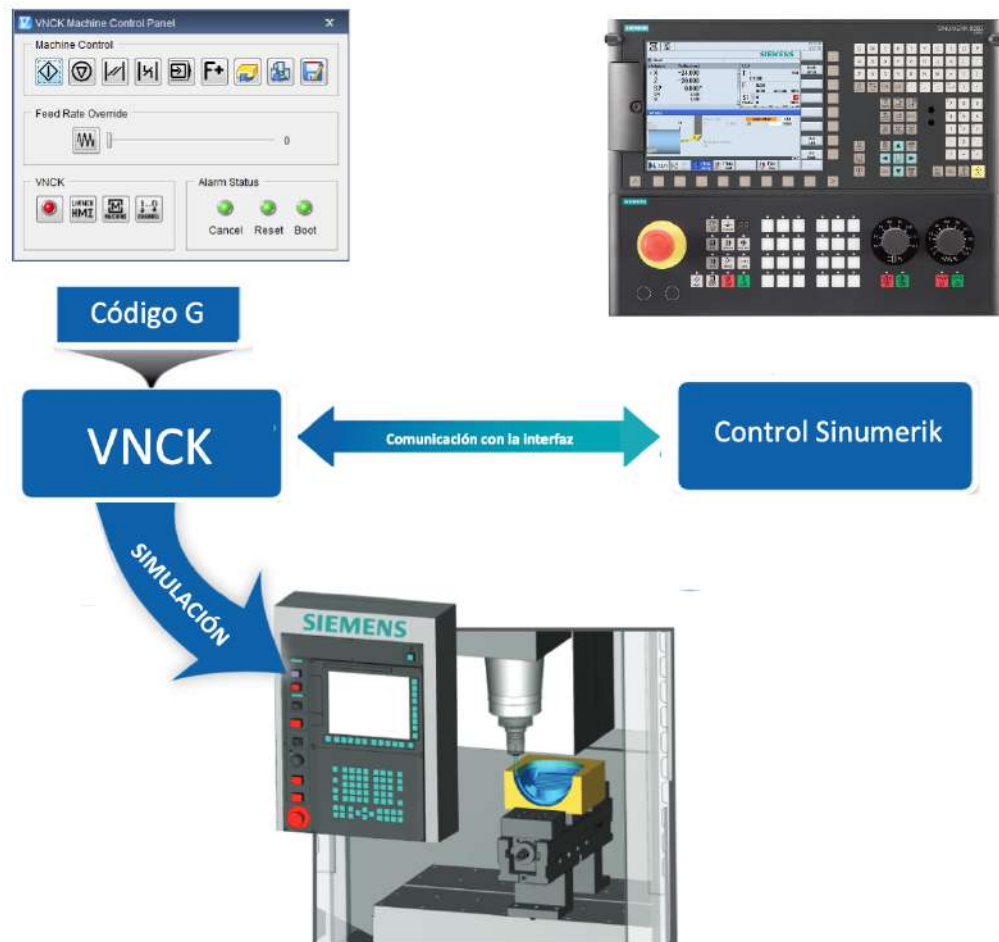


Figura 61. Integración de VNCK dentro del control CNC.

Gracias a VNCK, el usuario puede tener una primera aproximación de un gemelo digital de la máquina CNC y de su control *Sinumerik*, independiente del estado y la disponibilidad de una máquina CNC real, véase Figura 62. Esto le permitirá planificar, optimizar y verificar los pasos de producción en este entorno virtual. Además, al utilizar este *software* en una máquina virtual y un entorno de producción virtual, los usuarios de máquinas herramienta tienen el nivel de seguridad necesario para optimizar la preparación de sus trabajos y la utilización de sus máquinas. Solo así se pueden verificar y evaluar los programas, evitando posibles errores de programación y colisiones. Este diseño será una primera aproximación de un gemelo digital ya que después faltará incluir todo lo relacionado con la interconexión del mismo dentro de una fábrica digital.



Figura 62. Ejemplo de integración entre *Siemens NX* y VNCK [SIEM23].

Capítulo 6

Virtualización del CMV *Hartford HV-35*

EN este capítulo se detalla el procedimiento seguido para la digitalización del centro de mecanizado vertical de tres ejes *Hartford HV-35* del LSITF del ICAI. Uno de los objetivos de este capítulo es ilustrar los pasos y seguidos para que este estudio pueda ayudar a otros a virtualizar otras máquinas. Es muy importante tener en cuenta que para este capítulo se van a necesitar todos los detalles y especificaciones anteriormente descritos.

6.1. Instalación

El primer paso para la digitalización de una máquina es la instalación de los *softwares* necesarios para la simulación éstos son *Siemens NX* 1926 y *VNCK*, v.4.7.4, versiones compatibles con la máquina del ICAI. En este caso se va a detallar la instalación de ambos programas ya que no ha sido un paso sencillo y hay bastantes detalles a tener en cuenta para que luego se pueda integrar y simular bien tanto el gemelo digital como la máquina y el control CNC.

En principio, se podría haber escogido otra versión tanto de *Siemens NX* como de *VNCK*. Pero la restricción de ambos *softwares* la impone la máquina y el control real ya que a la hora de virtualizarlos se necesita instalar un *plugin* que incluye tres plantillas (un torno, una fresadora de tres ejes y una fresadora de cinco ejes). Este *plugin* es el que necesita ciertas versiones, es decir, que para disponer de estas plantillas se necesita *Siemens NX* 1926 y *VNCK* v.4.7.4, cualquier otra combinación no funcionará.

6.1.1. *Siemens NX* 1926

El primer aspecto importante para la instalación de *Siemens NX* 1926 es el hecho de que esta versión ya está obsoleta y por tanto el primer reto con el que se encuentra el usuario es el de encontrar los archivos de instalación de esta versión concreta de *Siemens NX*. En este caso, el modo de solventarlo fue a través del personal del Servicio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (STIC del ICAI) que proporcionaron los archivos de la instalación del programa tras haberse puesto en contacto con la propia empresa. Para obtener las licencias pertinentes fue necesario hacerlo a través del servidor de licencias propios del STIC del ICAI.

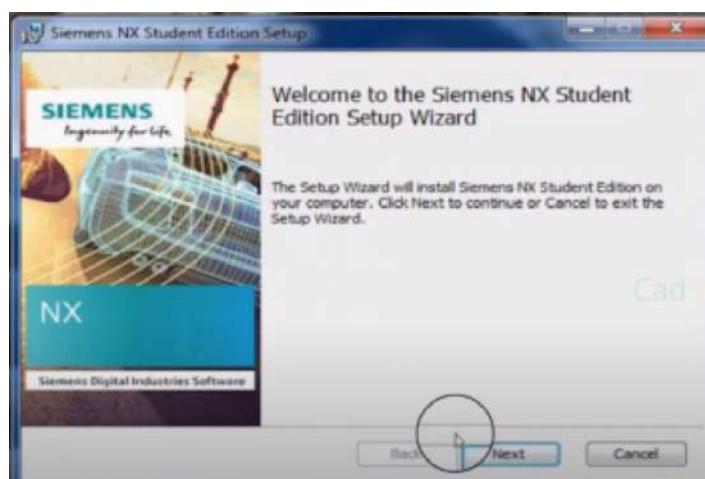


Figura 63. Instalador *Siemens NX* 1926.

Así, una vez que se han obtenido los archivos de instalación, se procede a ejecutar la instalación, siguiendo atentamente los pasos proporcionados por el instalador, véase Figura 63. En este punto, se debe tener especial atención al directorio de instalación asignado por defecto, ya que tanto la carpeta como la ruta del directorio no pueden contener espacios, acentos o símbolos específicos. Por ello, se recomienda ubicar el programa en el disco duro *C*, véase Figura 64. Es crucial tener en cuenta este aspecto, ya que *Siemens NX* es un programa de origen alemán y en dicho idioma no se necesita considerar estas limitaciones con lo que el fabricante no advierte sobre este problema. Si no se realiza el cambio, en el caso de que el ordenador esté en español, el programa se instalará por defecto en la carpeta “Archivos de programa”, que, aunque el instalador no contenga espacios ni símbolos, se encuentra en una ruta con espacios. Este hecho no se manifestará hasta que se ejecute el programa y, en ese momento, no será capaz de detectar el error. Por tanto, es fundamental tomar las precauciones necesarias y modificar la ruta de instalación para evitar este problema. Para más información acerca de los pasos a seguir para la instalación del software *Siemens NX* consultar en <https://support.academicsoftware.eu/hc/es/articles/4406151292689-Cómo-instalar-Siemens-NX-Student-Edition>.

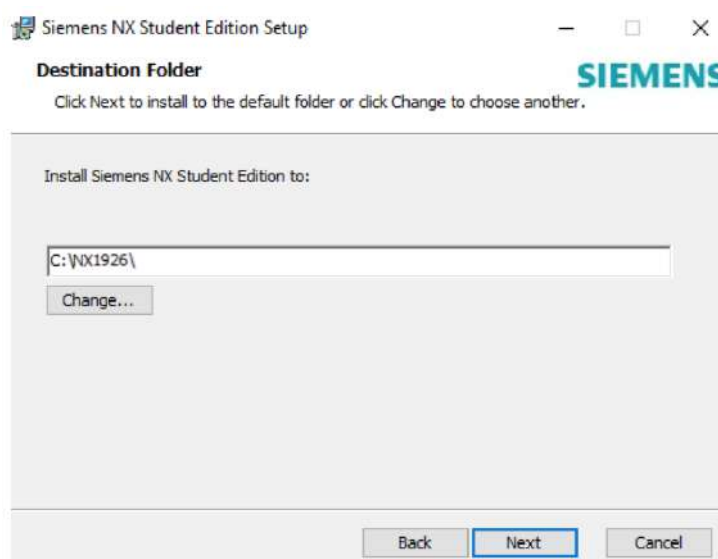
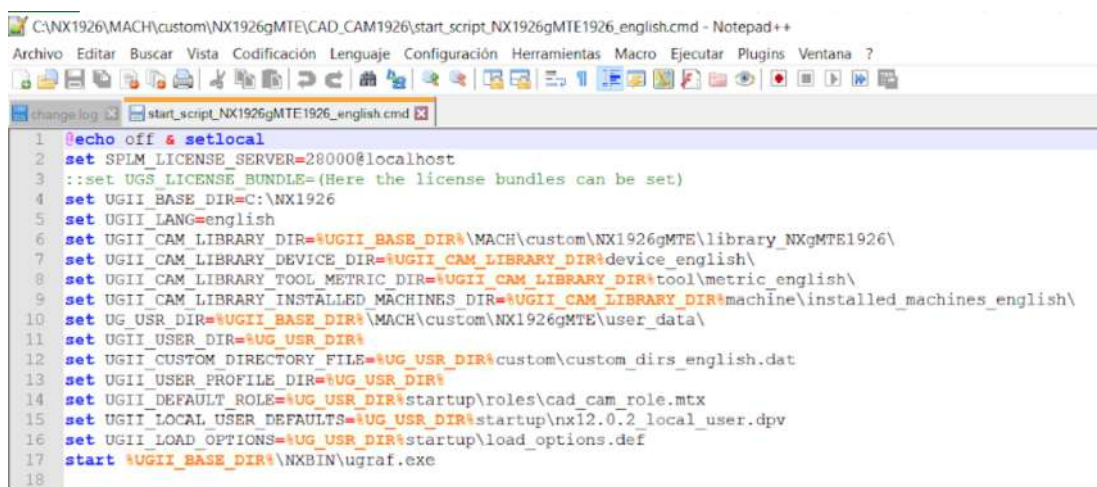


Figura 64. Ubicación *Siemens NX* 1926.

Además de instalar el programa se ha tenido que instalar también un *script* el cual carga una preconfiguración de inicio determinada del programa. La importancia de utilizar este *script* reside principalmente en que, entre otras cosas, éste es el encargado de enlazar correctamente los directorios de los archivos que se van a utilizar, véase Figura 65.



```

1 @echo off & setlocal
2 set SPLM_LICENSE_SERVER=28000@localhost
3 ::set UGS_LICENSE_BUNDLE=(Here the license bundles can be set)
4 set UGII_BASE_DIR=C:\NX1926
5 set UGII_LANG=english
6 set UGII_CAM_LIBRARY_DIR=%UGII_BASE_DIR%\MACH\custom\NX1926gMTE\library NXgMTE1926\
7 set UGII_CAM_LIBRARY_DEVICE_DIR=%UGII_CAM_LIBRARY_DIR%device_english\
8 set UGII_CAM_LIBRARY_TOOL_METRIC_DIR=%UGII_CAM_LIBRARY_DIR%tool\metric_english\
9 set UGII_CAM_LIBRARY_INSTALLED_MACHINES_DIR=%UGII_CAM_LIBRARY_DIR%machine\installed_machines_english\
10 set UG_USR_DIR=%UGII_BASE_DIR%\MACH\custom\NX1926gMTE\user_data\
11 set UGII_USER_DIR=%UG_USR_DIR%
12 set UGII_CUSTOM_DIRECTORY_FILE=%UG_USR_DIR%custom\custom_dirs_english.dat
13 set UGII_USER_PROFILE_DIR=%UG_USR_DIR%
14 set UGII_DEFAULT_ROLE=%UG_USR_DIR%startup\roles\cad_cam_role.mtx
15 set UGII_LOCAL_USER_DEFAULTS=%UG_USR_DIR%startup\nx12.0.2_local_user.dpv
16 set UGII_LOAD_OPTIONS=%UG_USR_DIR%startup\load_options.def
17 start %UGII_BASE_DIR%\NXBIN\ugraf.exe
18

```

Figura 65. Código del *script* con la preconfiguración de inicio del *Siemens NX 1926*.

6.1.2. VNCK v.4.7.4

La obtención de la licencia se ha realizado mediante la conexión de los dispositivos pertinentes al servidor de licencias del STIC del ICAI. Con respecto a la instalación del VNCK se necesita la versión v.4.7.4 ya que es la versión compatible con el control físico de la máquina y cualquier otra versión de VNCK obligaría a actualizar el control numérico de la máquina a digitalizar.

Durante el procedimiento de instalación del *software* hay que tener en cuenta diversos aspectos que si no se consideran después no será posible enlazar ambos programas, véase Anexo C. El primer paso para la instalación es iniciar sesión como administrador y desde ahí seguir los siguientes pasos:

- El paquete de formación desempaquetado contiene un archivo con la extensión “.bat”. Este archivo representa el *script* de instalación para el paquete de formación y garantiza que los datos, como las máquinas o los documentos de formación, se copien en la carpeta “personalizada”. Esta carpeta se encuentra en el directorio de instalación de NX.
- El *script* de instalación crea un *script* de inicio para NX. Este *script* de inicio contiene la referencia a los datos de entrenamiento y otros ajustes, por ejemplo, el idioma en NX.
- El *script* de instalación crea dos accesos directos en el escritorio. Uno para el *script* de inicio y otro para la carpeta de formación “CAD-CAM”, que contiene los documentos de formación y los ejercicios correspondientes.
- La siguiente figura, véase Figura 66, muestra el *script* de instalación abierto del paquete de formación para NX 1926. El área 1 contiene un resumen de los parámetros individuales, como el idioma para el *script* de inicio y, por tanto, también el idioma para NX o la ruta de instalación de NX. Si desea establecer un idioma diferente o si la ruta de instalación no coincide con su instalación de NX, puede cambiar esto utilizando las opciones 0 (idioma) y 1 (ruta de instalación) en el área 2.

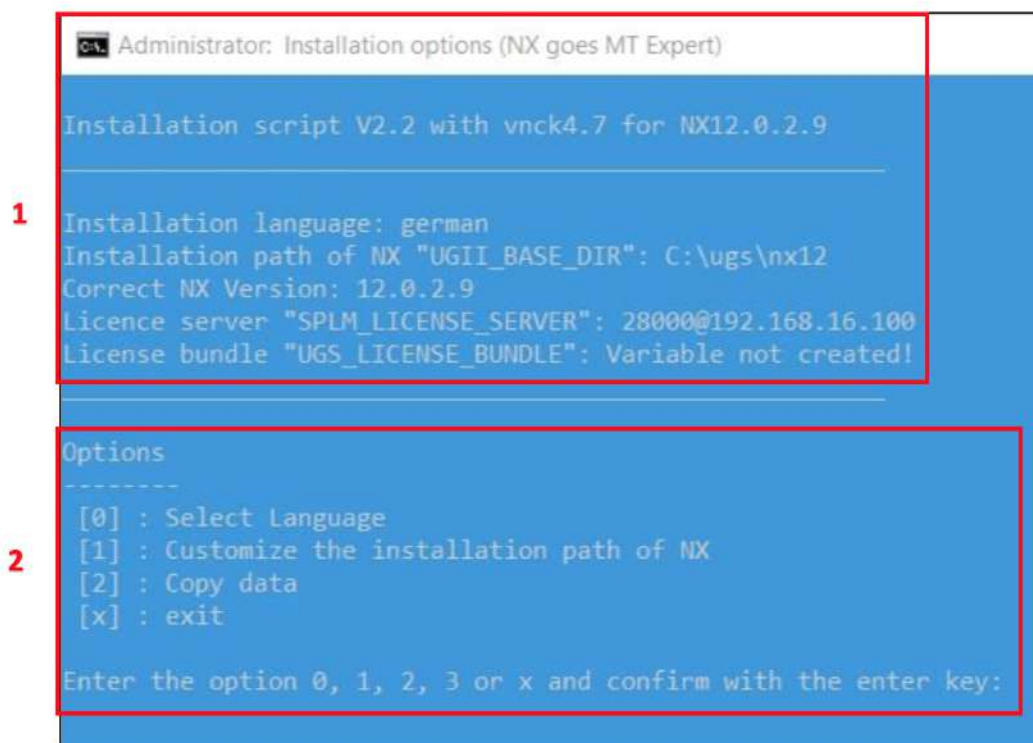


Figura 66. Instalación VNCK (I), Anexo C.

- Para “instalar” el paquete de formación, utilice la opción 2, escriba 2 (véase la Figura 67) y confirme con Intro. Accederá a la pantalla de selección para especificar cómo debe copiarse el paquete de formación (véase la Figura 67). Con las opciones 0 y 1 se copian los datos del paquete de entrenamiento. La diferencia entre estas opciones es que la opción 0 crea un registro de entrenamiento limpio y borra cualquier dato modificado o añadido, como herramientas autoañadidas, en la carpeta de entrenamiento. Con la opción 1 se copian todos los datos del paquete de entrenamiento, pero los datos modificados o añadidos no se eliminan.

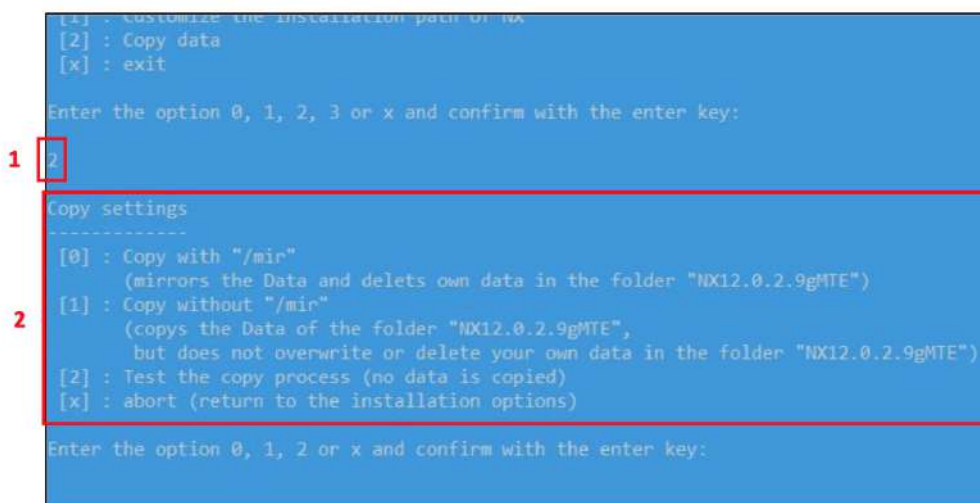


Figura 67. Instalación VNCK (II), Anexo C.

6.2. Modelado

En concreto, para este apartado se ha utilizado el módulo o aplicación de “Modelado” del *software Siemens NX*, véase Figura 68, la cual proporciona las herramientas para diseñar la geometría de la máquina y de la pieza a fabricar.

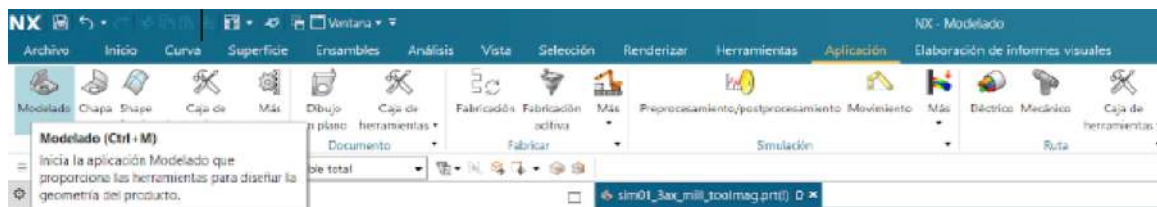


Figura 68. Aplicación “Modelado” del *software Siemens NX*.

6.2.1. Modelado de la máquina

Para el modelado de la máquina *HV-35* se han empleado las herramientas y procedimientos típicos de las aplicaciones de diseño CAD. Para el diseño de la máquina se ha decidido dividirla en dos partes: la estructura exterior o envoltente de la máquina y la estructura interior o zona de trabajo de la misma, véase Figura 69.



Figura 69. Árbol general del modelado del *HV-35*

6.2.1.1. Estructura exterior

Piezas y ensambles

Se ha procurado representar el exterior de la forma más fidedigna posible para que así la apariencia de la máquina virtual coincida lo máximo posible con el exterior de la máquina *HV-35* del LSITF del ICAI, véase Figura 75. Puede consultarse más detalles en el Plano 2 en el Documento “Planos”. Para ello se ha llevado a cabo un ensamble cuya base es una pieza que se corresponde con la estructura exterior de la máquina, véase Figura 70 (“exteriormaquinaTFM.prt”). Para más detalles puede consultarse el Plano 3 en el Documento “Planos”.

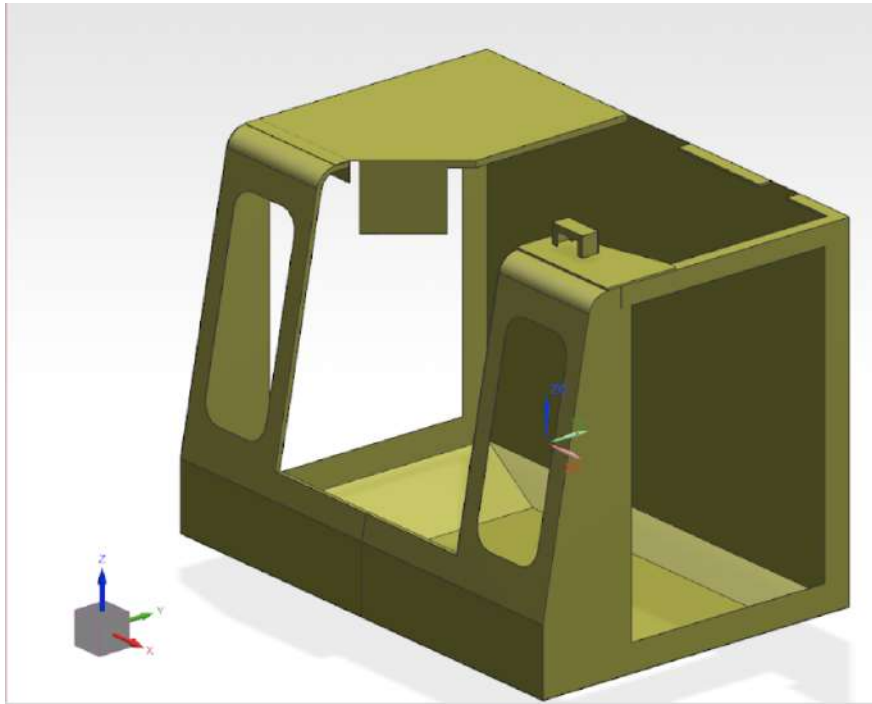


Figura 70. Modelo de la carcasa o cubierta exterior.

A esta estructura se le han ensamblado los diferentes elementos que se apoyan sobre ella: dos ventanas frontales, véase Figura 71, (“ventanafrontalmaquinaTFM.prt” x 2), dos puertas frontales, véase Figura 72, (“puertafrontalizquierdamaquinaTFM.prt” y “puertafrontalderechamaquinaTFM.prt”) y dos puertas laterales, véase Figura 73, (“puertalateralmaquinaTFM.prt” x 2). Para más detalles puede consultarse el Plano 4, Plano 5 y Plano 6 en el Documento “Planos”.

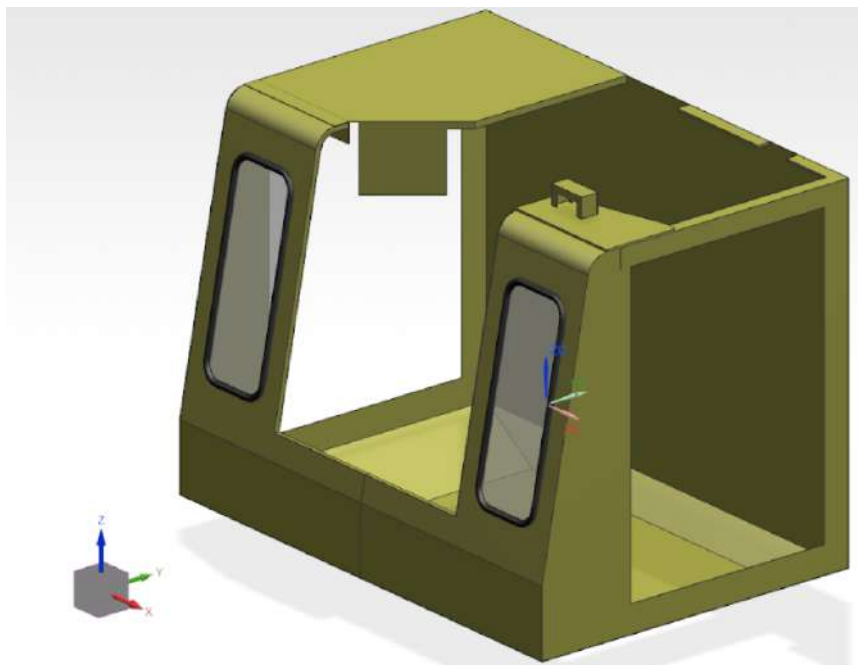


Figura 71. Modelo incorporando las ventanas frontales.

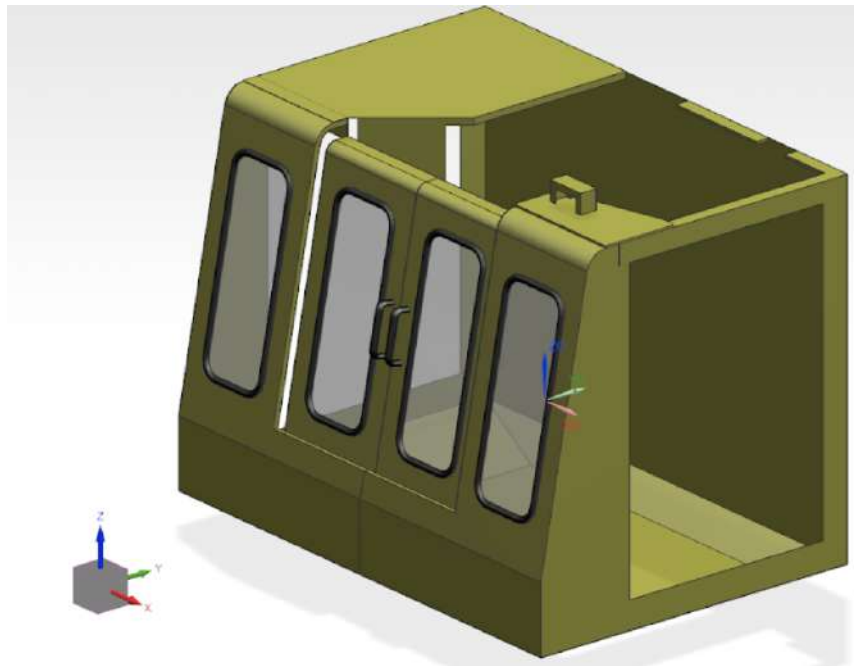


Figura 72. Modelo incorporando las puertas frontales.

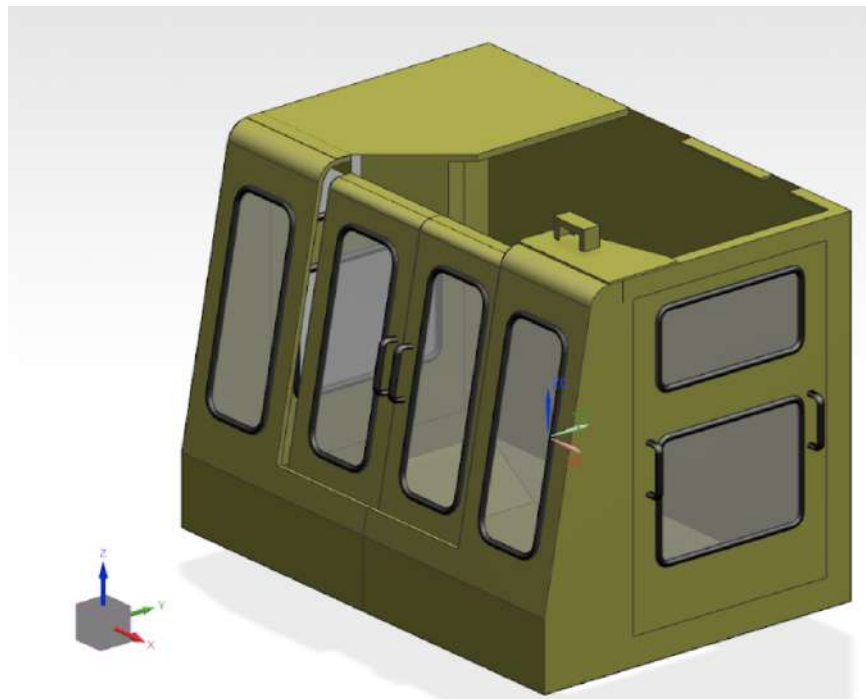


Figura 73. Modelo incorporando las puertas laterales.

Además, se ha añadido un ensamblaje del control CNC (“puentecontrolmaquinaTFM.prt”). Dicho ensamblaje del control a su vez tiene como base el puente del control CNC, véase Figura 74, al cual se le ha incorporado la pieza de la consola de visualización del control CNC propiamente dicho (“controlmaquinaTFM.prt”), véase Figura 75. Para más detalles puede consultarse el Plano 7 en el Documento “Planos”.

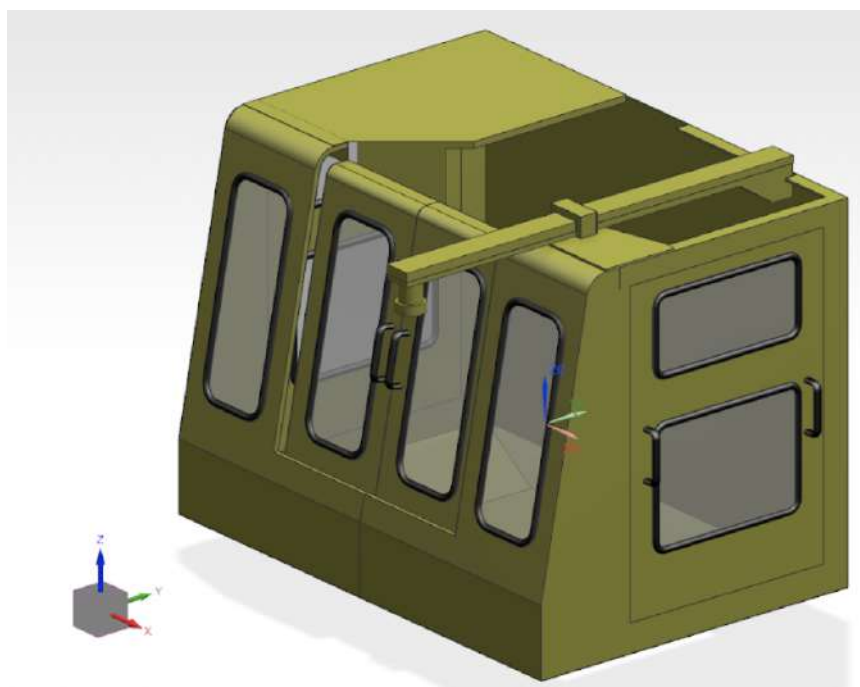


Figura 74. Modelo incorporando el brazo del control.

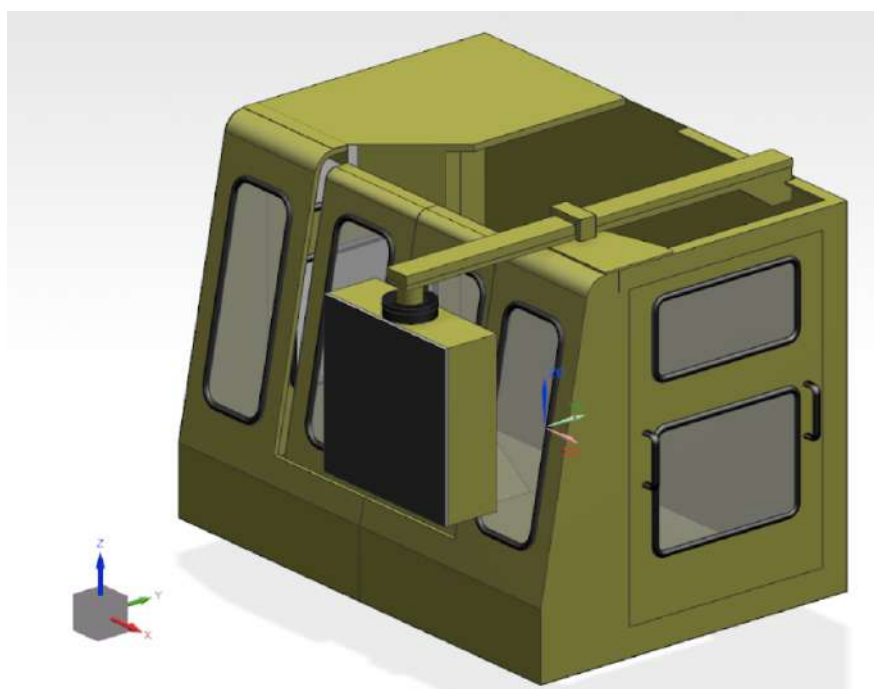


Figura 75. Modelo de la estructura exterior de la máquina.

Así se concluye el modelado de la estructura exterior de la máquina. A continuación se muestra el árbol de trabajo del navegador de ensamble asociado a ésta, véase Figura 76.



Figura 76. Árbol general del modelado de la estructura exterior.

Restricciones

En cuanto a las restricciones o limitaciones de movimiento entre los diferentes elementos que componen el ensamble de la estructura exterior, véase Figura 77, cabe destacar que todas las puertas y ventanas están montadas a ras de la estructura salvo las puertas frontales que están ligeramente desplazadas hacia el interior de la máquina para facilitar la actuación del mecanismo de apertura y cierre de las mismas. Por otro lado, el ensamble del control CNC es un voladizo que está apoyado en un extremo sobre la pared trasera de la máquina y en su punto medio descansa sobre una placa atornillada al techo de la misma. El otro extremo sobresale de la máquina permitiendo que pueda rotar sobre su eje la consola de visualización del control CNC.

Restricciones	
☒	Alinear (PUERTALATERALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUERTALATERALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUERTALATERALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Alinear (PUERTALATERALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUERTALATERALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUERTALATERALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Paralelo (PUERTAFRONTALDERECHAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUERTAFRONTALDERECHAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Alinear (PUERTAFRONTALDERECHAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Distancia (PUERTAFRONTALDERECHAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Paralelo (PUERTAFRONTALIZQUIERDAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUERTAFRONTALIZQUIERDAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Alinear (PUERTAFRONTALIZQUIERDAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Distancia (PUERTAFRONTALIZQUIERDAMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Alinear (VENTANAFRONTALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (VENTANAFRONTALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (VENTANAFRONTALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Alinear (VENTANAFRONTALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (VENTANAFRONTALMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUENTECONTROLMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Tocar (PUENTECONTROLMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)
☒	Centro (PUENTECONTROLMAQUINATFM, exteriormaquinaTFM)

Figura 77. Lista de restricciones globales asociadas al ensamble de la estructura exterior.

Hay que tener en cuenta que además de estas restricciones globales existen, también, restricciones locales asociadas a cada uno de los subensambles de los elementos que conforman

la estructura exterior de la máquina. Para más detalles sobre éstos examine el archivo “exteriormaquinaTFM.prt”.

6.2.1.2. Estructura interior

Piezas y ensambles

El modelado de la estructura interior de la máquina se ha limitado a diseñar el área de trabajo o zona de corte de la misma, para lo cual se han llevado a cabo una serie de simplificaciones geométricas sin que ello afecte a la funcionalidad de los elementos que la conforman. En este caso, el modelado se ha realizado de cada elemento por separado y luego se ha procedido a hacer un ensamble que integre a todos ellos. El diseño del interior no ha partido estrictamente desde cero sino que se ha utilizado una geometría ya modelada de una máquina incluida en la “Biblioteca de máquinas” del programa lo más parecida posible a la que se quiere modelar: un centro de mecanizado vertical de tres ejes (“sim01_3ax_mill_toolmag_assembly.prt”). En ningún caso, se ha entrado a diseñar las piezas o mecanismos interiores que generan el movimiento de estos elementos. Para más detalles puede consultarse el Plano 8 en el Documento “Planos”.

Guías Lineales Verticales (“sim01_z_base_3_mm.prt”): el diseño de esta pieza no incluye el súper acabado de la cola de milano cuya única función es la de anclar la guía vertical a la pared interior trasera de la máquina., véase Figura 78. Para más detalles puede consultarse el Plano 9 en el Documento “Planos”.

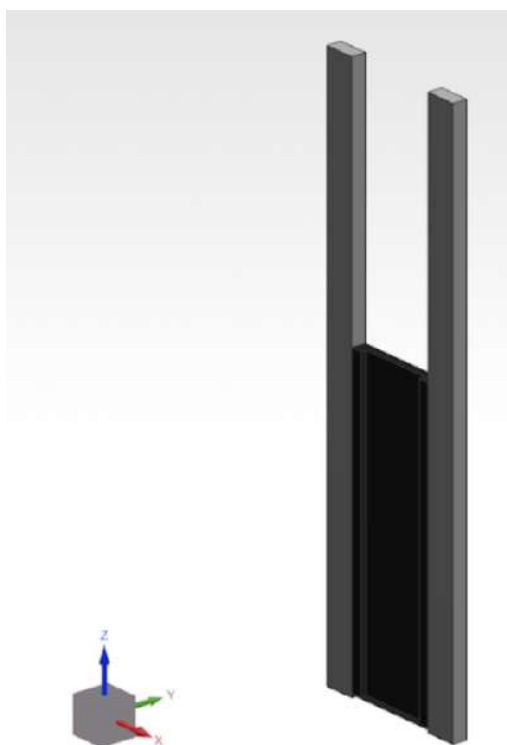


Figura 78. Modelo de las Guías Lineales Verticales.

Torre (“sim01_z_slide_3_mm.prt”): se ha modelado la torre sin tener en cuenta el husillo que hace girar el cabezal situado en la base de la misma, véase Figura 79. Para más detalles puede consultarse el Plano 10 en el Documento “Planos”.

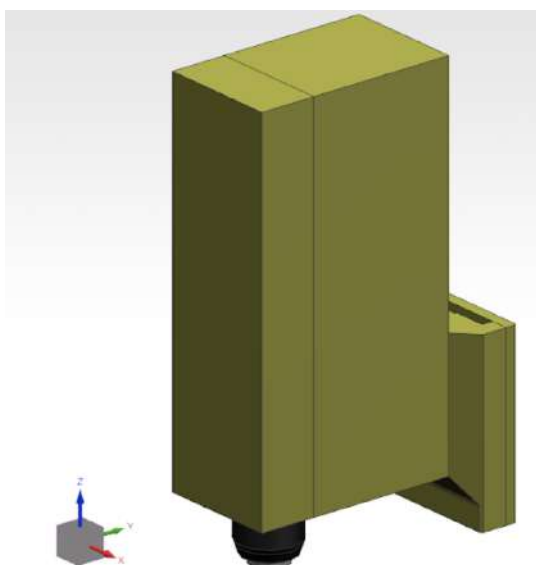


Figura 79. Modelo de la torre.

Carro transversal (“sim01_y_base_3_mm.prt”): en este caso se ha considerado que las diferentes secciones que componen el carro no deslizan unas sobre otras y los extremos permanecen fijos, sino que se ha diseñado como una guía móvil que se mueve transversalmente a lo largo del eje *Y*, véase Figura 80. Para más detalles puede consultarse el Plano 11 en el Documento “Planos”.

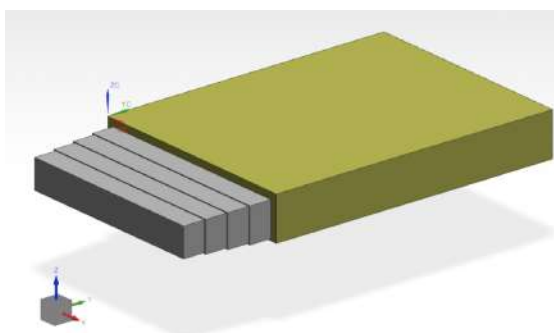


Figura 80. Modelo del carro transversal.

Carro longitudinal (“sim01_y_slide_3_mm.prt”): en este caso se ha considerado que las diferentes secciones que componen el carro no deslizan unas sobre otras y los extremos permanecen fijos, sino que se ha diseñado como una guía móvil que se mueve longitudinalmente a lo largo del eje *X*, véase Figura 81. Para más detalles puede consultarse el Plano 12 en el Documento “Planos”.

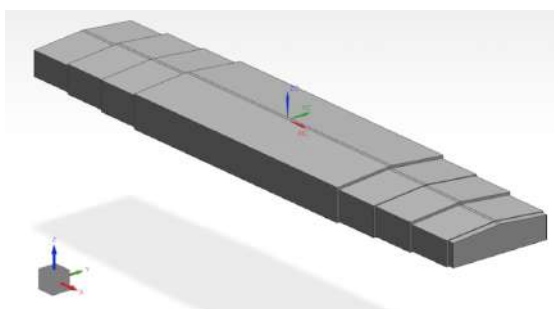


Figura 81. Modelo del carro longitudinal .

Mesa de Trabajo (“sim01_x_slide_3_mm.prt”): este elemento se ha diseñado tal cual es en la realidad, véase Figura 82. Para más detalles puede consultarse el Plano 13 en el Documento “Planos”.

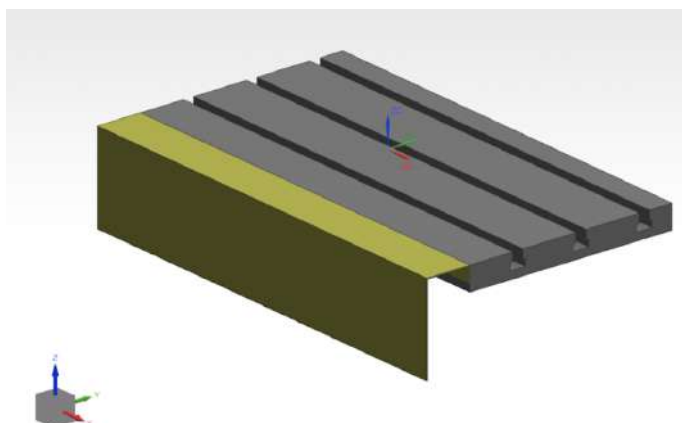


Figura 82. Modelo de la mesa de trabajo .

Brazo del Cambiador Automático de Herramientas (“sim01_tool_arm_3_mm.prt”): dada la geometría tan compleja e irregular de la misma y la dificultad para acceder a su medición se ha simplificado la misma sin comprometer la función del mismo, véase Figura 83. Para más detalles puede consultarse el Plano 14 en el Documento “Planos”.

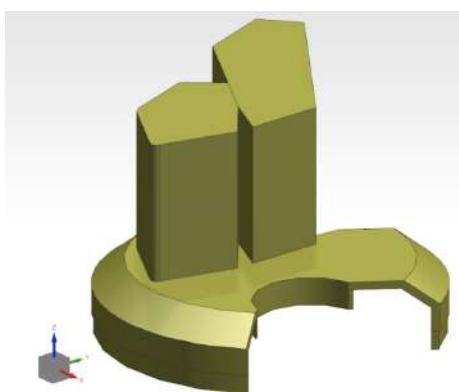


Figura 83. Modelo del brazo del cambiador automático de herramientas .

Cambiador Automático de Herramientas (“sim01_tool_mag_3_mm.prt”): la simplificación llevada a cabo en esta parte es simplemente que se ha representado sin tener en cuenta el mecanismo que produce el movimiento de rotación en torno a su eje central, véase Figura 84. Para más detalles puede consultarse el Plano 15 en el Documento “Planos”.

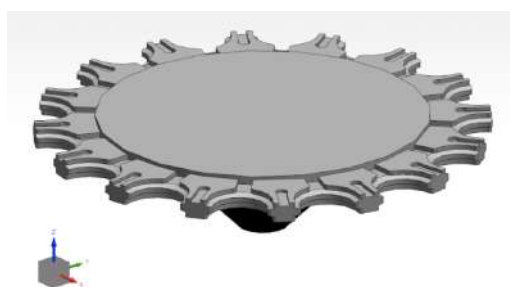


Figura 84. Modelo del cambiador automático de herramientas .

Así se concluye el modelado del área de trabajo de la máquina, véase Figura 85.

