

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



**RUTAS DE MANUFACTURA POR CONTROL NUMÉRICO
PARA LA INSTRUMENTACIÓN ASTRONÓMICA**

HERNÁN RIVERA RAMOS

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

Asesor

M. en I. ALEJANDRO FARAH SIMÓN

MEXICO D.F. 2005



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A MIS PADRES, ELENA Y MARCO

A MI HERMANO ALONSO

A JIMENA

AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Astronomía, por abrirme sus puertas y darme acceso a la mejor educación.

A todos los profesores de la Facultad y en especial a Antonio Zepeda Sánchez, Javier Cervantes Cabello, Mariano García del Gallego y Ubaldo Márquez Amador, por tomarse el tiempo de revisar y mejorar este trabajo.

A Alex, por la enorme paciencia durante este proceso, por darme la oportunidad de integrarme a un gran equipo de trabajo, y sobre todo por tu amistad.

A los amigos que han estado cerca y pendientes estos últimos años. Adelaida, Artemisa, Elli, Fernanda, Mariana, Fernando, Marco, Rafael.

A mis amigos de la Facultad, con quienes disfrute mucho estos años de universidad. Lucia, Farid, Fernando, Héctor, Juan, Santiago.

Por supuesto a los del CEMAC, que después de tantos años seguimos juntos. Aldo, Andrés, José Eduardo, Juan Pablo, Marcos, Pedro, Rodrigo, Santiago, Voltan.

A Jordi, que eres en parte responsable de que haya llegado hasta aquí. Este trabajo también es tuyo.

A la familia Turrent Cortés.

A la familia Rivera y a la familia Ramos.

A Alonso, porque nunca me has dejado solo.

A Jimena, no tengo palabras para explicarte lo que siento y agradecer todo lo que me has dado. Sin ti esto no sería lo mismo.

A mis papas, Elena y Marco. Esto representa el trabajo que hemos hecho juntos durante tantos años. Por su esfuerzo, su apoyo y su confianza, nunca terminaré de agradecerles.

ÍNDICE.

	Pag.
OBJETIVOS	3
1 ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN	
1.1 Los telescopios.	5
1.2 Tipos, requerimientos y especificaciones.	14
1.3 Diseño y maquinado de telescopios.	18
1.4 SCIDAR Generalizado Mexicano.	18
2 MARCO DE REFERENCIA.	
2.1 Proceso de diseño mecánico tradicional.	21
2.2 Procesos de maquinado convencional.	26
2.3 Proceso de diseño de elementos mecánicos por CAD/CAM.	31
2.3.1 Software.	36
2.3.2 Máquinas automáticas y de control numérico.	39
2.4 Procesos de manufactura avanzada.	40
2.4.1 Control Numérico por Computadora.	42
2.5 Evolución de CAD/CAM	45
2.6 Diseño concurrente.	46
3 MARCO TEÓRICO.	
3.1 Fundamentos de los programas CAD.	49
3.1.1 Proceso de diseño.	53
3.1.2 Dibujo de las curvas.	54
3.1.3 Visualización de superficies.	54
3.1.4 métodos de diseño.	55
3.2 Fundamentos de operación de CNC.	56
3.2.1 Características.	56
3.2.2 Programación.	67
3.3 Post-procesadores.	70

4 DESARROLLO.	
4.1 Planteamiento del problema.	73
4.1.1 Necesidades generales.	73
4.1.2 Situación actual del Instituto de Astronomía.	74
4.2 Especificaciones de diseño.	75
4.2.1 Descripción de las piezas.	75
4.2.2 Cálculo de tolerancias.	76
4.2.3 Análisis de variable críticas y tolerancias.	77
4.3 Especificaciones de los recursos disponibles.	79
4.3.1 Software y equipo de cómputo.	79
4.3.2 Especificaciones del centro de maquinado.	80
4.4 Modelado.	81
4.5 Generación de rutas de maquinado.	87
4.6 Post-procesamiento.	107
4.7 Simulación y verificación.	112
4.8 Preparación del equipo de fabricación.	115
5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	
5.1 Diagrama de flujo.	119
5.2 Definición de retornos en el diagrama de flujo.	122
5.3 Observaciones y precauciones en cada etapa del proceso.	124
5.4 Conclusiones.	126
APENDICE 1 COMANDOS CÓDIGO G.	127
REFERENCIAS.	131

OBJETIVOS

Implementar dentro del Departamento de Instrumentación del Instituto de Astronomía de la UNAM, la aplicación de procesos de manufactura por CAD/CAM que permitan aprovechar los recursos tecnológicos disponibles, incrementando su capacidad para fabricar piezas de mayor complejidad y precisión en el Taller Mecánico de dicha institución.