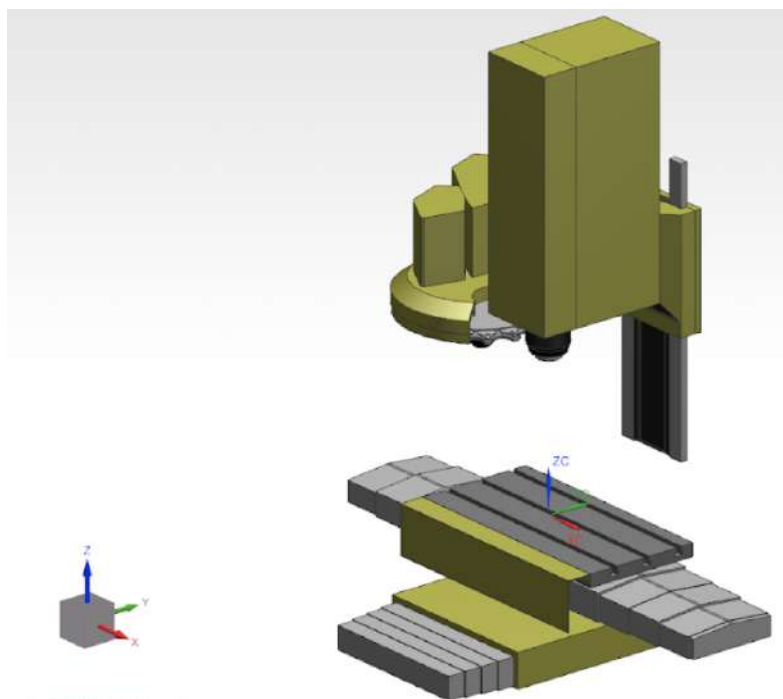


Figura 85. Modelo de la estructura interior de la máquina.

A continuación se muestra el árbol de trabajo del navegador de ensamble asociado a éste, véase Figura 86.



Figura 86. Árbol general del modelado del interior del área de trabajo.

NOTA:

Téngase en cuenta que para los nombres de los archivos correspondientes a los elementos que componen el área de trabajo de la máquina *Hartford* se ha seguido utilizando la nomenclatura que tenía por defecto el CMV de tres ejes de la librería de máquinas del *software Siemens NX 1926*, el cual ha servido de punto de partida para el diseño de los componentes del área de trabajo de nuestra máquina. Por esta razón, los nombres de los archivos pueden no corresponderse con la cinemática real de los componentes asociados a éstos.

Restricciones

En cuanto a las restricciones o limitaciones de movimiento entre los diferentes elementos que componen el ensamblaje del área de trabajo, véase Figura 87, cabe destacar que éstas son de cuatro tipos: restricción de tipo “Tocar o alinear”, “Centro”, “Distancia” y “Fijo”. Esta última

se aplica únicamente a las Guías Lineales Verticales, base del eje *Z*, estando éstas ancladas a la pared interior trasera de la máquina. Las tres primeras restricciones se aplican a todos los elementos que componen el área de trabajo de la máquina para establecer las posiciones relativas entre ellos.

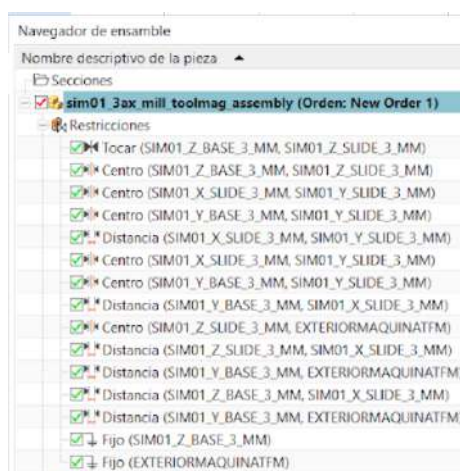


Figura 87. Lista de restricciones globales asociadas al ensamble de la estructura interior.

6.2.1.3. Estructura exterior + Estructura interior

Una vez se ha modelado la estructura exterior de máquina *Hartford* así como la estructura interior o área de trabajo de la misma, se procede a realizar el ensamble total entre ambas, empleando como base para ello el archivo asociado al área de trabajo ("sin01_3ax_mill_toolmag_assembly.prt").

Así se concluye el modelado de la máquina, véase Figura 88. Para más detalles puede consultarse el Plano 1 en el Documento "Planos".

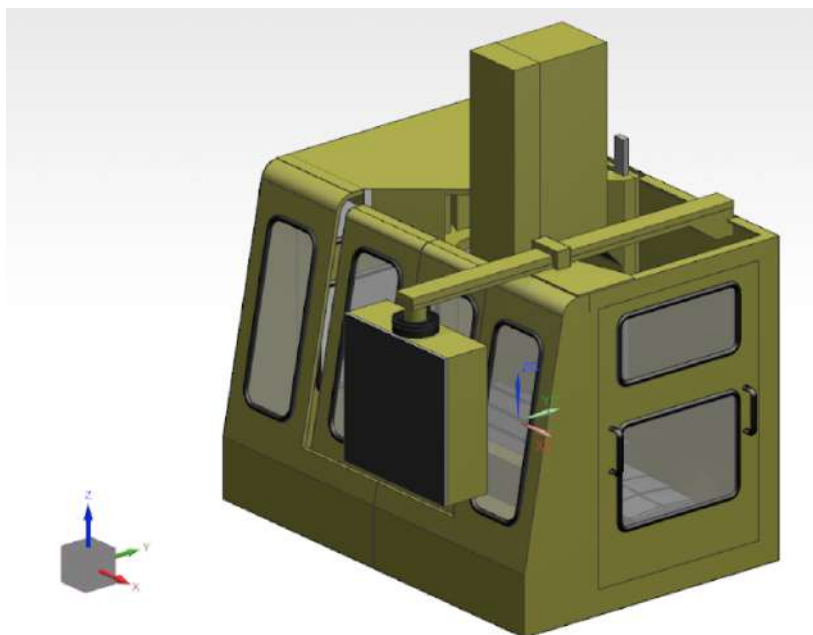


Figura 88. Modelo de la máquina.

A continuación se muestra el árbol de trabajo del navegador de ensamble total asociado a ésta, véase Figura 89.

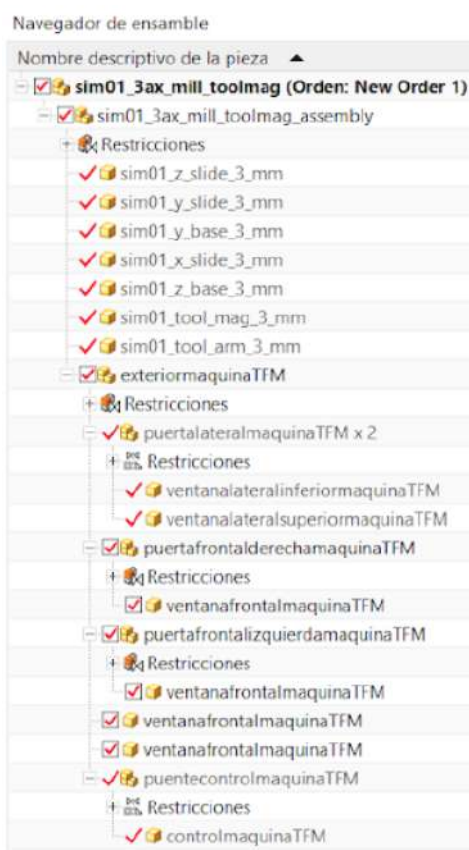


Figura 89. Árbol general del modelado la máquina.

Restricciones

En cuanto a las restricciones o limitaciones de movimiento entre la estructura exterior e interior de la máquina *Hartford*, véase Figura 90, cabe destacar que éstas se han aplicado conjuntamente con las restricciones aplicadas al área de trabajo, puesto que se ha usado este fichero como base para el ensamblaje. Dichas restricciones son de cuatro tipos: restricción de tipo “Tocar o alinear”, “Centro”, “Distancia” y “Fijo”. Esta última se aplica únicamente a la estructura exterior de la máquina. Según cómo se genere el ensamblaje puede ser que no sea necesaria aplicar esta restricción, pudiendo quedar definida mediante las relaciones establecidas por otras restricciones. Las tres primeras restricciones se aplican al resto de elementos que componen el ensamblaje del modelo de la máquina para establecer las posiciones relativas entre ellos.

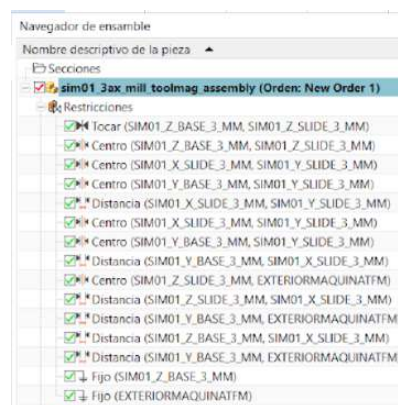


Figura 90. Lista de restricciones globales asociadas al ensamblaje de la máquina.

6.2.2. Modelado de la pieza

Con el objeto de probar la validez de la máquina virtualizada se ha decidido modelar una pieza de trabajo a partir de un plano de la misma presente en el LSITF del ICAI (“piezaTFM.prt”). Dicha pieza se trata de una Placa de Apoyo de aluminio en cuya cara superior se han practicado una serie de operaciones de mecanizado básico, véase Figura 91 y Plano 16 en Documentos “Planos”.

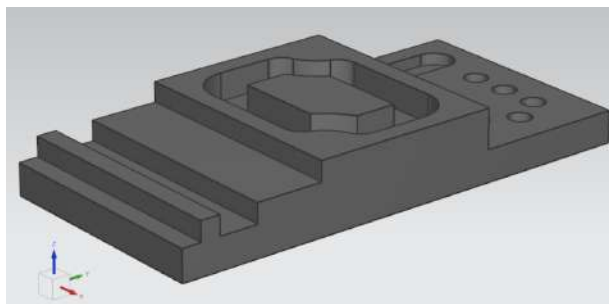


Figura 91. Modelo de la pieza de trabajo: Placa de Apoyo.

Para la posterior simulación del mecanizado y fabricación de dicha pieza se partirá de un bloque de aluminio en bruto cuyas dimensiones son 123x60x20 mm, el cual se ha modelado en un archivo independiente al de la pieza (“bloquepiezaTFM.prt”). Ambos archivos se han unido en un ensamble total (“conjuntobloquepiezaTFM.prt”), véase Figura 92. Para el modelado de ambas piezas se han empleado las herramientas y procedimientos típicos de las aplicaciones de diseño CAD.

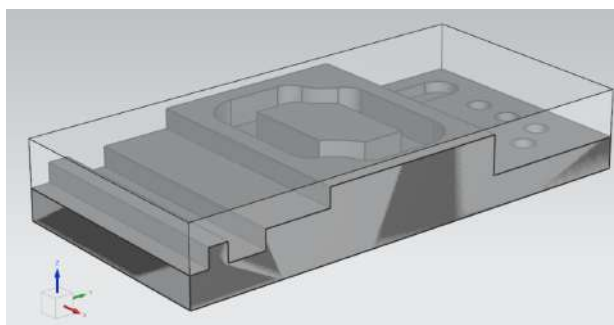


Figura 92. Modelo del ensamble total Bloque - Pieza de trabajo.

El proceso de generación de dicho ensamble es muy simple: primero se fija la pieza mediante una restricción tipo “Fijo” y, posteriormente, ésta se alinea en los tres ejes con el bloque mediante tres restricciones del tipo “Tocar o alinear”. Así se consigue que se toquen las paredes adyacentes entre ambos componentes, quedando completamente la Pieza de Trabajo dentro del Bloque, véase Figura 93.

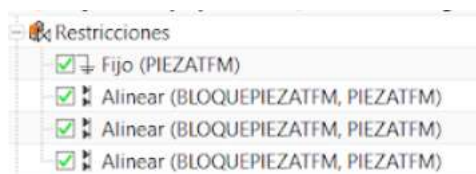


Figura 93. Restricciones del ensamble total Bloque - Pieza de trabajo.

6.3. Creación del modelo cinemático

Una vez se han modelado todos los componentes del CMV *Hartford* se va a proceder a la creación del modelo cinemático del mismo dotando así de movimiento a los elementos que lo componen. Para ello se han utilizado la aplicación “Constructor de máquinas herramienta” del software *Siemens NX*, que proporciona las herramientas para crear y editar una máquina herramienta para su posterior simulación y verificación integradas, véase Figura 94.

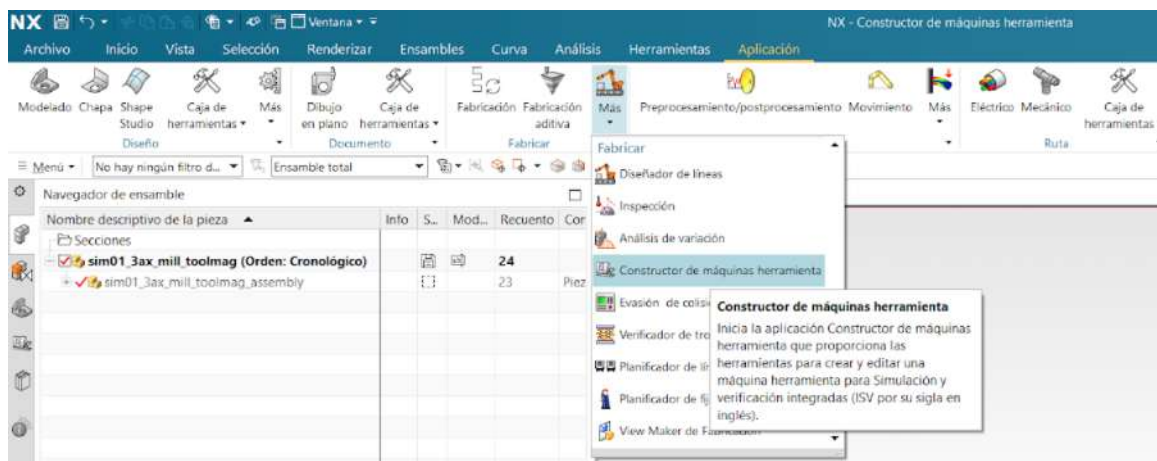


Figura 94. Aplicación “Constructor de máquinas herramientas” del software *Siemens NX*.

Con el objeto de generar el movimientos entre los diferentes componentes interiores es necesario definir qué componentes del área de trabajo de la máquina se mueven y cómo lo hacen, es decir, en qué eje/s se mueven dichos componentes, y cuáles son los recorridos de los mismos a lo largo de dichos ejes. Dichos recorridos están delimitados por los límites, inferior y superior, de las posiciones extremas de los componentes a lo largo de sus respectivos ejes de movimiento.

Los valores cinemáticos asociados a los ejes del modelo se han obtenido moviendo la máquina mediante el control CNC hasta los límites, superior e inferior, de los mismos. Dichos valores se muestran en la consola de visualización del control CNC.

El primer paso para la creación del modelo cinemático es asignarle un nombre a la máquina, en este caso será: “HARTFORD”. El segundo paso es definir la base de la máquina (“MACHINE_BASE”), véase Figura 95. Para ello, será necesario definir el origen de coordenadas global de la máquina, el cual, aunque realmente está posicionado en el extremo derecho de la mesa de trabajo, a efectos prácticos la posición cero de la máquina será definida en el centro geométrico de la cara superior de la mesa de trabajo.

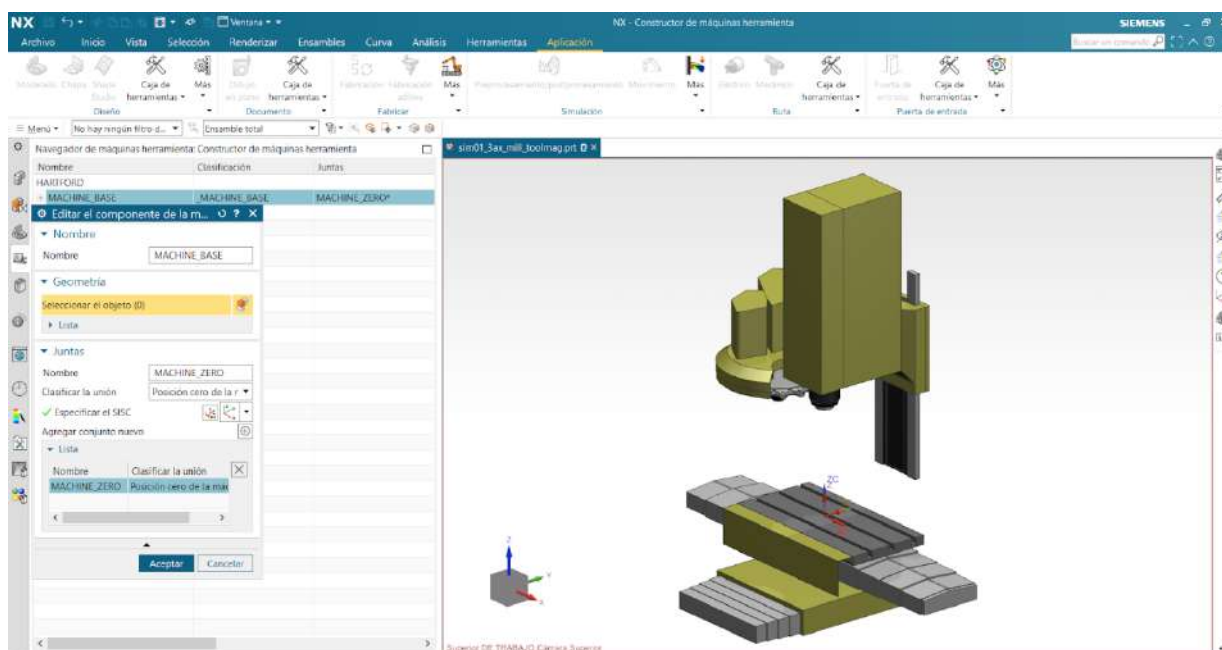


Figura 95. Definición de la base y de la posición cero de la máquina

A continuación, se definirá la base del eje *Z* de la máquina (“Z_BASE”), para lo cual se seleccionará el componente Guías Lineales Verticales, ya que es el único componente del área de trabajo que permanece fijo durante el mecanizado de una pieza, véase Figura 96. También, será necesario definir el origen de coordenadas de dicha base que igualmente estará posicionado en el centro geométrico de la cara superior de la mesa de trabajo.

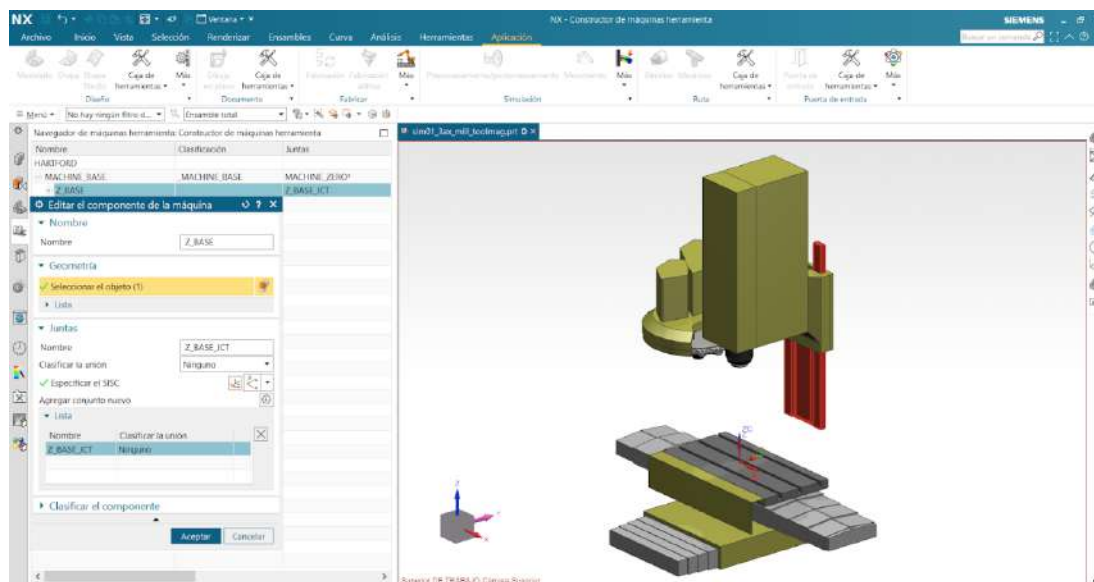


Figura 96. Definición de la base del eje *Z* de la máquina

Seguidamente, se procederá a definir el eje *Z* de la máquina (“Z_AXIS”), para lo cual se seleccionará el componente Torre, puesto que se trata del único componente del área de trabajo que se mueve verticalmente a lo largo de dicho eje, véase Figura 97.

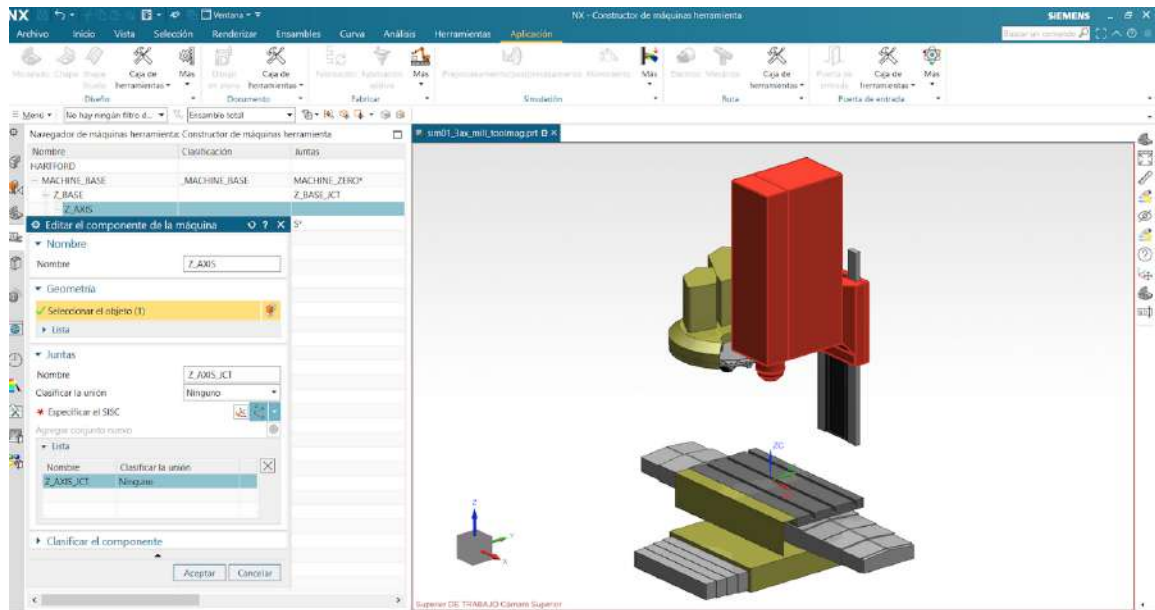


Figura 97. Definición del componente de la máquina asociado al eje Z.

También hay que definir los valores cinemáticos asociados al eje Z, Figura 98. Cabe destacar que el valor inicial de la posición de la Torre es de 518,5 mm, siendo éste el valor de la cota absoluta medida a lo largo del eje Z desde el centro geométrico de la boquilla del cabezal (donde está localizado el origen de coordenadas del eje *S* o *spindle*), hasta el origen de coordenadas de dicho eje Z, posicionado en el centro geométrico de la cara superior de la mesa de trabajo. En cuanto a las propiedades dinámicas se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

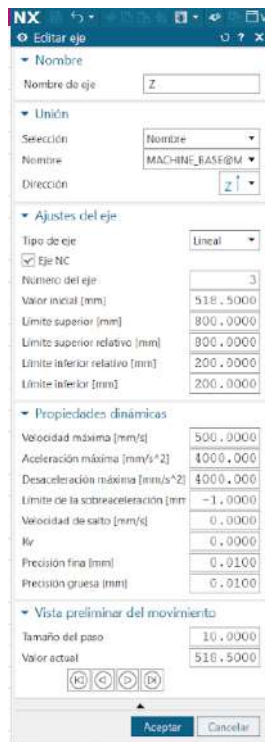


Figura 98. Definición de los valores asociados al eje Z de la máquina.

Luego, se procederá a especificar el origen de coordenadas de la base asociada al eje de rotación *S*, denominado *spindle* (“SPINDLE”), que es el eje de rotación del husillo del cabezal

de la torre, alrededor del cual giran las herramientas de corte. Dicho origen de coordenadas se posicionará en el centro geométrico de la cara inferior de la boquilla del cabezal, donde tiene lugar el montaje de la herramienta de corte, por donde pasa el eje de misma, véase Figura 99.

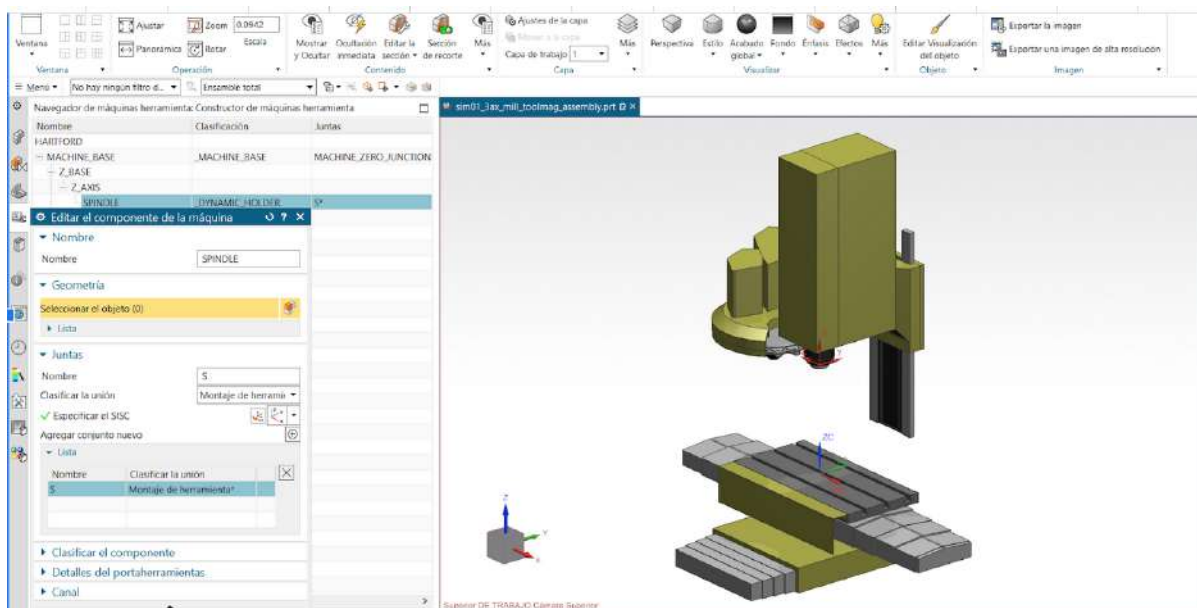


Figura 99. Definición del origen de coordenadas del *spindle*.

Además, hay que definir los valores cinemáticos asociados al eje *S*, Figura 100. En cuanto a las propiedades dinámicas se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

Nombre	
Nombre de eje	S
Unión	
Selección	Nombre
Nombre	SPINDLE@S
Dirección	X
Ajustes del eje	
Tipo de eje	Husillo
☐ Eje NC	
Número del eje	4
Valor inicial [deg]	0.0000
Límite superior relativo [deg]	3.6e+64
Límite inferior relativo [deg]	-3.6e+64
Propiedades dinámicas	
Velocidad máxima [deg/s]	100.0000
Aceleración máxima [deg/s^2]	250.0000
Desaceleración máxima [deg/s^2]	250.0000
Límite de la sobreaceleración [deg]	-1.0000
Velocidad de salto [deg/s]	0.0000
Kv	0.0000
Precisión fina [deg]	0.0100
Precisión gruesa [deg]	0.0100
Vista preliminar del movimiento	
Tamaño del paso	10.0000
Valor actual	0.0000
Anterior Anterior Siguiente Siguiente	
Aceptar Cancelar	

Figura 100. Definición de los valores asociados al eje *S* de la máquina.

A continuación, se definirá la base del eje Y de la máquina (“Y_BASE”), para lo cual no se seleccionará ningún componente ya que no hay ningún componente que permanezca fijo en este eje, véase Figura 101.



Figura 101. Definición de la base del eje Y de la máquina

Seguidamente, se procederá a definir el eje Y de la máquina (“Y_AXIS”), para lo cual se seleccionará el componente Carro Transversal, véase Figura 102.

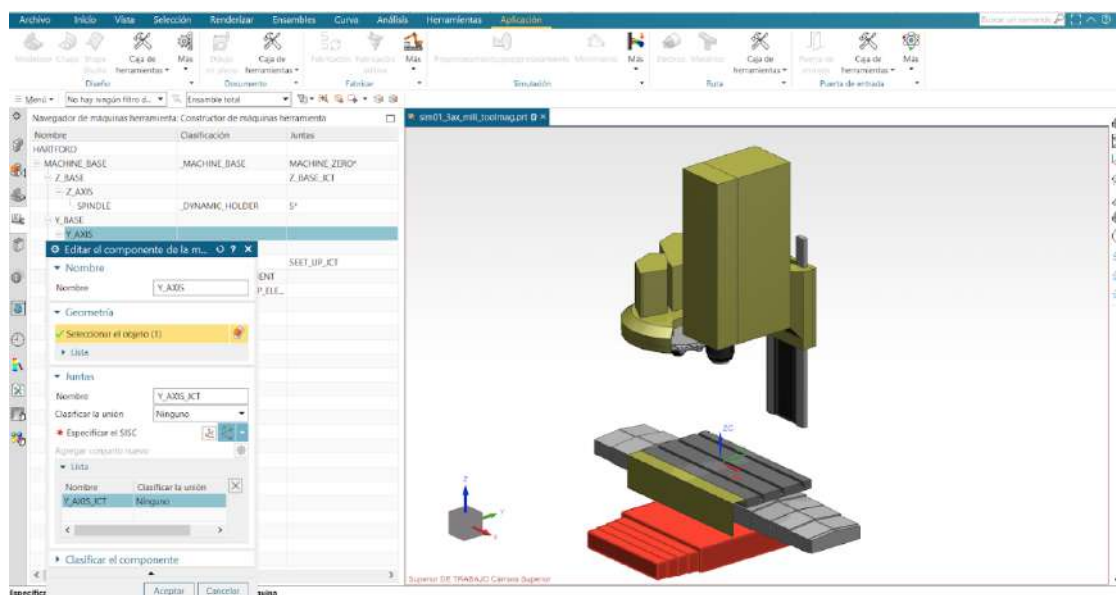


Figura 102. Definición del componente de la máquina asociado al eje Y.

También hay que definir los valores cinemáticos asociados al eje Y, Figura 103. En cuanto a las propiedades dinámicas se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

Nombre
Nombre de eje: Y

Unión
Selección: Nombre
Nombre: MACHINE_BASE@M
Dirección: [Icono]

Ajustes del eje
Tipo de eje: Lineal
☒ Eje NC
Número del eje: 2
Valor inicial [mm]: 0,0000
Límite superior [mm]: 280,0000
Límite superior relativo [mm]: 280,0000
Límite inferior relativo [mm]: -120,000
Límite inferior [mm]: -120,000

Propiedades dinámicas
Velocidad máxima [mm/s]: 500,0000
Aceleración máxima [mm/s^2]: 4000,000
Desaceleración máxima [mm/s^2]: 4000,000
Límite de la sobreaceleración [mm]: -1,0000
Velocidad de salto [mm/s]: 0,0000
Hv: 0,0000
Precisión fina [mm]: 0,0100
Precisión gruesa [mm]: 0,0100

Vista preliminar del movimiento
Tamaño del paso: 10,0000
Valor actual: 0,0000
[Iconos de movimiento]

Aceptar Cancelar

Figura 103. Definición de los valores asociados al eje Y de la máquina.

Seguidamente, se procederá a definir el eje X de la máquina (“X_AXIS”), el cual cuelga del eje Y de la máquina (“Y_AXIS”), ya que en la realidad el eje X está montado sobre el eje Y. Para ello, se seleccionará el componente Carro Longitudinal así como el componente Mesa de Trabajo, los cuales se mueven solidariamente, véase Figura 104.

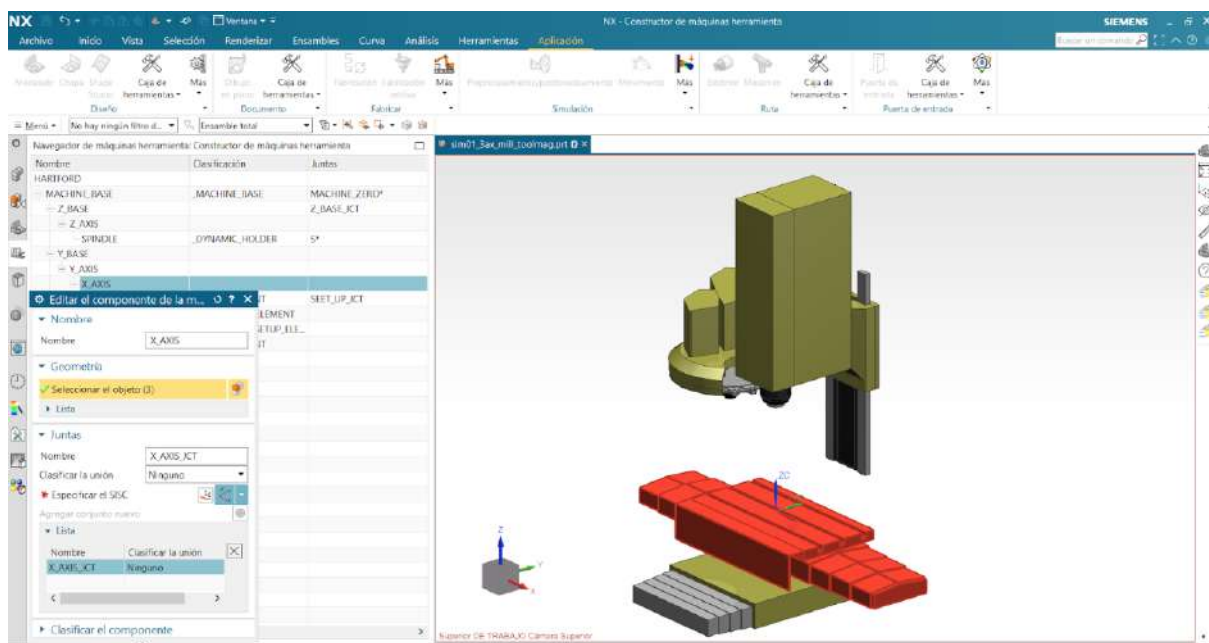


Figura 104. Definición de los componentes de la máquina asociados al eje X.

También hay que definir los valores cinemáticos asociados al eje X, Figura 105. En cuanto a las propiedades dinámicas se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

Figura 105. Definición de los valores asociados al eje *X* de la máquina.

Una vez realizadas todas estas acciones, hay que proceder a establecer la configuración o *Set Up* (“SET_UP”), que cuelga del eje *X* el cual a su vez cuelga del eje *Y*. Dicha configuración consiste en crear tres elementos que posteriormente se definirán durante la simulación del mecanizado (“PART”, “WORKPIECE” y “FIXTURE”), véase Figura 106.

Y_BASE		
Y_AXIS		
X_AXIS		
SET_UP	_SETUP_ELEMENT	SET_UP_JCT
PART	_PART_SETUP_ELEMENT	
WORK_PIECE	_WORKPIECE_SETUP_ELE...	
FIXTURE	_SETUP_ELEMENT	

Figura 106. Definición de la configuración.

A continuación, se definirá la base del cambiador automático de herramientas de la máquina (“TOOL_HOUSING”), véase Figura 107.

Figura 107. Definición de la base del cambiador automático de herramientas.

Colgando de la base se definirá el componente asociado al brazo del cambiador de herramientas (“TOOL_ARM”), seleccionando para ello el componente Brazo del Cambiador Automático de Herramientas, véase Figura 108. Además, se ha definido el sistema de coordenadas del eje de traslación asociado al brazo del cambiador de herramientas (eje V). LA dirección de este eje estará definida entre el centro geométrico de la campana del cambiador hasta el centro geométrico de la boquilla del cabezal donde se montan las herramientas y su origen está posicionado en el centro geométrico de la cara circular superior de la campana del brazo, véase Figura 108.

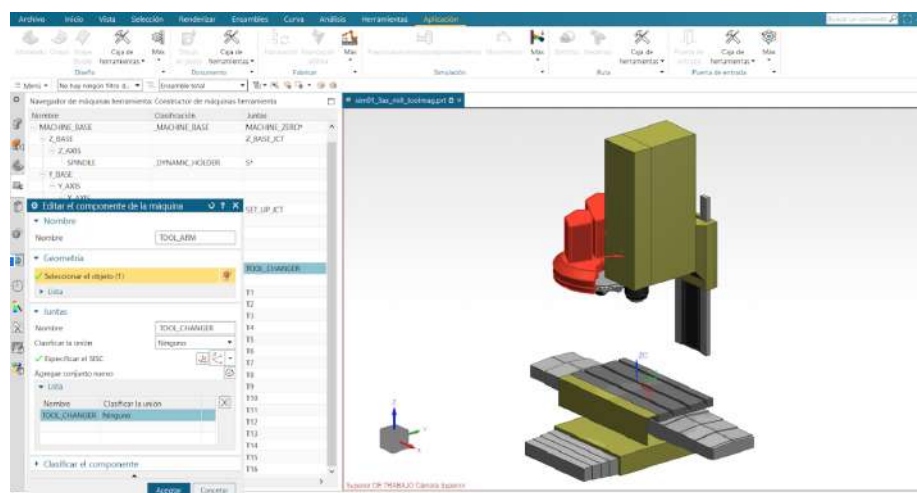


Figura 108. Definición del componente Brazo del Cambiador Automático de Herramientas.

Además, hay que definir los valores cinemáticos asociados al eje lineal V, Figura 109. En cuanto a las propiedades dinámicas se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

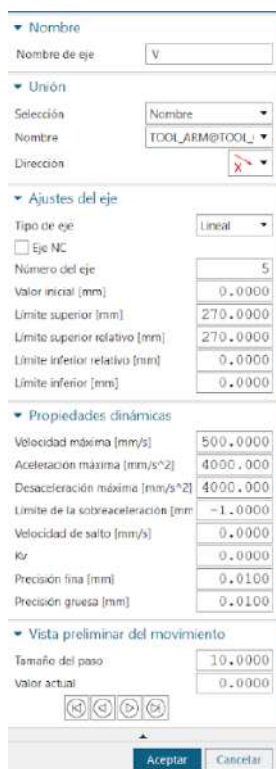


Figura 109. Definición de los valores asociados al eje lineal V del brazo del cambiador.

Por último, colgando del brazo del cambiador de herramientas (“TOOL_ARM”) se definirá el cambiador de herramientas propiamente dicho (“TOOL_MAGAZINE”), seleccionando para ello el componente Cambiador Automático de Herramientas, véase Figura 110. Además, se ha definido el sistema de coordenadas del eje de rotación asociado al cambiador de herramientas (eje *C*) y cuyo origen está posicionado en el centro geométrico de la cara circular superior de la campana del brazo, véase Figura 111, alrededor del cual gira el propio cambiador.

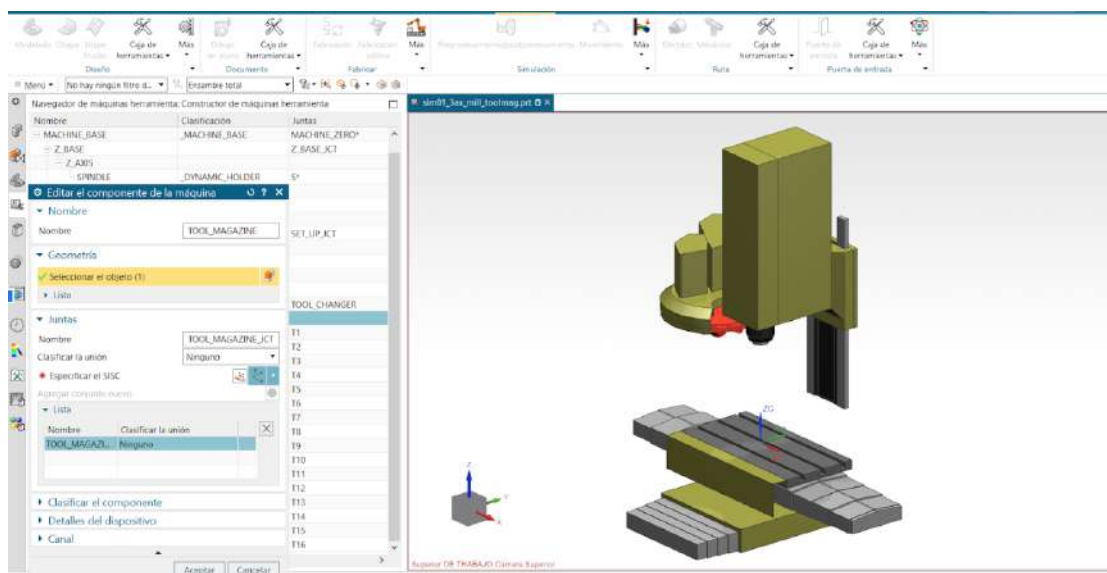


Figura 110. Definición del componente Cambiador Automático de Herramientas.

Además, hay que definir los valores cinemáticos asociados al eje de rotación *C*, Figura 111. En cuanto a las propiedades dinámicas se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

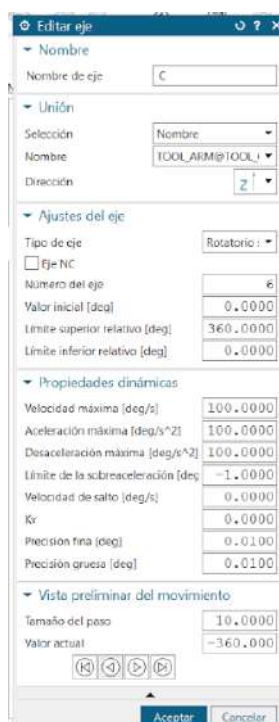


Figura 111. Definición de los valores asociados al eje de rotación *C* del cambiador de herramientas.

Para terminar, se definen los *pockets* del cambiador automático de herramientas (“POCKET_XX”). Dicha definición se realizará de manera análoga para cada uno de los dieciséis *pockets*, por lo que sólo se incluirá la definición del primero de ellos en concreto. Para definir un bolsillo hay que establecer un sistema de coordenadas cuyo origen se encuentra en el centro geométrico de la cara superior del mismo, coincidiendo éste con el eje de rotación de la herramienta insertada en dicho *pockets*, véase Figura 112.

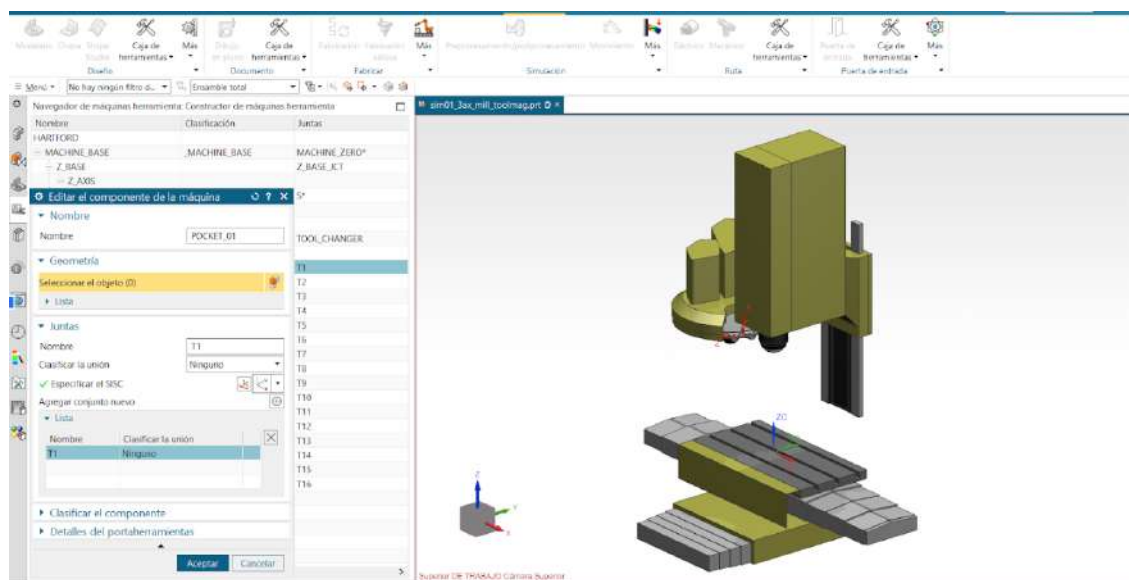


Figura 112. Definición del *Pocket 1* del Cambiador Automático de Herramientas.

Una vez realizados todos estos pasos, se obtiene el modelo cinemático completo del CMV *Hartford*, véase Figura 113.

Nombre	Clasificación	Juntas	Nombre de eje	Valor inicial	Eje NC
HARTFORD					
MACHINE_BASE	MACHINE_BASE	MACHINE_ZERO*			
Z_BASE		Z_BASE_JCT			
Z_AXIS			Z	518.5	✓
SPINDLE	DYNAMIC HOLDER	S*	S	0	
Y_BASE					
Y_AXIS			Y	0	✓
X_AXIS			X	0	✓
SET_UP	SETUP_ELEMENT	SET_UP_JCT			
PART	PART_SETUP_ELEMENT				
WORKPIECE	WORKPIECE_SETUP_ELEMENT				
FIXTURE	FIXTURE_SETUP_ELEMENT				
TOOL_HOUSING					
TOOL_ARM		TOOL_CHANGER	V	0	
TOOL_MAGAZINE	DEVICE		C	0	
POCKET_01	STATIC HOLDER	T1			
POCKET_02	STATIC HOLDER	T2			
POCKET_03	STATIC HOLDER	T3			
POCKET_04	STATIC HOLDER	T4			
POCKET_05	STATIC HOLDER	T5			
POCKET_06	STATIC HOLDER	T6			
POCKET_07	STATIC HOLDER	T7			
POCKET_08	STATIC HOLDER	T8			
POCKET_09	STATIC HOLDER	T9			
POCKET_10	STATIC HOLDER	T10			
POCKET_11	STATIC HOLDER	T11			
POCKET_12	STATIC HOLDER	T12			
POCKET_13	STATIC HOLDER	T13			
POCKET_14	STATIC HOLDER	T14			
POCKET_15	STATIC HOLDER	T15			
POCKET_16	STATIC HOLDER	T16			

Figura 113. Árbol general del modelo cinemático de la máquina.

6.4. Simulación del mecanizado

En esta parte se va a llevar a cabo la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo escogida, Placa de Apoyo, para comprobar y verificar el correcto funcionamiento del CMV *Hartford*.

El primer paso consiste en realizar un ensamble entre los diferentes componentes que intervienen en el proceso de simulación del mecanizado: la máquina, el útil de sujeción y la pieza de trabajo, véase Figura 114 y Figura 115.

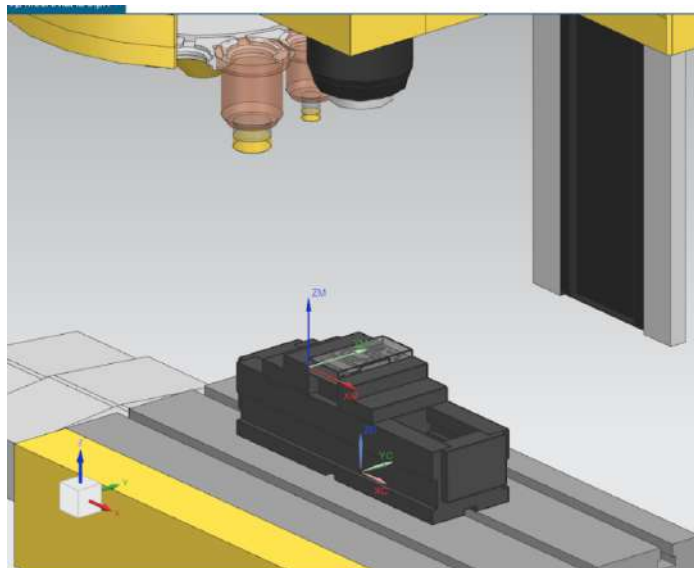


Figura 114. Modelo del ensamble total empleado para la simulación del mecanizado de la pieza.

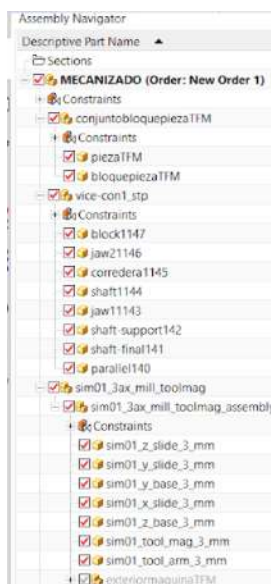


Figura 115. Árbol del modelo del ensamble total empleado para la simulación del mecanizado de la pieza.

En concreto, el utillaje de sujeción consiste en un tornillo de banco con sendas mordazas entre las que se ajusta la pieza de trabajo impidiendo que ésta se mueva durante su mecanizado.

Dicho tornillo de banco se ha creado mediante un ensamble de las diferentes piezas que lo componen, véase Figura 116.

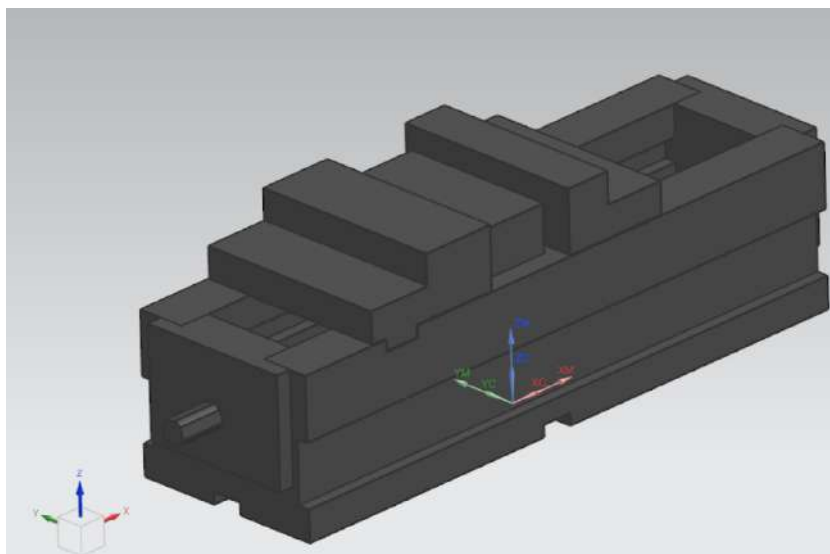


Figura 116. Modelo del tornillo de banco.

Éstos son:

- La estructura del tornillo de banco que sirve de base para el resto de piezas (“block1147.prt”).
- Dos soportes para el eje del tornillo de banco montado en los respectivos extremos de la estructura (“shaft-support142.prt” y “shaft-final141.prt”).
- Una deslizadera que desliza longitudinalmente a lo largo del eje del tornillo de banco (“corredera1145.prt”).
- El propio eje del tornillo de banco que al hacerlo rotar mediante la manivela que hay en uno de sus extremos acerca o aleja las mordazas entre sí (“shaft1144.prt”).
- Dos mordazas, de las cuales una de ellas está fija a la estructura (“jaw21146.prt”) mientras que la otra es solidaria a la deslizadera por lo que también puede desplazarse longitudinalmente a lo largo del eje (“jaw11143.prt”).
- Un bloque nivelador, que se ubica entre ambas mordazas y es paralelo al plano de la mesa de trabajo (“parallel140.prt”), sobre el cual se apoya la pieza en cuestión a mecanizar.

Por otro lado, la lista de restricciones globales del ensamble total del tornillo de banco se incluyen a continuación, véase Figura 117.

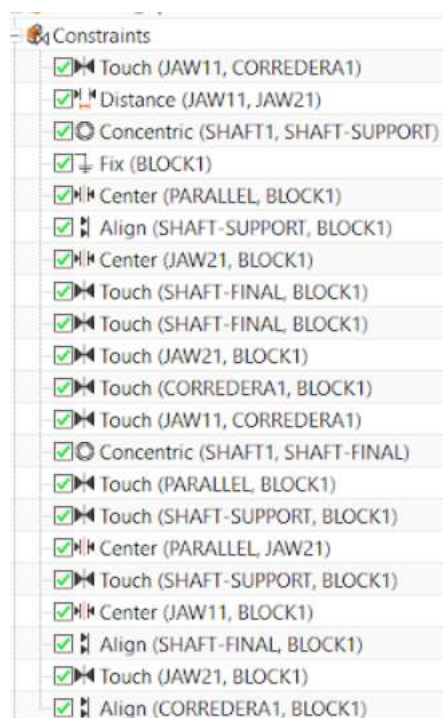


Figura 117. Lista de restricciones globales del ensamble total del tornillo de banco.

Obsérvese que este útil de sujeción no se corresponde exactamente con el de la máquina física *Hartford* pero se ha elegido este útil en concreto puesto que ya se tenía integrado en *Siemens NX* gracias a la asignatura “Diseño del Producto” del MII.

El centro geométrico de dicho útil de sujeción coincidirá con la proyección del centro geométrico de la boquilla del cabezal sobre la cara superior de la mesa de trabajo para lo cual se han incluido las siguientes restricciones. Asimismo, la pieza de trabajo cuyo mecanizado se va a proceder a simular debe estar posicionada entre ambas mordazas, la fija y la móvil, centrada con respecto a la estructura del tornillo de banco y apoyada sobre el bloque nivelador. A continuación, se puede ver la lista de restricciones globales del ensamble, teniendo en cuenta que las tres primeras restricciones relacionan el conjunto bloque pieza con el útil de sujeción, mientras que las tres últimas relacionan la pieza de trabajo con el útil de sujeción, véase Figura 118.

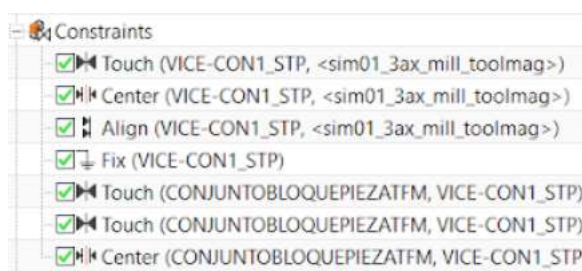


Figura 118. Lista de restricciones globales del ensamble total de la máquina, del útil de sujeción y de la pieza de trabajo.

Hasta este momento se ha estado usando la aplicación de “Modelado” del *software Siemens NX*, y a partir de este punto, se empieza a utilizar la aplicación de “Fabricación” que proporciona las herramientas para programar y postprocesar interactivamente el fresado, el taladrado y las trayectorias de las herramientas, véase Figura 119. Dentro de esta aplicación existen cuatro tipos de vistas diferentes las cuales se usarán en función de los requerimientos de la simulación: “Vista de Orden del programa”, “Vista de la máquina herramienta”, “Vista de Geometría” y “Vista de

método de mecanizado”. Además, a partir de este momento es imprescindible abrir el programa utilizando el *script* que incluye la preconfiguración del mismo.

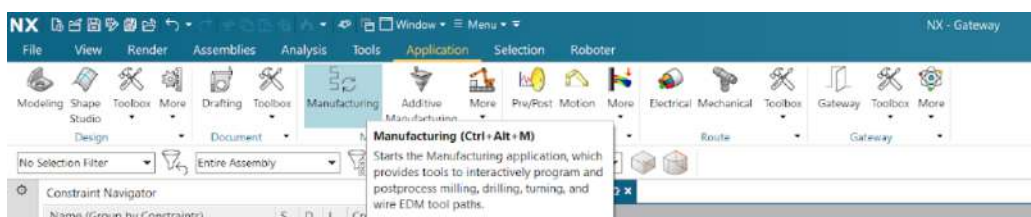


Figura 119. Aplicación “Fabricación” del *software* Siemens NX.

El segundo paso de la simulación, será definir los elementos de la configuración del modelo cinemático de la máquina (“SET_UP”) que se han determinado previamente. Para ello se ha asignado la pieza de trabajo al elemento “PART”, véase Figura 120, el bloque de aluminio al elemento “WORK_PIECE”, véase Figura 121 y el tornillo de banco al elemento “FIXTURE”, véase Figura 122.

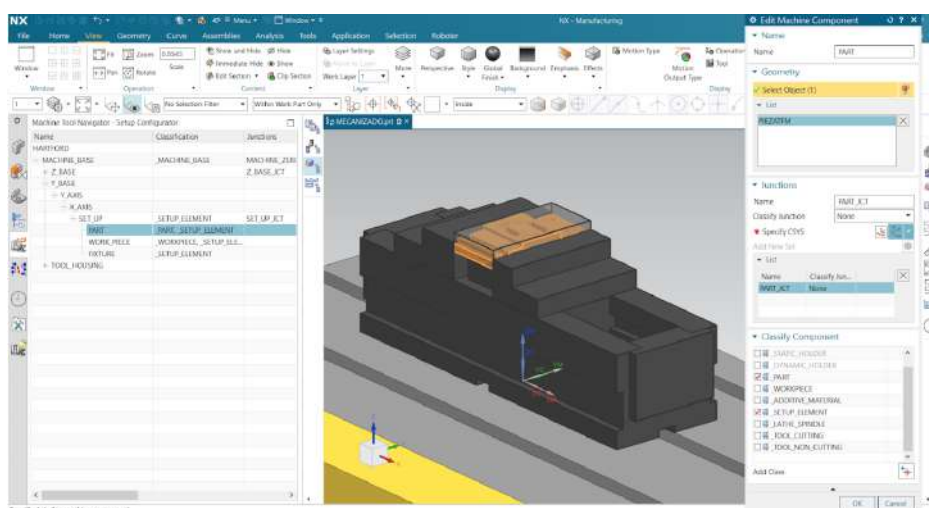


Figura 120. Asignación de la pieza de trabajo al elemento “PART”.

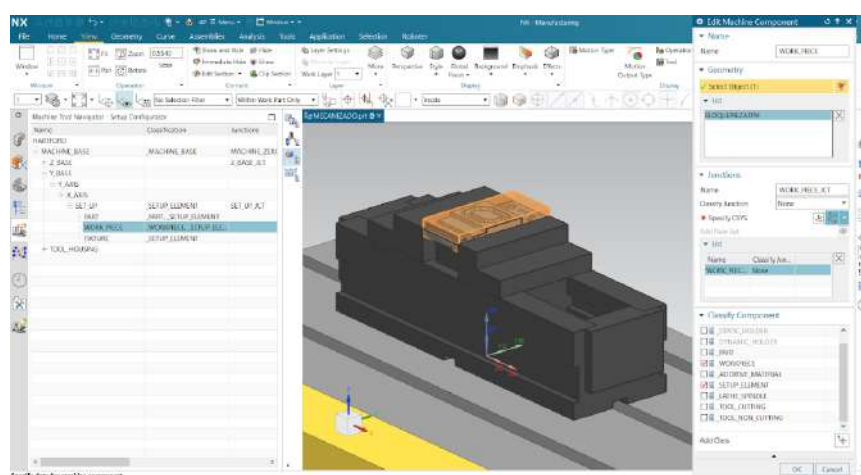


Figura 121. Asignación del bloque de aluminio al elemento “WORK_PIECE”.

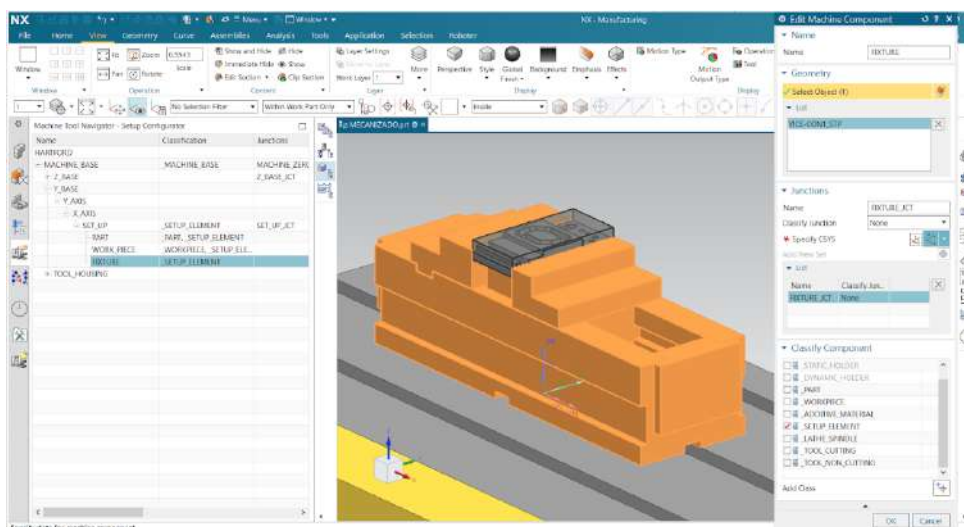


Figura 122. Asignación del tornillo de banco al elemento “FIXTURE”.

El tercer paso de la simulación se hará en la “Vista de Geometría” donde se procede a la creación de grupos padre del sistema de coordenadas en máquina (SCM), que básicamente consiste en la definición del sistema de coordenadas cartesianas global de la máquina (“MCS_MAIN”), véase Figura 123 y del sistema de coordenadas cartesianas local de la pieza de trabajo (“MCS_LOCAL”), véase Figura 124.

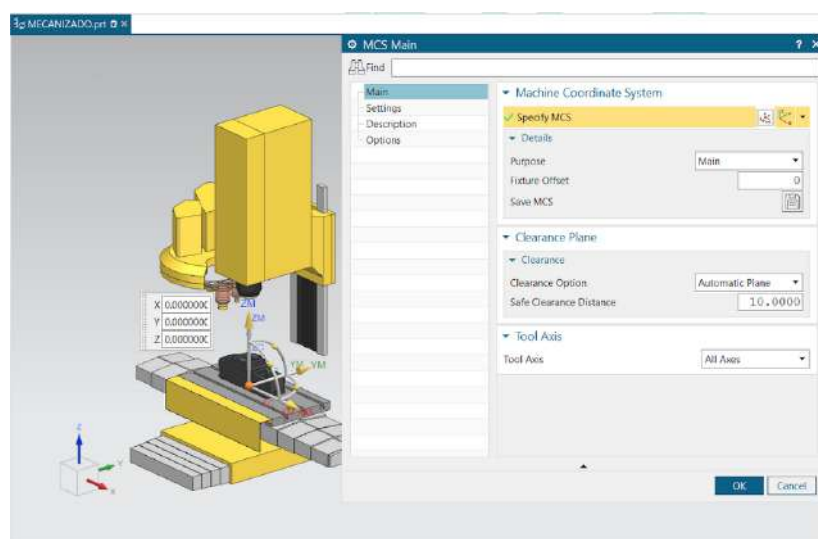


Figura 123. Definición del sistema de coordenadas cartesianas global de la máquina.

Como ya se ha comentado anteriormente, el origen del sistema de coordenadas global de la máquina se encuentra localizado en el centro geométrico de la cara superior de la mesa de trabajo. El origen del sistema de coordenadas local de la pieza de trabajo se encuentra localizado en la esquina superior izquierda de la pieza de trabajo vista ésta en planta, siendo las direcciones y sentidos de los ejes análogos a los de los ejes de coordenadas cartesianas globales de la máquina. Esta definición es un aspecto muy importante a la hora de la simulación.

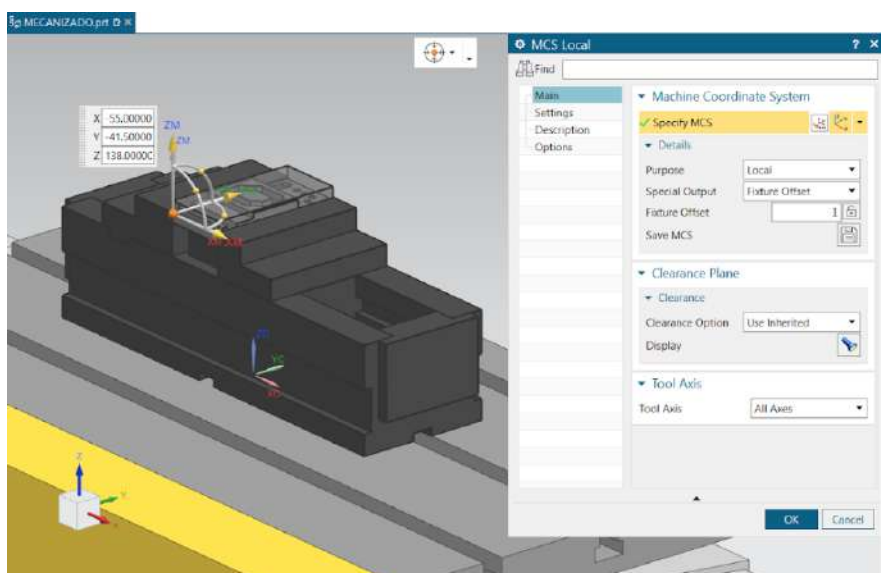


Figura 124. Definición del sistema de coordenadas cartesianas local de la pieza de trabajo.

Además, dicho sistema de coordenadas local de la pieza cuelga del sistema de coordenadas global de la máquina. A su vez, de este sistema de coordenadas local de la pieza cuelga la definición de la geometría (“WORKPIECE”) del ensamble Bloque - Pieza de Trabajo necesario para poder llevar a cabo la simulación del mecanizado de la misma. Para ello habrá que asignar la pieza de trabajo al elemento “Part”, véase Figura 125, y el bloque de aluminio al elemento “Blank”, véase Figura 126. También se asignará el material a ambos componentes, que en este caso se trata de Aluminio 7050, cuya referencia en la librería de materiales es “MAT0_00266”.

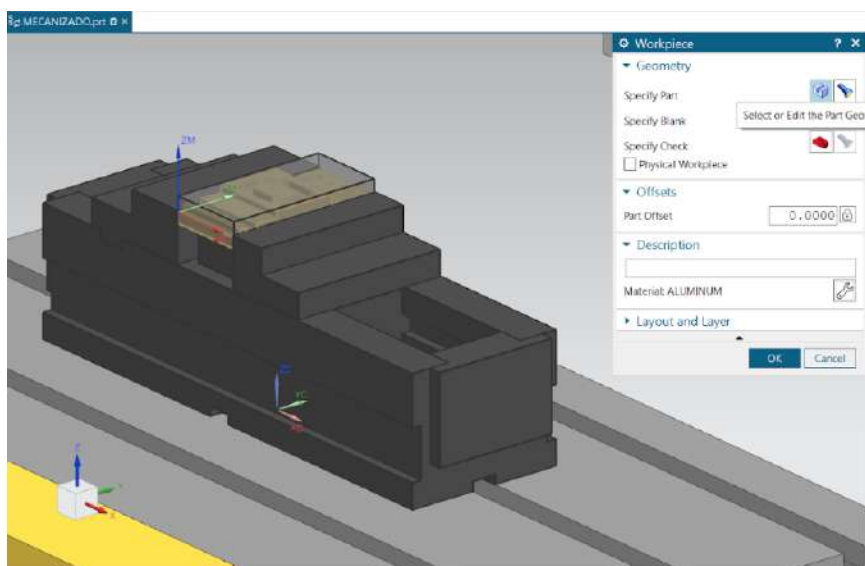


Figura 125. Asignación de la pieza de trabajo al elemento “Part”.

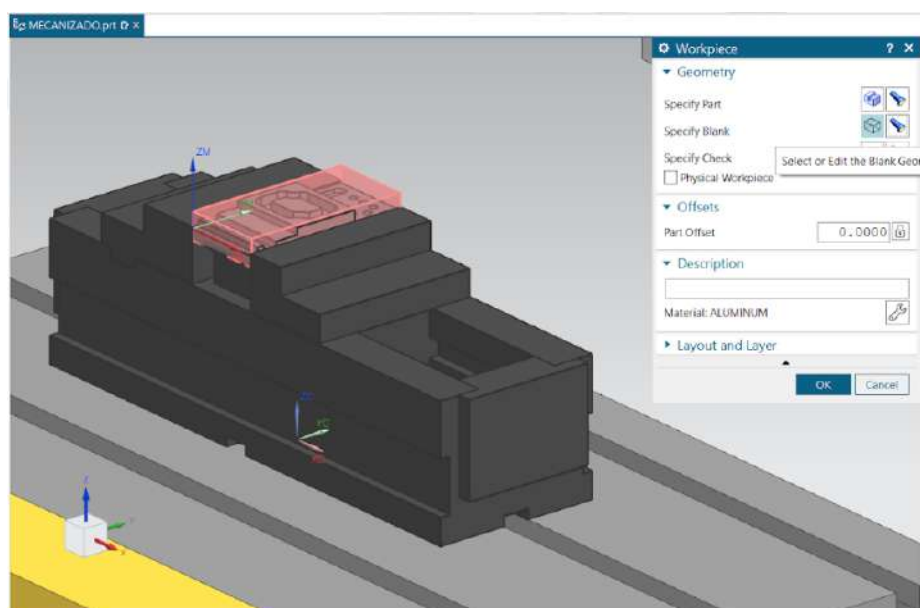


Figura 126. Asignación del bloque de aluminio al elemento “Blank”.

A continuación, se adjuntan el árbol correspondiente a la “Vista de Geometría”, véase Figura 127.

Operation Navigator - Geometry				
Name	Path	Tool	Geometry	Method
GEOMETRY				
Unused Items				
MCS_MAIN				
MCS_LOCAL				
WORKPIECE				
FLOOR_FACING_1	✓	UGT0202_031	WORKPIECE	METHOD
FLOOR_WALL_1	✓	UGT0202_002	WORKPIECE	METHOD
FLOOR_WALL_2	✓	UGT0202_002	WORKPIECE	METHOD
PLANAR_PROFILIN...	✓	WKZ_101004	WORKPIECE	METHOD
FLOOR_WALL_3	✓	WKZ_101004	WORKPIECE	METHOD
POCKETING_1	✓	UGT0201_002	WORKPIECE	METHOD
POCKETING_2	✓	UGT0201_002	WORKPIECE	METHOD
SPOT_DRILLING_1	✓	NXT0301_030	WORKPIECE	METHOD
DRILLING_1	✓	NXT0301_031	WORKPIECE	METHOD

Figura 127. Árbol de la “Vista de Geometría” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.

Estos pasos iniciales se corresponden con la preconfiguración de la simulación del mecanizado. A continuación, se definirán las diferentes operaciones del proceso de mecanizado y las herramientas asociadas a cada una de ellas. Para ello, se ilustrará el procedimiento para definir una de ellas, haciendo extensible dicho procedimiento a las demás.

Para la definición de las diferentes operaciones y herramientas se pueden seguir dos procedimientos. Dentro de la “Vista de Geometría”, el primero de ellos consiste en ir añadiendo

las diferentes operaciones de mecanizado a la definición de la geometría de la pieza y asignándole la herramienta de corte correspondiente. Dentro de la “Vista de la máquina herramienta”, el segundo de ellos consiste en ir insertando las diferentes herramientas en sus correspondientes *pockets* del cambiador automático de herramientas, para después asignarles a cada una ellas la operación u operaciones correspondientes. En este caso se ha optado por seguir el primer procedimiento.

Los pasos para crear una operación son:

1. Insertar una operación, véase Figura 128.

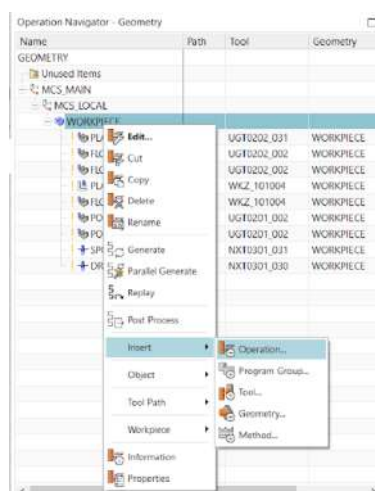


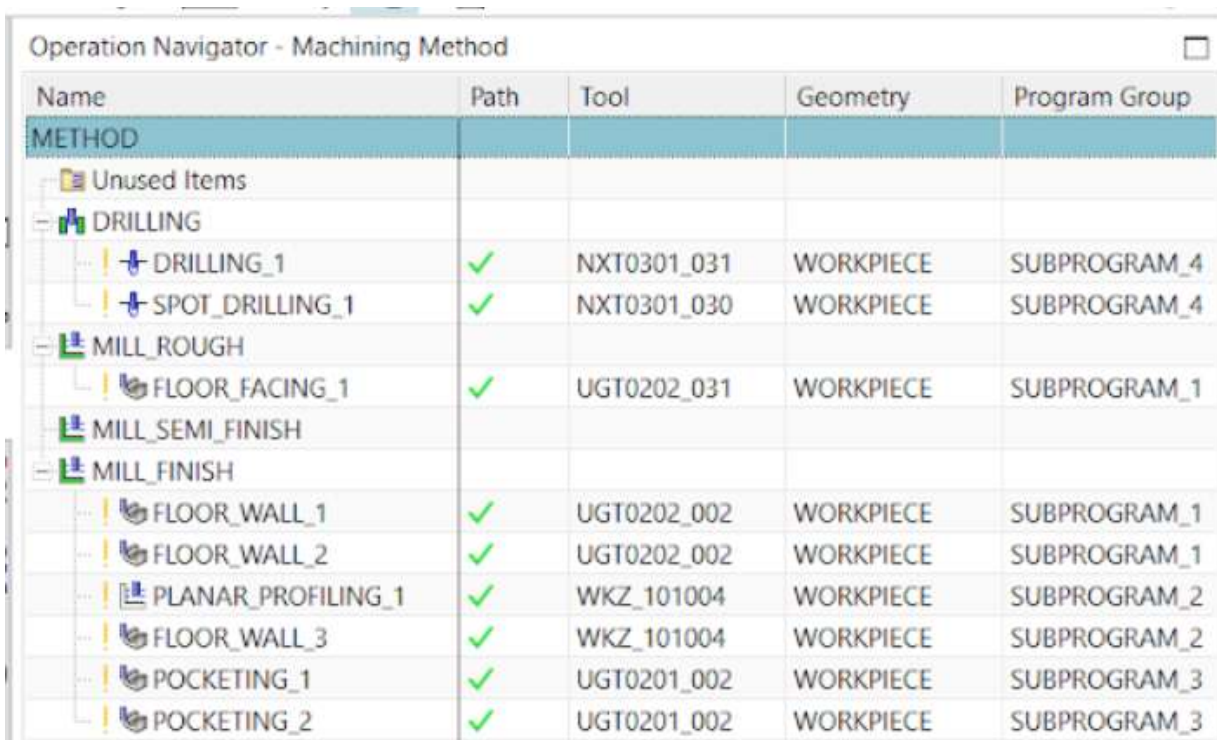
Figura 128. Insertar una operación.

2. Definir los parámetros de la operación: tipo, subtipo, ubicación y nombre, véase Figura 129.



Figura 129. Definir los parámetros de la operación.

A continuación, se adjuntan el árbol correspondiente a la “Vista de método de mecanizado”, véase Figura 130.



Name	Path	Tool	Geometry	Program Group
METHOD				
Unused Items				
DRILLING				
DRILLING_1	✓	NXT0301_031	WORKPIECE	SUBPROGRAM_4
SPOT_DRILLING_1	✓	NXT0301_030	WORKPIECE	SUBPROGRAM_4
MILL_ROUGH				
FLOOR_FACING_1	✓	UGT0202_031	WORKPIECE	SUBPROGRAM_1
MILL_SEMI_FINISH				
MILL_FINISH				
FLOOR_WALL_1	✓	UGT0202_002	WORKPIECE	SUBPROGRAM_1
FLOOR_WALL_2	✓	UGT0202_002	WORKPIECE	SUBPROGRAM_1
PLANAR_PROFILING_1	✓	WKZ_101004	WORKPIECE	SUBPROGRAM_2
FLOOR_WALL_3	✓	WKZ_101004	WORKPIECE	SUBPROGRAM_2
POCKETING_1	✓	UGT0201_002	WORKPIECE	SUBPROGRAM_3
POCKETING_2	✓	UGT0201_002	WORKPIECE	SUBPROGRAM_3

Figura 130. Árbol de la “Vista de método de mecanizado” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.

3. Seleccionar la herramienta y especificar el área de corte, véase Figura 131. Opcionalmente, se puede establecer un valor para las creces de la superficie y un patrón de corte de la herramienta. En este apartado se pueden ajustar muchos otros parámetros de corte aunque en este caso se mantendrán los valores preestablecidos por defecto.

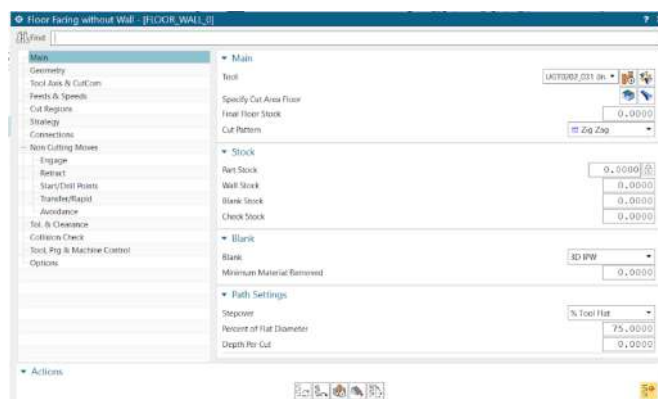


Figura 131. Seleccionar los parámetros de corte.

Una vez creada la operación se procederá a generar la trayectoria utilizada en dicha operación (“Generar la trayectoria para herramientas”), véase Figura 132.

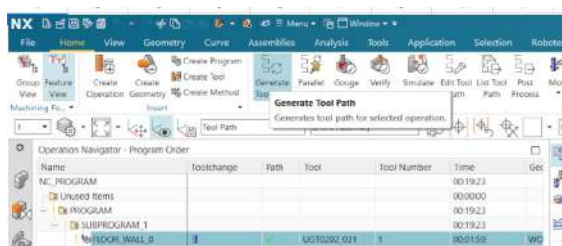


Figura 132. Generación de la trayectoria de la herramienta.

Después, se debe verificar que dicha trayectoria es la deseada (“Verificar la trayectoria para herramientas”) y que la herramienta seleccionada es la correcta y su movimiento es el esperado, véase Figura 133.

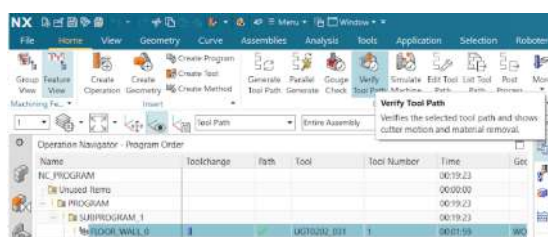


Figura 133. Verificación de la trayectoria de la herramienta.

Tras todo esto, ya se puede proceder a simular la operación dentro de la máquina (“Simular con máquina”). En este punto se comprueba que dicha operación se ejecuta de manera adecuada, dentro de la máquina, siguiendo el modelo cinemático previamente definido y, por tanto, el acoplamiento entre la herramienta, la pieza y la máquina es correcto., véase Figura 134. Si se quiere simular el mecanizado de un grupo de operaciones al mismo tiempo previamente hay que crear un subprograma (“SUBPROGRAM”) que las agrupe en la “Vista de Orden del programa”.

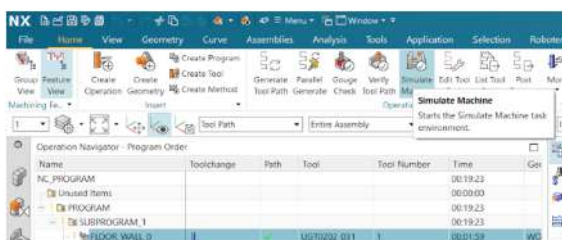
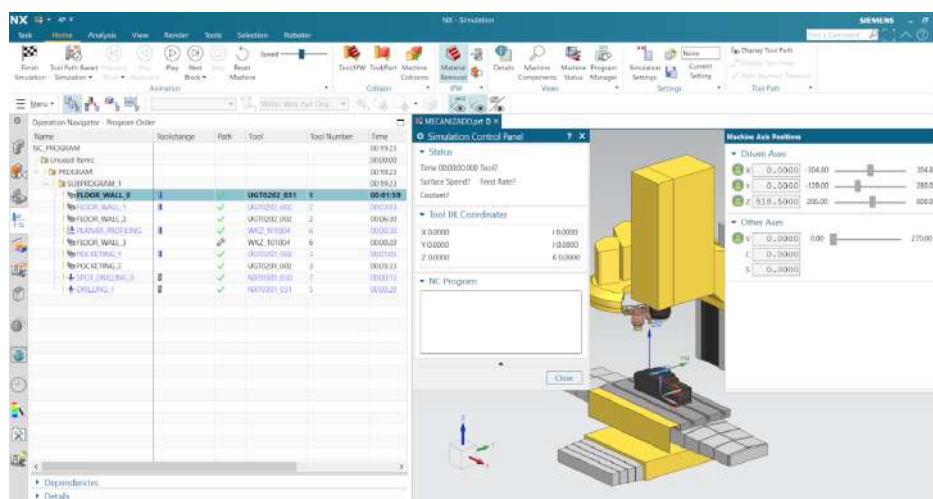


Figura 134. Generación de la trayectoria de la herramienta.

Durante la visualización del simulado se puede ajustar la velocidad del simulado, visualizar el material que se corta, verificar las posibles colisiones, etc. , véase Figura 135. En concreto, durante la simulación se muestran dos paneles de control de la simulación (“Simulation Control Panel”). En el primero de ellos se puede ver las posiciones de los ejes, tanto los principales (X, Y, Z) como los secundarios (S, V, C), y comprobar así que dichos valores están dentro de los límites establecidos. Por otro lado, en el segundo panel de control de la simulación se observan tres aspectos: el estado de la misma (tiempo de la simulación, herramienta utilizada, parámetros de corte tales como la velocidad de corte y la velocidad de avance y uso de refrigerante), las coordenadas I, J, K de la herramienta y el código NC (“NC_PROGRAM”), véase Figura 137.

**Figura 135.** Parámetros del simulado.

A continuación, se detallarán las distintas características de cada operación en las siguientes Tabla 5 y Tabla 6.

OPERACIÓN	NOMBRE	TIPO	SUBTIPO	LOCALIZACIÓN			
				PROGRAMA	HERRAMIENTA	MÉTODO	GEOMETRÍA
DESBASTE + PLANEADO	FLOOR_FACING_1	mill_planar	FLOOR_FACING	PROGRAM-SUBPROGRAM_1	UGT0202_031	METHOD-MILL_ROUGH	WORKPIECE
PLANEADO	FLOOR_WALL_1	mill_planar	FLOOR_WALL	PROGRAM-SUBPROGRAM_1	UGT0202_002	METHOD-MILL_FINISH	WORKPIECE
PLANEADO	FLOOR_WALL_2	mill_planar	FLOOR_WALL	PROGRAM-SUBPROGRAM_1	UGT0202_002	METHOD-MILL_FINISH	WORKPIECE
RANURADO RECTO	PLANAR_PROFILING_1	mill_planar	PLANAR_PROFILING	PROGRAM-SUBPROGRAM_2	WKZ_101004	METHOD-MILL_FINISH	WORKPIECE
FRESADO EN ESCUADRA	FLOOR_WALL_3	mill_planar	FLOOR_WALL	PROGRAM-SUBPROGRAM_2	WKZ_101004	METHOD-MILL_FINISH	WORKPIECE
RANURADO DE FORMA	POCKETING_1	mill_planar	POCKETING	PROGRAM-SUBPROGRAM_3	UGT0201_002	METHOD-MILL_FINISH	WORKPIECE
RANURADO DE FORMA	POCKETING_2	mill_planar	POCKETING	PROGRAM-SUBPROGRAM_3	UGT0201_002	METHOD-MILL_FINISH	WORKPIECE
PUNTEADO	SPOT_DRILLING_1	hole_making	SPOT_DRILLING	PROGRAM-SUBPROGRAM_4	NXT0301_030	METHOD-DRILLING	WORKPIECE
TALADRADO	DRILLING_1	hole_making	DRILLING	PROGRAM-SUBPROGRAM_4	NXT0301_031	METHOD-DRILLING	WORKPIECE

Tabla 5. Características de las operaciones utilizadas en el simulado (I).

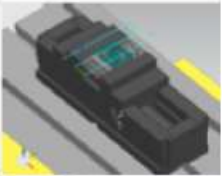
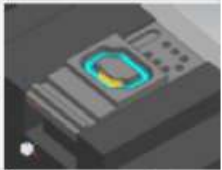
OPERACIÓN	NOMBRE	TIEMPO DE SIMULACIÓN	PATRÓN DE CORTE	TRAYECTORIA
DESBASTE + PLANEADO	FLOOR_FACING_1	0:01:59	Zig Zag	
PLANEADO	FLOOR_WALL_1	0:03:03	Follow Periphery	
PLANEADO	FLOOR_WALL_2	0:06:30	Follow Periphery	
RANURADO RECTO	PLANAR_PROFILING_1	0:00:20	Follow Periphery	
FRESADO EN ESCUADRA	FLOOR_WALL_3	0:00:40	Follow Periphery	
RANURADO DE FORMA	POCKETING_1	0:05:33	Follow Periphery	
RANURADO DE FORMA	POCKETING_2	0:01:05	Follow Periphery	
PUNTEADO	SPOT_DRILLING_1	0:00:13	Zig Zag	
TALADRADO	DRILLING_1	0:00:20	Follow Periphery	

Tabla 6. Características de las operaciones utilizadas en el simulado (II).

Además, se añade una tabla con las principales características y especificaciones de las herramientas creadas, véase Tabla 7 y Figura 136. Las herramientas se han escogido en función a sus dimensiones, las cuales deben ser acordes a las propias dimensiones de la superficie de

corte específicas de cada operación. Así pues, se emplea una misma herramienta para llevar a cabo más de una operación de mecanizado, véase Figura 138. Obsérvese también, que todas las herramientas son no indexables, es decir, están formadas una pieza entera que corta, por lo tanto si ésta pierde su funcionalidad habrá que reemplazar la herramienta de corte por completo. En contraposición, existen también herramientas indexables, las cuales están formadas por pequeñas placas de corte y, por lo tanto, si alguna de estas placas pierden su funcionalidad de corte se pueden reemplazar sin necesidad de cambiar toda la herramienta de corte por completo.

Todas las herramientas de corte emplean el nitrato de titanio aluminio (Al,Ti)N como material usado en el método de recubrimiento de las mismas denominado deposición física de vapor (*PVD*); a excepción de la herramienta localizada en el *pocket* número 6, la cual está fabricada en acero rápido o acero de alta velocidad (*HSS*). Dicha herramienta es la única cuyo portaherramientas está insertado en un cono de sujeción, el cual se aloja directamente en el *pocket* del cambiador de herramientas y es introducido a presión en el interior del cabezal de la torre cunado tiene lugar el cambio de herramienta, tal y como ocurre en el proceso de mecanizado real.

NOMBRE	REFERENCIA	POCKET	DIMENSIONES	MATERIAL	TIPOLOGÍA	IMAGEN
Insert Cutter 50 mm	UGT0202_031	1	D = 50.000 mm R1 = 0.800 mm B = 0° A = 0° L = 34.690 mm FL = 15.40 mm	PVD (Ti,Al)N	No indexable	
Insert Cutter 25 mm	UGT0202_002	2	D = 25.000 mm R1 = 0.800 mm B = 0° A = 0° L = 31.920 mm FL = 9.500 mm	PVD (Ti,Al)N	No indexable	
End Mill 8 mm	UGT0201_002	3	D = 8.000 mm R1 = 0.000 mm B = 0° A = 0° L = 30.000 mm FL = 19.000 mm	PVD (Ti,Al)N	No indexable	
Carbide Drill 5.9 mm	NXT0301_030	4	D = 5.900 mm PA= 140° PL = 1.092 mm CR = 0.000 mm L = 66.000 mm FL = 28.000 mm	PVD (Ti,Al)N	No indexable	
Carbide Drill 6 mm	NXT0301_031	5	D = 6.000 mm PA= 140° PL = 1.092 mm CR = 0.000 mm L = 66.000 mm FL = 28.000 mm	PVD (Ti,Al)N	No indexable	
End Mill 10 mm	WKZ_101004	6	D = 10.000 mm R1 = 0.000 mm B = 0° A = 0° L = 72.000 mm FL = 22.000 mm	HSS	No indexable	

Tabla 7. Características de las herramientas utilizadas en el simulado.

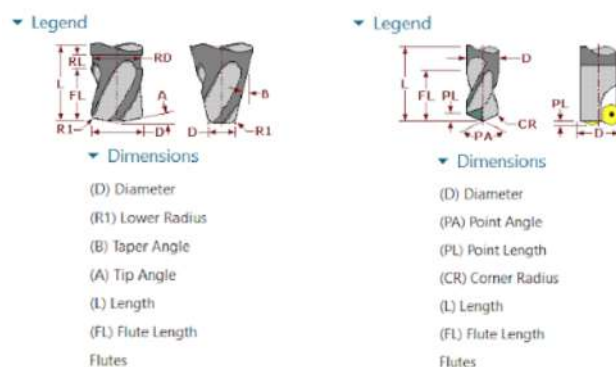


Figura 136. Parámetros dimensionales de las herramientas de corte.

A continuación, se adjuntan los árboles correspondientes “Vista de Orden del programa” “Vista de la máquina herramienta”, véase Figura 137 y Figura 138. Para más información sobre el simulado puede consultarse el Anexo D.

Operation Navigator - Program Order						
Name	Toolchange	Path	Tool	Tool Number	Time	
NC_PROGRAM					00:19:44	
Unused Items					00:00:00	
PROGRAM					00:19:44	
SUBPROGRAM_1					00:11:32	
FLOOR_FACING_1		✓	UGT0202_031	1	00:01:59	
FLOOR_WALL_1		✓	UGT0202_002	2	00:03:03	
FLOOR_WALL_2		✓	UGT0202_002	2	00:06:30	
SUBPROGRAM_2					00:01:00	
PLANAR_PROFILING_1		✓	WKZ_101004	6	00:00:20	
FLOOR_WALL_3		✓	WKZ_101004	6	00:00:40	
SUBPROGRAM_3					00:06:38	
POCKETING_1		✓	UGT0201_002	3	00:05:33	
POCKETING_2		✓	UGT0201_002	3	00:01:05	
SUBPROGRAM_4					00:00:34	
SPOT_DRILLING_1		✓	NXT0301_030	4	00:00:13	
DRILLING_1		✓	NXT0301_031	5	00:00:20	

Figura 137. Árbol de la “Vista de Orden del programa” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.

Operation Navigator - Machine Tool							
Name	Path	Tool	Description	Tool Number	Geometry	Method	Program Group
3-AX MILL_VERTICAL_POST_CONFIGURATOR_METRIC_INCH			Example: 3-Ax_Mill_Vertical_Post_Configurator_metricinch				
Unused Items			3-Ax_Mill_Vertical_Post_Configurator_metricinch				
SPINDLE			Pocket:				
TOOL_MAGAZINE			Tool Carrier: 1				
POCKET_01			Pocket:				
UGT0202_031	✓	UGT0202_031	Insert Cutter 50 mm	1			
FLOOR_FACING_1	✓	UGT0202_031	FLOOR_FACING	1	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_1
POCKET_02			Pocket:				
UGT0202_002	✓	UGT0202_002	Insert Cutter 25 mm	2			
FLOOR_WALL_1	✓	UGT0202_002	FLOOR_WALL	2	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_1
FLOOR_WALL_2	✓	UGT0202_002	FLOOR_WALL	2	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_1
POCKET_03			Pocket:				
UGT0201_002	✓	UGT0201_002	End Mill 8 mm	3			
POCKETING_2	✓	UGT0201_002	POCKETING	3	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_3
POCKETING_1	✓	UGT0201_002	POCKETING	3	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_3
POCKET_04			Pocket:				
NXT0301_030	✓	NXT0301_030	Carbide Drill 5.0mm (860.1-0590-018A1-MM 2214)	4			
SPOT_DRILLING_1	✓	NXT0301_030	SPOT_DRILLING	4	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_4
POCKET_05			Pocket:				
NXT0301_031	✓	NXT0301_031	Carbide Drill 6mm (860.1-0600-018A1-MM 2214)	5			
DRILLING_1	✓	NXT0301_031	DRILLING	5	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_4
POCKET_06			Pocket:				
WKZ_101004	✓	WKZ_101004	end_mill_810	6			
FLOOR_WALL_3	✓	WKZ_101004	FLOOR_WALL	6	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_2
PLANAR_PROFILING_1	✓	WKZ_101004	PLANAR_PROFILING	6	WORKPIECE	METHOD	SUBPROGRAM_2

Figura 138. Árbol de la “Vista de la máquina herramienta” de la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo.