Determinar una ruta de manufactura que permita integrar en forma eficaz los recursos e infraestructura de los talleres mecánicos y del departamento de instrumentación. Inferida a partir del proceso de manufactura de 2 piezas para el instrumento SCIDAR Generalizado Mexicano, proyecto que se desarrolla dentro de este instituto y cuya fase de diseño ha sido concluida.

1 ANTECEDENTES E INTRODUCCIÓN.

1.1 LOS TELESCOPIOS

La astronomía es una ciencia que encuentra en la observación su principal método de estudio, y por lo tanto en los telescopios su principal herramienta de trabajo. El telescopio es en esencia un instrumento capaz de obtener imágenes ampliadas de los cuerpos celestes, y existen muchos tipos de telescopios que se clasifican según su principio de operación, su tamaño y el tipo de radiaciones que son capaces de captar.

La cantidad de flujo luminoso que puede captarse con cualquier telescopio depende de las dimensiones de la superficie de captación del propio telescopio y es proporcional al área del objetivo del instrumento. Esto significa que un telescopio con un sistema óptico principal de 4 m recoge 16 veces más luz que un telescopio de 1 m. Además de garantizar una sensibilidad mayor, un telescopio tiene otra ventaja: proporcionar más poder de resolución respecto al ojo humano, lo que quiere decir que no solo permite observar objetos más débiles, sino también recoger detalles más finos, que de otro modo escaparían a nuestra vista.

Naturalmente, esto tiene una importancia extraordinaria para estudiar la morfología de ciertas clases de cuerpos celestes, como galaxias. La parte principal de un telescopio es el objetivo que cumple esencialmente dos misiones; La primera es recoger la luz de los objetos observados; la segunda, concentrarla en el foco del telescopio. Según el tipo de objetivo que empleen, los telescopios se dividen en dos categorías principales: refractores y reflectores.

Galileo Galilei (1564 - 1642).

La historia del telescopio inicia a principios del siglo XVII, cuando los hijos de un fabricante de lentes holandés llamado Hans Lippershey (1570 – 1619) jugando descubrieron accidentalmente haciendo combinaciones de los lentes que podían amplificar las imágenes en forma significativa. Lippershey entonces presentó su descubrimiento a la Corona, pensando en el valor estratégico del hallazgo, y en una de las demostraciones se encontraba presente un amigo de Galileo Galilei, quien a su regreso a Italia le informó de lo que había presenciado en Holanda, así que inmediatamente Galileo entendió el

principio físico y comenzó a hacer sus propios experimentos, construyendo así su primer telescopio usando un tubo de órgano para sostener los lentes, realizando sus primeras observaciones con el instrumento el 6 de enero de 1610.

En primer lugar, Galileo concibió el proyecto, una vez tenidas noticias sobre tal instrumento, para sacar partido económico con su venta a la República Veneciana, obteniendo, de hecho, la confirmación de por vida en la cátedra paduana, con doble salario. En segundo lugar, Galileo, para defenderse de quien minimizaba el mérito de su descubrimiento por saber ya de antemano de su existencia, argumentaba que es más difícil llegar a la resolución de un problema planteado que encontrar tal solución por puro azar, como le ocurriera al holandés que había previamente construido el aparato. En *il Saggiatore*, Galileo explica el razonamiento preciso por el que descubrió cómo debía hacerse el telescopio. Pero se trata de un razonamiento *a posteriori* y tan manipulado que difícilmente puede encubrir la realidad de que Galileo, probablemente, llegó al telescopio más bien gracias a la experimentación y a su habilidad manual. De hecho, una de las características más importantes del trabajo de Galileo es su deseo por experimentar que, además de a la construcción de telescopios de gran perfección, le llevó a su utilización astronómica.

El telescopio de Galileo consistió en un par de lentes, la primera una lente objetivo convexa de 3 cm de diámetro, la cual refracta la luz y la concentra en una segunda lente cóncava más pequeña llamada ocular la cual se encuentra cerca del ojo del observador.

Los primeros descubrimientos que hizo con el telescopio, se encuentran expuestos en el *Sidereus Nuncius*, obra escrita en latín y publicada en Venecia en 1610 y que envió, entre otros, a Johannes Kepler (1571 – 1630). Este se tomó bastante interés por ella y le contestó en otra obra *breve, Disertatio cum Nuncio Sidereo*, en la que, junto a muchos elogios, no faltan también críticas a algunos de los razonamientos de Galileo.

En el *Sidereus Nuncius*, Galileo describe el telescopio y explica sus primeras observaciones:

Descubrió, en la Luna, montañas similares a las de la Tierra, pero mucho más altas.