6.5. Postprocesado

Una vez realizados los procesos de diseño, modelado y simulación de la máquina se pasará a detallar los procesos siguientes: postprocesado y depuración.

Un postprocesador es una parte esencial del proceso de mecanizado de máquinas CNC. En general, se puede afirmar que el postprocesado es un *software* que traduce el código generado por el *software* CAM en un lenguaje específico para la máquina CNC en la que se realizará el mecanizado.

Cuando se crea un programa de mecanizado utilizando un *software* CAM, este genera un código G (código *G-Code*) que describe las instrucciones de movimiento y las operaciones de corte necesarias para producir la pieza deseada. Sin embargo, el código G generado por el *software* CAM no es directamente comprensible para la máquina CNC, ya que cada máquina tiene su propio lenguaje de control específico.

Aquí es donde entra en juego el postprocesador. Su función es procesar el código G generado por el *software* CAM y convertirlo en un formato que la máquina CNC pueda entender. El postprocesador tiene en cuenta las particularidades de la máquina, como las características del control CNC, los comandos y las secuencias específicas que requiere la máquina para realizar las operaciones de mecanizado de manera precisa. Así, un buen postprocesador puede optimizar el rendimiento y la precisión de la máquina, reduciendo errores y tiempos de mecanizado.

Hasta ahora para realizar la simulación del mecanizado de la pieza se ha utilizado el comando “Simulado en máquina”, basada en la trayectoria de las herramientas (“Tool Path Based Simulation”). Dicha simulación proporciona el código NC basado en la trayectoria de las herramientas. En cambio, para llevar a cabo el postprocesado, aunque no es necesario, se realizará la simulación basada en el código de la máquina (“Machine Code Based Simulation”), la cual proporciona el código NC basado en los códigos *G* y *M* de la máquina, véase Figura 139.

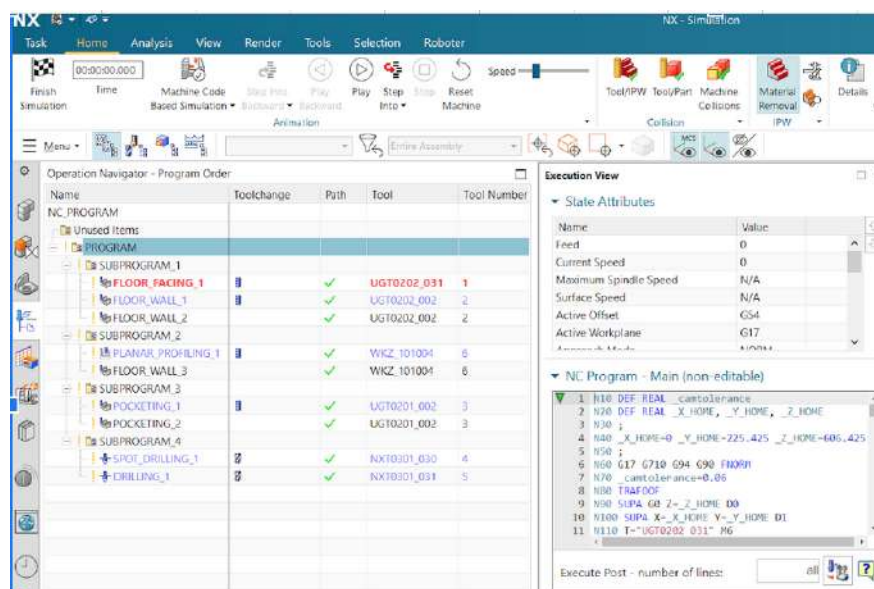


Figura 139. Simulación del mecanizado de la pieza basado en el código NC de la máquina.

Para obtener el código NC basado en la máquina, basta con emplear el comando de postprocesado (“Post Process”). A continuación, se selecciona el postprocesador que se desea emplear. En este caso se ha utilizado el postprocesador, asociado al CMV de tres ejes que fue usado como archivo de partida en el modelado, el cual ya está implementado por defecto en el *software* Siemens NX 1926 (“3-Ax_Mill_Vertical_PC”). Dicho postprocesador genera un archivo

de texto (.mpf) que contiene el código NC del programa de mecanizado de la pieza, véase Figura 140.

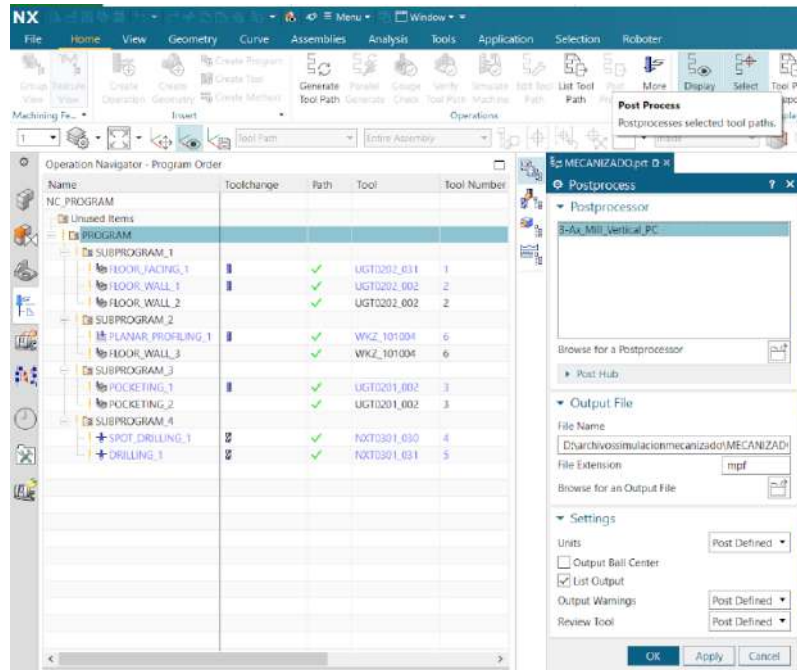


Figura 140. Postprocesado del programa de mecanizado de la pieza.

Seguidamente, se adjunta el código NC de la máquina asociado al programa de mecanizado de la pieza de trabajo.

Post Configurator www.siemens.com			
LIB-Sourcing	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\HARD...	Libraries\lib_sourcing.tcl
LIB-General	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\HARD...	Libraries\lib_general.tbc
LIB-XML-Handling	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\...	Libraries\lib_xml_handling.tbc
LIB-MSG-Commands	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\HARDFORT...	Libraries\lib_msg.tbc
LIB-File-Handling	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\...	Libraries\lib_file_handling.tbc
LIB-Standard-Post-Func	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_en...	Libraries\lib_standard_post_func.tbc
LIB-Documents	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\HARD...	Libraries\lib_documents.tbc
Ctrl_Sinumerik_Base	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\...	Controller\ctrl_sinumerik_base.tbc
Ctrl_S840D_Base	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_english\...	Controller\ctrl_s840d_base.tbc
Ctrl_Sinumerik_Base-MSG	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\installed_machines_...	Controller\ctrl_sinumerik_base_msg.tbc
EventHandler Filename	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\install...	3-Ax_Mill_Vertical_PC\sim01_mill_3ax_sinumerik.tcl
Definition Filename	:	UGII_BASE_DIR\MACH\custom\NX1926gMTE\Library_NXgMTE1926\machine\install...	3-Ax_Mill_Vertical_PC\sim01_mill_3ax_sinumerik.def
Output Filename	:	D:\archivos simulacion mecanizado\codigo NC mecanizado.mpf	
NX-Version	:	1926.0.0.1700	Library-Version : 5.3.0 - Release
Machine	:	Default	Controller : SIEMENS 840D
Partname	:	MECANIZADO.prt	Partmaterial : ALUMINUM
Programmer	:	stic	Creation date : 14.07.2023 16:30

Toollist			
Toolnumber	Toolname	Description	Processingtime
1	UGT0202_031	Insert Cutter 50 mm	00:01:59
2	UGT0202_002	Insert Cutter 25 mm	00:09:30
6	WKZ_101004	end_mill_d10	00:00:59
3	UGT0201_002	End Mill 8 mm	00:06:37
4	NXT0301_030	Carbide Drill 5.9mm (860.1-0590-018A1-MM 2214)	00:00:11
5	NXT0301_031	Carbide Drill 6mm (860.1-0600-018A1-MM 2214)	00:00:18

Operationlist			
Pathname	Toolname	Operationtype	Cuttingtime
FLOOR_FACING_1	UGT0202_031	Volume Based 2.5D Milling	00:01:59
FLOOR_WALL_1	UGT0202_002	Volume Based 2.5D Milling	00:03:02
FLOOR_WALL_2	UGT0202_002	Volume Based 2.5D Milling	00:06:28
PLANAR_PROFILING_1	WKZ_101004	Planar Milling	00:00:20
FLOOR_WALL_3	WKZ_101004	Volume Based 2.5D Milling	00:00:39
POCKETING_1	UGT0201_002	Volume Based 2.5D Milling	00:05:32
POCKETING_2	UGT0201_002	Volume Based 2.5D Milling	00:01:05
SPOT_DRILLING_1	NXT0301_030	Drilling	00:00:11
DRILLING_1	NXT0301_031	Drilling	00:00:18
Totaltime			00:19:35

```

N10 DEF REAL _camtolerance
N20 DEF REAL _X_HOME, _Y_HOME, _Z_HOME
N30 ;
N40 _X_HOME=0 _Y_HOME=225.425 _Z_HOME=606.425
N50 ;
N60 G17 G710 G94 G90 FNORM
N70 _camtolerance=0.06
N80 TRAFOOF
N90 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
N100 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N110 T="UGT0202_031" M6
N120 MSG("MILL_ROUGH")
N130 TRAFOOF
N140 SUPA Z=_Z_HOME D0
N150 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N160 CYCLE832(_camtolerance ,3 ,1)
N170 COMPOF
N180 G54
N190 G17 G0 X-25. Y-28. S637 D1 M3
N200 Z23.
N210 Z13.
N220 G94 G1 G90 Z10. F300.
N230 Y-25.
N240 Y148.
N250 X7.82
N260 Y-25.
N270 X40.64
N280 Y148.
N290 Y151.
N300 Z13.
N310 G0 Z23.
N320 M5
N330 SUPA Z=_Z_HOME D0
N340 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N350 _camtolerance=0.02
N360 T="UGT0202_002" M6
N370 MSG("MILL_FINISH")
N380 TRAFOOF
N390 SUPA Z=_Z_HOME D0
N400 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D2
N410 CYCLE832(_camtolerance ,1 ,1)
N420 COMPOF
N430 G54
N440 G17 G0 X30. Y-12.5 S637 D2 M3
N450 Z20.
N460 Z13.
N470 G94 G1 G90 Z7.5 F250.
N480 X-12.5
N490 Y25.
N500 X72.5
N510 Y-12.5
N520 X30.
N530 Y5.05
N540 X5.05
N550 Y7.45
N560 X54.95
N570 Y5.05
N580 X30.

```

N590 X29.
 N600 Y2.05
 N610 Z10.5
 N620 G0 Z20.
 N630 X30. Y-15.5
 N640 Z8.
 N650 G1 Z5.
 N660 Y-12.5
 N670 X-12.5
 N680 Y25.
 N690 X72.5
 N700 Y-12.5
 N710 X30.
 N720 Y5.05
 N730 X5.05
 N740 Y7.45
 N750 X54.95
 N760 Y5.05
 N770 X30.
 N780 X29.
 N790 Y2.05
 N800 Z8.
 N810 G0 Z20.
 N820 _camtolerance=0.02
 N830 X30. Y135.5 S1061
 N840 Z13.
 N850 G1 Z7.5
 N860 X72.5
 N870 Y98.
 N880 X-12.5
 N890 Y135.5
 N900 X30.
 N910 Y117.95
 N920 X54.95
 N930 Y115.55
 N940 X5.05
 N950 Y117.95
 N960 X30.
 N970 X31.
 N980 Y120.95
 N990 Z10.5
 N1000 G0 Z20.
 N1010 X30. Y138.5
 N1020 Z8.
 N1030 G1 Z5.
 N1040 Y135.5
 N1050 X72.5
 N1060 Y98.
 N1070 X-12.5
 N1080 Y135.5
 N1090 X30.
 N1100 Y117.95
 N1110 X54.95
 N1120 Y115.55
 N1130 X5.05
 N1140 Y117.95
 N1150 X30.
 N1160 X31.
 N1170 Y120.95

```

N1180 Z8.
N1190 G0 Z20.
N1200 X30. Y138.5
N1210 Z5.5
N1220 G1 Z2.5
N1230 Y135.5
N1240 X72.5
N1250 Y98.
N1260 X-12.5
N1270 Y135.5
N1280 X30.
N1290 Y117.95
N1300 X54.95
N1310 Y115.55
N1320 X5.05
N1330 Y117.95
N1340 X30.
N1350 X31.
N1360 Y120.95
N1370 Z5.5
N1380 G0 Z20.
N1390 X30. Y138.5
N1400 Z3.
N1410 G1 Z0.
N1420 Y135.5
N1430 X72.5
N1440 Y98.
N1450 X-12.5
N1460 Y135.5
N1470 X30.
N1480 Y117.95
N1490 X54.95
N1500 Y115.55
N1510 X5.05
N1520 Y117.95
N1530 X30.
N1540 X31.
N1550 Y120.95
N1560 Z3.
N1570 G0 Z20.
N1580 X75.5 Y25.
N1590 Z8.
N1600 G1 Z5.
N1610 X72.5
N1620 X-12.5
N1630 X-15.5
N1640 Z8.
N1650 G0 Z20.
N1660 M5
N1670 SUPA Z=_Z_HOME D0
N1680 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D2
N1690 _camtolerance=0.02
N1700 T="WKZ_101004" M6
N1710 MSG("MILL_FINISH")
N1720 TRAFOOF
N1730 SUPA Z=_Z_HOME D0
N1740 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N1750 CYCLE832(_camtolerance ,1 ,1)
N1760 COMPOF

```

```

N1770 G54
N1780 G17 G0 X68. Y15. S10610 D1 M3
N1790 Z20.
N1800 Z3.
N1810 G94 G1 G90 Z0. F250.
N1820 X60.
N1830 X0.
N1840 X-8.
N1850 Z3.
N1860 G0 Z20.
N1870 _camtolerance=0.02
N1880 Z20. S1061
N1890 X68. Y0.
N1900 Z3.
N1910 G1 Z0.
N1920 X65.
N1930 X-5.
N1940 X-8.
N1950 Z3.
N1960 G0 Z20.
N1970 Y90.5
N1980 Z3.
N1990 G1 Z0.
N2000 X-5.
N2010 X65.
N2020 X68.
N2030 Z3.
N2040 G0 Z20.
N2050 M5
N2060 SUPA Z=_Z_HOME D0
N2070 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N2080 _camtolerance=0.02
N2090 T="UGT0201_002" M6
N2100 MSG("MILL_FINISH")
N2110 TRAFOOF
N2120 SUPA Z=_Z_HOME D0
N2130 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D3
N2140 CYCLE832(_camtolerance ,1 ,1)
N2150 COMPOF
N2160 G54
N2170 G17 G0 X25.645 Y48.5 S1061 D3 M3
N2180 Z20.
N2190 Z13.
N2200 G94 G1 G90 X25.494 Z12.992 F250.
N2210 X39.989 Z12.232
N2220 X41.426 Y50.99 Z12.082
N2230 X42.318 Y52.272 Z12.
N2240 X43.331 Y53.461 Z11.918
N2250 X44.454 Y54.546 Z11.836
N2260 X44.893 Y54.904 Z11.806
N2270 X44.454 Y54.546 Z11.777
N2280 X43.331 Y53.461 Z11.695
N2290 X42.318 Y52.272 Z11.613
N2300 X41.426 Y50.99 Z11.531
N2310 X39.989 Y48.5 Z11.381
N2320 X25.494 Z10.621
N2330 X39.989 Z9.861
N2340 X41.426 Y50.99 Z9.711
N2350 X42.318 Y52.272 Z9.629

```


N2360 X43.331 Y53.461 Z9.547
 N2370 X44.454 Y54.546 Z9.465
 N2380 X44.893 Y54.904 Z9.435
 N2390 X44.454 Y54.546 Z9.406
 N2400 X43.331 Y53.461 Z9.324
 N2410 X42.318 Y52.272 Z9.242
 N2420 X41.426 Y50.99 Z9.16
 N2430 X39.989 Y48.5 Z9.01
 N2440 X25.494 Z8.25
 N2450 X11.
 N2460 Y65.489
 N2470 X13. Y66.644
 N2480 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N2490 G1 X20.011 Y74.5
 N2500 X49.
 N2510 Y57.511
 N2520 X47. Y56.356
 N2530 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N2540 G1 X39.989 Y48.5
 N2550 X25.494
 N2560 Y46.5
 N2570 X40.858
 N2580 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N2590 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N2600 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N2610 G1 Y70.5
 N2620 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N2630 G1 X19.142
 N2640 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N2650 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N2660 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N2670 G1 Y52.5
 N2680 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N2690 G1 X25.494
 N2700 X26.494
 N2710 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N2720 G1 Z11.25
 N2730 G0 Z20.
 N2740 X25.645
 N2750 Z11.25
 N2760 G1 X25.494 Z11.242
 N2770 X39.989 Z10.482
 N2780 X41.426 Y50.99 Z10.332
 N2790 X42.318 Y52.272 Z10.25
 N2800 X43.331 Y53.461 Z10.168
 N2810 X44.454 Y54.546 Z10.086
 N2820 X44.893 Y54.904 Z10.057
 N2830 X44.454 Y54.546 Z10.027
 N2840 X43.331 Y53.461 Z9.945
 N2850 X42.318 Y52.272 Z9.863
 N2860 X41.426 Y50.99 Z9.781
 N2870 X39.989 Y48.5 Z9.631
 N2880 X25.494 Z8.871
 N2890 X39.989 Z8.111
 N2900 X41.426 Y50.99 Z7.961
 N2910 X42.318 Y52.272 Z7.879
 N2920 X43.331 Y53.461 Z7.797
 N2930 X44.454 Y54.546 Z7.715
 N2940 X44.893 Y54.904 Z7.685

N2950 X44.454 Y54.546 Z7.656
 N2960 X43.331 Y53.461 Z7.574
 N2970 X42.318 Y52.272 Z7.492
 N2980 X41.426 Y50.99 Z7.41
 N2990 X39.989 Y48.5 Z7.26
 N3000 X25.494 Z6.5
 N3010 X11.
 N3020 Y65.489
 N3030 X13. Y66.644
 N3040 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N3050 G1 X20.011 Y74.5
 N3060 X49.
 N3070 Y57.511
 N3080 X47. Y56.356
 N3090 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N3100 G1 X39.989 Y48.5
 N3110 X25.494
 N3120 Y46.5
 N3130 X40.858
 N3140 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N3150 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N3160 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N3170 G1 Y70.5
 N3180 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N3190 G1 X19.142
 N3200 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N3210 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N3220 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N3230 G1 Y52.5
 N3240 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N3250 G1 X25.494
 N3260 X26.494
 N3270 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N3280 G1 Z9.5
 N3290 G0 Z20.
 N3300 X25.645
 N3310 Z9.5
 N3320 G1 X25.494 Z9.492
 N3330 X39.989 Z8.732
 N3340 X41.426 Y50.99 Z8.582
 N3350 X42.318 Y52.272 Z8.5
 N3360 X43.331 Y53.461 Z8.418
 N3370 X44.454 Y54.546 Z8.336
 N3380 X44.893 Y54.904 Z8.307
 N3390 X44.454 Y54.546 Z8.277
 N3400 X43.331 Y53.461 Z8.195
 N3410 X42.318 Y52.272 Z8.113
 N3420 X41.426 Y50.99 Z8.031
 N3430 X39.989 Y48.5 Z7.881
 N3440 X25.494 Z7.121
 N3450 X39.989 Z6.361
 N3460 X41.426 Y50.99 Z6.211
 N3470 X42.318 Y52.272 Z6.129
 N3480 X43.331 Y53.461 Z6.047
 N3490 X44.454 Y54.546 Z5.965
 N3500 X44.893 Y54.904 Z5.935
 N3510 X44.454 Y54.546 Z5.906
 N3520 X43.331 Y53.461 Z5.824
 N3530 X42.318 Y52.272 Z5.742

N3540 X41.426 Y50.99 Z5.66
 N3550 X39.989 Y48.5 Z5.51
 N3560 X25.494 Z4.75
 N3570 X11.
 N3580 Y65.489
 N3590 X13. Y66.644
 N3600 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N3610 G1 X20.011 Y74.5
 N3620 X49.
 N3630 Y57.511
 N3640 X47. Y56.356
 N3650 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N3660 G1 X39.989 Y48.5
 N3670 X25.494
 N3680 Y46.5
 N3690 X40.858
 N3700 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N3710 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N3720 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N3730 G1 Y70.5
 N3740 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N3750 G1 X19.142
 N3760 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N3770 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N3780 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N3790 G1 Y52.5
 N3800 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N3810 G1 X25.494
 N3820 X26.494
 N3830 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N3840 G1 Z7.75
 N3850 G0 Z20.
 N3860 X25.645
 N3870 Z7.75
 N3880 G1 X25.494 Z7.742
 N3890 X39.989 Z6.982
 N3900 X41.426 Y50.99 Z6.832
 N3910 X42.318 Y52.272 Z6.75
 N3920 X43.331 Y53.461 Z6.668
 N3930 X44.454 Y54.546 Z6.586
 N3940 X44.893 Y54.904 Z6.557
 N3950 X44.454 Y54.546 Z6.527
 N3960 X43.331 Y53.461 Z6.445
 N3970 X42.318 Y52.272 Z6.363
 N3980 X41.426 Y50.99 Z6.281
 N3990 X39.989 Y48.5 Z6.131
 N4000 X25.494 Z5.371
 N4010 X39.989 Z4.611
 N4020 X41.426 Y50.99 Z4.461
 N4030 X42.318 Y52.272 Z4.379
 N4040 X43.331 Y53.461 Z4.297
 N4050 X44.454 Y54.546 Z4.215
 N4060 X44.893 Y54.904 Z4.186
 N4070 X44.454 Y54.546 Z4.156
 N4080 X43.331 Y53.461 Z4.074
 N4090 X42.318 Y52.272 Z3.992
 N4100 X41.426 Y50.99 Z3.91
 N4110 X39.989 Y48.5 Z3.76
 N4120 X25.494 Z3.

N4130 X11.
 N4140 Y65.489
 N4150 X13. Y66.644
 N4160 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N4170 G1 X20.011 Y74.5
 N4180 X49.
 N4190 Y57.511
 N4200 X47. Y56.356
 N4210 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N4220 G1 X39.989 Y48.5
 N4230 X25.494
 N4240 Y46.5
 N4250 X40.858
 N4260 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N4270 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N4280 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N4290 G1 Y70.5
 N4300 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N4310 G1 X19.142
 N4320 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N4330 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N4340 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N4350 G1 Y52.5
 N4360 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N4370 G1 X25.494
 N4380 X26.494
 N4390 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N4400 G1 Z6.
 N4410 G0 Z20.
 N4420 _camtolerance=0.02
 N4430 X9. Y108.937
 N4440 Z3.
 N4450 G1 Y113. Z2.787
 N4460 Y113.142 Z2.78
 N4470 X9.096 Y113.451 Z2.763
 N4480 X9.286 Y113.714 Z2.746
 N4490 X9.549 Y113.904 Z2.729
 N4500 X9.858 Y114. Z2.712
 N4510 X10.142 Z2.697
 N4520 X10.451 Y113.904 Z2.68
 N4530 X10.714 Y113.714 Z2.663
 N4540 X10.904 Y113.451 Z2.646
 N4550 X11. Y113.142 Z2.629
 N4560 Y102.272 Z2.059
 N4570 Y113.142 Z1.489
 N4580 X10.904 Y113.451 Z1.472
 N4590 X10.714 Y113.714 Z1.456
 N4600 X10.451 Y113.904 Z1.439
 N4610 X10.142 Y114. Z1.422
 N4620 X9.858 Z1.407
 N4630 X9.549 Y113.904 Z1.39
 N4640 X9.286 Y113.714 Z1.373
 N4650 X9.096 Y113.451 Z1.356
 N4660 X9. Y113.142 Z1.339
 N4670 Y113. Z1.331
 N4680 Y104.25 Z0.873
 N4690 Y113. Z0.414
 N4700 Y113.142 Z0.407
 N4710 X9.096 Y113.451 Z0.39

N4720 X9.286 Y113.714 Z0.373
 N4730 X9.549 Y113.904 Z0.356
 N4740 X9.858 Y114. Z0.339
 N4750 X10.142 Z0.324
 N4760 X10.451 Y113.904 Z0.307
 N4770 X10.714 Y113.714 Z0.29
 N4780 X10.904 Y113.451 Z0.273
 N4790 X11. Y113.142 Z0.256
 N4800 Y102.272 Z-0.314
 N4810 Y113.142 Z-0.883
 N4820 X10.904 Y113.451 Z-0.9
 N4830 X10.714 Y113.714 Z-0.917
 N4840 X10.451 Y113.904 Z-0.934
 N4850 X10.142 Y114. Z-0.951
 N4860 X9.858 Z-0.966
 N4870 X9.549 Y113.904 Z-0.983
 N4880 X9.286 Y113.714 Z-1.
 N4890 X9.096 Y113.451 Z-1.017
 N4900 X9. Y113.142 Z-1.034
 N4910 Y113. Z-1.041
 N4920 Y104.25 Z-1.5
 N4930 Y95.5
 N4940 G3 X11. I1. J0.
 N4950 G1 Y113.
 N4960 G3 X9. I-1. J0.
 N4970 G1 Y104.25
 N4980 Y103.25
 N4990 G3 X11. Y101.25 I2. J0.
 N5000 G1 Z1.5
 N5010 G0 Z20.
 N5020 X9. Y108.937
 N5030 Z1.5
 N5040 G1 Y113. Z1.287
 N5050 Y113.142 Z1.28
 N5060 X9.096 Y113.451 Z1.263
 N5070 X9.286 Y113.714 Z1.246
 N5080 X9.549 Y113.904 Z1.229
 N5090 X9.858 Y114. Z1.212
 N5100 X10.142 Z1.197
 N5110 X10.451 Y113.904 Z1.18
 N5120 X10.714 Y113.714 Z1.163
 N5130 X10.904 Y113.451 Z1.146
 N5140 X11. Y113.142 Z1.129
 N5150 Y102.272 Z0.559
 N5160 Y113.142 Z-0.01
 N5170 X10.904 Y113.451 Z-0.027
 N5180 X10.714 Y113.714 Z-0.044
 N5190 X10.451 Y113.904 Z-0.061
 N5200 X10.142 Y114. Z-0.078
 N5210 X9.858 Z-0.093
 N5220 X9.549 Y113.904 Z-0.11
 N5230 X9.286 Y113.714 Z-0.127
 N5240 X9.096 Y113.451 Z-0.144
 N5250 X9. Y113.142 Z-0.161
 N5260 Y113. Z-0.169
 N5270 Y104.25 Z-0.627
 N5280 Y113. Z-1.086
 N5290 Y113.142 Z-1.093
 N5300 X9.096 Y113.451 Z-1.11

```

N5310 X9.286 Y113.714 Z-1.127
N5320 X9.549 Y113.904 Z-1.144
N5330 X9.858 Y114. Z-1.161
N5340 X10.142 Z-1.176
N5350 X10.451 Y113.904 Z-1.193
N5360 X10.714 Y113.714 Z-1.21
N5370 X10.904 Y113.451 Z-1.227
N5380 X11. Y113.142 Z-1.244
N5390 Y102.272 Z-1.814
N5400 Y113.142 Z-2.383
N5410 X10.904 Y113.451 Z-2.4
N5420 X10.714 Y113.714 Z-2.417
N5430 X10.451 Y113.904 Z-2.434
N5440 X10.142 Y114. Z-2.451
N5450 X9.858 Z-2.466
N5460 X9.549 Y113.904 Z-2.483
N5470 X9.286 Y113.714 Z-2.5
N5480 X9.096 Y113.451 Z-2.517
N5490 X9. Y113.142 Z-2.534
N5500 Y113. Z-2.541
N5510 Y104.25 Z-3.
N5520 Y95.5
N5530 G3 X11. I1. J0.
N5540 G1 Y113.
N5550 G3 X9. I-1. J0.
N5560 G1 Y104.25
N5570 Y103.25
N5580 G3 X11. Y101.25 I2. J0.
N5590 G1 Z0.
N5600 G0 Z20.
N5610 M5
N5620 SUPA Z=_Z_HOME D0
N5630 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D3
N5640 _camtolerance=0.06
N5650 T="NXT0301_030" M6
N5660 MSG("DRILLING")
N5670 TRAFOOF
N5680 SUPA Z=_Z_HOME D0
N5690 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N5700 CYCLE832()
N5710 G54
N5720 G17 G0 X50. Y104.25 S0 D1 M3
N5730 Z22.
N5740 G94 F250.
N5750 MCALL CYCLE81(22,0,3,-0.273)
N5760 X50. Y104.25
N5770 X45. Y113.
N5780 X45. Y95.5
N5790 X35. Y113.
N5800 X35. Y95.5
N5810 X25. Y113.
N5820 X25. Y95.5
N5830 MCALL
N5840 M5
N5850 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
N5860 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N5870 _camtolerance=0.06
N5880 T="NXT0301_031" M6
N5890 MSG("DRILLING")

```



```

N5900 TRAFOOF
N5910 SUPA Z=_Z_HOME D0
N5920 SUPA X=_X_HOME Y=_Y_HOME D1
N5930 CYCLE832()
N5940 G54
N5950 G17 G0 X45. Y113. S0 D1 M3
N5960 Z22.
N5970 G94 F250.
N5980 MCALL CYCLE81(22,0,3,-8)
N5990 X45. Y113.
N6000 X35. Y113.
N6010 X25. Y113.
N6020 X25. Y95.5
N6030 X35. Y95.5
N6040 X45. Y95.5
N6050 X50. Y104.25
N6060 MCALL
N6070 M5
N6080 SUPA G0 Z=_Z_HOME D0
N6090 T0
N6100 M6
N6110 M30
Tool Path Listing has 611 lines.

```

6.6. Depuración del código NC

Una vez obtenido el código NC mediante el postprocesado, es necesario depurar dicho código para que el control CNC pueda ejecutar el programa de mecanizado ya que el postprocesador que se ha empleado no es el propio del CMV *Hartford*, sino que, como ya se ha comentado anteriormente, se ha utilizado un postprocesador asociado a otra máquina similar a la que se ha modelado.

El proceso de depuración que se ha seguido ha sido puramente manual. Primero se ha introducido el archivo *.mpf* con el código del programa de mecanizado en el control CNC de la máquina mediante un dispositivo de memoria USB. A continuación, se ha procedido a ejecutar dicho programa de modo que, cada vez que el control CNC detectaba un comando que no entendía, se ha procedido a suprimirlo. Repitiendo este procedimiento de ejecución del programa y supresión de los comandos inoperantes. En concreto, los comandos que se han suprimido del archivo *.mpf* han sido: “_camtolerance”, “_X_HOME”, “_Y_HOME” y “_Z_HOME”. Todos estos comandos están relacionado con el ajuste de las tolerancias de posición de las herramientas de corte durante el proceso de mecanizado de la pieza de trabajo.

De esta manera, se ha conseguido obtener el código NC del mecanizado de la pieza correctamente depurado, para su posterior lanzamiento con vistas a la fabricación de la pieza de trabajo.

De cara a la fabricación de la pieza, se ha añadido una línea inicial al código NC para la definición de las dimensiones del material en bruto, en este caso, el bloque de aluminio de partida:

```
N10 WORKPIECE( , "A" , , "BOX" , 0 , 11 , -60 , -80 , 0 , 0 , 60 , 123 )
```

Además, se ha remplazado el nombre de las herramientas de corte empleadas en la simulación del mecanizado de la pieza de trabajo, por los nombres de las herramientas reales o físicas de la librería de herramientas del CMV *Hartford* del LSITF del ICAI. Así, se termina fabricando la pieza de trabajo deseada, véase Figura 141.

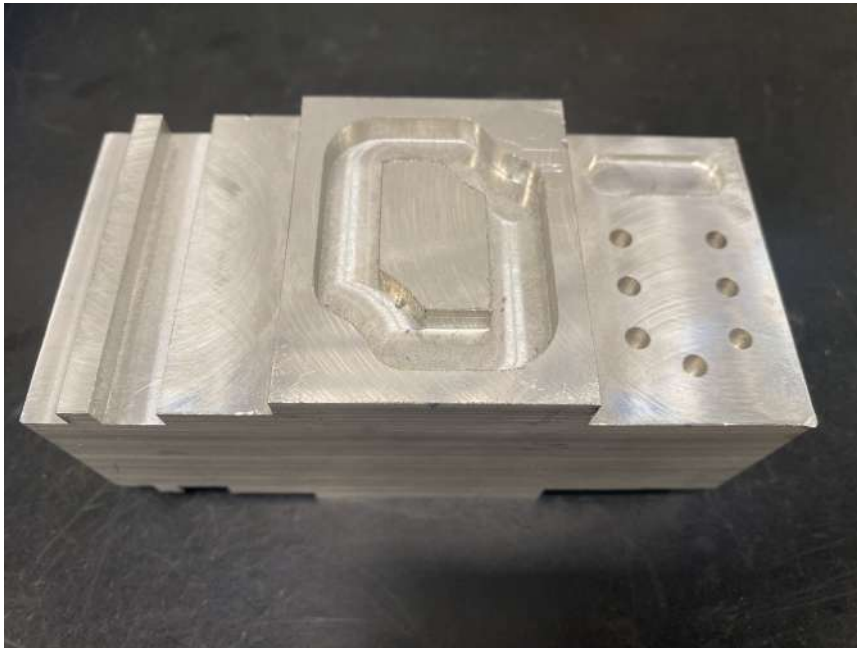


Figura 141. Pieza de aluminio fabricada en la máquina del LSITF del ICAI.

Para terminar el trabajo se adjunta el código depurado del proceso de mecanizado de la pieza de trabajo.

```

N10 WORKPIECE( , "A" , , "BOX" , 0 , 11 , -60 , -80 , 0 , 0 , 60 , 123 )
N60 G17 G710 G94 G90 FNORM
N80 TRAFOOF
N110 T="1" M6
N120 MSG( "METHOD" )
N130 TRAFOOF
N170 COMPOF
N180 G54
N190 G17 G0 X-25. Y-28. S637 D1 M3
N200 Z23 .
N210 Z13 .
N220 G94 G1 G90 Z10. F300 .
N230 Y-25.
N240 Y148 .
N250 X7.82
N260 Y-25.
N270 X40.64
N280 Y148 .
N290 Y151 .
N300 Z13 .
N310 G0 Z23 .
N320 M5
N360 T="PLATO50" M6
N370 MSG( "METHOD" )
N380 TRAFOOF
N420 COMPOF
N430 G54
N440 G17 G0 X30. Y-12.5 S1061 D1 M3
N450 Z20 .
N460 Z13 .
N470 G94 G1 G90 Z7.5 F250 .
N480 X-12.5
N490 Y25 .

```

N500 X72.5
 N510 Y-12.5
 N520 X30.
 N530 Y5.05
 N540 X5.05
 N550 Y7.45
 N560 X54.95
 N570 Y5.05
 N580 X30.
 N590 X29.
 N600 Y2.05
 N610 Z10.5
 N620 G0 Z20.
 N630 X30. Y-15.5
 N640 Z8.
 N650 G1 Z5.
 N660 Y-12.5
 N670 X-12.5
 N680 Y25.
 N690 X72.5
 N700 Y-12.5
 N710 X30.
 N720 Y5.05
 N730 X5.05
 N740 Y7.45
 N750 X54.95
 N760 Y5.05
 N770 X30.
 N780 X29.
 N790 Y2.05
 N800 Z8.
 N810 G0 Z20.
 N830 X30. Y135.5
 N840 Z13.
 N850 G1 Z7.5
 N860 X72.5
 N870 Y98.
 N880 X-12.5
 N890 Y135.5
 N900 X30.
 N910 Y117.95
 N920 X54.95
 N930 Y115.55
 N940 X5.05
 N950 Y117.95
 N960 X30.
 N970 X31.
 N980 Y120.95
 N990 Z10.5
 N1000 G0 Z20.
 N1010 X30. Y138.5
 N1020 Z8.
 N1030 G1 Z5.
 N1040 Y135.5
 N1050 X72.5
 N1060 Y98.
 N1070 X-12.5
 N1080 Y135.5
 N1090 X30.

N1100 Y117.95
 N1110 X54.95
 N1120 Y115.55
 N1130 X5.05
 N1140 Y117.95
 N1150 X30.
 N1160 X31.
 N1170 Y120.95
 N1180 Z8.
 N1190 G0 Z20.
 N1200 X30. Y138.5
 N1210 Z5.5
 N1220 G1 Z2.5
 N1230 Y135.5
 N1240 X72.5
 N1250 Y98.
 N1260 X-12.5
 N1270 Y135.5
 N1280 X30.
 N1290 Y117.95
 N1300 X54.95
 N1310 Y115.55
 N1320 X5.05
 N1330 Y117.95
 N1340 X30.
 N1350 X31.
 N1360 Y120.95
 N1370 Z5.5
 N1380 G0 Z20.
 N1390 X30. Y138.5
 N1400 Z3.
 N1410 G1 Z0.
 N1420 Y135.5
 N1430 X72.5
 N1440 Y98.
 N1450 X-12.5
 N1460 Y135.5
 N1470 X30.
 N1480 Y117.95
 N1490 X54.95
 N1500 Y115.55
 N1510 X5.05
 N1520 Y117.95
 N1530 X30.
 N1540 X31.
 N1550 Y120.95
 N1560 Z3.
 N1570 G0 Z20.
 N1580 X75.5 Y25.
 N1590 Z8.
 N1600 G1 Z5.
 N1610 X72.5
 N1620 X-12.5
 N1630 X-15.5
 N1640 Z8.
 N1650 G0 Z20.
 N1660 M5
 N1700 T="PLANA10" M6
 N1710 MSG("METHOD")

N1720 TRAFOOF
 N1760 COMPOF
 N1770 G54
 N1780 G17 G0 X68.985 Y14.826 S10610 D1 M3
 N1790 Z20.
 N1800 Z3.
 N1810 G94 G1 G90 Z0. F250.
 N1820 X68. Y15.
 N1830 X60.
 N1840 X0.
 N1850 X-8.
 N1870 X-8.985 Y14.826
 N1880 Z3.
 N1890 G0 Z20.
 N1910 X68. Y0. S1061
 N1920 Z3.
 N1930 G1 Z0.
 N1940 X65.
 N1950 X-5.
 N1960 X-8.
 N1970 Z3.
 N1980 G0 Z20.
 N1990 Y90.5
 N2000 Z3.
 N2010 G1 Z0.
 N2020 X-5.
 N2030 X65.
 N2040 X68.
 N2050 Z3.
 N2060 G0 Z20.
 N2070 M5
 N2110 T="PLANA8"
 M6
 N2120 MSG("METHOD")
 N2130 TRAFOOF
 N2170 COMPOF
 N2180 G54
 N2190 G17 G0 X9. Y109.094 S1061 D1 M3
 N2200 Z20.
 N2210 Z3.
 N2220 G94 G1 G90 Y113.247 Z2.782 F250.
 N2230 X9.272 Y113.728 Z2.753
 N2240 X9.753 Y114. Z2.724
 N2250 X10.247 Z2.698
 N2260 X10.728 Y113.728 Z2.669
 N2270 X11. Y113.247 Z2.64
 N2280 Y102.272 Z2.065
 N2290 Y113.247 Z1.49
 N2300 X10.728 Y113.728 Z1.461
 N2310 X10.247 Y114. Z1.432
 N2320 X9.753 Z1.406
 N2330 X9.272 Y113.728 Z1.377
 N2340 X9. Y113.247 Z1.348
 N2350 Y104.25 Z0.877
 N2360 Y113.247 Z0.405
 N2370 X9.272 Y113.728 Z0.376
 N2380 X9.753 Y114. Z0.347
 N2390 X10.247 Z0.321
 N2400 X10.728 Y113.728 Z0.292

N2410 X11. Y113.247 Z0.263
 N2420 Y102.272 Z-0.312
 N2430 Y113.247 Z-0.887
 N2440 X10.728 Y113.728 Z-0.916
 N2450 X10.247 Y114. Z-0.945
 N2460 X9.753 Z-0.971
 N2470 X9.272 Y113.728 Z-1.
 N2480 X9. Y113.247 Z-1.029
 N2490 Y104.25 Z-1.5
 N2500 Y95.5
 N2510 G3 X11. I1. J0.
 N2520 G1 Y113.
 N2530 G3 X9. I-1. J0.
 N2540 G1 Y104.25
 N2550 Y103.25
 N2560 G3 X11. Y101.25 I2. J0.
 N2570 G1 Z1.5
 N2580 G0 Z20.
 N2590 X9. Y109.094
 N2600 Z1.5
 N2610 G1 Y113.247 Z1.282
 N2620 X9.272 Y113.728 Z1.253
 N2630 X9.753 Y114. Z1.224
 N2640 X10.247 Z1.198
 N2650 X10.728 Y113.728 Z1.169
 N2660 X11. Y113.247 Z1.14
 N2670 Y102.272 Z0.565
 N2680 Y113.247 Z-0.01
 N2690 X10.728 Y113.728 Z-0.039
 N2700 X10.247 Y114. Z-0.068
 N2710 X9.753 Z-0.094
 N2720 X9.272 Y113.728 Z-0.123
 N2730 X9. Y113.247 Z-0.152
 N2740 Y104.25 Z-0.623
 N2750 Y113.247 Z-1.095
 N2760 X9.272 Y113.728 Z-1.124
 N2770 X9.753 Y114. Z-1.153
 N2780 X10.247 Z-1.178
 N2790 X10.728 Y113.728 Z-1.207
 N2800 X11. Y113.247 Z-1.236
 N2810 Y102.272 Z-1.812
 N2820 Y113.247 Z-2.387
 N2830 X10.728 Y113.728 Z-2.416
 N2840 X10.247 Y114. Z-2.445
 N2850 X9.753 Z-2.471
 N2860 X9.272 Y113.728 Z-2.5
 N2870 X9. Y113.247 Z-2.528
 N2880 Y104.25 Z-3.
 N2890 Y95.5
 N2900 G3 X11. I1. J0.
 N2910 G1 Y113.
 N2920 G3 X9. I-1. J0.
 N2930 G1 Y104.25
 N2940 Y103.25
 N2950 G3 X11. Y101.25 I2. J0.
 N2960 G1 Z0.
 N2970 G0 Z20.
 N2990 X25.621 Y48.5
 N3000 Z13.