Observó las estrellas de la constelación de Orión y de las Pléyades, descubriendo la existencia de muchas de ellas no visibles a simple vista y encontró que la Vía Láctea era, en realidad un agregado de estrellas individuales. De especial interés es la observación que hace Galileo de que el tamaño de las estrellas, cuando se observan con el telescopio, no aumenta tanto como en el caso de los planetas o de los demás cuerpos. Según ya se ha dicho, las *cabelleras* y *fulgores* usando términos de Galileo, que presentan las estrellas cuando se observan a simple vista se deben a la difracción producida en la pupila. Este efecto es menor cuando se utiliza un

telescopio, que tiene una abertura (la del objetivo) mucho mayor. Galileo da una explicación un tanto artificiosa del fenómeno en unos términos en que parece estar muy seguro de la misma, ganándose por ella la recriminación de Kepler que, aunque no había llegado a la explicación correcta, daba una bastante más razonable.

El *Sidereus Nuncius* se concluye con el descubrimiento de los satélites de Júpiter y la descripción detallada de sus posiciones y brillos entre los días 7 de Enero y 2 de Marzo de 1610.

Más adelante, Galileo descubrió las fases de Venus y la variación de su tamaño aparente y los anillos de Saturno.

Estudió las manchas solares, que contribuyeron a refutar la idea de la imperturbabilidad de los cuerpos celestes, así como le permitieron determinar la posición del ecuador solar y calcular su período de rotación, desmintiendo las deducciones teóricas que, al respecto, había hecho Kepler.

Posteriormente Kepler presentó una variante al telescopio de Galileo, en el cual sustituye la lente del ocular por una lente convexa, lo que invertía la imagen observada pero ampliaba el campo de visión del telescopio. Sin embargo esto trajo como consecuencia un aumento considerable en la aberración esférica (Fig. 1.1), problema que resultaba casi despreciable en el telescopio de Galileo.

Al pasar la luz por el objetivo, ésta debe salir en un frente de ondas esférico, pues solo de esta manera podrá concentrarse toda la luz en un mismo punto. Sin embargo, al pasar la luz por el lente, esta se descompone y el ángulo de refracción depende de la longitud de onda, por lo que la luz se concentra en diferentes puntos del eje focal para cada fase del espectro.

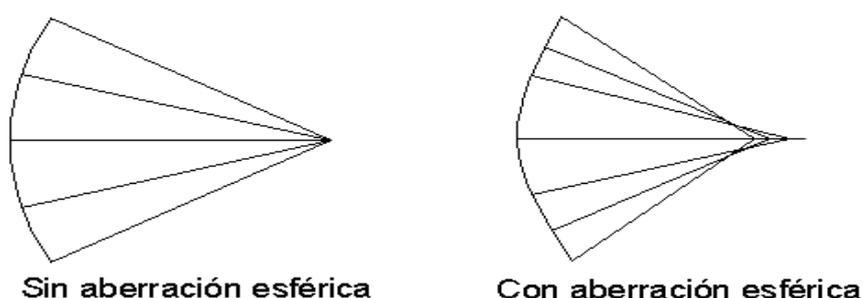


Fig. 1.1 Efecto de la aberración esférica.

A mediados del siglo XVII Christiaan Huygens (1629 – 1693) trató de corregir este problema alargando la distancia focal de los objetivos, con lo cual obtuvo además un incremento proporcional de la imagen. Con esta nueva mejora pudo observar por primera vez los anillos de Saturno, aunque en realidad parecía ser uno solo hasta que Jean-Dominique Cassini (1625 – 1712) descubrió la separación que lleva su nombre.

Isaac Newton (1642 – 1727)

Un poco más tarde Newton perfecciona notablemente el telescopio ideado por su compatriota James Gregory (1638 – 1675) en 1663, construyendo en 1668 su telescopio de espejo (reflector), para ofrecer a la astronomía un instrumento libre de la aberración esférica, que Newton estimaba inevitablemente unida a los telescopios refractores. El telescopio de Newton (Fig. 1.2) despertó un enorme interés: el rey expresó deseos de verlo y la Royal Society, que conserva hoy como inestimable reliquia el segundo modelo de ese telescopio, lo elige miembro de la misma en 1672, año en que presenta a la institución su primera memoria: *A new theory about light and colours*, que más tarde aparecerá en los *Philosophical Transactions*.

Estando Newton convencido de la imposibilidad de evitar la aberración cromática con el uso de lentes, decide sustituirlos por espejos. Newton colocó un espejo cóncavo en la base del telescopio y otro plano en el tubo, a 45°, al que envía la luz y el cual refleja la imagen hacia un ocular colocado a un lado. El telescopio de Newton generaba imágenes nueve veces más grandes que un refractor cuatro veces más largo.

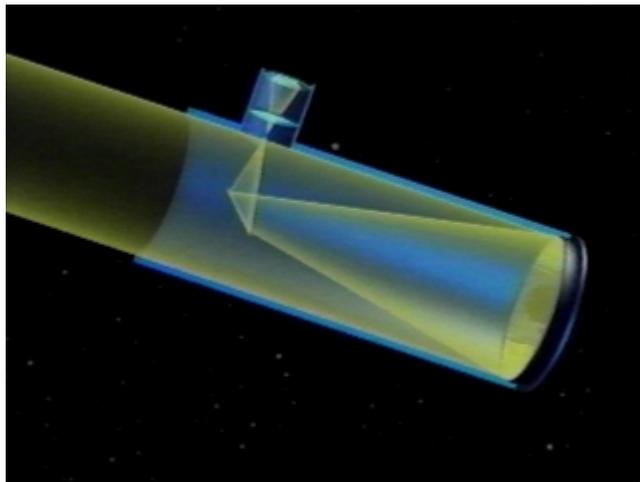


Fig. 1.2 Principio de operación del telescopio reflector de Newton.

Simultáneamente a Newton, Guillaume Cassegrain (1629 – 1693) surge en Francia presentando un telescopio similar, el cual posee un espejo primario similar al de Newton, que refleja la luz hacia un espejo secundario convexo que se encuentra de frente y opuesto al primario, enviando y concentrando la luz en un orificio en el centro del espejo primario. Sin embargo este modelo no funcionó sino hasta que Bernhard Schmidt (1879 – 1935) agregó a finales del siglo XIX una lente que logró corregir la aberración propia de este telescopio.

Una de las principales limitaciones de los telescopios reflectores estaba en la complicación de fabricar los espejos, ya que en ese entonces se trataba de superficies metálicas pulidas. Esto encontró una solución cuando el físico francés Jean Foucault (1819 – 1868) encontró un proceso químico para aluminizar superficies de vidrio, las cuales resultan mucho más fáciles de manipular que las metálicas, lo que cooperó para el resurgimiento de los

telescopios reflectores. A partir de esto comenzaron a construirse en forma simultánea tanto telescopios reflectores como refractores, lo que inició una competencia entre ambos tipos, fabricándose instrumentos cada vez más grandes hasta que en 1897 entró en funcionamiento el telescopio refractor Yerkes en Chicago, el cual se convirtió en el refractor más grande con un diámetro de 40 pulgadas. A partir de entonces los proyectos de grandes telescopios han sido principalmente catadiópticos.

Monte Palomar (1948).

Durante el siglo XX se desarrollaron numerosos proyectos cada vez más ambiciosos, empezando con el telescopio de Monte Wilson de 2.54 m de diámetro, construido por George Ellery Hale (1868 – 1938), el cual fu terminado en 1917 y con el que Edwin Hubble (1889 – 1953) desarrolló su teoría de la expansión del universo.



Fig. 1.3 Imágenes del Observatorio Monte Palomar.

El 2 de Diciembre de 1934 empezó la fundición del disco de vidrio Pyrex para el gran telescopio Hale en el observatorio de Monte Palomar (Fig. 1.3). Para disminuir el peso, se hizo su parte posterior de forma alveolada, pudiendo reducir su peso a la mitad sin perjuicio de su resistencia. El molde requirió tres años de trabajo y fue proyectado por el Dr. A. Grader. Se prepararon 38 toneladas de vidrio a pesar de que solo se necesitaban 20. El calentamiento previo duró 10 días hasta conseguir una temperatura de unos 1500° C. La operación de llenar el crisol duró tres semanas. La colada duró 10 horas y después se dejó bajar lentamente la temperatura hasta los 650°. Esta temperatura se mantuvo durante dos meses, haciéndola luego descender diariamente una pequeña fracción hasta que alcanzó la temperatura ambiente. La fundición se llevó a cabo en Corning Glass Works, de Nueva York.

El tallado, pulido, figurado e instalación fue hecho por el Instituto Tecnológico de California. La media luna, parte superior del eje polar se desliza en un baño de aceite a presión. El foco primario está situado en la parte superior del telescopio y puede accederse a él por medio de un ascensor.

Con este telescopio de 5 m de diámetro y con la Cámara Schmidt de 122 cm. de este observatorio, se tomaron por primera vez fotografías en color verdadero de galaxias y objetos de la Vía Láctea.

Keck. (1967).

El telescopio óptico más grande construido hasta la fecha es el telescopio Keck de 10 metros de diámetro (Fig. 1.4). Dicho telescopio depende de la Universidad de California y está ubicado en Mauna Kea, Hawaii, debido a que este lugar se caracteriza por tener condiciones de observación excepcionales. Debe su nombre al Sr. W.M. Keck (1880 – 1964) que donó 70 millones de dólares a la construcción del telescopio. El telescopio Keck funcionó por varios años obteniendo unos resultados excelentes que en combinación con observaciones del telescopio espacial han mostrado que desarrollando nueva tecnología es posible alcanzar nuevos límites en la profundidad de las observaciones astronómicas.