N3010 G1 X25.494 Z12.993
 N3020 X39.989 Z12.233
 N3030 X41.634 Y51.349 Z12.061
 N3040 X42.795 Y52.892 Z11.96
 N3050 X44.133 Y54.284 Z11.859
 N3060 X44.893 Y54.904 Z11.807
 N3070 X44.133 Y54.284 Z11.756
 N3080 X42.795 Y52.892 Z11.655
 N3090 X41.634 Y51.349 Z11.553
 N3100 X39.989 Y48.5 Z11.381
 N3110 X25.494 Z10.621
 N3120 X39.989 Z9.862
 N3130 X41.634 Y51.349 Z9.689
 N3140 X42.795 Y52.892 Z9.588
 N3150 X44.133 Y54.284 Z9.487
 N3160 X44.893 Y54.904 Z9.436
 N3170 X44.133 Y54.284 Z9.384
 N3180 X42.795 Y52.892 Z9.283
 N3190 X41.634 Y51.349 Z9.182
 N3200 X39.989 Y48.5 Z9.009
 N3210 X25.494 Z8.25
 N3220 X11.
 N3230 Y65.489
 N3240 X13. Y66.644
 N3250 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N3260 G1 X20.011 Y74.5
 N3270 X49.
 N3280 Y57.511
 N3290 X47. Y56.356
 N3300 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N3310 G1 X39.989 Y48.5
 N3320 X25.494
 N3330 Y46.5
 N3340 X40.858
 N3350 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N3360 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N3370 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N3380 G1 Y70.5
 N3390 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N3400 G1 X19.142
 N3410 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N3420 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N3430 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N3440 G1 Y52.5
 N3450 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N3460 G1 X25.494
 N3470 X26.494
 N3480 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N3490 G1 Z11.25
 N3500 G0 Z20.
 N3510 X25.621
 N3520 Z11.25
 N3530 G1 X25.494 Z11.243
 N3540 X39.989 Z10.484
 N3550 X41.634 Y51.349 Z10.311
 N3560 X42.795 Y52.892 Z10.21
 N3570 X44.133 Y54.284 Z10.109
 N3580 X44.893 Y54.904 Z10.057
 N3590 X44.133 Y54.284 Z10.006

N3600 X42.795 Y52.892 Z9.905
 N3610 X41.634 Y51.349 Z9.804
 N3620 X39.989 Y48.5 Z9.631
 N3630 X25.494 Z8.871
 N3640 X39.989 Z8.112
 N3650 X41.634 Y51.349 Z7.939
 N3660 X42.795 Y52.892 Z7.838
 N3670 X44.133 Y54.284 Z7.737
 N3680 X44.893 Y54.904 Z7.686
 N3690 X44.133 Y54.284 Z7.634
 N3700 X42.795 Y52.892 Z7.533
 N3710 X41.634 Y51.349 Z7.432
 N3720 X39.989 Y48.5 Z7.259
 N3730 X25.494 Z6.5
 N3740 X11.
 N3750 Y65.489
 N3760 X13. Y66.644
 N3770 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N3780 G1 X20.011 Y74.5
 N3790 X49.
 N3800 Y57.511
 N3810 X47. Y56.356
 N3820 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N3830 G1 X39.989 Y48.5
 N3840 X25.494
 N3850 Y46.5
 N3860 X40.858
 N3870 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N3880 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N3890 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N3900 G1 Y70.5
 N3910 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N3920 G1 X19.142
 N3930 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N3940 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N3950 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N3960 G1 Y52.5
 N3970 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N3980 G1 X25.494
 N3990 X26.494
 N4000 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N4010 G1 Z9.5
 N4020 G0 Z20.
 N4030 X25.621
 N4040 Z9.5
 N4050 G1 X25.494 Z9.493
 N4060 X39.989 Z8.734
 N4070 X41.634 Y51.349 Z8.561
 N4080 X42.795 Y52.892 Z8.46
 N4090 X44.133 Y54.284 Z8.359
 N4100 X44.893 Y54.904 Z8.307
 N4110 X44.133 Y54.284 Z8.256
 N4120 X42.795 Y52.892 Z8.155
 N4130 X41.634 Y51.349 Z8.054
 N4140 X39.989 Y48.5 Z7.881
 N4150 X25.494 Z7.122
 N4160 X39.989 Z6.362
 N4170 X41.634 Y51.349 Z6.19
 N4180 X42.795 Y52.892 Z6.088

N4190 X44.133 Y54.284 Z5.987
 N4200 X44.893 Y54.904 Z5.936
 N4210 X44.133 Y54.284 Z5.884
 N4220 X42.795 Y52.892 Z5.783
 N4230 X41.634 Y51.349 Z5.682
 N4240 X39.989 Y48.5 Z5.51
 N4250 X25.494 Z4.75
 N4260 X11.
 N4270 Y65.489
 N4280 X13. Y66.644
 N4290 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N4300 G1 X20.011 Y74.5
 N4310 X49.
 N4320 Y57.511
 N4330 X47. Y56.356
 N4340 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N4350 G1 X39.989 Y48.5
 N4360 X25.494
 N4370 Y46.5
 N4380 X40.858
 N4390 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N4400 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N4410 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N4420 G1 Y70.5
 N4430 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N4440 G1 X19.142
 N4450 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N4460 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N4470 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N4480 G1 Y52.5
 N4490 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N4500 G1 X25.494
 N4510 X26.494
 N4520 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N4530 G1 Z7.75
 N4540 G0 Z20.
 N4550 X25.621
 N4560 Z7.75
 N4570 G1 X25.494 Z7.743
 N4580 X39.989 Z6.984
 N4590 X41.634 Y51.349 Z6.811
 N4600 X42.795 Y52.892 Z6.71
 N4610 X44.133 Y54.284 Z6.609
 N4620 X44.893 Y54.904 Z6.557
 N4630 X44.133 Y54.284 Z6.506
 N4640 X42.795 Y52.892 Z6.405
 N4650 X41.634 Y51.349 Z6.304
 N4660 X39.989 Y48.5 Z6.131
 N4670 X25.494 Z5.372
 N4680 X39.989 Z4.612
 N4690 X41.634 Y51.349 Z4.44
 N4700 X42.795 Y52.892 Z4.338
 N4710 X44.133 Y54.284 Z4.237
 N4720 X44.893 Y54.904 Z4.186
 N4730 X44.133 Y54.284 Z4.134
 N4740 X42.795 Y52.892 Z4.033
 N4750 X41.634 Y51.349 Z3.932
 N4760 X39.989 Y48.5 Z3.76
 N4770 X25.494 Z3.

N4780 X11.
 N4790 Y65.489
 N4800 X13. Y66.644
 N4810 G3 X18.856 Y72.5 I-8. J13.856
 N4820 G1 X20.011 Y74.5
 N4830 X49.
 N4840 Y57.511
 N4850 X47. Y56.356
 N4860 G3 X41.144 Y50.5 I8. J-13.856
 N4870 G1 X39.989 Y48.5
 N4880 X25.494
 N4890 Y46.5
 N4900 X40.858
 N4910 G3 X41.801 Y47.167 I0. J1.
 N4920 G2 X50.333 Y55.699 I13.199 J-4.667
 N4930 G3 X51. Y56.642 I-0.333 J0.943
 N4940 G1 Y70.5
 N4950 G3 X45. Y76.5 I-6. J0.
 N4960 G1 X19.142
 N4970 G3 X18.199 Y75.833 I0. J-1.
 N4980 G2 X9.667 Y67.301 I-13.199 J4.667
 N4990 G3 X9. Y66.358 I0.333 J-0.943
 N5000 G1 Y52.5
 N5010 G3 X15. Y46.5 I6. J0.
 N5020 G1 X25.494
 N5030 X26.494
 N5040 G3 X28.494 Y48.5 I0. J2.
 N5050 G1 Z6.
 N5060 G0 Z20.
 N5070 M5
 N5110 T="5"
 M6
 N5120 MSG("METHOD")
 N5130 TRAFOOF
 N5160 CYCLE832()
 N5170 G54
 N5180 G17 G0 X50. Y104.25 S0 D1 M3
 N5190 Z22.
 N5200 G94 F250.
 N5210 MCALL CYCLE81(22,0,3,-0.273)
 N5220 X50. Y104.25
 N5230 X45. Y113.
 N5240 X45. Y95.5
 N5250 X35. Y113.
 N5260 X35. Y95.5
 N5270 X25. Y113.
 N5280 X25. Y95.5
 N5290 MCALL
 N5300 M5
 N5340 T="22"
 M6
 N5350 MSG("METHOD")
 N5360 TRAFOOF
 N5390 CYCLE832()
 N5400 G54
 N5410 G17 G0 X45. Y113. S0 D1 M3
 N5420 Z22.
 N5430 G94 F250.
 N5440 MCALL CYCLE81(22,0,3,-8)

N5450	X45.	Y113.
N5460	X35.	Y113.
N5470	X25.	Y113.
N5480	X25.	Y95.5
N5490	X35.	Y95.5
N5500	X45.	Y95.5
N5510	X50.	Y104.25
N5520	MCALL	
N5530	M5	
N5550	T0	
N5560	M6	
N5570	M30	

Capítulo 7

Resultados y conclusiones

ESTE último capítulo recoge los principales resultados y conclusiones de este trabajo. Además se han incluido las líneas futuras del proyecto, tanto aquellas que ya se han iniciado en este trabajo pero que no se han seguido explorando por falta de tiempo como las posibles líneas de investigación que quedan abiertas y aún sin explorar.

7.1. Resultados

El principal resultado del trabajo es la obtención de la máquina virtualizada. Como ya se ha detallado en el capítulo anterior, ésta posee ciertas simplificaciones con respecto a la máquina real pero conserva sus propiedades esenciales.

Siguiendo con lo realizado anteriormente, ahora se va a analizar las principales similitudes y diferencias entre la pieza simulada y la fabricada, para así poder discernir si el modelo digital de la máquina es correcto o qué detalles no se pueden conseguir con la máquina virtualizada. En concreto, se ha realizado la simulación de la fabricación de una pieza de aluminio, véase Figura 141.

Al comparar la pieza real con la versión simulada, representada en la Figura ??, a simple vista puede parecer que apenas existen diferencias entre las dos. Ambas muestran claramente las ranuras y perforaciones específicas, dando la impresión de que están en la misma posición. Sin embargo, es importante destacar que esta afirmación no es completamente precisa. En la pieza simulada, las ranuras y perforaciones se ajustan con precisión según las tolerancias especificadas en el diseño y en el *software* utilizado. Mientras que en la pieza fabricada, las ranuras y perforaciones presentan ligeras diferencias en las tolerancias dimensionales debido al proceso de fabricación real. De hecho, la pieza fabricada ha perdido calidad debido al propio proceso de fabricación ya que durante la creación de la máquina digital se han realizado durante el proceso de depuración del código en las que se han eliminado todos los comandos relacionados con dichas tolerancias. Con lo cual, la pieza fabricada ha perdido la calidad de precisión de la pieza simulada.

En relación a las propiedades de la pieza fabricada y simulada, se puede afirmar que las diferencias entre ambas son insignificantes, lo que implica que las dos poseen propiedades similares. Sin embargo, es importante considerar el papel que juega el material seleccionado para la fabricación. Si se utiliza un material ampliamente estudiado y conocido, como el aluminio, el *software* de *Siemens* incluye sus propiedades específicas, que suelen ser muy cercanas a las reales. En este caso, las diferencias entre la pieza simulada y la fabricada se pueden considerar no significativas, ya que el aluminio es un material ampliamente conocido y sus propiedades están bien establecidas. En consecuencia, se puede asumir que tanto la pieza simulada como la fabricada tienen propiedades similares, gracias al uso de un material como el aluminio que está

ampliamente documentado y tiene características bien definidas. Esto proporciona confianza en la validez de la simulación y asegura que las propiedades esperadas se mantengan en la pieza fabricada. Es importante tener en cuenta que estas afirmaciones se basan en la suposición de que se han seguido adecuadamente los procedimientos y parámetros de mecanizado recomendados. Además, en casos donde se utilicen materiales menos conocidos o con propiedades más variables, se debe realizar un análisis más detallado para comparar las propiedades entre la pieza simulada y la fabricada.

Otra diferencia entre ambas piezas radica en el tiempo de fabricación. Aunque el tiempo total es el mismo en ambos casos, en la pieza simulada se puede ajustar la velocidad de la simulación, lo que permite obtener rápidamente una representación virtual de la pieza en cuestión de unos minutos. Por otro lado, en la fabricación real, se requieren aproximadamente treinta minutos para obtener la pieza completa y la velocidad está determinada por la máquina y las herramientas utilizadas. La capacidad de variar la velocidad en la simulación es una ventaja significativa, ya que permite acelerar el proceso y obtener resultados rápidos. Esto resulta especialmente útil en etapas de diseño donde se requiere una evaluación rápida de la forma y las dimensiones de la pieza. Sin embargo, en la fabricación real, el tiempo necesario para completar la pieza está influenciado por diversos factores, como la configuración de la máquina, la carga de las herramientas y la secuencia de operaciones. Estos elementos determinan la velocidad de mecanizado y no pueden ser ajustados en el mismo grado que en la simulación.

7.2. Conclusiones

A la luz de los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo digital creado para la máquina *HV-35* es una primera representación precisa de la misma. A pesar de las simplificaciones realizadas, el modelo digital logra simular de manera efectiva el movimiento real de la máquina y además, como se ha observado en los resultados, el mecanizado de la pieza también se simula de manera adecuada. Estos hallazgos respaldan con confianza la afirmación de que el modelo digital es una primera representación de la máquina y puede ser utilizado para simular y realizar pruebas en un entorno virtual. Esta capacidad de simulación ofrece beneficios significativos al permitir ahorrar tiempo y dinero en la fase de diseño y desarrollo. Al tener un adecuado modelo digital de la máquina, se pueden evaluar y optimizar diferentes aspectos, como la configuración de herramientas, la secuencia de operaciones y la eficiencia del proceso de mecanizado, todo ello sin la necesidad de utilizar recursos físicos ni producir prototipos reales. Esto no solo agiliza el proceso de desarrollo, sino que también reduce los costos asociados con el mecanizado de piezas de prueba. En resumen, los resultados obtenidos respaldan la calidad del modelo digital de la máquina *HV-35*, demostrando su capacidad para simular el movimiento y el mecanizado de la misma y, por lo tanto, se ha cumplido el principal objetivo del trabajo. Cabe destacar que este modelo es una primera representación de la máquina virtual ya que como se detallará en las líneas futuras aún se puede seguir mejorando este modelo para acercarlo cada vez más al concepto de gemelo digital.

En cuanto a los otros objetivos establecidos al inicio del trabajo, se puede afirmar que tanto el segundo como el tercer objetivo han sido cumplidos de manera satisfactoria. Durante los capítulos intermedios de este trabajo, se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica sobre la fábrica digital y la Industria 4.0. Además, se ha realizado un estudio detallado de la máquina en cuestión y del control CNC utilizado en el laboratorio, analizando en profundidad sus especificaciones. Así, se puede afirmar que en relación al segundo objetivo, la revisión bibliográfica ha permitido obtener un conocimiento sólido y actualizado sobre el concepto de fábrica digital y su relación con la Industria 4.0. De hecho, se han explorado diversos enfoques, técnicas y tecnologías empleadas en la implementación de fábricas digitales, brindando una base

teórica robusta para comprender su funcionamiento y beneficios. Con respecto al tercer objetivo, se ha realizado un análisis minucioso de la máquina y el control CNC utilizados en el laboratorio. Esto ha implicado estudiar sus características técnicas, su funcionamiento y las posibilidades que ofrecen en términos de mecanizado y control de procesos. Esta investigación detallada ha proporcionado una comprensión completa de la maquinaria y su potencial para aplicaciones específicas.

En relación al último objetivo de acercar este proyecto a empresas con recursos limitados, se puede afirmar que se ha hecho un primer acercamiento de dicho modelo a la Universidad Pontificia de Comillas. Además, se ha puesto un esfuerzo significativo en redactar de manera clara todos los detalles involucrados en el modelo, con el propósito de facilitar su reproducción en otras máquinas de pequeñas y medianas empresas o empresas con recursos limitados. También, se han registrado los principales problemas encontrados y las soluciones aplicadas, ya que algunos de estos desafíos requirieron mucho tiempo para su detección y resolución. Específicamente, se han incluido secciones como la instalación de los *softwares*, con el objetivo de proporcionar a cualquier persona interesada en crear un modelo digital todas las herramientas y pasos necesarios para lograrlo. De esta manera, se ha buscado proporcionar una guía abierta, completa y detallada que sirva como punto de partida para futuros proyectos similares. En resumen, se ha puesto el énfasis en redactar todos los detalles relevantes y ofrecer soluciones a los problemas encontrados. Así, se ha creado una base sólida que puede servir como punto de partida para futuras investigaciones y trabajos orientados a llevar este estudio a la práctica en casos reales de empresarios con recursos limitados.

En general, se puede concluir que contar con un modelo digital de una máquina proporciona ventajas significativas para la fabricación en serie en una industria. Sin embargo, es importante destacar que obtener este modelo requiere una inversión considerable tanto en términos de dinero como de tiempo. Como se muestra en el modelo económico del trabajo, véase Anexo B, esta inversión se recupera de manera periódica cada año. No obstante, es importante considerar que año tras año se deberá realizar una nueva inversión para crear o mantener dicha máquina digital. Este ciclo de inversión y recuperación representa un factor importante a tener en cuenta al tomar decisiones sobre la implementación y el uso de modelos digitales en la industria y sobre todo en las pequeñas y medianas empresas.

7.3. Líneas futuras

Al analizar el alcance y los objetivos del trabajo, surge de manera natural considerar como una posible línea de investigación futura la aplicación del VNCK a la máquina digital. Así, continuando con el estudio realizado en este trabajo, sería viable integrar el control VNCK en la máquina digital. Esta integración no debería presentar grandes dificultades, dado que todo el proceso de diseño se ha llevado a cabo de manera que la integración sea prácticamente automática, de ahí la elección de las versiones y todos los detalles ya descritos. Esta acción de integración proporcionaría aún más cercanía entre el modelo virtual y un gemelo digital de la máquina, ya que con el uso de este *software*, sería posible incluir la máquina en una fábrica digital y generar una serie de datos y relaciones que actualmente no se pueden obtener únicamente con el modelo digital. Así, la integración del control VNCK ofrecería numerosos beneficios y permitiría simular y evaluar de forma más precisa el comportamiento de la máquina en un entorno de fábrica digital, proporcionando información valiosa para optimizar los procesos de producción y tomar decisiones fundamentadas. Además, se podrían recopilar datos en tiempo real durante la operación de la máquina, lo que permitiría realizar análisis más profundos y obtener información valiosa para la toma de decisiones. También esta integración permitiría realizar un estudio de la simulación con el VNCK frente a la simulación ordinaria y ver sus ventajas y posibilidades.

Siguiendo la línea de acercar el modelo virtual al gemelo digital se podrían introducir ciertas mejoras en el modelo relacionadas con el proceso de creación del mismo. Así, desde el punto de vista del modelado se podría mejorar la precisión del mismo introduciendo medidas tomadas con un escáner 3d o con elementos de medidas más precisos que los utilizados como puede ser el micrómetro. Nótese que en el caso del trabajo se han utilizados elementos clásicos de medida cuya precisión es de décimas de milímetros.

Con respecto al modelo cinemático se podrían modificar las propiedades dinámicas incluidas por defecto en el *software* y modificarlas por propiedades dinámicas medidas para la máquina en cuestión de modo que se obtenga un modelo cinemático más preciso.

Desde el punto de vista de la simulación se podrían mejorar dos aspectos fundamentales, las herramientas y los útiles o utillaje de sujeción. Así, se puede crear una amplia biblioteca de herramientas en *Siemens NX* que simule piezas y mecanizados más complejos y realistas, ya que en este caso las herramientas consideradas no son exactamente las herramientas reales de la máquina. En concreto, se pueden incluir las herramientas propias del LSITF del ICAI, véase Figura 142 y Figura 143.

Puest.	Tp.	Nombre herramien.	D	H	Longitud	Radio	N
1		PRUEBA	1	0	0.000	0.000	0
2		BROCA MACIZA	1	0	100.550	50.000	0
3		PLATO50	1	0	100.000	20.000	0
4		PLANA10	1	0	125.692	12.500	0
5		5	1	0	135.192	5.000	2
6		PALPADOR_3D	1	0	158.442	3.000	118.0
7		RADIO_ESQUINA	1	0	161.071	3.000	0

Figura 142. Herramientas de la máquina del LSITF del ICAI (I).

Puest.	Tp.	Nombre herramien.	D	H	Longitud	Radio	N
6		PALPADOR_3D	1	0	161.071	3.000	0
7		RADIO_ESQUINA	1	0	100.000	4.000	0
8		8	1	0	142.260	5.000	0
9		BOL10	1	0	100.000	3.000	118.0
10		22	1	0	100.000	3.000	0
11		11	1	0	100.000	4.000	0
12		12	1	0	100.000	4.000	0
13		PLANO0	1	0	100.000	4.000	0

Figura 143. Herramientas de la máquina del LSITF del ICAI (II).

Con respecto a esta línea de investigación, también, se podría seguir mejorando el modelo actual de la máquina, para ello se podría cambiar el útil de sujeción utilizado por el utillaje de sujeción real y así el simulado será más fidedigno y realista, véase Figura 144. Nótese que, en el caso de este proyecto el útil de sujeción que se ha utilizado ha sido un tornillo de banco que se tenía previamente modelado, mientras que el utillaje de sujeción real consiste en un plato de garra y un tornillo de banco diferente al utilizado.



Figura 144. Utillaje de sujeción de la máquina del LSITF del ICAI.

Por último, para terminar de mejorar el modelo digital actual se podría realizar un postprocesador específico para el control *Siemens Sinumerik 828D* que depurase el código de modo que no hiciera falta hacer estos procesos de forma predeterminada y manual como se ha realizado en el trabajo. Además, se podría hacer un estudio más detallado de las tolerancias dimensionales, geométricas y de acabado superficial de la pieza fabricada y compararla con el plano original de la misma.

Otra línea de investigación futura, que se deduce del trabajo, va relacionada con el último objetivo y sería extender este estudio a otras máquinas de empresas sin recursos, las cuales necesitan estas herramientas para poder permanecer en el mercado industrial. En este sentido, habría primero que intentar extender el estudio a otras máquinas CNC con controles *Sinumerik*, ya que para estos casos se pueden seguir utilizando estas versiones aquí tratadas; y después extender el estudio a otros controles de distintas marcas y quizás con otros *softwares*.

Por otro lado, también, es posible extender este trabajo desde el punto de vista económico. Así, queda como línea futura estudiar más detalladamente el modelo económico realizado en el Anexo B. En este sentido se podrían estudiar parámetros relacionados con los periodos de amortización del gemelo digital y el mantenimiento y desarrollo de los mismos.

Bibliografía

- [BOTK18] **Botkina, D., Hedlind, M., Olsson, B., Henser, J., Lundholm, T.**, *Digital Twin of a Cutting Tool*. Procedia CIRP, 72, 215-218, 2018.
- [BRAC05] **Bracht, U., Masurat, T.**, *The Digital Factory between vision and reality*. Computers in Industry, 56, 325-333, 2005.
- [CAIX22] **CaixaBank Research** , *Blockchain y criptomonedas: bienvenidos al nuevo paradigma digital* <https://www.caixabankresearch.com/es/economia-y-mercados/politica-monetaria/blockchain-y-criptomonedas-bienvenidos-al-nuevo-paradigma>
- [CHEN17] **Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., Yin, B.**, *Smart factory of industry 4.0: key technologies, application case, and challenges*. IEEE Access, 6, 1, 6505-6519, 2017.
- [CORE16] **Corea, F.**, *Big data analytics: A management perspective*. Studies Series in Big Data, 21. Springer International Publishing. 2016.
- [DAUM20] **Daume, S., Kofler, S., Kager, J. , Kroll, P., Herwig, C.**, *Generic workflow for the setup of mechanistic process models*. In: *Animal cell biotechnology*. Springer, Berlin, pp 189-211. 2020.
- [DEAN79] **Deane, P. M., Deane, P. M. ,** *The first industrial revolution*. Cambridge University Press. 1979
- [DIRE23] **Direct Industry, L and W Machine**. Última consulta: 20/06/2023
<https://www.directindustry.es/prod/l-w-machine-tools-inc/product-84273-2459657.html>
- [DRIS10] **Driscoll, M. E. ,** *How much data is “Big Data”?* Message posted to <https://www.quora.com/How-much-data-is-Big-Data> 2010.
- [DOOR15] **Doornik, J. A., Hendry, D. F. ,** *Statistical model selection with big data*. Cogent Economics and Finance, 3, 1045216. 2015.
- [DUMB13] **Dumbill, E. ,** *Making sense of big data*. Big Data 1(1), 1?2. 2013.
- [FAED22] **FAEDIS, Business Intelligence**. Última consulta: 23/02/2022
<http://virtual.umng.edu.co/distancia/ecosistema/odin/>
- [GEOR16] **Georgakopoulos, D., Jayaraman, P.P., Fazia, M., Villari, M., Ranjan, R. ,** *Internet of Things and edge cloud computing roadmap for manufacturing*. IEEE Cloud Comput;3(4):66-73. 2016.
- [GRAD22] **Gradiant, Retos de futuro de la Industria 4.0**. Última consulta: 24/01/2022
<https://www.gradiant.org/blog/retos-futuro-industria-4-0/>

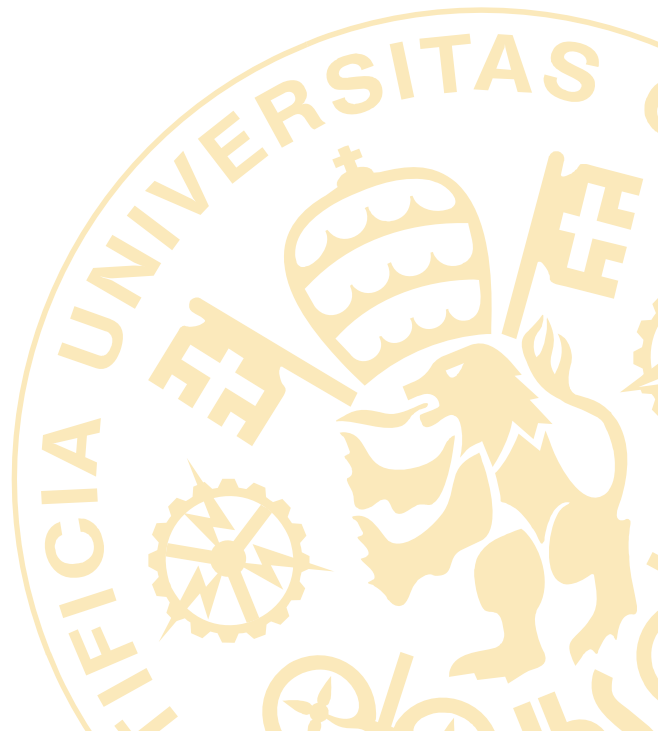
- [GRIE19] **Grieves, M.**, *Virtually intelligent product systems: digital and physical twins*. Complex Syst Eng Theor Pract:175-200.2019.
- [AIMH23] **AIMHE**, *Descubre los cursos online que ofrece Haas*. Última consulta: 09/06/2023
<https://aimhe.org/descubre-los-cursos-online-que-ofrece-haas/>
- [HIST22] **History**, *How the Second Industrial Revolution Changed Americans' Lives*. Última consulta: 19/01/2022
<https://www.history.com/news/second-industrial-revolution-advances>
- [HIRS19] **Hirsh, S.**, *Blockchain*. American Library Association. 2019.
- [IBM22] **IBM**, *IBM Documentation*. Última consulta: 20/02/2022
<https://www.ibm.com/mysupport/>
- [INDU22] **Industrial Revolution**, *Technological changes cascaded quickly after the introduction of the Steam Engine*. Última consulta: 19/01/2022
<https://englandindustrialrevolution.weebly.com/technological-changes-cascaded-quickly-after-the-introduction-of-the-steam-engine.html>
- [INTE22] **INTER 200 S.L.U.**, *Historia de los CNC*. Última consulta: 24/06/2023
<https://www.inter2000mecanizados.com/post/historia-de-los-cnc>
- [JOBW22] **JOB Wizards**, *Gemelos digitales: Duplicando el potencial de innovación*. Última consulta: 21/02/2022
<https://job-wizards.com/es/gemelos-digitales-duplicando-el-potencial-de-innovacion/>
- [KANE21] **Kaneez, F., Banerjee, A., Mitra, K., Prakash, P., Ranjan, R., Patel, P., Georgakopoulos, D.**, *QoE in IoT: a vision, survey and future directions*. Discover Internet of Things, 1:4. 2021.
- [KRIT18] **Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W.**, *Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification*. IFAC-PapersOnLine 51(11):1016-1022. 2018.
- [LANE01] **Laney, D.**, *3D data management: Controlling data volume, velocity, and variety*. META group Inc, 2001.
- [LIM19] **Lim, K.Y.H., Zheng, P., Chen. C.H.**, *3A state-of-the-art survey of digital twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives*. J Intell Manuf:1-25. 2019
- [MCAF12] **McAfee, A., Brynjolfsson, E.**, *Big data: The management revolution*. Harvard Business Review, 90(10), 60-66. 2012
- [MANY13] **Manyika, J., Chui, M., Bughin, J., Dobbs, R., Bisson, P., Marrs, A.**, *Disruptive technologies: advances that will transform life, business, and the global economy*. San Francisco: McKinsey Global Institute; 2013.
- [MARR15] **Marr, B.**, *Big data: Using SMART big data, analytics and metrics to make better decisions and improve performance*. Wiley, 256 pages. 2015.
- [MEDI22] **Médico +**, *Thomas Edison: biografía y resumen de sus aportes a la ciencia*. Última consulta: 20/01/2022
<https://medicoplus.com/biografias/thomas-edison>

- [MICH06] **Michalewicz, Z., Schmidt, M., Michalewicz, M., Chiriach, C.**, *Adaptive Business Intelligence*. Springer Berlin Heidelberg. 2006.
- [MOAH19] **Mohajan, H.**, *The first industrial revolution: creation of a new global human era*. 377-387. 2019.
- [MOKO22] **Moko Technology**, *¿Qué es CNC?*. Última consulta: 19/06/2023
<https://www.mokotechnology.com/es/what-is-cnc/>
- [MOKY98] **Mokyr, J., Strotz, R.H.**, *The second industrial revolution, 1870-1914*. Storia dell'economia Mondiale 21945, 1. 1998.
- [MORE17] **Moreno, A., Velez, G., Ardanza, A.**, *Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision*. Int J Interact Des Manuf 11, 365-373. 2017.
- [NEGR17] **Negri, E., Fumagalli, L., Macchi, M.**, *A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems*. Procedia Manuf 11:939-948. 2017.
- [NIZA16] **Nizamuddin, A., Veladri, K.**, *Modeling and Simulation of 7-dof Robotic Manipulator*. University College of Engineering Kakinada(A) JNTUK Kakinada A.P. India. 22. 2016.
- [PATE21] **Patel, M., Jaiswal, M.**, *NTRODUCTION TO ARTIFICIAL INTELLIGENCE*. 10.25215/9781667143620. 2021.
- [PARA22] **Parabrisas 60 años**, *Henry Ford, un revolucionario de la industria automotriz*. Última consulta: 20/01/2022
<https://parabrisas.perfil.com/noticias/hombres-de-auto/henry-ford-un-revolucionario-de-la-industria-automotriz.phtml>
- [PHIL19] **Philbeck, T., Davis, N.**, *The fourth industrial revolution: Shaping a new era*. Journal of International Affairs, 72, 1, 17-22. 2019.
- [PROS22] **Prosume**, *The financing of the transition to a new third industrial revolution business model*. Última consulta: 19/01/2022
<https://prosume.io/the-financing-of-the-transition-to-a-new-third-industrial-revolution-business-model/>
- [REVI22] **Revista de Robots**, *Qué es el Internet of Things y para qué sirve. Ejemplos y aplicaciones en 2021*. <https://revistaderobots.com/noticias/el-internet-of-things-del-dia-a-dia/>
- [RIGH20] **Righi, R., Alberti, A. M., Singh, M.**, *Blockchain Technology for Industry 4.0 Secure, Decentralized, Distributed and Trusted Industry Environment*. (1st ed. 2020.). Springer Singapore. 2020.
- [ROBE15] **Roberts, B.**, *The Third Industrial Revolution: Implications for Planning Cities and Regions*. Working Paper Urban Frontiers. 1. 2015.
- [ROSE15] **Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., Bettenhausen, K.D.**, *About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing*. IFAC-Papers Online 48(3):567-572. 2015.

- [SEMA22] **Semana**, *AlphaZero, la máquina que revolucionó el ajedrez y podría cambiar el mundo*. <https://www.semana.com/vida-moderna/articulo/asi-es-alphazero-la-maquina-que-revoluciono-el-ajedrez/595812/>
- [SIEM17] **Siemens**, *Manual del usuario: Sinumerik 840D sl / 828D Universal*. 2017.
- [SIEM22] **Siemens**, *NX*. Última consulta: 19/01/2022
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- [SIEM23] **Siemens**, *Community*. Última consulta: 29/06/2023
<https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000061xPf7SAE/vnck>
- [SINU23] **Sinumerik**, *Manual del usuario, Siemens Sinumerik 840D sl/ 828D Fresado*. Última consulta: 17/06/2023
<https://community.sw.siemens.com/s/question/0D54O000061xPf7SAE/vnck>
- [SMID03] **Smid, P.**, *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*. Industrial Press Inc. 2003.
- [STRA19] **Strawn, G.**, *BLOCKCHAIN*. IT Professional, 21(1), 91-92. 2019.
- [TTHE22] **Tthegap Blog**, *El poder del Big Data*. Última consulta: 22/02/2022
<https://www.tthegap.com/blog/poder-del-big-data/>
- [XUXU18] **Xu, L.D., Xu, E.L., Davis, N.**, *Industry 4.0: state of the art and future trends*. Int. J. Prod. Res., 56, 8, 2941-2962, 2018.

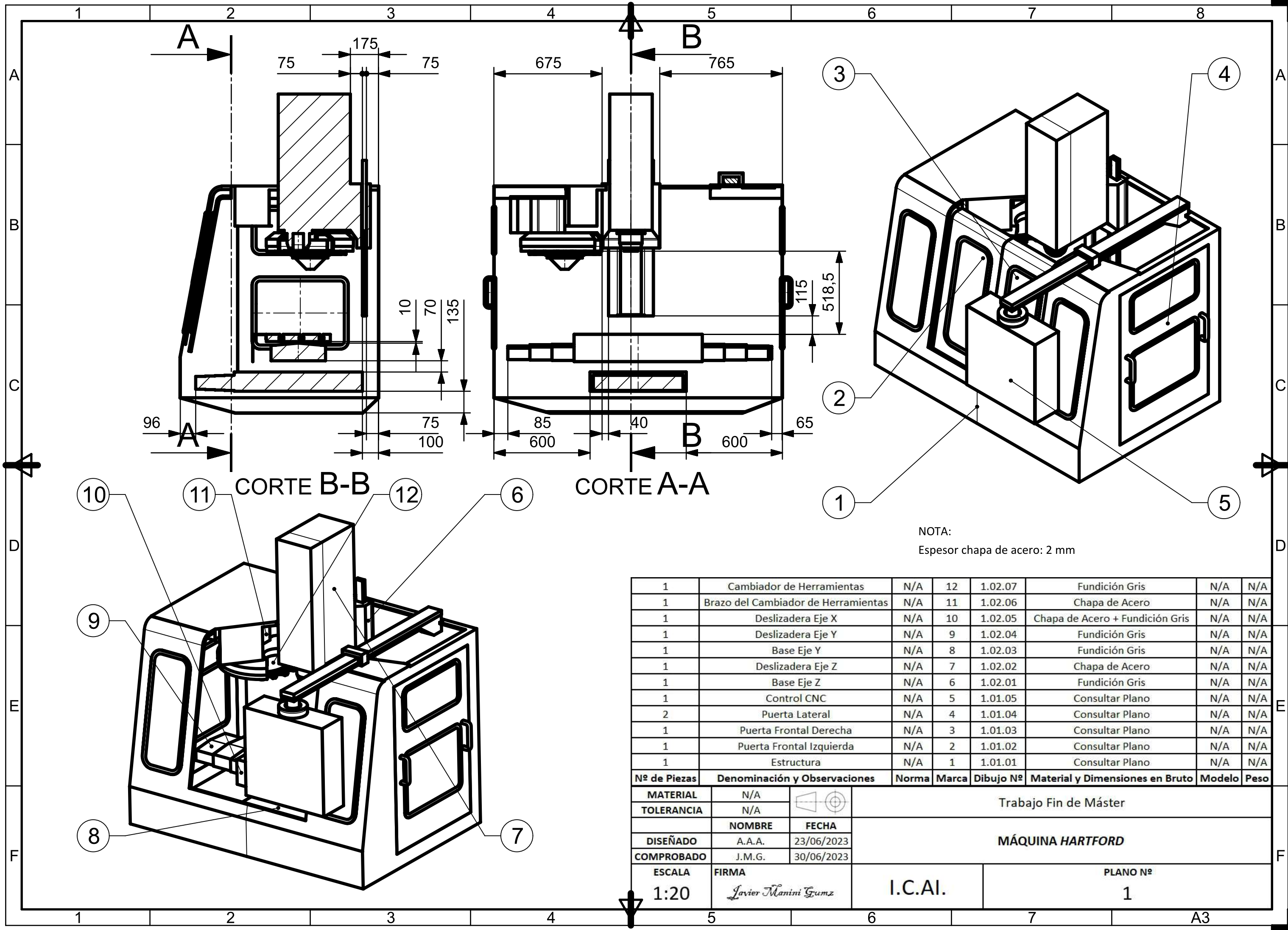
DOCUMENTO II

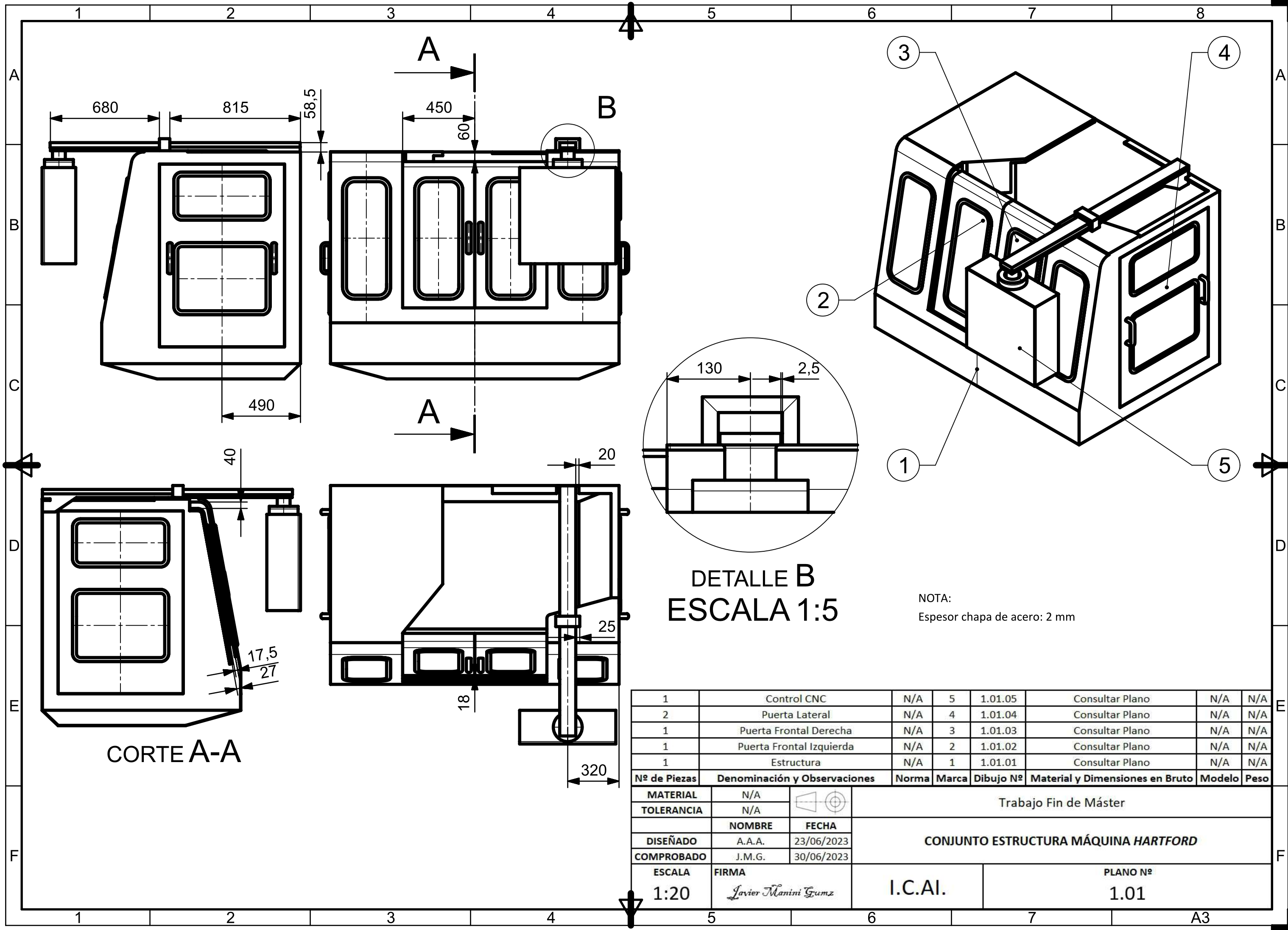
PLANOS



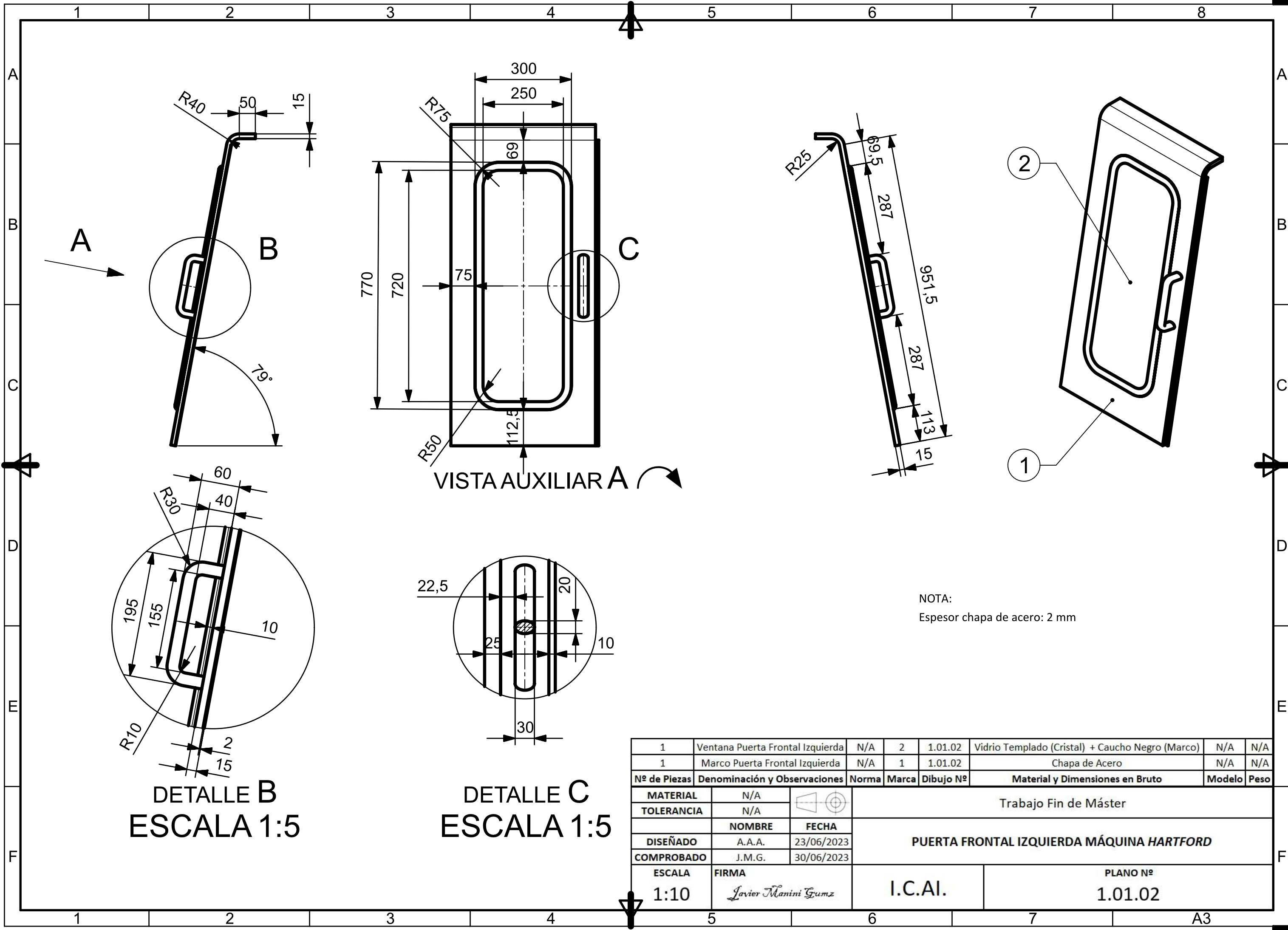
Lista de planos

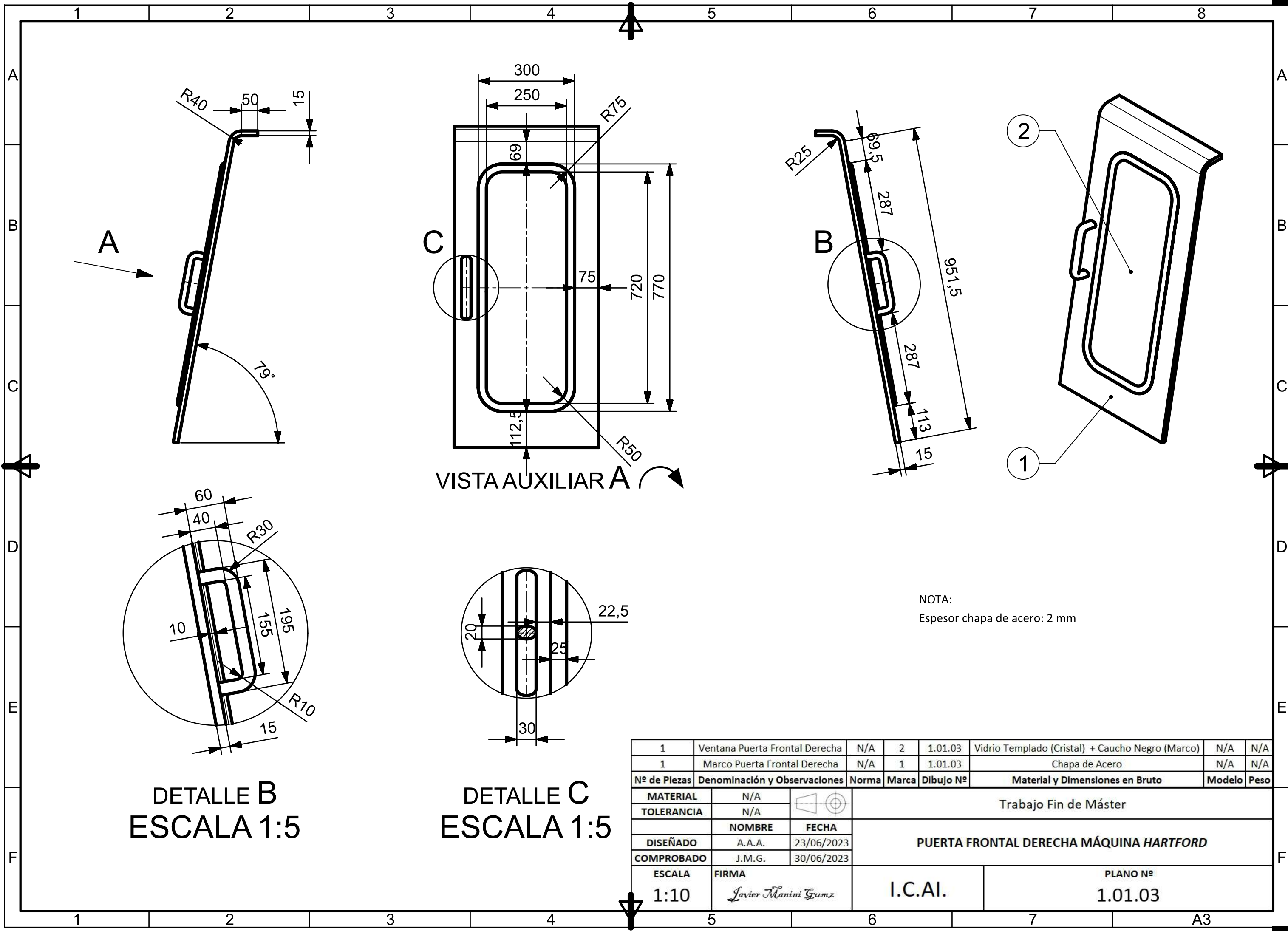
- Plano 1. Plano Máquina *Hartford*
- Plano 2. Plano Conjunto Estructura Máquina *Hartford*
- Plano 3. Plano Estructura Máquina *Hartford*
- Plano 4. Plano Puerta Frontal Izquierda Máquina *Hartford*
- Plano 5. Plano Puerta Frontal Derecha Máquina *Hartford*
- Plano 6. Plano Puerta Lateral Máquina *Hartford*
- Plano 7. Plano Control CNC Máquina *Hartford*
- Plano 8. Plano Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 9. Plano Guías Lineales Verticales - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 10. Plano Torre - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 11. Plano Carro Transversal - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 12. Plano Carro Longitudinal - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 13. Plano Mesa de Trabajo - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 14. Plano Brazo del Cambiador de Herramientas - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 15. Plano Cambiador de Herramientas - Área de Trabajo Máquina *Hartford*
- Plano 16. Plano Placa de Apoyo - Pieza de Trabajo

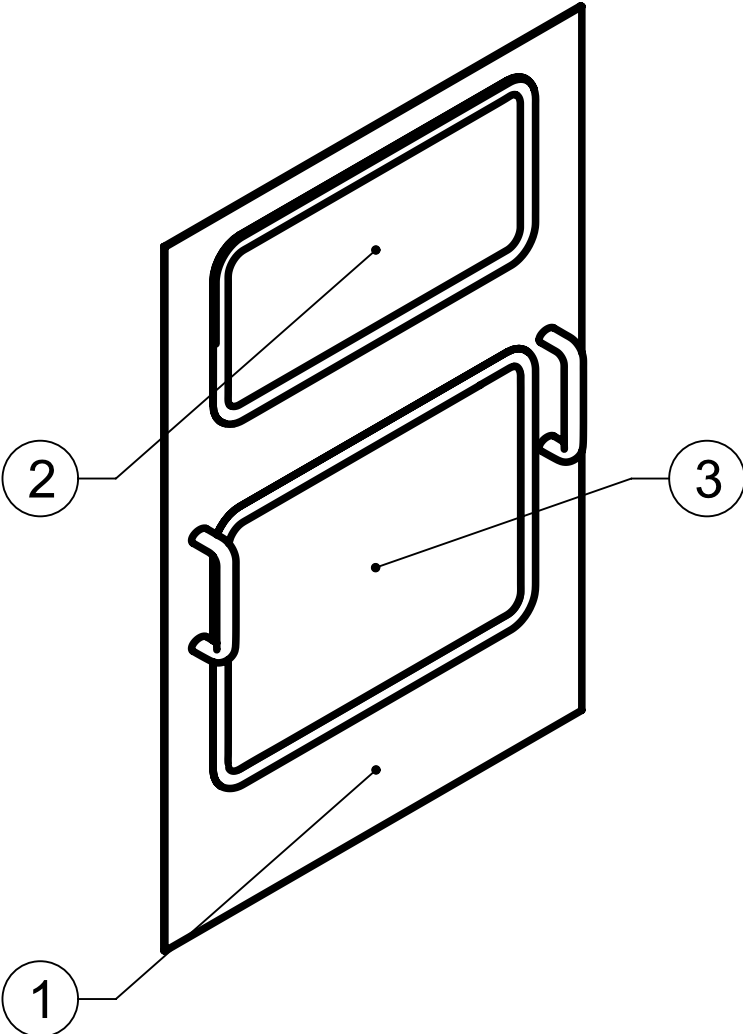


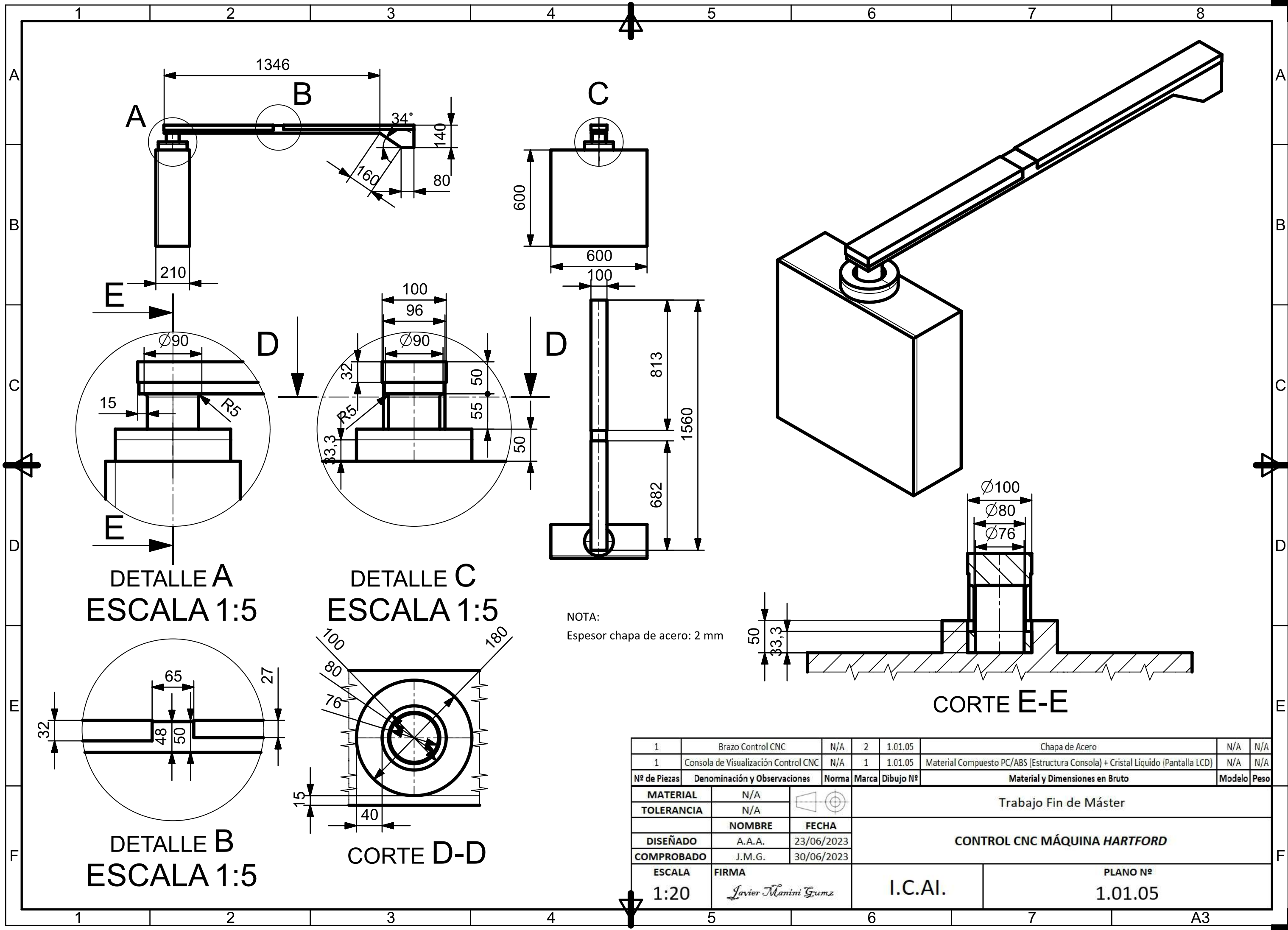


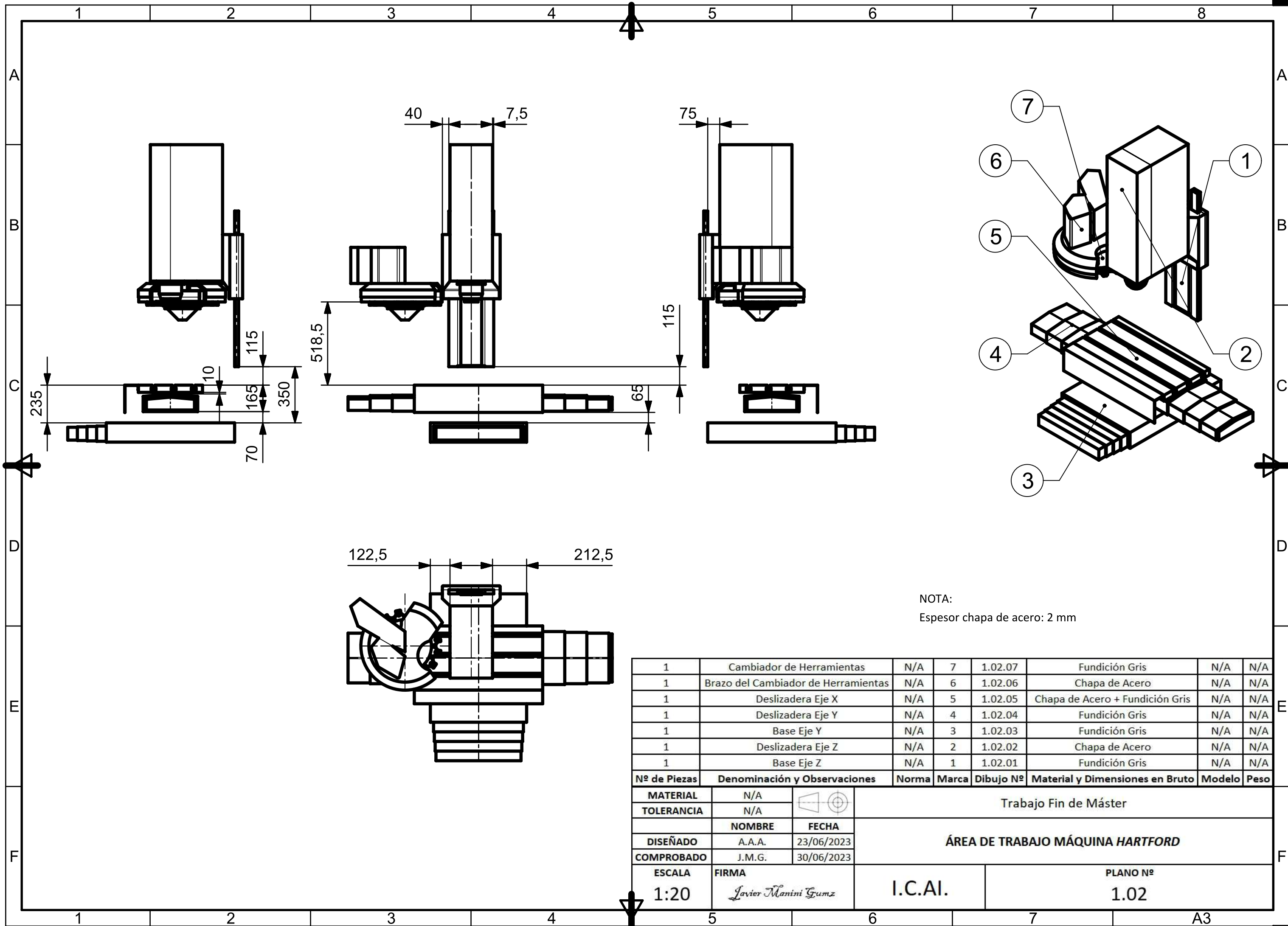
1	Control CNC	N/A	5	1.01.05	Consultar Plano	N/A	N/A
2	Puerta Lateral	N/A	4	1.01.04	Consultar Plano	N/A	N/A
1	Puerta Frontal Derecha	N/A	3	1.01.03	Consultar Plano	N/A	N/A
1	Puerta Frontal Izquierda	N/A	2	1.01.02	Consultar Plano	N/A	N/A
1	Estructura	N/A	1	1.01.01	Consultar Plano	N/A	N/A
Nº de Piezas	Denominación y Observaciones	Norma	Marca	Dibujo Nº	Material y Dimensiones en Bruto	Modelo	Peso
MATERIAL	N/A	Trabajo Fin de Máster					
TOLERANCIA	N/A						
DISEÑADO	A.A.A.	FECHA	CONJUNTO ESTRUCTURA MÁQUINA HARTFORD				
COMPROBADO	J.M.G.	30/06/2023					
ESCALA	FIRMA	I.C.AI.		PLANO Nº			
1:20	Javier Manini Gumz			1.01			

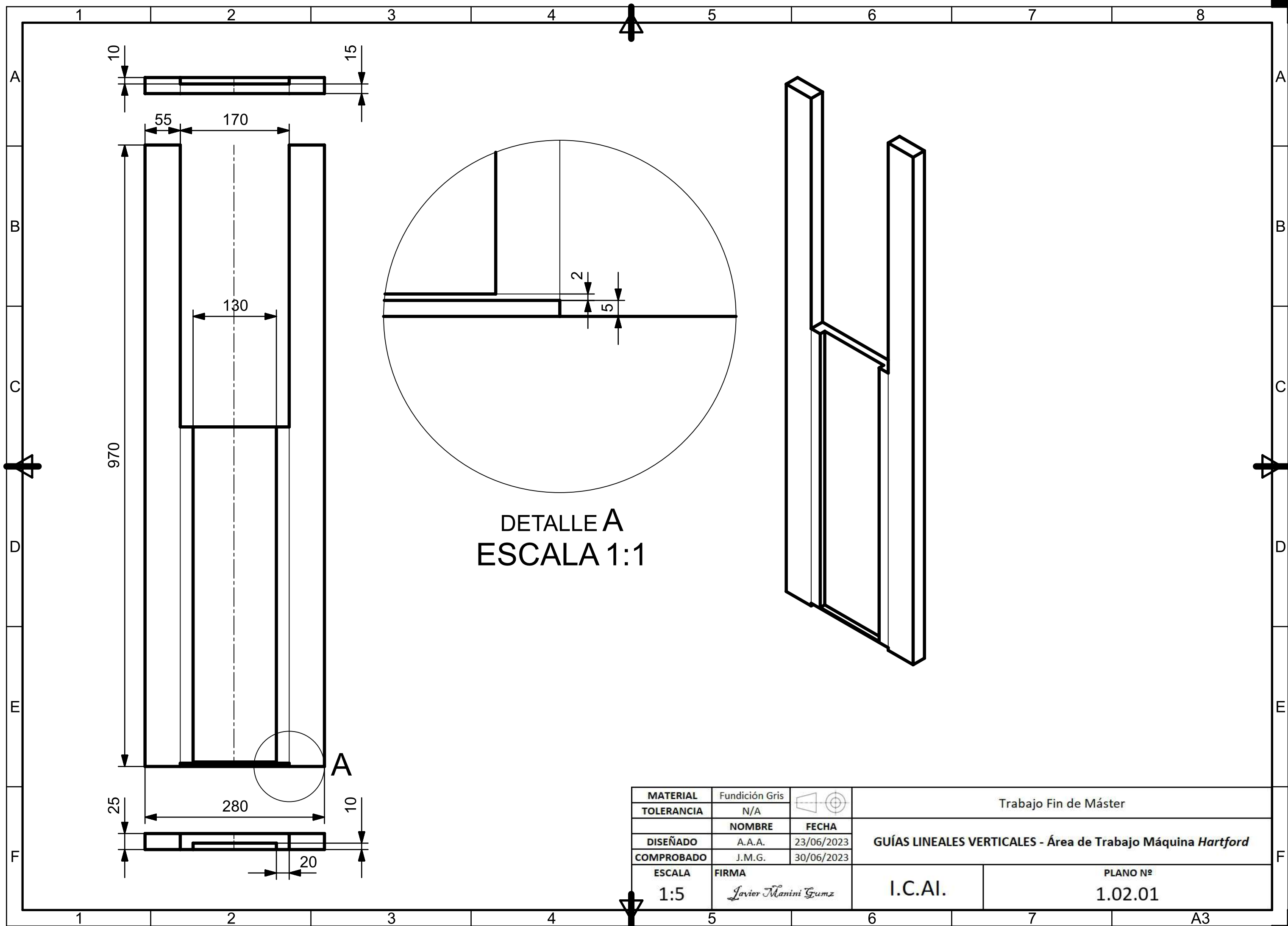




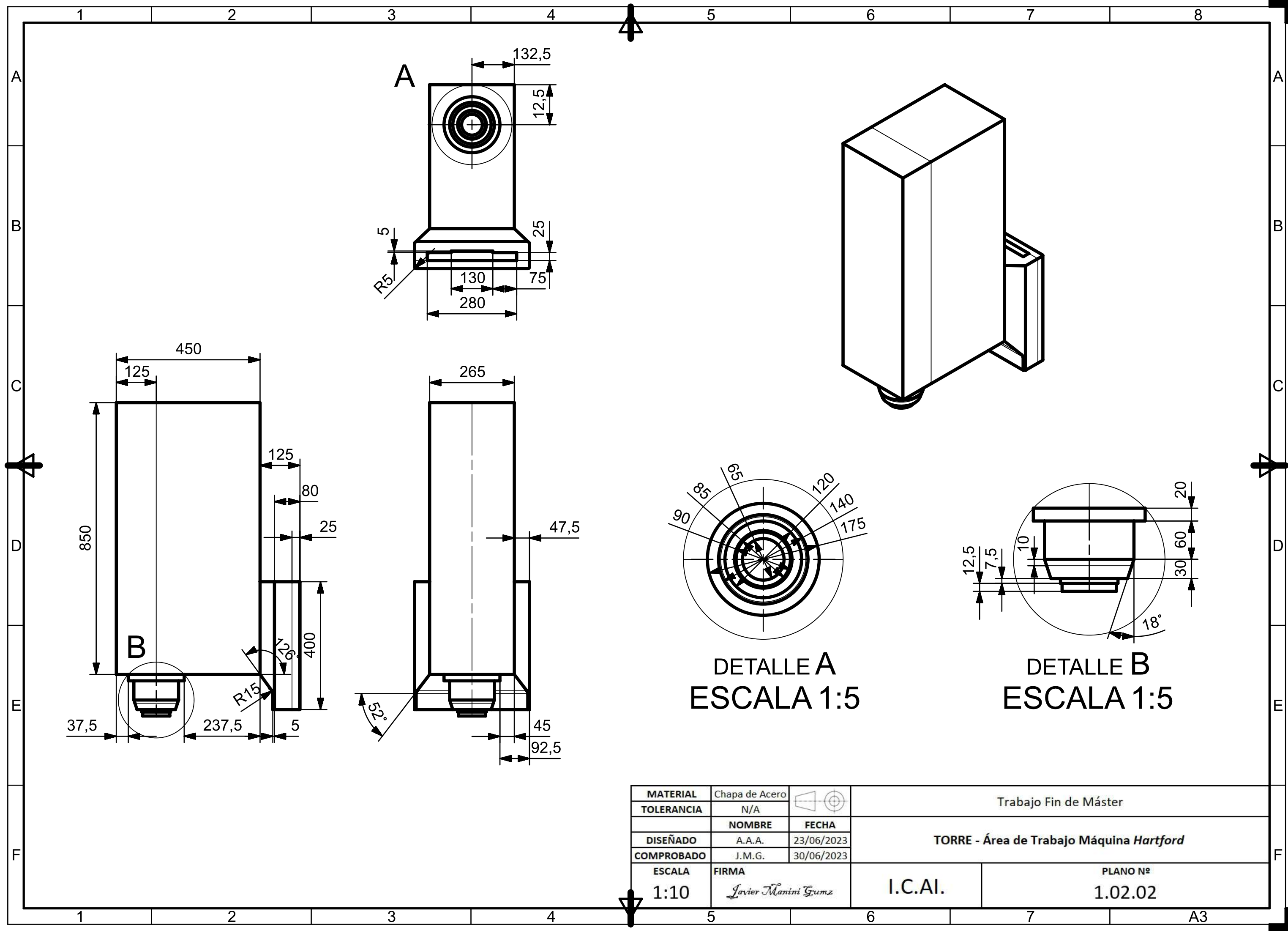








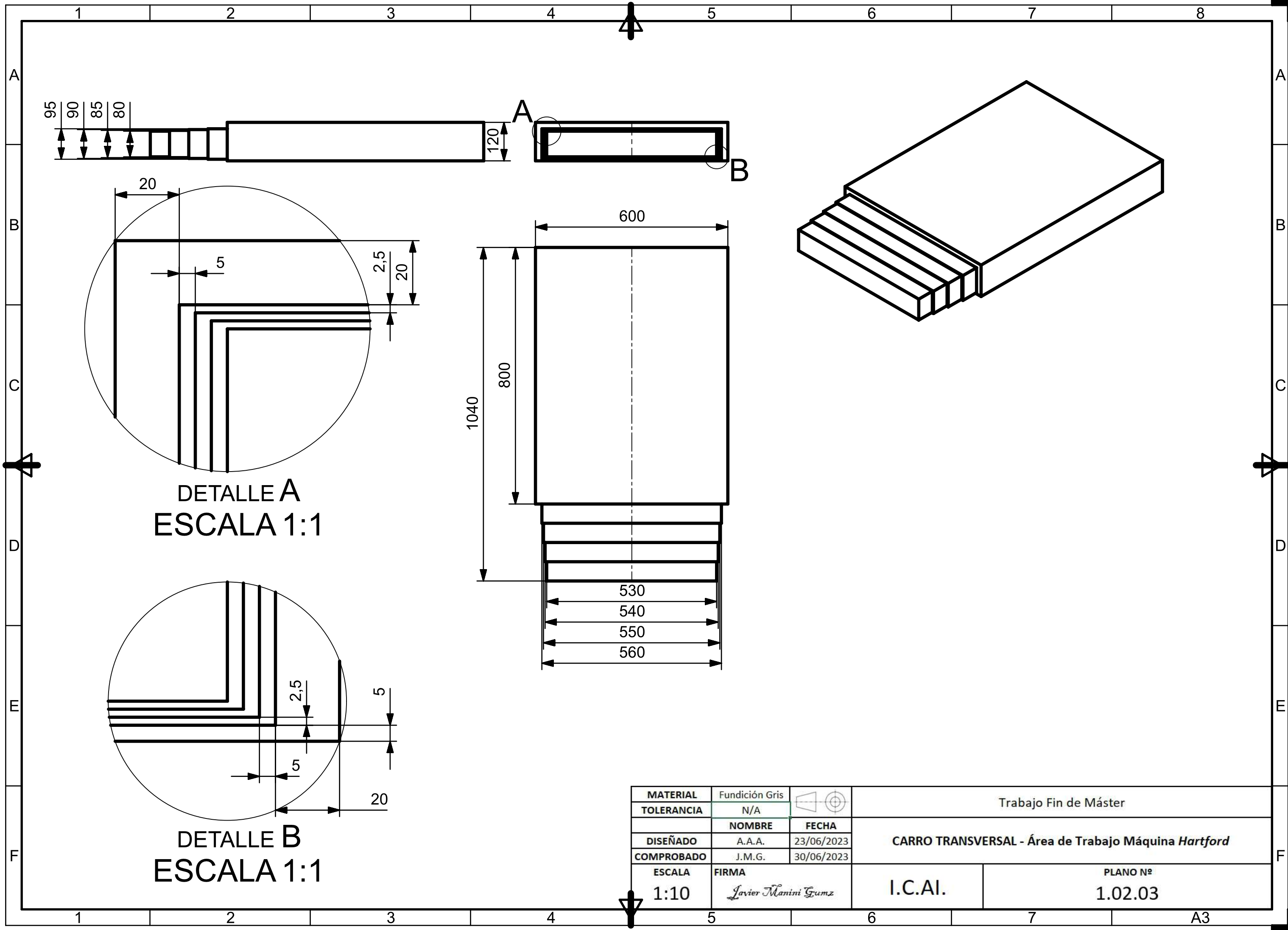
MATERIAL	Fundición Gris		Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	N/A			
	NOMBRE	FECHA	GUÍAS LINEALES VERTICALES - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	
DISEÑADO	A.A.A.	23/06/2023		
COMPROBADO	J.M.G.	30/06/2023		
ESCALA	FIRMA	I.C.AI.		PLANO Nº 1.02.01
1:5	<i>Javier Manini Gumz</i>			



DETALLE A
ESCALA 1:5

DETALLE B
ESCALA 1:5

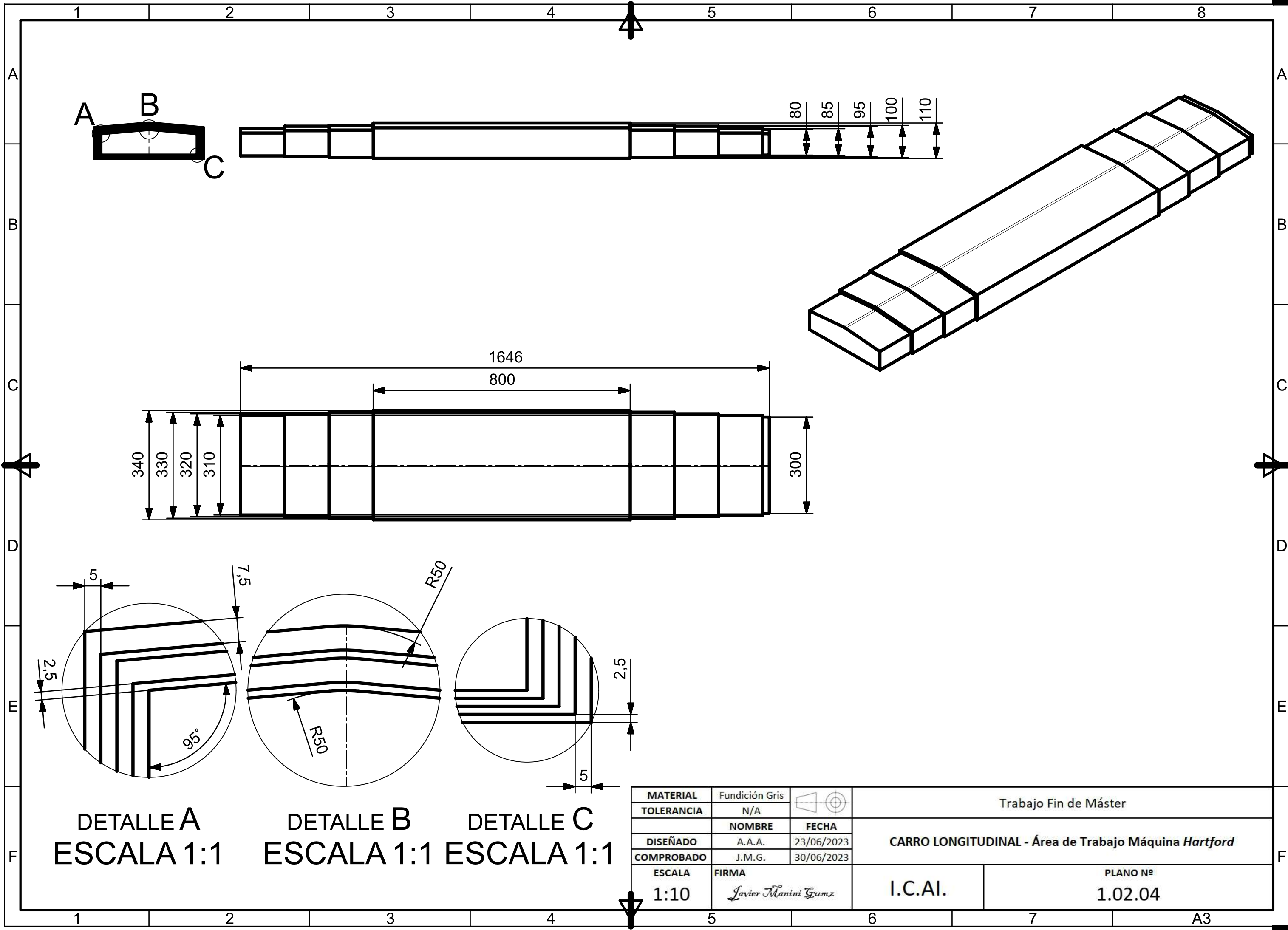
MATERIAL	Chapa de Acero		Trabajo Fin de Máster				
TOLERANCIA	N/A		TORRE - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>				
	NOMBRE						FECHA
DISEÑADO	A.A.A.						23/06/2023
COMPROBADO	J.M.G.						30/06/2023
ESCALA	FIRMA		I.C.AI.		PLANO Nº		
1:10	<i>Javier Manini Gumz</i>				1.02.02		
5		6		7		A3	

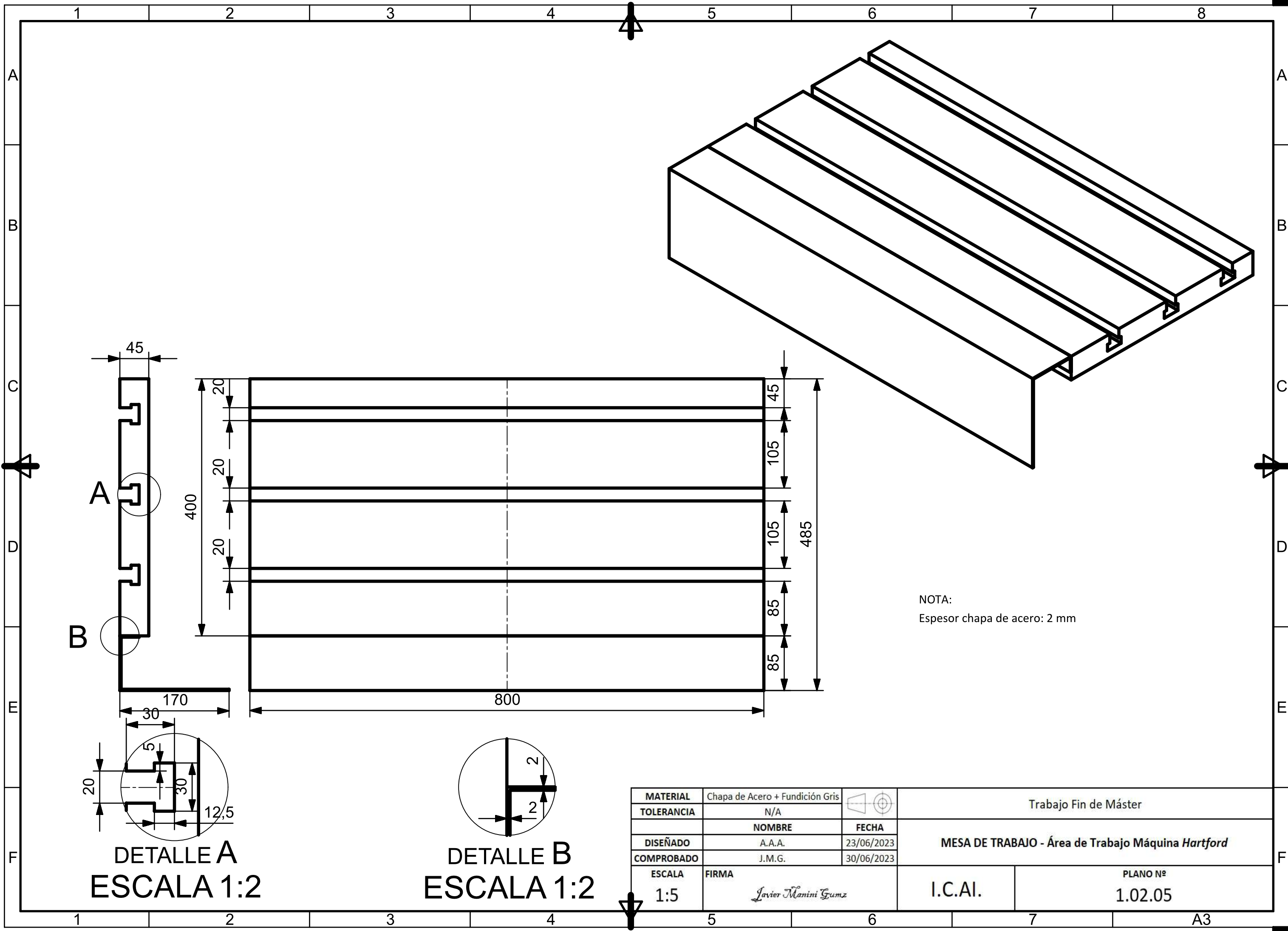


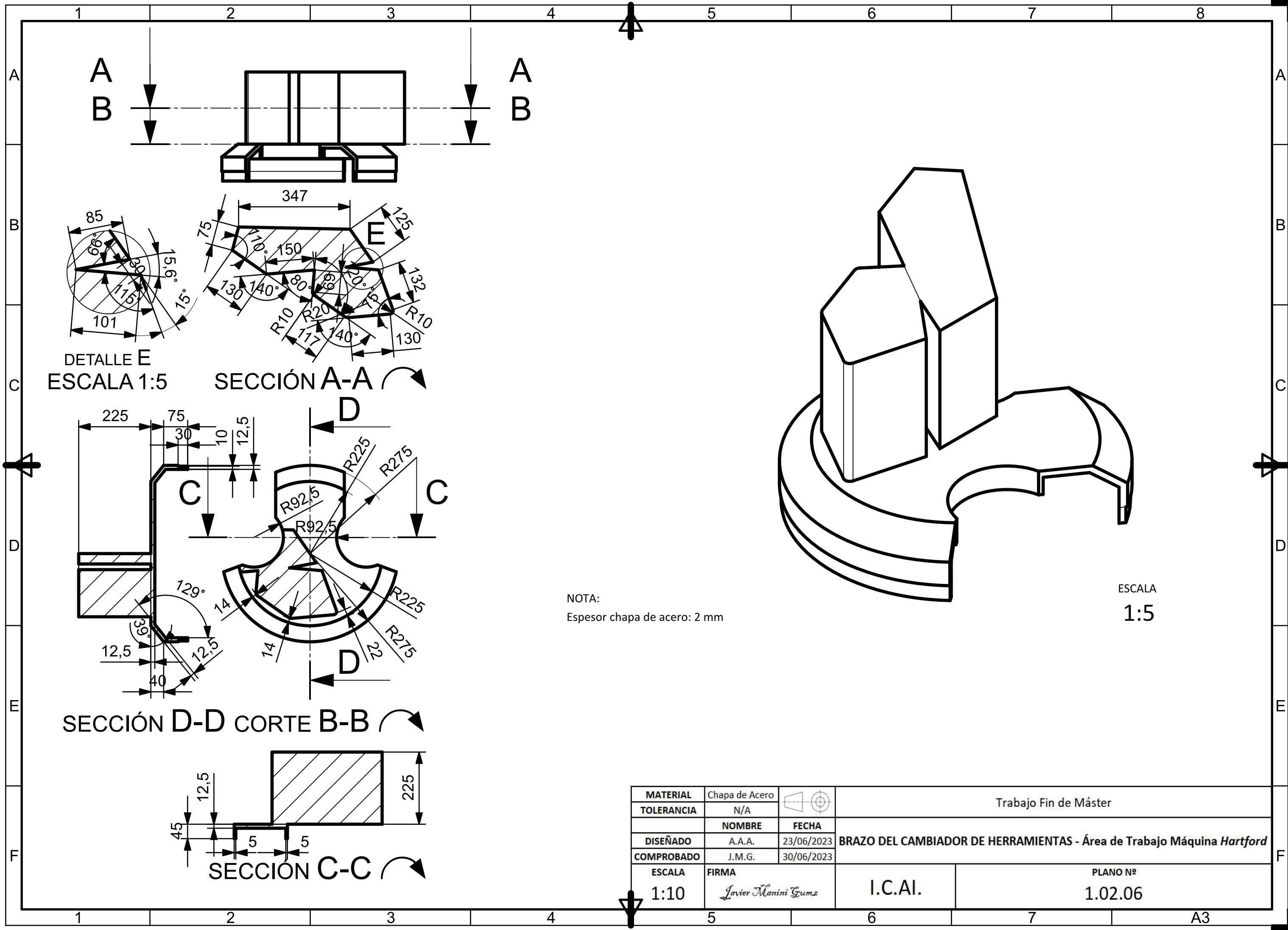
DETALLE A
ESCALA 1:1

DETALLE B
ESCALA 1:1

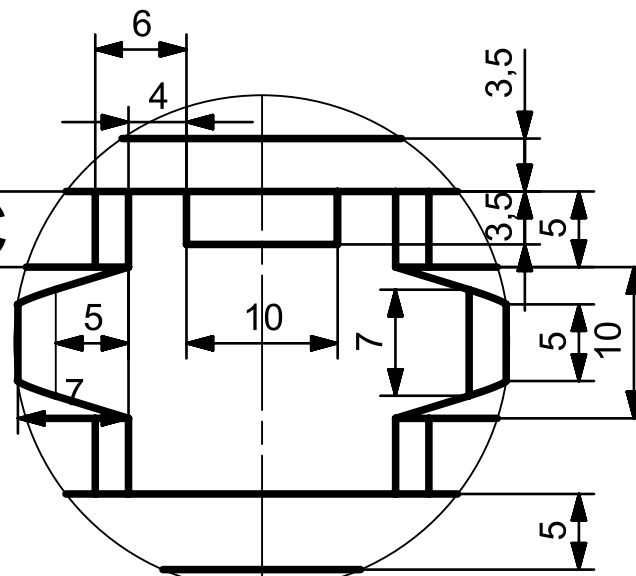
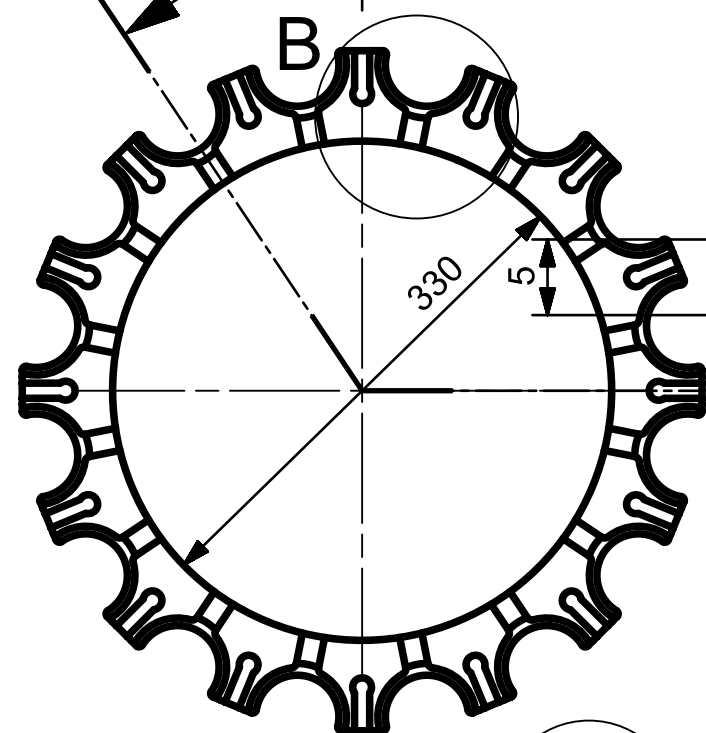
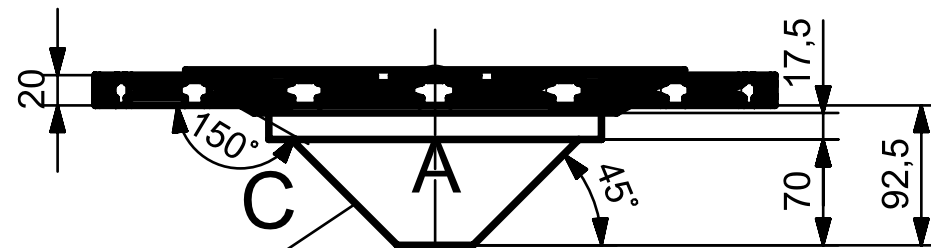
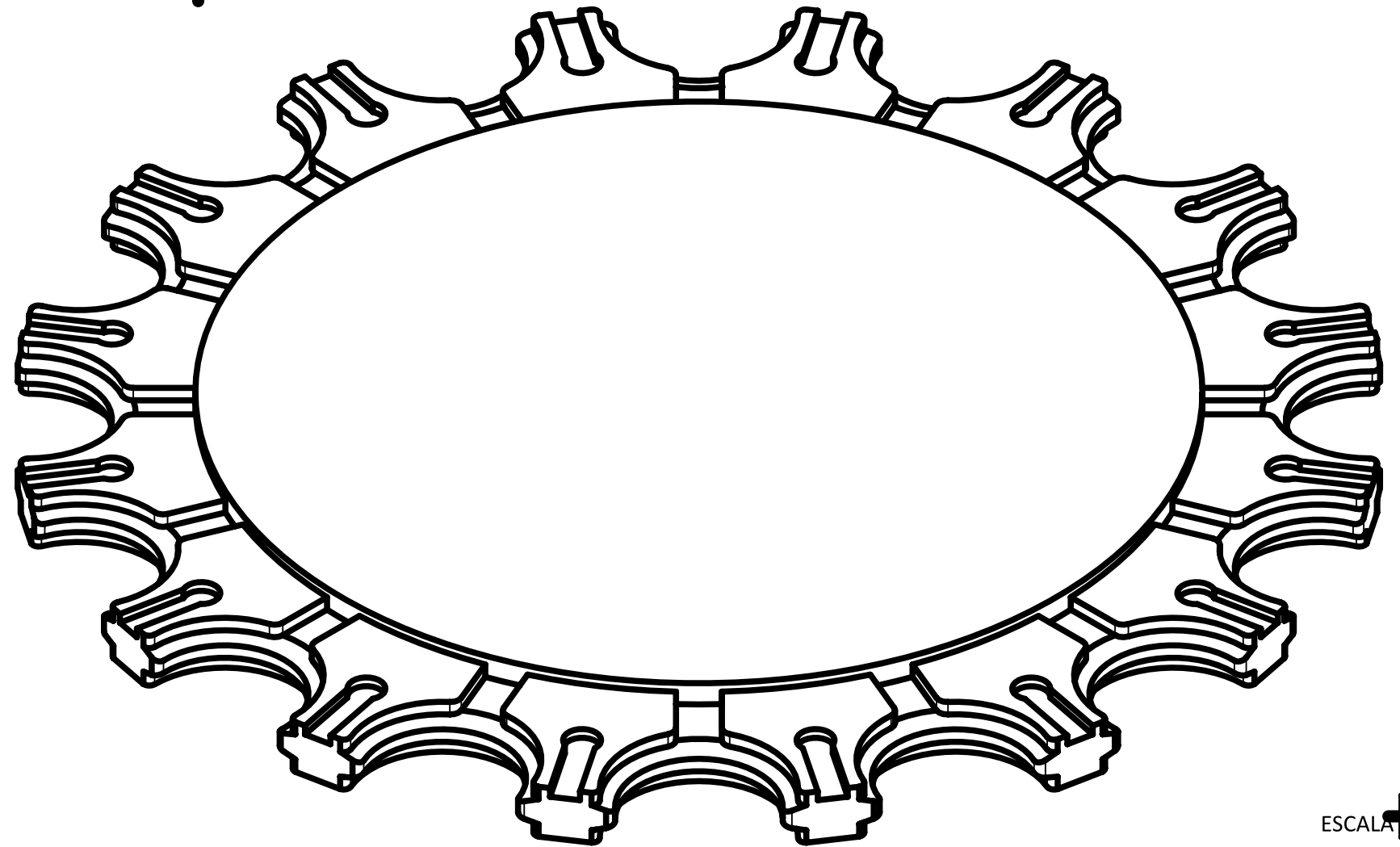
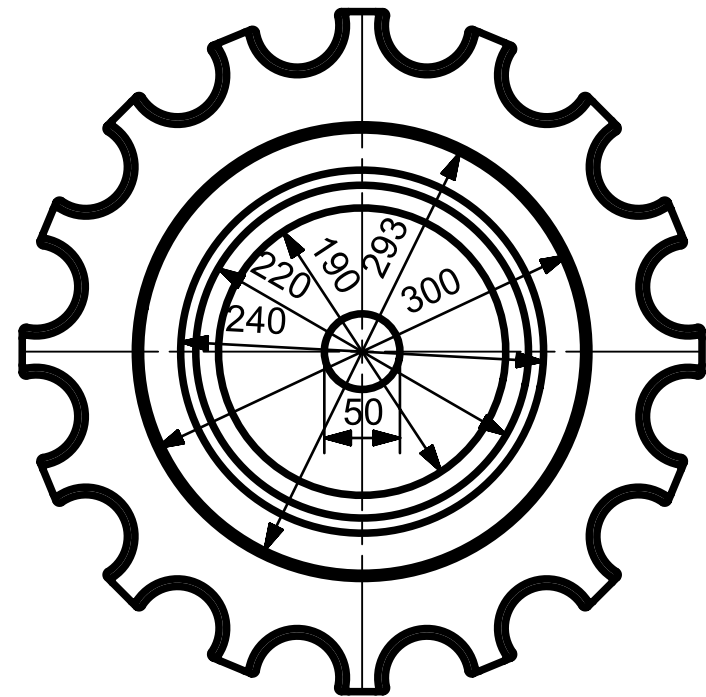
MATERIAL	Fundición Gris		Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	N/A			
	NOMBRE	FECHA	CARRO TRANSVERSAL - Área de Trabajo Máquina <i>Hartford</i>	
DISEÑADO	A.A.A.	23/06/2023		
COMPROBADO	J.M.G.	30/06/2023		
ESCALA	FIRMA		I.C.AI.	PLANO Nº 1.02.03
1:10	<i>Javier Manini Gumz</i>			