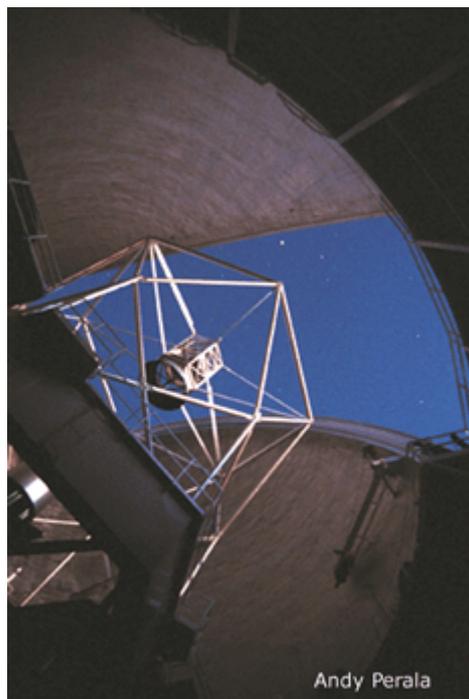


Fig. 1.4 Estructura del telescopio Keck de 10 m de diámetro.

El proyecto Keck fue tan exitoso que unos años más tarde se empezó a construir un segundo telescopio gemelo, del mismo diámetro que el primero formando así el interferómetro Keck (Fig. 1.5). Dos telescopios se pueden usar simultáneamente apuntando al mismo objeto celeste, de tal forma que la señal medida en cada uno de ellos se combina para obtener una señal total con el doble de intensidad que si solo se observara con un telescopio. Esta técnica es muy poderosa porque permite ver detalles del objeto observado imposibles de ver con un solo telescopio.

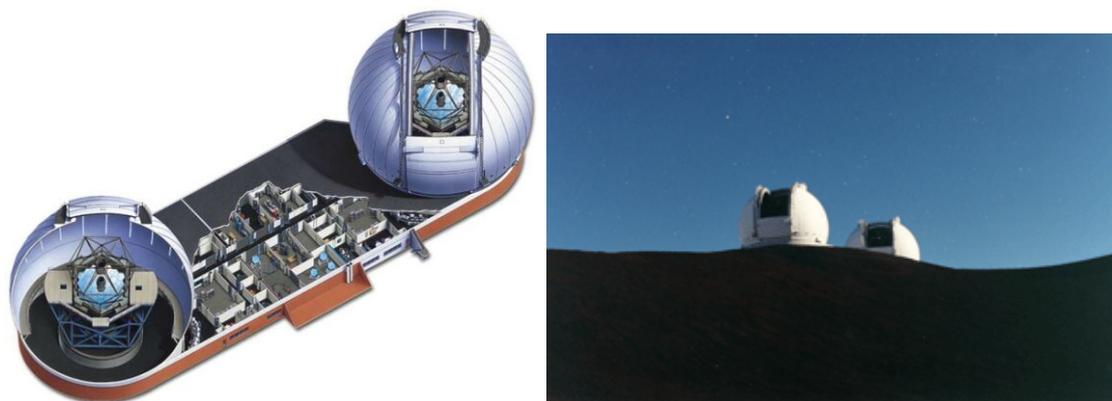


Fig. 1.5 Imágenes del interferómetro Keck (2 telescopios gemelos de 10 m).

Hablar de un telescopio de 10 m de diámetro significa una seria complicación para la fabricación y la manipulación del espejo. Por esta razón es que para este proyecto se plantea una forma alternativa de generar dicha superficie. Se trata de un espejo segmentado, formado por 36 espejos hexagonales de 1.8 m de lado con la capacidad de orientarse en forma independiente, lo que la convierte en una superficie más fácil de fabricar, montar y manipular.

Un interferómetro utiliza múltiples telescopios para reunir ondas de luz, después combina las ondas de tal manera que interactúen, o “interfieran” unas con otras. Un fenómeno similar puede observarse al tirar una piedra a un lago y viendo las ondas resultantes. Si se lanza una segunda piedra al agua, el nuevo juego de ondas pueden golpear con las primeras ondas cambiando su diseño, o pueden juntarse con las primeras, obteniendo ondas más grandes y más potentes. En astronomía, la idea es combinar las ondas de luz de los múltiples telescopios para simular un telescopio mayor. Esto permite a los científicos capturar imágenes de objetos mucho más pequeños o determinar su tamaño o posición con un mayor grado de precisión.

El desarrollo del Interferómetro Keck está dirigido por el JPL (Laboratorio de Propulsión a Chorro) para la Oficina de Ciencia Espacial de la NASA, en Washington, DC. JPL es una división del Instituto de Tecnología de California (Caltech). El W. M. Keck Observatory esta financiado por Caltech, la Universidad de California, y la NASA y está dirigido por la Asociación California para la Investigación Astronómica (California Association for Research in Astronomy), en Kamuela, Honolulu.

Hubble. (1990).

Aunque los instrumentos han aumentado notablemente sus capacidades, existen muchos obstáculos difíciles de superar para obtener imágenes más claras. Uno de estos obstáculos es la propia atmósfera terrestre. Las diferentes capas de la atmósfera difractan y filtran la luz, lo que se traduce en imágenes distorsionadas. Por esta razón es que surge la idea de poner telescopios fuera de la atmósfera terrestre. No fue hasta el año 1923 cuando el científico alemán Hermann Orberth (1894 – 1989) propuso la construcción de un observatorio en el espacio. La carrera espacial comenzó en 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik. En 1962, cuatro años después de que se

fundara la NASA, un grupo de científicos estadounidense propuso la creación de un gran telescopio espacial, declaración que se repitió posteriormente en varias ocasiones.

Los primeros satélites artificiales de carácter astronómico lanzados por la NASA fueron en los años 1968 y 1972. Con estos dos satélites se demostró la necesidad de tener un telescopio mayor, mejor y que durara varios años. La aceptación del proyecto de la lanzadera espacial ayudó a decidir también la propuesta del Telescopio Espacial.

En el año 1973 un grupo de científicos de la NASA propuso las líneas generales de construcción de este gran telescopio orbitante cuyas especificaciones fueron revisadas y ampliadas por otro grupo más numeroso en 1977. Ese mismo año el Congreso estadounidense aprobó la partida presupuestaria. Dos años antes, en 1975, la Agencia Espacial Europea (ESA) se había involucrado en el proyecto.

Dos organismos se hicieron cargo del diseño, desarrollo y construcción del telescopio espacial. El primero fue el Centro de Vuelos Espaciales Marshall en Alabama y el segundo fue el Centro de Vuelos Espaciales Goddar en Maryland.

Para la construcción del telescopio fueron contratados las empresas aeroespaciales Perkin-Elmer Corp. y Lockheed Missiles & Space Company. La primera se encargaría de desarrollar los sistemas ópticos y los sensores de guía, mientras que la segunda fabricaría la estructura, los sistemas de soporte y finalmente ensamblaría todo el satélite. La ESA, por su parte, desarrollaría los paneles solares y uno de los instrumentos científicos.

El proceso de construcción tomó casi una década. El espejo principal estaba acabado desde 1981 y el ensamblaje óptico fue entregado para la integración en el satélite en 1984. Los instrumentos científicos estaban disponibles desde 1983 para su calibración. El ensamblaje estaba íntegramente concluido en 1985.

Pero el lanzamiento tuvo que ser pospuesto. Previsto inicialmente para 1986, el desastre del trasbordador Challenger en enero de ese mismo año obligó a un paro de la carrera espacial estadounidense durante varios años hasta verificar y corregir los defectos de las lanzaderas espaciales. Durante ese tiempo, los ingenieros verificaron una y otra vez los instrumentos del telescopio.

Por fin, en el mes de abril del año 1990, el trasbordador Discovery transportó en su bodega al Telescopio Espacial Hubble (Fig. 1.6) fuera de la superficie de la Tierra.



Fig. 1.6 Telescopio espacial Hubble en órbita.

El Telescopio Espacial Hubble es un satélite artificial que orbita a la Tierra, al igual que otros satélites utilizados para las telecomunicaciones. Sin embargo, la diferencia más notable es que dirige sus instrumentos hacia el espacio en lugar de hacia nuestro planeta.

La arquitectura principal no difiere mucho de un telescopio terrestre. Es un tubo cilíndrico, en cuyo interior reside un gran espejo de 2,5 metros de diámetro. Comparado con otros telescopios terrestres no es gran cosa, ya que los más grandes (como los Keck I y II en Hawaii) alcanzan los 10m.

El espejo principal colecta la luz y la concentra en un espejo secundario situado en la boca del telescopio, que a su vez refleja la luz hacia los instrumentos situados por detrás del primario gracias a una abertura en su centro.

Los instrumentos se encargan de recoger la luz y convertirla en datos para su envío a la Tierra. Curiosamente, el Telescopio Espacial Hubble utiliza otros satélites artificiales de comunicaciones para estar permanentemente en contacto con el Instituto Científico del Telescopio Espacial (STScI), en Baltimore. Esto es así ya que el Hubble no es un satélite geoestacionario, sino que da una vuelta alrededor de la Tierra cada 90 minutos, a una altura de 600 km sobre la superficie.

La arquitectura de este singular telescopio es modular, pensando en las misiones de servicio que los astronautas del trasbordador espacial realizan. En 1993, fue sustituido uno de los instrumentos científicos e instalado un aparato denominado COSTAR para corregir el defectuoso pulido del espejo primario, por el cual las imágenes se obtenían borrosas. En 1997, otra misión de servicio, cambió también varios de los instrumentos por otros mucho más sensibles y contruidos con tecnología de punta.