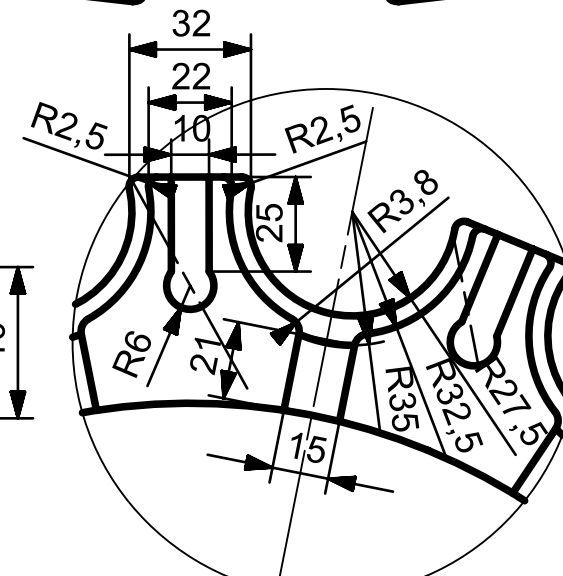




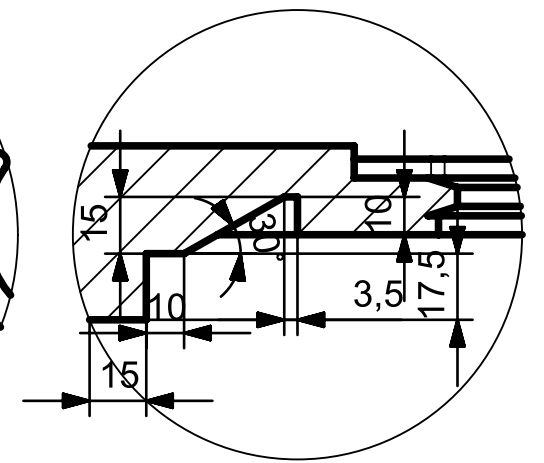
NOTA:
Espesor chapa de acero: 2 mm



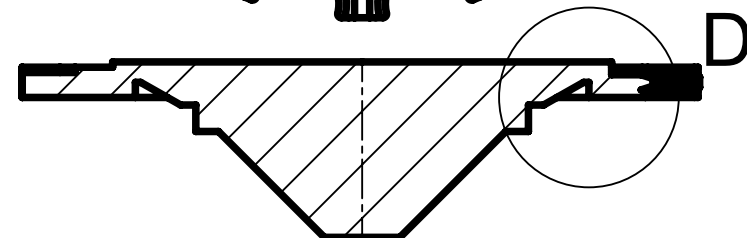
DETALLE A
ESCALA 2:1



DETALLE B
ESCALA 1:2



DETALLE D
ESCALA 1:2

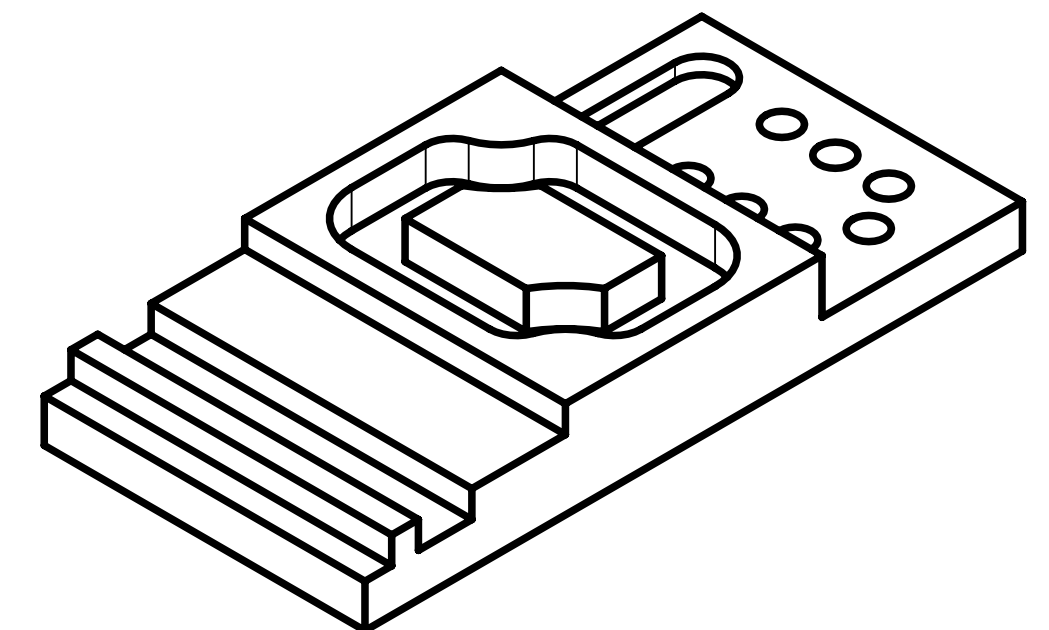
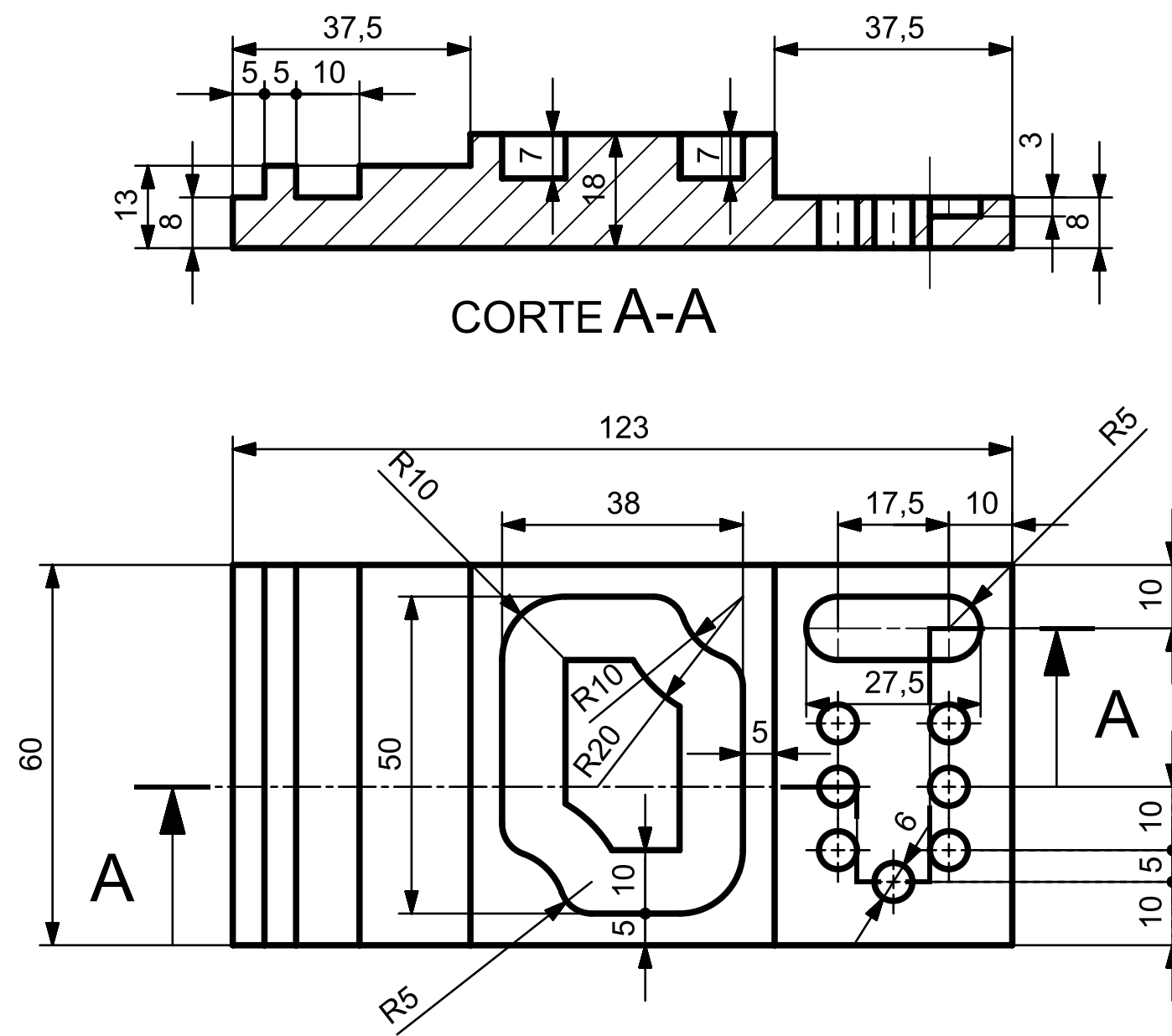


CORTE C-C

ESCALA
1:2

MATERIAL	Fundición Gris	
TOLERANCIA	N/A	
DISEÑADO	A.A.A.	23/06/2023
COMPROBADO	J.M.G.	30/06/2023
ESCALA	FIRMA	
1:5	Javier Manini Gumz	

Trabajo Fin de Máster	
CAMBIADOR DE HERRAMIENTAS - Área de Trabajo Máquina Hartford	
I.C.AI.	PLANO Nº 1.02.07

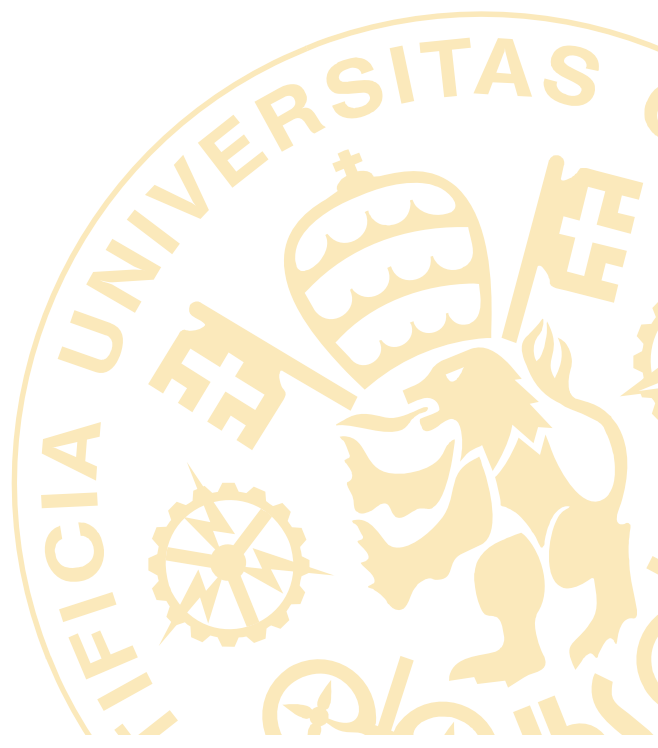


NOTA:
Dimensión en bruto: 123x60x20

MATERIAL	Aluminio		Trabajo Fin de Máster	
TOLERANCIA	N/A			
	NOMBRE	FECHA	PLACA DE APOYO - PIEZA DE TRABAJO	
DISEÑADO	A.A.A.	23/06/2023		
COMPROBADO	J.M.G.	30/06/2023		
ESCALA	FIRMA		I.C.AI.	PLANO Nº
1:1	<i>Javier Manini Gumz</i>			2

DOCUMENTO III

ANEXOS



Índice

Anexo A: Objetivos de Desarrollo Sostenible	3
Anexo B: Estudio económico	4
Anexo C: Instrucciones instalación VNCK	8
Anexo D: Operaciones de mecanizado	15
Anexo E: Comandos Código NC	65
Anexo F: Archivo <i>.mtk</i>	74

Anexo A: Objetivos de Desarrollo Sostenible

En este apartado se mencionarán específicamente cuáles son los objetivos que están relacionados con el proyecto. El 25 de septiembre de 2015, los líderes mundiales adoptaron un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que se debían alcanzarse en los próximos 15 años, véase Figura 1.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible, [ONU23].

En primer lugar, el objetivo noveno, "Industria, Innovación e Infraestructura", es una piedra angular de este proyecto, véase Figura 2. La digitalización de máquinas y la adopción de tecnologías avanzadas tienen como finalidad mejorar la industria tradicional y llevarla hacia la Industria 4.0. Este enfoque busca impulsar la eficiencia y la productividad en el sector industrial, promoviendo la innovación y el desarrollo de infraestructuras inteligentes. Al transformar máquinas convencionales en máquinas digitales, se facilita la implementación de técnicas avanzadas de control, automatización y análisis de datos, lo que conduce a una producción más eficiente y a una mayor competitividad empresarial.



Figura 2. Objetivo noveno relacionado con el trabajo, [ONU23].

En segundo lugar, el objetivo número diez, "Reducción de las desigualdades", también es una parte integral de este proyecto, aunque esto se ha dejado incluido como línea futura del mismo, véase Figura 3. El enfoque social del trabajo consiste en facilitar el acceso a la digitalización de máquinas a pequeñas y medianas empresas con recursos limitados. Al proporcionar una guía detallada y herramientas para la creación de modelos digitales, se busca democratizar la tecnología y reducir las brechas de desigualdad en la industria. Al permitir que empresas de menor tamaño se adapten a la Industria 4.0, se fomenta la inclusión y se impulsa el desarrollo económico y social de diversos actores en la transformación digital. Por eso se ha puesto un gran esfuerzo en detallar todo el proceso de creación de manera muy amplia para que se pueda extender este estudio a otras máquinas y situaciones.



Figura 3. Objetivo décimo relacionado con el trabajo, [ONU23].

Por último, el objetivo número doce, "Producción y consumo responsable", es un aspecto relevante del trabajo, véase Figura 4. La adopción de soluciones virtuales mediante la simulación antes de la producción física contribuye a un enfoque más responsable y sostenible en la industria. Al evitar la compra innecesaria de nuevas máquinas, se reducen los residuos y se optimizan los recursos naturales, lo que beneficia tanto al medio ambiente como a la eficiencia económica de las empresas. La producción y el consumo responsables son esenciales para minimizar el impacto ambiental y avanzar hacia una economía circular y sostenible.



Figura 4. Objetivo duodécimo relacionado con el trabajo, [ONU23].

En conclusión, el trabajo realizado está alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, enfocándose en la industria, la innovación, la reducción de desigualdades y la producción y consumo responsable. Al promover la digitalización de máquinas y la adopción de prácticas sostenibles, se contribuye a un desarrollo más equitativo, eficiente y respetuoso con el medio ambiente. El proyecto busca marcar una diferencia en la industria, impulsando el avance hacia un futuro más sostenible y tecnológicamente avanzado.

Anexo B: Estudio económico

En este anexo, se va a proceder a realizar un sucinto estudio económico acerca de los costes asociados a las tres librerías principales del *software Siemens NX 1926*: la librería de máquinas ("*Machinery Library*"), la librería de herramientas ("*Tool Library*") y la librería de dispositivos ("*Machine Tool Device Library*"), entre los cuales está incluido el utillaje de sujeción (véase *Figura 1*). El diseño CAD y el posterior desarrollo e implementación de todos estos elementos se llevará a cabo por la Oficina Técnica de Gestión de Proyectos de la empresa industrial que quiera implantar el modelo de Fábrica Digital en el marco de la Industria 4.0.

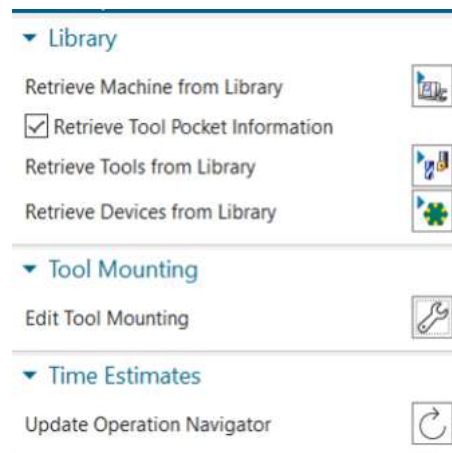


Figura 1. Librerías del *software Siemens NX 1926*.

En todos los casos, el cálculo del presupuesto económico se llevará a cabo en base a las horas anuales empleadas en realizar cada tarea asociada a cada una de dichas librerías, y al coste por hora estimado asociado a cada una de dichas tareas.

El valor del coste por hora se ha establecido a partir de las cifras y datos manejados por uno de los directores de este TFM, D. Javier Manini Gumz, quien tiene años de experiencia como director técnico en la estimación de costes relacionados con la ingeniería de los procesos de fabricación.

Así pues, en primer lugar, se va a proceder a calcular los costes asociados a la virtualización de una máquina, para posteriormente ser incluida en la librería de máquinas del *software Siemens NX 1926* (véase *Figura 2*).

TAREA A REALIZAR	HORAS (h)	COSTE POR HORA (€)	COSTE TOTAL (€)
Diseño CAD de y creación del modelo cinemático de la máquina	30	60 (*)	1800
Creación del postprocesador del <i>software Siemens NX 1926</i> para el control CNC de la máquina	25	60 (*)	1500
Inserción del modelo de la máquina virtualizada y de los <i>drivers</i> en la librería de máquinas	5	60 (*)	300
(*) 10€/h operario + 15€/h consultor + 35€/h gastos fábrica o empresa			3600

Figura 2. Cálculo de los costes asociados a la inserción de una máquina virtual en la librería de máquinas del *software Siemens NX 1926*.

En segundo lugar, se va a proceder a calcular los costes asociados a la creación de una librería de herramientas para el *software Siemens NX 1926* (véase *Figura 3*).

Se trata de unos costes que principalmente repercuten en la fábrica. Por este motivo, resulta fundamental el tener catalogadas y montadas las herramientas de corte en sus respectivos conos portaherramientas de sujeción, lo cual permitirá que el operador de CAM cuente con las herramientas de corte adecuadas para cada operación de mecanizado, y no tenga así que perder tiempo en montar las herramientas de corte en la máquina, sino sólo introducirlas en el cambiador automático de herramientas.

Así pues, el tiempo ahorrado en el lanzamiento de los programas de mecanizado en la máquina redundará en el beneficio obtenido (véase *Figura 3*).

TAREA A REALIZAR	HORAS (h)	COSTE (€)	COSTE TOTAL (€/año)	Nº PROGRAMAS PARA AMORTIZACIÓN GASTO (programas/máquina)
Mantenimiento en fábrica de las herramientas de corte	120 h/año	45 €/h (*)	5400	60,75
Mantenimiento en CAM de las herramientas de corte	72 h/año	60 €/h (**)	4320	PERÍODO AMORTIZACIÓN GASTO (años)
Ahorro en el lanzamiento de los programas de mecanizado en fábrica	4 h/programa (*)	(-)160 €/programa (***)		0,6-1,2 años (*)
	(*) 3h operario + 1h máquina parada	(*) 10€/h operario + 35€/h gastos fábrica o empresa	9720	(*) 100-200 programas/(máquina*año)
		(**) 10€/h operario + 15€/h consultor + 35€/h gastos fábrica o empresa		
		(***) 3h/programa*45€/h operario fábrica + 1h/programa*25€/h parada máquina		

Figura 3. Cálculo del período de amortización de las herramientas de corte sobre una base anual.

En tercer y último lugar, se va a proceder a calcular los costes asociados a la creación de una librería de utillaje de sujeción para el *software Siemens NX 1926* (véase *Figura 4*), los cuales serán modelados mediante diseño CAD.

TAREA A REALIZAR	HORAS (h)	COSTE POR HORA (€/h)	COSTE TOTAL (€)
Diseño CAD del utillaje de sujeción de la máquina	200	60(*)	12000
Inserción del utillaje de sujeción modelado en la biblioteca de dispositivos del software Siemens NX1926	5	60 (*)	300
		(*) 10€/h operario + 15€/h consultor + 35€/h gastos fábrica o empresa	12300

Figura 4. Cálculo de los costes asociados a la creación de una librería de utillaje de sujeción para el *software Siemens NX 1926*.

De los costes totales calculados que tiene que asumir la fábrica o empresa, se deduce que la inversión que ésta tiene que realizar para tener sus librerías virtualizadas es considerablemente elevada, por lo que desde la misma tendrá que considerarse si compensa asumir dicho gasto o no.

En cualquier caso, el hecho de invertir en la creación de un gemelo digital como parte de una fábrica digital se trata siempre de una inversión a medio y largo plazo, con un período de amortización generalmente largo y variable según las circunstancias de entre 2 y 10 años, teniendo en cuenta que el periodo de amortización de la creación de una librería de herramientas es de en torno a 1 año, aproximadamente (véase *Figura 3*).

Anexo C: Instrucciones instalación VNCK

The following document contains recommendations for the installation of Siemens NX, the VNCK and the training package "NX Goes MT Expert".

content

General information	1
operating system	1
Required disk space (full installation).....	1
NX and VNCK version.....	1
installations	2
Overview of installation steps (administrator rights required)	2
Installation steps, NX11.0.2	2
Installation steps, NX12.0.2	2
Installation steps, VNCK4.7.4.0	3
Installation steps, training package (dataset) of "NX Goes MT Expert"	3
Other	5
Support area or Global Technical Access Center (GTAC)	5
1 WebKey Account Management	5
2 Download or upload files (download area).....	6
4 Documentation	6

General information

operating system

- Win7
- Win10

Required disk space (**full installation**)

- NX 11.0.2 approx. 17.4 GB
- NX 12.0.2 approx. 18.8 GB
- VNCK4.7.4.0 approx. 1.1 GB
- Training package (data record) "NX Goes MT Expert"
 - Version for NX11 approx. 230 MB
 - Version for NX12 approx. 390 MB

NX and VNCK version

- NX11.0.2 or NX12.0.2
- VNCK 4.7.4.0

Hint:

- Which NX version you have to install (NX11.0.2 or NX12.0.2) depends on which training package (data set) of "NX Goes MT Expert" you want to install and use.
- Please note that the training package (data set) for NX11.0.2 is not compatible with NX12.0.2 and vice versa the training package (data set) for NX12.0.2 is not compatible with NX11.0.2.

Name of the training package (data record)	NX Version	VNCK Version
V1.7_12.09.17_vnck4.7.zip	NX11.0.2	VNCK4.7.4.0
V2.2_NX12.0.2.9gMTE_07.10.18_vnck4.7.zip	NX12.0.2	VNCK4.7.4.0

Installation recommendation: NX Goes MT EXPERT

installations

Overview of installation steps (administrator rights required)

1. Install NX
2. Install VNCK
 - 2.1. Registering a license for the VNCK
3. Install training package (dataset) "NX Goes MT Expert"
 - 3.1. Adjust start script if necessary

Installation steps, **NX11.0.2**

1. Download installation files:

Name of the installation file	info
"nx-11.0.0.zip"	main installation
"nx-11.0.2.zip"	Update (Maintenance Release)
"nx-11.0.2.mp11.zip"	(Maintenance Pack) smaller update, fixes bug in NX Install if required

Link to the download area of the Siemens GTAC page (Global Technical Access Center):

<https://download.industrysoftware.automation.siemens.com/>

2. Extract installation files
3. Install NX11 (main installation)
4. Update to NX11.0.2 (Maintenance Release)
5. Install smaller update as needed (Maintenance Pack)

Hint:

- Make sure to specify an installation path without spaces and special characters e.g.
C:\Siemens\NX11
- Further information can be found in the unpacked installation files of NX11 and NX11.0.2, each in the subfolder "docs".

Installation steps, **NX12.0.2**

1. Download installation files:

Name of the installation file	info
Not required (see note)	main installation
"nx-12.0.2.zip" "nx-12.0.2.z01" "nx-12.0.2.z02"	Update, Maintenance Release Three files (see note)
"nx-12.0.2.mp04.zip"	maintenance pack smaller update, fixes bug in NX Install if required

Link to the download area of the Siemens GTAC page (Global Technical Access Center):

<https://download.industrysoftware.automation.siemens.com/>

2. Extract installation files (**note note**)
3. Install NX12.0.2 (Maintenance Release)
4. Install smaller update as needed (Maintenance Pack)

Hint:

- Make sure to specify an installation path without spaces and special characters e.g.
C:\Siemens\NX12
- The installation file of the main installation is not required! The reason for this is that the installation files of the update NX12.0.2 (Maintenance Release), in contrast to the update NX11.0.2, represent a complete NX installation.
- Please also note that the update NX12.0.2 consists of three files in contrast to the update NX11.0.2. All three files are required for the installation! To extract the files correctly, please use **WinZip** or **7-Zip**! All three files must be in the same folder! Please also note that only the file "nx-12.0.2.zip" (only file with the file extension . zip) has to be selected

Installation recommendation: NX Goes MT EXPERT

for unpacking the files. The other two files "nx-12.0.2.z01" and "nx-12.0.2.z02" are automatically unpacked by unpacking the file "nx-12.0.2.zip".

- Further information can be found in the unpacked installation file of NX12.0.2, in the subfolder "docs".

Installation steps, VNCK4.7.4.0

1. Download the installation file:

Name of the installation file	info
"VNCK_4.7.4.0.zip"	

Link to the download area of the Siemens GTAC page (Global Technical Access Center):
<https://download.industrysoftware.automation.siemens.com/>

2. Extract installation file
3. Install VNCK
4. Registering a license for the VNCK
 - The license "vnckLicense.dat" for the VNCK is located in the subfolder "vnckLicense" of the unpacked installation file. Copy this file to the following folder:
C:\ProgramData\Siemens\Sinumerik\VNCK\v4.7.4
If you cannot find the "ProgramData" folder, note that this folder is a hidden folder.

Hint:

- For the installation path of the VNCK it is explicitly recommended not to use the default path, but to specify an installation path without spaces and special characters e.g.
C:\Siemens\Sinumerik\VNCK\v4.7.4
- Further information can be found in the unpacked installation file of the VNCK, in the subfolder "doc".
- If necessary, you will find detailed installation instructions for the VNCK in German in the download area of the Siemens GTAC page:
"VNCK_4.7.4.0_Installation_Instructions_eng.pdf".

Installation steps, training package (dataset) of "NX Goes MT Expert".

1. Training package (data set, depending on NX version):

Name of the training package (data record)	NX Version	VNCK Version
V1.7_12.09.17_vnck4.7.zip	NX11.0.2	VNCK4.7.4.0
V2.2_NX12.0.2.9gMTE_07.10.18_vnck4.7.zip	NX12.0.2	VNCK4.7.4.0

2. Unpack Training Package (Data Record)
3. Start installation script (**as admin**)
 - The unpacked training package contains a file with the extension ".bat". This file represents the installation script for the training package and ensures that the data such as machines or training documents are copied to the "custom" folder. This folder can be found in the NX installation directory e.g.
"C:\plm\nx11\MACH\custom\".
 - The installation script creates a startup script for NX. This start script contains the reference to the training data and further adjustments e.g. language in NX.
 - The installation script creates two shortcuts on the desktop. One for the start script and one for the training folder "CAD_CAM", which contains the training documents and corresponding exercises.
 - The following figure shows the open installation script of the training package for NX12.0.2. Area **1** contains an overview of individual parameters such as the language for the start script and thus also the language for NX or the installation path of NX. If you want to set a different language or if the installation path does not match your

Installation recommendation: NX Goes MT EXPERT

NX installation, you can change this using the options 0 (language) and 1 (installation path) in area **2**.

```
Administrator: Installation options (NX goes MT Expert)

Installation script V2.2 with vnck4.7 for NX12.0.2.9

1 Installation language: german
Installation path of NX "UGII_BASE_DIR": C:\ugs\nx12
Correct NX Version: 12.0.2.9
Licence server "SPLM_LICENSE_SERVER": 28000@192.168.16.100
License bundle "UGS_LICENSE_BUNDLE": Variable not created!

Options
-----
[0] : Select Language
[1] : Customize the installation path of NX
[2] : Copy data
[x] : exit

Enter the option 0, 1, 2, 3 or x and confirm with the enter key:
```

Figure 1: Installation script training package

- To "install" the training package, use option 2, type 2 (see following figure, **1**) and confirm with Enter. You are taken to the Selection screen to specify how the training package is to be copied (see figure **2** below). With the option 0 and 1 you copy the data of the training package. The difference between these options is that option 0 creates a **clean training record** and deletes any changed or added data, such as self-added tools, in the training folder. With option 1 you copy all data of the training package, but changed or added data will not be deleted here.

```
[1] : Customize the installation path of NX
[2] : Copy data
[x] : exit

Enter the option 0, 1, 2, 3 or x and confirm with the enter key:

1 2

Copy settings
-----
[0] : Copy with "/mir"
      (mirrors the Data and deletes own data in the folder "NX12.0.2.9gMTE")
[1] : Copy without "/mir"
      (copies the Data of the folder "NX12.0.2.9gMTE",
       but does not overwrite or delete your own data in the folder "NX12.0.2.9gMTE")
[2] : Test the copy process (no data is copied)
[x] : abort (return to the installation options)

Enter the option 0, 1, 2 or x and confirm with the enter key:
```

Figure 2: Installation script Training package - Option 2 Copy data

Installation recommendation: NX Goes MT EXPERT

Customize startup script (if necessary, see note)

- Open the start script with a text editor and adjust the values for the two variables "SPLM_LICENSE_SERVER" and "UGS_LICENSE_BUNDLE" according to your license server and your license bundle(s).
- The following is an example (represented by the two bold lines):

```
set SPLM_LICENSE_SERVER=28000@...  
::set UGS_LICENSE_BUNDLE=(Here the license can be set)
```

We assume that the value in the first line "28000@..." for the variable "SPLM_LICENSE_SERVER" is already correct. Accordingly, no change needs to be made here. However, the second line should be adjusted. In the following both lines are listed again with the adapted second line. Note that the two colons have been removed. This means that the line is no longer commented out. It is also possible that instead of colons "rem" or "REM" is placed before the variable to comment out. It should also be noted that two license bundles (TOTALMACH and ACD10), separated by a semicolon, were specified. Enter your license bundle(s) here.

```
set SPLM_LICENSE_SERVER=28000@...  
set UGS_LICENSE_BUNDLE=TOTALMACH;ACD10
```

Hint:

- Adjusting the two variables "SPLM_LICENSE_SERVER" and "UGS_LICENSE_BUNDLE" in the start script is only necessary if you have not set the license server and the license bundles in the "Licensing tool".

Other

[Support area or Global Technical Access Center \(GTAC\)](#)

In the support area of the Siemens PLM Software website or via the Global Technical Access Center (GTAC) you have access to various online support tools and services. You can reach the support area or the GTAC via the following link: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/support/>

The following figure shows an excerpt of the support links of the support area. Please note the Support Links marked in the figure and the following corresponding explanations.



Figure 3: Section Support Area (GTAC) - Support Links

1 WebKey Account Management

Here you can create a "WebKey Account". This account is required to access the download area or license management. You need a **Sold-to ID** and a **WebKey Access Code** to create it. Both can be found in your license file.

Installation recommendation: NX Goes MT EXPERT

2 Download or upload files (download area)

In the download area you can download the installation files for NX and the VNCK. Link to the download area: <https://download.industrysoftware.automation.siemens.com/>

Tip: To find the installation files quickly, copy the complete name with quotation marks from this document, e.g. "nx-11.0.0.zip", paste it into the search bar of the download area and start the search (see following figure).

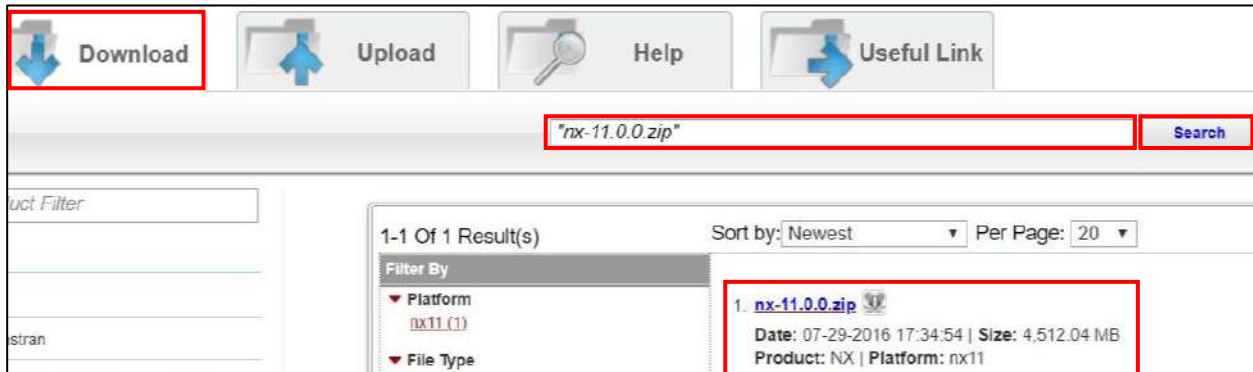


Figure 4: Download area of GTAC - Find installation file "nx-11.0.0.zip"

Alternatively, you can also call up a folder structure in the download area by left-clicking (MB1) on the entries listed on the left, e.g. NX. By left-clicking (MB1) on the individual folder elements of the folder structure, you can display the subfolders and other file contents. The installation file "nx-11.0.0.zip" can be found e.g. via **Full products Nx11 → Windows (64-bit) 2 → nx-11.0.0.zip**

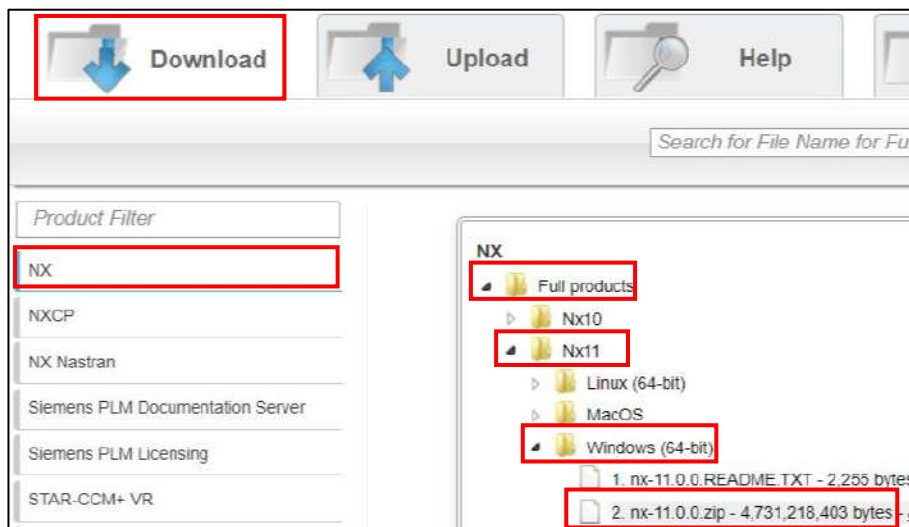


Figure 5: Download area GTAC - Find installation file "nx-11.0.0.zip"

3 License management

If you have created a WebKey account, you can download your license file here.

4 Documentation

Here you have the opportunity to access the documentation for various products, including NX. Link to the selection of NX documentations:

<https://support.industrysoftware.automation.siemens.com/general/nx.shtml>

Anexo D: Operaciones de mecanizado

1. FLOOR_FACING_1
2. FLOOR_WALL_1
3. FLOOR_WALL_2
4. PLANAR_PROFILING_1
5. FLOOR_WALL_3
6. POCKETING_1
7. POCKETING_2
8. SPOT_DRILLING_1
9. DRILLING_1

----- Object name: FL00R_FACING_1 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: FL00R_FACING
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name FL00R_FACING_1
Operation Type Volume Based 2.5D Milling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:01:30
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52005
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_1
Method Group MILL_ROUGH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:01:59
Cutting Time 00:01:59
Non-Cutting Time 00:00:00

-----Tool Information-----
----- Object name: UGT0202_031 -----
Template Type: Library
Template Subtype: Insert Cutter 50 mm
Coordinate System of Data - Work

Tool retrieved from library. Library reference: ugt0202_031

Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : UGT0202_031
Partfile name for assembly graphics:
ugt0202_031.prt
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : 320

(D) Diameter = 50.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.800000000 mm
(L) Length = 34.690000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 15.400000000 mm
Number of Flute 4
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off
Tool Number = Off
Catalog Number = ugt0202_031

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 65.500000000 mm
Length = 10.350000000 mm
Upper Diameter = 79.994300000 mm
Taper Angle = 35.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 80.000000000 mm
Length = 70.500000000 mm
Upper Diameter = 80.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 97.500000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 97.500000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC =	-55.000000000	X =	-55.000000000
YC =	-41.500000000	Y =	-41.500000000
ZC =	138.000000000	Z =	138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC =	1.000000000	X =	1.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Y-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	1.000000000	Y =	1.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Z-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)

Approach	0.000 (MMPM)
Engage	300.189 (MMPM)
First Cut	300.189 (MMPM)
Last Cut	300.189 (MMPM)
Step Over	300.189 (MMPM)
Cross Over	300.189 (MMPM)
Cut	300.189 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	300.189 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----
Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----
Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----
FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----
Start Point None

----- Return Point -----
Return Point None

----- GOHOME Point -----
GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----
Tool Axis Type Normal to First Face
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----

Intol	=	0.030000000 mm
Outtol	=	0.030000000 mm

----- Stock -----

Part Stock	=	0.800000000 mm
Wall Stock	=	0.000000000 mm
Floor Stock	=	0.000000000 mm
Blank Stock	=	0.000000000 mm
Check Stock	=	0.000000000 mm
Blank Distance	=	3.000000000 mm
Depth Per Cut	=	0.000000000 mm

----- Clearance Distance -----

Horizontal Clearance	=	3.000000000 mm
----------------------	---	----------------

Vertical Clearance = 3.000000000 mm
Minimum Clearance = 3.000000000 mm
Shank Clearance = 3.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----

Stepover Type Tool Diameter
Percent = 75.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----

Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Method Zig-Zag
Cut Order Level First
Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes
Cut Walls Only No
Bnd Approximation No
Island Cleanup No
Wall Cleanup None
Extend To part On

----- Blank Overhang Parameters -----

Blank Overhang Type Tool Diameter
Percent = 100.000000000 mm

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Cut
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Outward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Undefined

----- Cut Angle for All Zig Cut Methods -----

Method Automatic
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °
Round Point Output Off

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting On

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Tool Diameter
Percent = 200.000000000 mm
Simplify Shapes None

----- Corner and Feed Rate Control -----

Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis

Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----

Type None

Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Use Tool Holder Yes

Use 2D Workpiece No

In Process Workpiece Use 3D

Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Cut Area Body/Face -----

Member Count 1

----- Geometry - Wall Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Blank Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Attributes -----

GENERATED ON	= NX 1926.1700 2023/07/19 18:01:32 (string)
CAM_TOOLTIP	= KEY:FLOOR_FACING_TITLE (string)
CAM_PICTURE	= cam_mill_floor_facing_tip.bmp (string)
CAM_TEXT	= KEY:OPERATION_FLOOR_FACING (string)
CAM_ICON	= cam_mill_floor_facing (string)

----- Object name: FLOOR_WALL_1 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: FLOOR_WALL
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name FLOOR_WALL_1
Operation Type Volume Based 2.5D Milling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:03:00
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52007
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_1
Method Group MILL_FINISH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:03:03
Cutting Time 00:03:02
Non-Cutting Time 00:00:01

-----Tool Information-----
----- Object name: UGT0202_002 -----
Template Type: Library
Template Subtype: Insert Cutter 25 mm
Coordinate System of Data - Work

Tool previously retrieved from library: Library reference:
ugt0202_002
Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : UGT0202_002
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : 320

(D) Diameter = 25.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.800000000 mm
(L) Length = 31.920000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 9.500000000 mm
Number of Flute 3
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off
Tool Number = Off
Catalog Number =

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 53.500000000 mm
Length = 8.200000000 mm
Upper Diameter = 64.983400000 mm
Taper Angle = 35.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 65.000000000 mm
Length = 52.700000000 mm
Upper Diameter = 65.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 82.500000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 82.500000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes
MCS Origin: (mm)

XC =	-55.000000000	X =	-55.000000000
YC =	-41.500000000	Y =	-41.500000000
ZC =	138.000000000	Z =	138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC =	1.000000000	X =	1.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Y-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	1.000000000	Y =	1.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Z-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)
Approach 0.000 (MMPM)
Engage 250.000 (MMPM)

First Cut	250.000 (MMPM)
Last Cut	250.000 (MMPM)
Step Over	250.000 (MMPM)
Cross Over	250.000 (MMPM)
Cut	250.000 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	250.000 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----
Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----
Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----
FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----
Start Point None

----- Return Point -----
Return Point None

----- GOHOME Point -----
GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----
Tool Axis Type Normal to First Face
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----
Intol = 0.010000000 mm
Outtol = 0.010000000 mm

----- Stock -----
Part Stock = 0.000000000 mm
Wall Stock = 0.000000000 mm
Floor Stock = 0.000000000 mm
Blank Stock = 0.000000000 mm
Check Stock = 0.000000000 mm
Blank Distance = 3.000000000 mm
Depth Per Cut = 3.000000000 mm

----- Clearance Distance -----
Horizontal Clearance = 3.000000000 mm
Vertical Clearance = 3.000000000 mm
Minimum Clearance = 3.000000000 mm

Shank Clearance = 3.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----

Stepover Type Tool Diameter
Percent = 75.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----

Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Method Follow Periphery
Cut Order Level First
Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes
Cut Walls Only No
Bnd Approximation No
Island Cleanup No
Wall Cleanup Automatic
Extend To part On

----- Blank Overhang Parameters -----

Blank Overhang Type Tool Diameter
Percent = 100.000000000 mm

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Cut
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Inward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Undefined
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °
Round Point Output Off

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting On

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Tool Diameter
Percent = 200.000000000 mm
Simplify Shapes None

----- Corner and Feed Rate Control -----

Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis
Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----

Type Engage/Retract
Minimum Move = 1.000000000 mm
Minimum Angle = 10.000000000
Output Plane No
Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Use Tool Holder No
Use 2D Workpiece No
In Process Workpiece Use 3D
Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Cut Area Body/Face -----

Member Count 2

----- Geometry - Wall Body/Face -----

Member Count 1

----- Geometry - Blank Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Attributes -----

GENERATED ON = NX 1926.1700 2023/07/19 18:02:58 (string)
CAM_TEXT3 = Recommended for basic face milling of planar

faces on prismatic parts. This operation replaces the FACE_MILLING_AREA operation found in previous releases. (string)
CAM_TEXT2 = Select floor and/or wall geometry. The material to be removed is determined by the cut area floor and the blank thickness. (string)
CAM_TEXT = Cuts Floors and Walls. (string)
CAM_PICTURE = \$UGII_CAM_TEMPLATE_IMAGE_DIR/oper_floor_wall.bmp (string)
CAM_TOOLTIP = Floor and Wall (string)

----- Object name: FLOOR_WALL_2 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: FLOOR_WALL
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name FLOOR_WALL_2
Operation Type Volume Based 2.5D Milling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:03:00
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52009
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_1
Method Group MILL_FINISH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:06:30
Cutting Time 00:06:28
Non-Cutting Time 00:00:02

-----Tool Information-----
----- Object name: UGT0202_002 -----
Template Type: Library
Template Subtype: Insert Cutter 25 mm
Coordinate System of Data - Work

Tool previously retrieved from library: Library reference:
ugt0202_002
Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : UGT0202_002
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : 320

(D) Diameter = 25.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.800000000 mm
(L) Length = 31.920000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 9.500000000 mm
Number of Flute 3
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off
Tool Number = Off
Catalog Number =

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 53.500000000 mm
Length = 8.200000000 mm
Upper Diameter = 64.983400000 mm
Taper Angle = 35.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 65.000000000 mm
Length = 52.700000000 mm
Upper Diameter = 65.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 82.500000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 82.500000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes
MCS Origin: (mm)

XC =	-55.000000000	X =	-55.000000000
YC =	-41.500000000	Y =	-41.500000000
ZC =	138.000000000	Z =	138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC =	1.000000000	X =	1.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Y-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	1.000000000	Y =	1.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Z-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)
Approach 0.000 (MMPM)
Engage 250.000 (MMPM)

First Cut	250.000 (MMPM)
Last Cut	250.000 (MMPM)
Step Over	250.000 (MMPM)
Cross Over	250.000 (MMPM)
Cut	250.000 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	250.000 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----
Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----
Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----
FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----
Start Point None

----- Return Point -----
Return Point None

----- GOHOME Point -----
GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----
Tool Axis Type Normal to First Face
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----
Intol = 0.010000000 mm
Outtol = 0.010000000 mm

----- Stock -----
Part Stock = 0.000000000 mm
Wall Stock = 0.000000000 mm
Floor Stock = 0.000000000 mm
Blank Stock = 0.000000000 mm
Check Stock = 0.000000000 mm
Blank Distance = 3.000000000 mm
Depth Per Cut = 3.000000000 mm

----- Clearance Distance -----
Horizontal Clearance = 3.000000000 mm
Vertical Clearance = 3.000000000 mm
Minimum Clearance = 3.000000000 mm

Shank Clearance = 3.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----

Stepover Type Tool Diameter
Percent = 75.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----

Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Method Follow Periphery
Cut Order Level First
Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes
Cut Walls Only No
Bnd Approximation No
Island Cleanup No
Wall Cleanup Automatic
Extend To part On

----- Blank Overhang Parameters -----

Blank Overhang Type Tool Diameter
Percent = 100.000000000 mm

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Cut
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Inward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Undefined
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °
Round Point Output Off

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting On

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Tool Diameter
Percent = 200.000000000 mm
Simplify Shapes None

----- Corner and Feed Rate Control -----

Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis
Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----

Type Engage/Retract
Minimum Move = 1.000000000 mm
Minimum Angle = 10.000000000
Output Plane No
Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Use Tool Holder No
Use 2D Workpiece No
In Process Workpiece Use 3D
Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Cut Area Body/Face -----

Member Count 3

----- Geometry - Wall Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Blank Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Attributes -----

GENERATED ON = NX 1926.1700 2023/07/19 18:03:01 (string)
CAM_TOOLTIP = Floor and Wall (string)


```
CAM_PICTURE          = $UGII_CAM_TEMPLATE_IMAGE_DIR/  
oper_floor_wall.bmp (string)  
CAM_TEXT            = Cuts Floors and Walls. (string)  
CAM_TEXT2           = Select floor and/or wall geometry. The  
material to be removed is determined by the cut area floor and the  
bla  
nk thickness. (string)  
CAM_TEXT3           = Recommended for basic face milling of planar  
faces on prismatic parts. This operation replaces the FACE_MILLI  
NG_AREA operation found in previous releases. (string)
```

----- Object name: PLANAR_PROFILING_1 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: PLANAR_PROFILING
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name PLANAR_PROFILING_1
Operation Type Planar Milling
Profile Type 2D Single
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:03:00
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Hybrid
Path Is Edited No
Path Tag 52008
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_2
Method Group MILL_FINISH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:00:20
Cutting Time 00:00:20
Non-Cutting Time 00:00:00

-----Tool Information-----
----- Object name: WKZ_101004 -----
Template Type: Library
Template Subtype: end_mill_d10
Coordinate System of Data - Work

Tool retrieved from library. Library reference: WKZ_101004

Tool Material Name : HSS

Material Description : High Speed Steel

Tool Name : WKZ_101004
Partfile name for assembly graphics:
WKZ_101004.prt
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : not specified

(D) Diameter = 10.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.000000000 mm
(L) Length = 72.000000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 22.000000000 mm
Number of Flute 2
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register 1
Cutcom Register 1
Tool Number = Off

Catalog Number = WKZ_101004

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 0

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC = -55.000000000

X = -55.000000000

YC = -41.500000000

Y = -41.500000000

ZC = 138.000000000

Z = 138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC = 1.000000000

X = 1.000000000

YC = 0.000000000

Y = 0.000000000

ZC = 0.000000000

Z = 0.000000000

Y-axis Vector

XC = 0.000000000

X = 0.000000000

YC = 1.000000000

Y = 1.000000000

ZC = 0.000000000

Z = 0.000000000

Z-axis Vector

XC = 0.000000000

X = 0.000000000

YC = 0.000000000

Y = 0.000000000

ZC = 1.000000000

Z = 1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)