Afortunadamente para el Telescopio Espacial Hubble, los astronautas también recuperan su órbita original. Aunque este telescopio espacial esté situado a 600 km de altura, el rozamiento con la tenue atmósfera terrestre hace que su órbita frene y por tanto descienda 400 metros de altitud por año.

Esta órbita baja y el frenado de la atmósfera, hacen que sea difícil conocer la posición exacta del Telescopio. Con dos días de diferencia, la incertidumbre crece 30 km, por lo que con conocer con 44 días de anticipación dónde estará

el Hubble se convierte en un enigma de unos 4000 km. Por esta razón, no es posible planificar con meticulosidad la agenda de observaciones puesto que no se sabe si la región a estudiar será visible.

El Telescopio Espacial Hubble gira libremente en los tres ejes, aunque esta libertad queda limitada por algunas restricciones obligadas. El satélite debe orientar siempre los paneles hacia el Sol y éste debe calentar la misma cara del instrumento.

Tampoco puede observar objetos que queden a menos de 50° del Sol, ni a $15,5^\circ$ del limbo de la Tierra ni a 9° de la Luna. Aunque los instrumentos del Telescopio Espacial son demasiado sensibles para observar estos brillantes cuerpos celestes.

Para localizar un objeto celeste el Telescopio Espacial Hubble se guía por un catálogo de estrellas. El Instituto Científico del Telescopio Espacial las selecciona del Catálogo de Estrellas Guías que se preparó para tal fin usando el Atlas Celeste del Monte Palomar. El Catálogo de Estrellas Guías consiste en 18 millones de estrellas. Pero si la precisión del campo a observar lo requiere, se pueden realizar las observaciones en directo para ayudar a dirigir desde Tierra al Telescopio Espacial Hubble.

1.2 TIPOS, REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES

Existen en esencia dos tipos de telescopios, los refractores y los reflectores. Los primeros ofrecen imágenes de mejor calidad, sin embargo los otros resultan mucho más potentes.

En el caso de los refractores el objetivo lo constituye una lente convergente cuya función es concentrar la luz en un punto preciso de su eje de simetría, llamado foco. Por este motivo, el eje de simetría de la lente se llama también eje focal. Uno de los parámetros característicos de un telescopio está representado por la distancia entre el foco y el objetivo, llamada distancia focal y expresada por F . El valor de la distancia focal varía según la forma de la lente que se utiliza para el objetivo (esférica, parabólica, etc.). La relación entre la distancia focal F y el diámetro del objetivo D define además la relación focal del telescopio (F/D). Además del objetivo, los telescopios refractores emplean otro sistema de lentes, de dimensiones menores, que sirven para ampliar la imagen. Estas lentes están colocadas en puntos distintos del eje focal, según el esquema óptico del telescopio. La relación entre la distancia focal del telescopio y la distancia f entre el foco y las lentes auxiliares determina la ampliación de la imagen. En el diseño de Galileo, por ejemplo, se emplea una lente divergente colocado entre el objetivo y el foco. En el diseño llamado kepleriano, en cambio, la ampliación de la imagen se obtiene mediante una lente convergente colocada más allá del foco del telescopio. Sin embargo, los telescopios refractores presentan algunos problemas.

El más importante es la aberración cromática o esférica. Este problema puede compensarse parcialmente utilizando las lentes adecuadas para modificar el ángulo de refracción, o bien atenuarlo con el empleo de telescopios de distancia focal mayor.

Por este motivo, los primeros telescopios refractores eran muy largos. Además algunas limitaciones técnicas impiden utilizar lentes de grandes dimensiones. En efecto, las lentes están sostenidas por la estructura del telescopio, lo que se consigue colocando fijaciones alrededor del borde. Si estas fijaciones fueran de dimensiones demasiado grandes, las lentes tenderían a curvarse por efecto de su propio peso y la deformación del objetivo produciría una distorsión de la imagen. Por este motivo, los telescopios refractores tienen un tamaño moderado.