Approach 0.000 (MMPM)

Engage 250.000 (MMPM)

First Cut 250.000 (MMPM)

Last Cut 250.000 (MMPM)

Step Over 250.000 (MMPM)

Cross Over 250.000 (MMPM)

Cut 250.000 (MMPM)

Traversal 0.000 (MMPM)

Retract 250.000 (MMPM)

Return 0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----

Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----

Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----

FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----

Start Point None

----- Return Point -----

Return Point None

----- GOHOME Point -----

GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----

Tool Axis Type All Axis
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----

Intol = 0.010000000 mm
Outtol = 0.010000000 mm

----- Stock -----

Part Stock	=	0.000000000 mm
Floor Stock	=	0.000000000 mm
Blank Stock	=	0.000000000 mm
Check Stock	=	0.000000000 mm
Trim Stock	=	0.000000000 mm
Text Depth	=	0.254000000 mm
Blank Distance	=	0.000000000 mm
Depth Per Cut	=	0.000000000 mm

----- Clearance Distance -----

Horizontal Clearance	=	3.000000000 mm
Vertical Clearance	=	3.000000000 mm
Minimum Clearance	=	3.000000000 mm
Shank Clearance	=	3.000000000 mm
Neck Clearance	=	0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----

Stepover Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----

Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Method Profile
Cut Order Depth First

Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes
Bnd Approximation Yes
Island Cleanup Yes

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Follow
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Outward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Forward
Std Drive Self Intersection Yes
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °

----- Multiple Passes Parameters -----

Do Side Passes Off
Total Thickness = 0.000000000 mm
Side Step Method Increment
Side Increment = 0.000000000 mm
Num Side Passes 0
Do Depth Passes Off
Total Depth = 0.000000000 mm
Depth Step Method Increment
Depth Increment = 0.000000000 mm
Num Depth Passes 0
Order Side Passes First

----- Smoothing -----

Z-axis Smoothing None
Smoothing Radius = 0.000000000 mm
Smoothing Ramp Angle = 70.000000000

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting Off

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Constant
Distance = 0.000000000 mm

----- Finish Parameters -----

Finish Pass Off
Finish Stock = 0.000000000 mm

----- Depth of Cut Parameters -----

Cut Depth Type Fixed Depth
Maximum = 0.000000000 mm
Minimum = 0.000000000 mm
Initial = 0.000000000 mm

Final = 0.000000000 mm
Increment Side Stock = 0.000000000 mm
Top Off Islands On

----- Corner and Feed Rate Control -----
Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----
Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis
Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----
Type None
Output Contact/Tracking Data No

----- Uncut Regions -----
Display No
Overlap Distance = 2.000000000 mm

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----
Use Tool Holder No
Use 2D Workpiece No
In Process Workpiece None
Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Collision Check -----
Collision Check Off
Vertical Distance = 3.000000000 mm
Follow Wall Bottom false

----- Geometry - Part Body/Face -----
Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----
Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----
Member Count 0

----- Geometry - Wall Body/Face -----
Member Count 0

----- Geometry - Part Boundary -----
Member Count 1

----- Geometry - Blank Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Part Text -----

Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Floor -----

Associative Object Yes

Floor Point (mm)

XC =	5.000000000	X =	5.000000000
YC =	-21.500000000	Y =	-21.500000000
ZC =	138.000000000	Z =	138.000000000

Floor Normal (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Attributes -----

GENERATED ON = NX 1926.1700 2023/07/19 18:03:05 (string)

CAM_TEXT = KEY:OPERATION_PLANAR_PROFILING (string)

CAM_PICTURE = \$UGII_CAM_TEMPLATE_IMAGE_DIR/

oper_planar_profile.bmp (string)

CAM_TOOLTIP = KEY:PLANAR_PROFILING_TITLE (string)

----- Object name: FL00R_WALL_3 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: FL00R_WALL
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name FL00R_WALL_3
Operation Type Volume Based 2.5D Milling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:03:06
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52010
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_2
Method Group MILL_FINISH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:00:40
Cutting Time 00:00:39
Non-Cutting Time 00:00:01

-----Tool Information-----
----- Object name: WKZ_101004 -----
Template Type: Library
Template Subtype: end_mill_d10
Coordinate System of Data - Work

Tool retrieved from library. Library reference: WKZ_101004

Tool Material Name : HSS

Material Description : High Speed Steel

Tool Name : WKZ_101004
Partfile name for assembly graphics:
WKZ_101004.prt
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : not specified

(D) Diameter = 10.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.000000000 mm
(L) Length = 72.000000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 22.000000000 mm
Number of Flute 2
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register 1
Cutcom Register 1
Tool Number = Off
Catalog Number = WKZ_101004

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 0

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC = -55.000000000

X = -55.000000000

YC = -41.500000000

Y = -41.500000000

ZC = 138.000000000

Z = 138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC = 1.000000000

X = 1.000000000

YC = 0.000000000

Y = 0.000000000

ZC = 0.000000000

Z = 0.000000000

Y-axis Vector

XC = 0.000000000

X = 0.000000000

YC = 1.000000000

Y = 1.000000000

ZC = 0.000000000

Z = 0.000000000

Z-axis Vector

XC = 0.000000000

X = 0.000000000

YC = 0.000000000

Y = 0.000000000

ZC = 1.000000000

Z = 1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)

Approach 0.000 (MMPM)

Engage 250.000 (MMPM)

First Cut 250.000 (MMPM)

Last Cut 250.000 (MMPM)

Step Over 250.000 (MMPM)

Cross Over 250.000 (MMPM)

Cut 250.000 (MMPM)

Traversal 0.000 (MMPM)

Retract 250.000 (MMPM)

Return 0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----

Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----

Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----

FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----
Start Point None

----- Return Point -----
Return Point None

----- GOHOME Point -----
GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----
Tool Axis Type Normal to First Face
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----
Intol = 0.010000000 mm
Outtol = 0.010000000 mm

----- Stock -----
Part Stock = 0.000000000 mm
Wall Stock = 0.000000000 mm
Floor Stock = 0.000000000 mm
Blank Stock = 0.000000000 mm
Check Stock = 0.000000000 mm
Blank Distance = 3.000000000 mm
Depth Per Cut = 0.000000000 mm

----- Clearance Distance -----
Horizontal Clearance = 3.000000000 mm
Vertical Clearance = 3.000000000 mm
Minimum Clearance = 3.000000000 mm
Shank Clearance = 3.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----
Stepover Type Tool Diameter
Percent = 75.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----
Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----
Cut Method Follow Periphery
Cut Order Level First
Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes

Cut Walls Only No
Bnd Approximation No
Island Cleanup No
Wall Cleanup Automatic
Extend To part On

----- Blank Overhang Parameters -----

Blank Overhang Type Tool Diameter
Percent = 100.000000000 mm

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Cut
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Outward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Undefined
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °
Round Point Output Off

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting On

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Tool Diameter
Percent = 200.000000000 mm
Simplify Shapes None

----- Corner and Feed Rate Control -----

Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis
Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----

Type Engage/Retract
Minimum Move = 1.000000000 mm
Minimum Angle = 10.000000000
Output Plane No
Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Use Tool Holder No
Use 2D Workpiece No
In Process Workpiece Use 3D
Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Geometry - Part Body/Face -----
Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----
Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----
Member Count 0

----- Geometry - Cut Area Body/Face -----
Member Count 1

----- Geometry - Wall Body/Face -----
Member Count 0

----- Geometry - Blank Boundary -----
Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----
Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----
Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Attributes -----

GENERATED ON = NX 1926.1700 2023/07/19 18:03:07 (string)
CAM_TEXT3 = Recommended for basic face milling of planar
faces on prismatic parts. This operation replaces the FACE_MILLI
NG_AREA operation found in previous releases. (string)
CAM_TEXT2 = Select floor and/or wall geometry. The
material to be removed is determined by the cut area floor and the
blank thickness. (string)
CAM_TEXT = Cuts Floors and Walls. (string)
CAM_PICTURE = \$UGII_CAM_TEMPLATE_IMAGE_DIR/
oper_floor_wall.bmp (string)
CAM_TOOLTIP = Floor and Wall (string)

----- Object name: POCKETING_1 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: POCKETING
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name POCKETING_1
Operation Type Volume Based 2.5D Milling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:03:12
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52012
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_3
Method Group MILL_FINISH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:05:33
Cutting Time 00:05:32
Non-Cutting Time 00:00:01

-----Tool Information-----
----- Object name: UGT0201_002 -----
Template Type: Library
Template Subtype: End Mill 8 mm
Coordinate System of Data - Work

Tool retrieved from library. Library reference: ugt0201_002

Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : UGT0201_002
Partfile name for assembly graphics:
ugt0201_002.prt
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : 310

(D) Diameter = 8.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.000000000 mm
(L) Length = 30.000000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 19.000000000 mm
Number of Flute 4
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off
Tool Number = Off
Catalog Number = ugt0201_002

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 43.000000000 mm
Length = 24.000000000 mm
Upper Diameter = 43.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 40.000000000 mm
Length = 27.000000000 mm
Upper Diameter = 40.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 64.000000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 64.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC =	-55.000000000	X =	-55.000000000
YC =	-41.500000000	Y =	-41.500000000
ZC =	138.000000000	Z =	138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC =	1.000000000	X =	1.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Y-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	1.000000000	Y =	1.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Z-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)

Approach	0.000 (MMPM)
Engage	250.000 (MMPM)
First Cut	250.000 (MMPM)
Last Cut	250.000 (MMPM)
Step Over	250.000 (MMPM)
Cross Over	250.000 (MMPM)
Cut	250.000 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	250.000 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----
Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----
Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----
FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----
Start Point None

----- Return Point -----
Return Point None

----- GOHOME Point -----
GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----
Tool Axis Type Normal to First Face
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----

Intol	=	0.010000000 mm
Outtol	=	0.010000000 mm

----- Stock -----

Part Stock	=	0.000000000 mm
Wall Stock	=	0.000000000 mm
Floor Stock	=	0.000000000 mm
Blank Stock	=	0.000000000 mm
Check Stock	=	0.000000000 mm
Blank Distance	=	3.000000000 mm
Depth Per Cut	=	2.000000000 mm

----- Clearance Distance -----

Horizontal Clearance	=	3.000000000 mm
----------------------	---	----------------

Vertical Clearance = 3.000000000 mm
Minimum Clearance = 3.000000000 mm
Shank Clearance = 3.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----

Stepover Type Tool Diameter
Percent = 75.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----

Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Method Follow Periphery
Cut Order Level First
Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes
Cut Walls Only No
Bnd Approximation No
Island Cleanup No
Wall Cleanup Automatic
Extend To part Off

----- Blank Overhang Parameters -----

Blank Overhang Type Tool Diameter
Percent = 100.000000000 mm

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Cut
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Outward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Undefined
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °
Round Point Output Off

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting On

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Tool Diameter
Percent = 200.000000000 mm
Simplify Shapes None

----- Corner and Feed Rate Control -----

Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis

Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----

Type Engage/Retract

Minimum Move = 1.000000000 mm

Minimum Angle = 10.000000000

Output Plane No

Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Use Tool Holder No

Use 2D Workpiece No

In Process Workpiece Use 3D

Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Cut Area Body/Face -----

Member Count 1

----- Geometry - Wall Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Blank Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Attributes -----

GENERATED ON	= NX 1926.1700 2023/07/19 18:03:11 (string)
CAM_TOOLTIP	= KEY:POCKETING_TITLE (string)
CAM_PICTURE	= cam_mill_pocketing_tip.bmp (string)
CAM_TEXT	= KEY:OPERATION_POCKETING (string)
CAM_ICON	= cam_mill_pocketing (string)

----- Object name: POCKETING_2 -----
Template Type: mill_planar
Template Subtype: POCKETING
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name POCKETING_2
Operation Type Volume Based 2.5D Milling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 18:03:12
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52011
In Process Workpiece Generated
Order Group SUBPROGRAM_3
Method Group MILL_FINISH
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:01:05
Cutting Time 00:01:05
Non-Cutting Time 00:00:00

-----Tool Information-----
----- Object name: UGT0201_002 -----
Template Type: Library
Template Subtype: End Mill 8 mm
Coordinate System of Data - Work

Tool retrieved from library. Library reference: ugt0201_002

Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : UGT0201_002
Partfile name for assembly graphics:
ugt0201_002.prt
Tool Type : Milling Tool-5 Parameters
Holding System : 310

(D) Diameter = 8.000000000 mm
(R1) Lower Radius = 0.000000000 mm
(L) Length = 30.000000000 mm
(B) Taper Angle = 0.000000000 °
(A) Tip Angle = 0.000000000 °
(FL) Tool Flute Length = 19.000000000 mm
Number of Flute 4
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off
Tool Number = Off
Catalog Number = ugt0201_002

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 43.000000000 mm
Length = 24.000000000 mm
Upper Diameter = 43.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 40.000000000 mm
Length = 27.000000000 mm
Upper Diameter = 40.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 64.000000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 64.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 0

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC = -55.000000000
YC = -41.500000000
ZC = 138.000000000

X = -55.000000000
Y = -41.500000000
Z = 138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC = 1.000000000
YC = 0.000000000
ZC = 0.000000000

X = 1.000000000
Y = 0.000000000
Z = 0.000000000

Y-axis Vector

XC = 0.000000000
YC = 1.000000000
ZC = 0.000000000

X = 0.000000000
Y = 1.000000000
Z = 0.000000000

Z-axis Vector

XC = 0.000000000
YC = 0.000000000
ZC = 1.000000000

X = 0.000000000
Y = 0.000000000
Z = 1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid 0.000 (MMPM)

Approach	0.000 (MMPM)
Engage	250.000 (MMPM)
First Cut	250.000 (MMPM)
Last Cut	250.000 (MMPM)
Step Over	250.000 (MMPM)
Cross Over	250.000 (MMPM)
Cut	250.000 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	250.000 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- Clearance Plane -----
Clearance Plane None

----- Lower Limit Plane -----
Lower Limit Plane None

----- FROM Point -----
FROM Point None
FROM Axis Status Inactive

----- Start Point -----
Start Point None

----- Return Point -----
Return Point None

----- GOHOME Point -----
GOHOME Method None
GOHOME Axis Status Inactive

----- Tool Axis -----
Tool Axis Type Normal to First Face
Associative Object No
Tool Axis (mm)

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----

Intol	=	0.010000000 mm
Outtol	=	0.010000000 mm

----- Stock -----

Part Stock	=	0.000000000 mm
Wall Stock	=	0.000000000 mm
Floor Stock	=	0.000000000 mm
Blank Stock	=	0.000000000 mm
Check Stock	=	0.000000000 mm
Blank Distance	=	3.000000000 mm
Depth Per Cut	=	2.000000000 mm

----- Clearance Distance -----

Horizontal Clearance	=	3.000000000 mm
----------------------	---	----------------

Vertical Clearance = 3.000000000 mm
Minimum Clearance = 3.000000000 mm
Shank Clearance = 3.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Stepover Parameters -----

Stepover Type Tool Diameter
Percent = 75.000000000

----- Max Cut Width Parameters -----

Max Cut Width Type Tool Diameter
Percent = 50.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Method Follow Periphery
Cut Order Level First
Resequence Regions Optimize
Follow Check Yes
Cut Walls Only No
Bnd Approximation No
Island Cleanup No
Wall Cleanup Automatic
Extend To part Off

----- Blank Overhang Parameters -----

Blank Overhang Type Tool Diameter
Percent = 100.000000000 mm

----- Across Voids Parameters -----

Across Voids Cut
Minimize Number of Engages Off
Periphery Progression Outward
Number of Passes 1
Cut Flag Undefined
Cut Direction Flag Climb
Cut Direction Undefined
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °
Round Point Output Off

----- Topology Tolerances -----

Angle = 6.000000000
Distance = 0.508000000 mm

----- Tracing Parameters -----

Prevent Under-Cutting On

----- Merge Distance Parameters -----

Merge Distance Type Tool Diameter
Percent = 200.000000000 mm
Simplify Shapes None

----- Corner and Feed Rate Control -----

Feed Rate Compensation Off

Filletts None

Slowdowns Off

Max. Tool Axis Change = 0.000000000

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis

Motion Data Tool Centerline Data

----- Cutter Compensation -----

Type Engage/Retract

Minimum Move = 1.000000000 mm

Minimum Angle = 10.000000000

Output Plane No

Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Use Tool Holder No

Use 2D Workpiece No

In Process Workpiece Use 3D

Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Check Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Cut Area Body/Face -----

Member Count 1

----- Geometry - Wall Body/Face -----

Member Count 0

----- Geometry - Blank Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Check Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Trim Boundary -----

Member Count 0

----- Geometry - Offset Value -----

Part Offset = 0.000000000 mm

----- Attributes -----

GENERATED ON	= NX 1926.1700 2023/07/19 18:03:16 (string)
CAM_TOOLTIP	= KEY:POCKETING_TITLE (string)
CAM_PICTURE	= cam_mill_pocketing_tip.bmp (string)
CAM_TEXT	= KEY:OPERATION_POCKETING (string)
CAM_ICON	= cam_mill_pocketing (string)

----- Object name: SPOT_DRILLING_1 -----
Template Type: hole_making
Template Subtype: SPOT_DRILLING
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name SPOT_DRILLING_1
Operation Type Drilling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 17:41:00
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52013
In Process Workpiece Out of Date
Order Group SUBPROGRAM_4
Method Group DRILLING
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:00:13
Cutting Time 00:00:11
Non-Cutting Time 00:00:02

-----Tool Information-----
----- Object name: NXT0301_030 -----
Template Type: Library
Template Subtype: Carbide Drill 5.9mm (860.1-0590-018A1-MM 2214)
Coordinate System of Data - Work

Tool previously retrieved from library: Library reference:
NXT0301_030
Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : NXT0301_030
Tool Type : Drilling Tool
Holding System : not specified

(D) Diameter = 5.900000000 mm
(CR) Corner Radius = 0.000000000 mm
(L) Length = 66.000000000 mm
(PA) Point Angle = 140.000000000 °
(PL) Point Length = 1.073712191 mm
(FL) Flute Length = 28.000000000 mm
Number of Flute 2
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register 1
Cutcom Register = Off
Tool Number 4
Catalog Number =

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 16.500000000 mm
Length = 10.000000000 mm
Upper Diameter = 28.047010000 mm
Taper Angle = 30.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 28.000000000 mm
Length = 22.750000000 mm
Upper Diameter = 28.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 64.000000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 64.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 2

Name: SYS_CL_TIP

Diameter = 0.000000000 mm
Length = 0.000000000 mm
Z-offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off

Name: SYS_CL_SHOULDER

Diameter = 0.000000000 mm
Length = 1.073712191 mm
Z-offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC =	-55.000000000	X =	-55.000000000
YC =	-41.500000000	Y =	-41.500000000
ZC =	138.000000000	Z =	138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC =	1.000000000	X =	1.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Y-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
------	-------------	-----	-------------

YC =	1.000000000	Y =	1.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Z-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid	0.000 (MMPM)
Approach	0.000 (MMPM)
Engage	250.000 (MMPM)
First Cut	250.000 (MMPM)
Last Cut	250.000 (MMPM)
Step Over	250.000 (MMPM)
Cross Over	250.000 (MMPM)
Cut	250.000 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	250.000 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- FROM Point -----

FROM Point	None
FROM Axis Status	Inactive

----- Start Point -----

Start Point	None
-------------	------

----- Return Point -----

Return Point	None
--------------	------

----- GOHOME Point -----

GOHOME Method	None
GOHOME Axis Status	Inactive

----- Tool Axis -----

Tool Axis Type	All Axis
Associative Object	No
Tool Axis (mm)	

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----

Intol	=	0.030000000 mm
Outtol	=	0.030000000 mm

----- Stock -----

Part Stock	=	0.000000000 mm
Floor Stock	=	0.000000000 mm

----- Clearance Distance -----

Minimum Clearance	=	3.000000000 mm
Shank Clearance	=	0.000000000 mm

Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Direction Forward

Max. Tool Axis Change = 0.0000 °

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis

Motion Data Tool Centerline Data

Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Collision Check -----

Collision Check On

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited

Member Count 1

----- Attributes -----

GENERATED ON = NX 1926.1700 2023/07/19 17:41:02 (string)

CAM_TOOLTIP = KEY:SPOT_DRILLING_TITLE (string)

CAM_PICTURE = \$UGII_CAM_TEMPLATE_IMAGE_DIR/

oper_spot_drilling.bmp (string)

CAM_TEXT = KEY:OPERATION_SPOT_DRILLING (string)

----- Object name: DRILLING_1 -----
Template Type: hole_making
Template Subtype: DRILLING
Coordinate System of Data - Work

----- Operation Information -----
Operation Name DRILLING_1
Operation Type Drilling
Update Status Need to Post
Last Time Updated 2023/07/19 17:41:00
Gouge Check Status Not checked
Gouge Checker used Exact V2
Path Is Edited No
Path Tag 52006
In Process Workpiece None
Order Group SUBPROGRAM_4
Method Group DRILLING
Geometry Group WORKPIECE
Total Machine Time 00:00:20
Cutting Time 00:00:18
Non-Cutting Time 00:00:02

-----Tool Information-----
----- Object name: NXT0301_031 -----
Template Type: Library
Template Subtype: Carbide Drill 6mm (860.1-0600-018A1-MM 2214)
Coordinate System of Data - Work

Tool retrieved from library. Library reference: NXT0301_031

Tool Material Name : PVD (Ti,Al)N

Material Description : Coated(Ti,Al)N

Tool Name : NXT0301_031
Partfile name for assembly graphics:
NXT0301_031.prt
Tool Type : Drilling Tool
Holding System : not specified

(D) Diameter = 6.000000000 mm
(CR) Corner Radius = 0.000000000 mm
(L) Length = 66.000000000 mm
(PA) Point Angle = 140.000000000 °
(PL) Point Length = 1.091910703 mm
(FL) Flute Length = 28.000000000 mm
Number of Flute 2
Direction = CLW

Z Offset = Off
Adjust Register 1
Cutcom Register = Off
Tool Number = Off
Catalog Number = NXT0301_031

Use Shank = No

Defined Holder Section Count: 3

Section 1

Lower Diameter = 16.500000000 mm
Length = 10.000000000 mm
Upper Diameter = 28.047010000 mm
Taper Angle = 30.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 2

Lower Diameter = 28.000000000 mm
Length = 22.750000000 mm
Upper Diameter = 28.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Section 3

Lower Diameter = 64.000000000 mm
Length = 15.900000000 mm
Upper Diameter = 64.000000000 mm
Taper Angle = 0.000000000 °
Corner Rad = 0.000000000 mm

Defined Tracking Point Count: 2

Name: SYS_CL_TIP

Diameter = 0.000000000 mm
Length = 0.000000000 mm
Z-offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off

Name: SYS_CL_SHOULDER

Diameter = 0.000000000 mm
Length = 1.091910703 mm
Z-offset = Off
Adjust Register = Off
Cutcom Register = Off

----- MCS -----

Associative Object Yes

MCS Origin: (mm)

XC = -55.000000000
YC = -41.500000000
ZC = 138.000000000

X = -55.000000000
Y = -41.500000000
Z = 138.000000000

MCS Matrix:

X-axis Vector

XC = 1.000000000
YC = 0.000000000
ZC = 0.000000000

X = 1.000000000
Y = 0.000000000
Z = 0.000000000

Y-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	1.000000000	Y =	1.000000000
ZC =	0.000000000	Z =	0.000000000

Z-axis Vector

XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Feed Rate -----

Rapid	0.000 (MMPM)
Approach	0.000 (MMPM)
Engage	0.000 (MMPM)
First Cut	250.000 (MMPM)
Last Cut	250.000 (MMPM)
Step Over	250.000 (MMPM)
Cross Over	0.000 (MMPM)
Cut	250.000 (MMPM)
Traversal	0.000 (MMPM)
Retract	0.000 (MMPM)
Return	0.000 (MMPM)

----- FROM Point -----

FROM Point	None
FROM Axis Status	Inactive

----- Start Point -----

Start Point	None
-------------	------

----- Return Point -----

Return Point	None
--------------	------

----- GOHOME Point -----

GOHOME Method	None
GOHOME Axis Status	Inactive

----- Tool Axis -----

Tool Axis Type	All Axis		
Associative Object	No		
Tool Axis (mm)			
XC =	0.000000000	X =	0.000000000
YC =	0.000000000	Y =	0.000000000
ZC =	1.000000000	Z =	1.000000000

----- Tolerances -----

Intol	=	0.030000000 mm
Outtol	=	0.030000000 mm

----- Stock -----

Part Stock	=	0.000000000 mm
Floor Stock	=	0.000000000 mm

----- Clearance Distance -----

Minimum Clearance = 3.000000000 mm
Shank Clearance = 0.000000000 mm
Neck Clearance = 0.000000000 mm

----- Cutting Parameters -----

Cut Direction Forward
Max. Tool Axis Change = 0.0000 °

----- Motion Output -----

Motion Output Type Arc - Perp to Tool Axis
Motion Data Tool Centerline Data
Output Contact/Tracking Data No

----- Tool Holder and In Process Workpiece -----

In Process Workpiece None
Shortest Collision-Free Tool Not calculated

----- Collision Check -----

Collision Check On

----- Geometry - Part Body/Face -----

Object Status Inherited
Member Count 1

----- Geometry - Blank Body/Face -----

Object Status Inherited
Member Count 1

----- Attributes -----

GENERATED ON = NX 1926.1700 2023/07/19 17:41:03 (string)
CAM_TOOLTIP = KEY:DRILLING_TITLE (string)
CAM_PICTURE = \$UGII_CAM_TEMPLATE_IMAGE_DIR/
oper_drilling.bmp (string)
CAM_TEXT = KEY:OPERATION_DRILLING (string)

Anexo E: Comandos Código NC

Estas tablas están sacadas del Manual de usuario de *Sinumerik* 828D/840D sl.

Tabla de código G

El anexo 1 describe los códigos G y sus funciones.

Tabla B- 1 Tabla de código G

Código G		Descripción	Sistema A	Sistema C
Grupo 1				
G00 ¹⁾	1	Rápido	G00	G00
G01	2	Movimiento lineal	G01	G01
G02	3	Círculo/hélice en sentido horario	G02	G02
G03	4	Círculo/hélice en sentido antihorario	G03	G03
G33	5	Tallado de roscas con paso constante	G33	G33
G34	9	Tallado de roscas con paso variable	G34	G34
G35		Rosca convexa en sentido horario	G35	G35
G36		Rosca convexa en sentido antihorario	G36	G36
G77	6	Ciclo de torneado longitudinal	G90	G20
G78	7	Ciclo de tallado de roscas	G92	G21
G79	8	Ciclo torneado transversal	G94	G24
Grupo 2				
G96	1	Velocidad de corte constante CON	G96	G96
G97 ¹⁾	2	Velocidad de corte constante DES	G97	G97
Grupo 3				
G90 ¹⁾	1	Programación absoluta	--	G90
G91	2	Programación incremental	--	G91
Grupo 4				
G68	1	Torreta doble/dos carros CON	G68	G68
G69 ¹⁾	2	Torreta doble/dos carros DES	G69	G69
Grupo 5				
G94	1	Avance lineal en [mm/min, pulgadas/min]	G98	G94
G95 ¹⁾	2	Avance por vuelta en [mm/vuelta, pulgadas/vuelta]	G99	G95
Grupo 6				
G20 ¹⁾	1	Sistema de entrada en pulgadas	G20	G70
G21	2	Sistema de entrada métrico	G21	G71
Grupo 7				
G40 ¹⁾	1	Cancelación de la corrección del radio de la fresa	G40	G40
G41	2	Corrección a la izquierda del contorno	G41	G41
G42	3	Corrección a la derecha del contorno	G42	G42
Grupo 8				

Código G		Descripción	Sistema A	Sistema C
Grupo 9				
G22	1	Limitación del campo de trabajo, zona protegida 3 CON	G22	G22
G23 ¹⁾	2	Limitación del campo de trabajo, zona protegida 3 DES	G23	G23
Grupo 10				
G80 ¹⁾	1	Ciclo de taladrado DES	G80	G80
G83		Taladrado profundo en cara frontal	G83	G83
G84	3	Roscado en cara frontal	G84	G84
G85	4	Ciclo de taladrado en cara frontal	G85	G85
G87	5	Taladrado profundo en caras laterales	G87	GG87
G88	6	Roscado en caras laterales	G88	G88
G89	7	Taladrado en caras laterales	G89	G89
Grupo 11				
G98 ¹⁾	1	Regreso al punto inicial en ciclos de taladrado	--	G98
G99	2	Regreso al punto R en ciclos de taladrado	--	G99
Grupo 12				
G66	1	Llamada modal de macro	G66	G67
G67 ¹⁾	2	Borrar llamada modal de macro	G67	G67
Grupo 13				
Grupo 14				
G54 ¹⁾	1	Seleccionar decalaje de origen	G54	G54
G55	2	Seleccionar decalaje de origen	G55	G55
G56	3	Seleccionar decalaje de origen	G56	G56
G57	4	Seleccionar decalaje de origen	G57	G57
G58	5	Seleccionar decalaje de origen	G58	G58
G59	6	Seleccionar decalaje de origen	G59	G59
G54 P{1...48}	1	Decalaje de origen ampliado	x	x
G54.1	7	Decalaje de origen ampliado	G54.1	G54.1
G54 P0	1	Decalaje de origen externo	x	x
Grupo 15				
Grupo 16				
G17	1	Plano XY	G17	G17
G18 ¹⁾	2	Plano ZX	G18	G18
G19	3	Plano YZ	G19	G19
Grupo 17				

Código G		Descripción	Sistema A	Sistema C
Grupo 18 (actividad por secuencia)				
G04	1	Tiempo de parada en [s] o vueltas de cabezal	G04	G04
G05	20	High-speed cycle cutting	G05	G05
G05.1	22	High-speed cycle -> Llamada CYCLE305	G05.1	G05.1
G07.1	18	Interpolación cilíndrica	G07.1	G07.1
G10	2	Escribir decalaje de origen/correcciones de herramienta	G10	G10
G10.6	19	Retirada rápida CON/DES	G10.6	G10.6
G28	3	Búsqueda del 1.er punto de referencia	G28	G28
G30	4	Búsqueda del 2.º/3.er/4.º punto de referencia	G30	G30
G30.1	21	Posición del punto de referencia	G30.1	G30.1
G31	5	Medida con detector de contacto	G31	G31
G52	6	Decalaje de origen programable	G52	G52
G53	17	Aproximación a posición en el sistema de coordenadas de la máquina	G53	G53
G60	24	Posicionamiento dirigido	G60	G60
G65	7	Llamada de macro	G65	G65
G70	8	Ciclo de acabado	G70	G72
G71	9	Ciclo de desbaste de eje longitudinal	G71	G73
G72	10	Ciclo de desbaste de eje de refrentado	G72	G74
G73	11	Repetición de contorno	G73	G75
G74	12	Taladrado profundo y ranurado en eje longitudinal (Z)	G74	G76
G75	13	Taladrado profundo y ranurado en eje de refrentado (X)	G75	G77
G76	14	Ciclo de tallado de roscas múltiple	G76	G78
G92	15	Poner valor real, limitación de la velocidad del cabezal	G50	G92
G92.1	23	Borrar valor real, reseteo de WKS	G50.3	G92.1
Grupo 20				
G50.2 ¹⁾	1	Torneado de polígonos DES	G50.2	G50.2
G51.2	2	Torneado de polígonos CON	G51.2	G51.2
Grupo 21				
G13.1 ¹⁾	1	TRANSMIT DES	G13.1	G13.1
G12.1	2	TRANSMIT CON	G12.1	G12.1
Grupo 22				
Grupo 25				
Grupo 31				
G290 ¹⁾	1	Selección de modo Siemens	G290	G290
G291	2	Selección de modo de dialecto ISO	G291x	G291

Nota

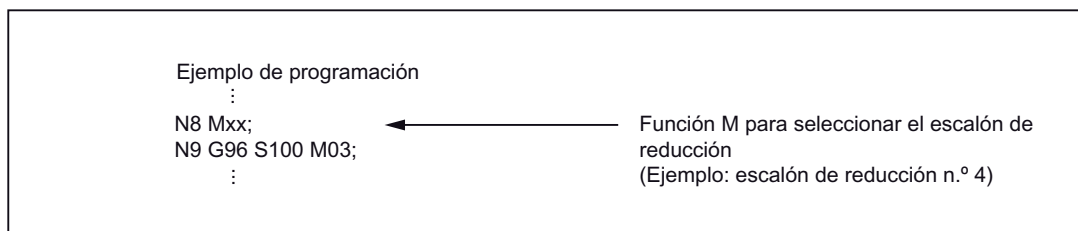
Por lo general, CN especifica las funciones G indicadas en ¹⁾ al conectar el control o ejecutar un RESET.

Cancelación de la velocidad de corte constante (G97)

Tras G97, el control interpreta de nuevo un valor S como velocidad de giro del cabezal en vueltas/min. Si no se indica una nueva velocidad de giro del cabezal, se mantiene el último valor alcanzado con G96.

Selección del escalón de reducción de la velocidad de giro del cabezal

En máquinas en las que el escalón de reducción puede cambiarse con un comando M, dicho comando debe escribirse antes de indicar G96 para seleccionar el escalón de reducción correspondiente. Para más detalles, consulte la documentación del fabricante de la máquina.



3.5.3 Cambio de herramienta con comandos T (función T)

Programando la palabra T tiene lugar un cambio directo de herramienta.

El efecto de la función T se define mediante datos de máquina. Tenga en cuenta la parametrización del fabricante de la máquina.

3.5.4 Función adicional (función M)

Con las funciones M se pueden activar en la máquina operaciones de maniobra, tales como "CON/DES refrigerante", así como otras funcionalidades. El fabricante del control ha asignado una funcionalidad fija a una pequeña parte de las funciones M (ver siguiente apartado).

Programación

M... Valores posibles: 0 a 9999 9999 (máx. valor INT), valor entero

El fabricante de la máquina puede asignar todos los números de función M libres, p. ej. con funciones de conmutación para el control de dispositivos sensores o para activar y desactivar otras funciones de máquina, por ejemplo. Ver las indicaciones del fabricante de la máquina.

Las funciones M específicas de CN se describen a continuación.

Funciones M para detener operaciones (M00, M01, M02, M30)

Con esta función M se desencadena una parada del programa y se interrumpe o finaliza el mecanizado. Que también se detenga el cabezal o no, dependerá de las indicaciones del fabricante de la máquina. Encontrará los detalles al respecto en la documentación del fabricante de la máquina.

M00 (parada del programa)

En una secuencia CN con M00, se detiene el mecanizado. Ahora se pueden retirar virutas o volver a medir, por ejemplo. Se emite una señal al PLC. Con Marcha CN se puede continuar el programa.

M01 (parada opcional)

M01 se puede ajustar con

- Diálogo del HMI "Influenciación del programa" o la
- Interfaz VDI

La ejecución del programa del CN solo se mantiene con M01 cuando la señal correspondiente de la interfaz VDI está activa o si en el diálogo del HMI se seleccionó "Influenciación del programa".

M30 o M02 (fin del programa)

Un programa se finaliza con M30 o M02.

Nota

Con M00, M01, M02 o M30 se emite una señal al PLC.

Nota

Para saber si a través de los comandos M00, M01, M02 o M30 se detiene el cabezal o se interrumpe el suministro de refrigerante, consulte la documentación del fabricante de la máquina.

3.5.5 Funciones M para influenciación del cabezal

Tabla 3- 8 Funciones M para control del cabezal

Función M	Función
M19	Posicionar cabezal
M29	Conmutación del cabezal en servicio de eje/controlado

Con M19 se desplaza el cabezal a la posición de cabezal determinada en el dato de operador 43240 \$SA_M19_SPOS[número de cabezal]. El modo Posicionar se consigna en \$SA_M19_SPOS.

El número de función M para la conmutación del modo cabezal (M29) también se puede ajustar de forma variable mediante un dato de máquina. Para el preajuste del número de función M se utiliza el DM20095 \$MC_EXTERN_RIGID_TAPPING_N_NR. Solo se debe ocupar con aquellos números de función M que no se utilicen como funciones M estándar. No están permitidos, p. ej. M0, M5, M30, M98, M99, etc.

3.5.6 Funciones M para llamadas a subprogramas

Tabla 3- 9 Funciones M para llamadas a subprogramas

Función M	Función
M98	Llamada a un subprograma
M99	Fin de subprograma

En el modo ISO se conecta el cabezal con M29 en el modo de eje.

3.5.7 Llamada a macro mediante función M

A través de un número M puede llamarse a un subprograma (macro) de forma análoga a G65.

La configuración de un máximo de 10 sustituciones de funciones M tiene lugar mediante el dato de máquina 10814 \$MN_EXTERN_M_NO_MAC_CYCLE y el dato de máquina 10815 \$MN_EXTERN_M_NO_MAC_CYCLE_NAME.

La programación tiene lugar de forma idéntica a G65. Las repeticiones se pueden programar con la dirección L.

3.5.8 Funciones M

Funciones M generales

Las funciones M no específicas vienen establecidas por el fabricante de la máquina. A continuación encontrará un ejemplo representativo de la utilización de las funciones M generales. Encontrará los detalles al respecto en la documentación del fabricante de la máquina. Cuando se programa un comando M junto con un movimiento de eje en la misma secuencia, el hecho de que la función M se ejecute al principio o al final de la secuencia tras alcanzar la posición de eje dependerá del ajuste de los datos de máquina del fabricante de la máquina. Encontrará los detalles al respecto en la documentación del fabricante de la máquina.

Tabla 3- 10 Otras funciones M generales

Función M	Función	Observaciones
M08	Refrigerante CON	Estas funciones M vienen establecidas por el fabricante de la máquina.
M09	Refrigerante DES	

Indicación de varias funciones M en una secuencia

Se pueden programar un máximo de cinco funciones M en una secuencia. En la documentación del fabricante de la máquina encontrará las posibles combinaciones de las funciones M y las posibles restricciones.

Funciones auxiliares adicionales (función B)

Si B no se utiliza como identificador de eje, se podrá utilizar como función auxiliar adicional. Las funciones B se transfieren al PLC como funciones auxiliares (funciones H con la ampliación de dirección H1 =).

Ejemplo: B1234 se transfiere como H1=1234.

Anexo F: Archivo .mtk

El archivo .mtk es un fichero que contiene todos los archivos asociados al modelo virtual de una máquina. De modo que cada máquina de la “Biblioteca de máquinas” del *software Siemens NX* tiene asociado su propio archivo .mtk., véase Figura 5.

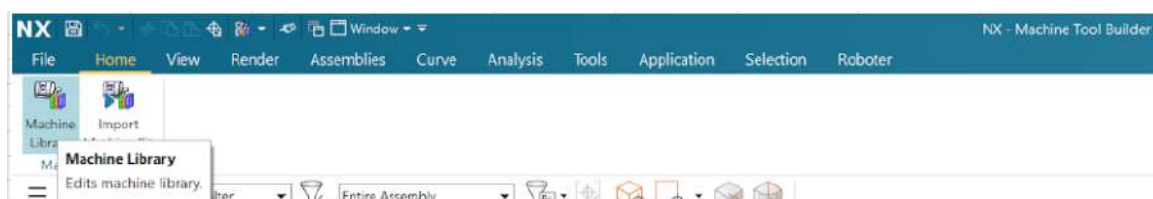


Figura 5. “Biblioteca de máquinas” del *software Siemens NX* 1926.

En la aplicación “Constructor de máquinas herramienta”, se genera dicho archivo .mtk exportando la máquina al cual está asociado desde la “Biblioteca de máquinas”. En este trabajo, para crear el archivo .mtk asociado a la máquina virtual modelada se ha generado una copia del archivo textit.mtk asociado al CMV de tres ejes de la “Biblioteca de máquinas” que incluye por defecto el *software Siemens NX*. Dicho archivo .mtk (“HARTFORD-1.mtk”) asociado a la máquina de trabajo se ha ido modificando automáticamente conforme se avanzaba en el proceso de creación del modelo digital de la máquina, véase Figura 6.

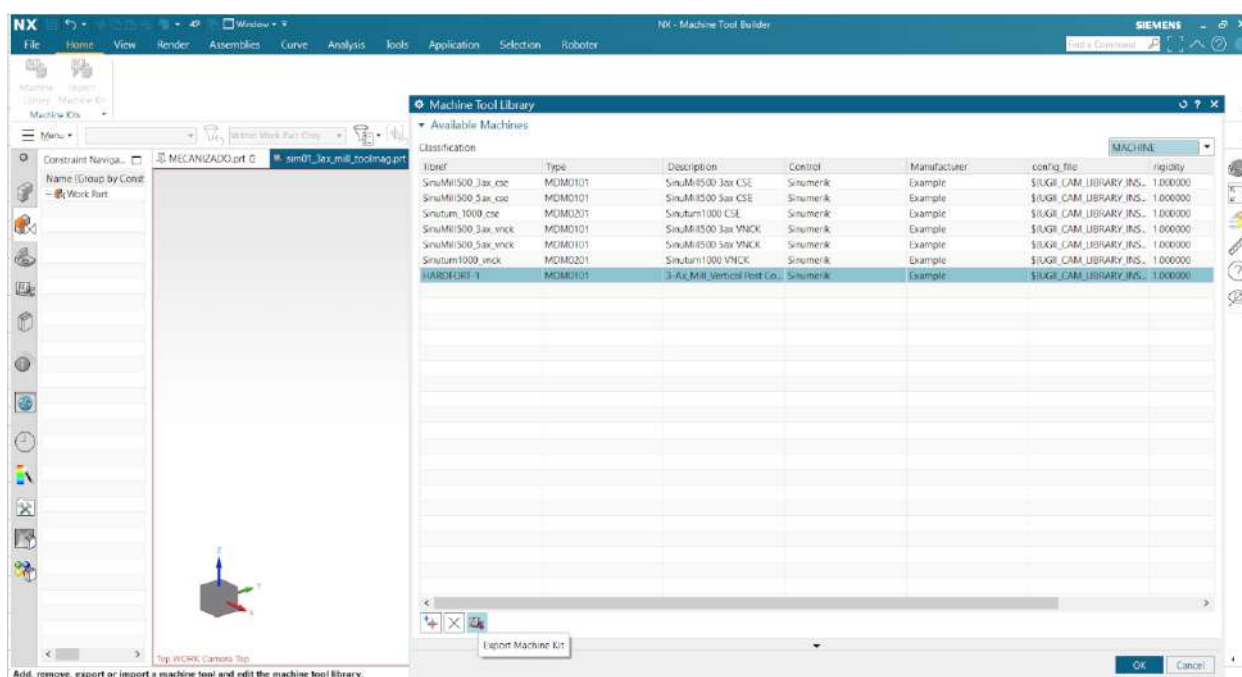


Figura 6. Comando: “Exportar el kit de máquinas”.

La estructura interna de un archivo .mtk es la siguiente, véase Figura 7:

- Carpeta de archivos “cse_driver”: incluye los motores que accionan la cinemática de la máquina.
- Carpeta de archivos “graphics”: incluye los diferentes archivos del modelado CAD de la máquina conjuntamente con el modelo cinemático de la misma.
- Carpeta de archivos “postprocessor”: incluye los archivos asociados al postprocesador asociado al control CNC de la máquina.
- Archivo .dat: archivo de datos que contiene la dirección de los ficheros necesarios para simular las trayectorias de las herramientas.

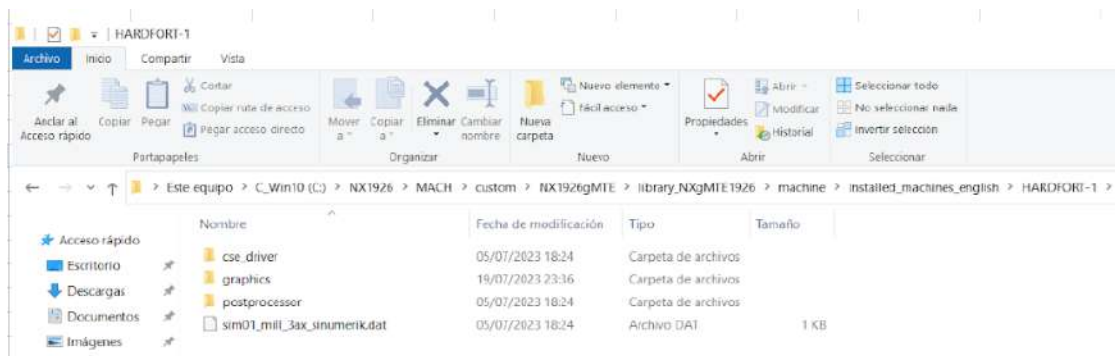


Figura 7. Estructura interna del archivo .mtk asociado al CMV *Hartford*.

La utilidad principal de este archivo es que puede ser importado mediante el comando “Importar el kit de máquinas” de la aplicación “Constructor de máquinas herramienta”, añadiendo así la máquina a la cual está asociado a una nueva “Biblioteca de máquinas” de otro dispositivo, véase Figura 8. Esta funcionalidad ha resultado clave a lo largo del desarrollo este trabajo, porque ésto ha permitido poder importar y exportar el modelo digital de la máquina entre los diferentes dispositivos de trabajo.

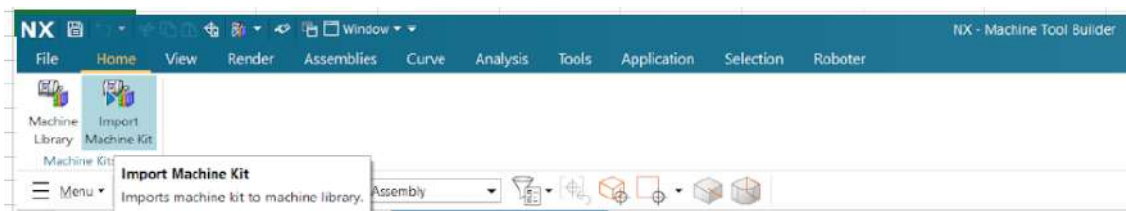


Figura 8. Comando: “Importar el kit de máquinas”.