Por otra parte están los telescopios reflectores, la mayor parte de los telescopios profesionales pertenecen a esta clasificación. En este tipo de telescopio, el colector de luz no es una lente, sino un espejo de forma parabólica. Por tanto, se elimina el problema de la aberración cromática, ya que la reflexión de la luz es independiente de su longitud de onda. Por otra parte, las estructuras de sostén pueden aplicarse también detrás del espejo, lo que permite la construcción de telescopios mayores. En los modelos más sencillos, la luz es captada por el espejo y enviada hacia un punto de recogida llamado foco principal. En la mayoría de casos, sin embargo, se prefiere utilizar también espejos auxiliares de menores dimensiones para llevar la luz recogida por el espejo principal hacia un foco secundario. Por esto, según la posición de los espejos secundarios, y su forma, a lo largo del recorrido de la luz, es posible obtener diversas configuraciones. En los reflectores de tipo newtoniano, se coloca un espejo plano de pequeñas dimensiones a lo largo del eje focal para desviar la luz recogida por el espejo principal hacia el foco secundario, colocado en el exterior del cuerpo del telescopio. La posición del espejo secundario se elige de modo que no modifique la distancia focal. Esta configuración es una de las más habituales en los pequeños telescopios que se utilizan preferentemente de manera visual, pero es desaconsejable en el caso de telescopios profesionales de mayores dimensiones, en los cuales la instrumentación en el foco del telescopio alteraría el equilibrio de toda la estructura. La configuración más habitual en los telescopios profesionales es, por tanto, la de tipo Cassegrain o también llamada catadióptica.

En este caso, la luz recogida por el espejo principal se refleja hacia un secundario convergente de forma hiperbólica, colocado siempre a lo largo del eje focal, y de ahí se refleja nuevamente, a través de una hendidura del espejo principal, hacia el foco secundario. Las ventajas de esta configuración son muchas. En primer lugar, es posible conseguir una distancia focal mayor, incluso empleando un tubo de dimensiones relativamente pequeñas. Además, los instrumentos científicos pueden estar dispuestos a lo largo del eje focal, lo cual garantiza un mayor equilibrio de toda la estructura. Al igual que en la configuración newtoniana, también en los reflectores de tipo Coudé el foco es exterior al telescopio. El sistema prevé, además del espejo principal, otro secundario hiperbólico y dos espejos planos paralelos inclinados 45° respecto

al eje focal. Aunque la configuración Coudé es conceptualmente más complicada que las anteriores, la posición del foco, relativamente distante del telescopio, presenta la ventaja de poder desplazar separadamente los instrumentos científicos. Finalmente, la configuración Nasmyth es muy parecida a la Coudé, con la diferencia de que hay un único espejo plano dispuesto a lo largo del eje focal.

Monturas.

La montura es la estructura del soporte principal de un telescopio y, naturalmente sólo se utiliza para los telescopios terrestres. En los telescopios profesionales, es fundamental disponer de una montura lo más estable posible para garantizar la precisión y permitir observaciones de alta calidad. El tipo de montura más utilizado por los grandes telescopios es la ecuatorial.

Independientemente del tipo de telescopio, existen tres tipos básicos de montura (o montaje): la montura Dobsoniana que es la más barata o simple, la montura Ecuatorial alemana y la montura Ecuatorial en U. Estas dos últimas poseen dos ejes que se manejan independientemente: el eje azimutal y el de eje de altura mediante los cuales se puede localizar cualquier objeto en cualquier parte del cielo si es que el telescopio está bien alineado con el sur polar.

La montura ecuatorial está constituida por un eje polar, paralelo al eje de rotación terrestre, y un eje ortogonal en el cual se monta el telescopio. Así, haciendo girar el telescopio en torno al eje, es posible regular la dirección de apuntamiento. La ventaja de la montura ecuatorial es que, haciendo girar el sistema alrededor del eje polar, puede compensarse el movimiento de rotación de la Tierra y, por consiguiente, tener apuntado el telescopio en un objetivo determinado. Una montura alternativa es la llamada altazimutal, en la cual el telescopio está montado sobre un eje azimutal perpendicular al suelo, capaz de girar sobre sí mismo 360°, y un eje perpendicular a este último que sirve para regular la altura del apuntamiento. La montura altazimutal es toda aquella montura que se puede mover hacia arriba y hacia abajo y hacia ambos lados, y en el caso de telescopios, corresponde a la montura dobsoniana.

Apertura y distancia focal.

Cuando en un telescopio dice de 3 pulgadas o de 6 pulgadas, ese número se refiere a su apertura, que es el diámetro de su espejo o lente objetivo. Entre más apertura, más luz capta el aparato y, por lo tanto, se puede ver más detalle. La relación de apertura no es lineal sino logarítmica. Un telescopio de 6 pulgadas no capta el doble de luz que uno de 3 pulgadas, sino cuatro veces más.

La distancia focal se puede dar en pulgadas o en milímetros y muchos telescopios la traen en ambos sistemas de medición. Entre mayor distancia focal, se podrán usar más aumentos, pero serán imágenes más borrosas, y una porción de cielo mucho menor, mientras que menores distancias focales

dan imágenes de porciones mayores de cielo. En general no se menciona la distancia focal de los telescopios sino la razón focal o $f_{\#}$. Este valor $f_{\#}$ se obtiene dividiendo la distancia focal del telescopio entre la apertura de su lente o espejo objetivo. Un telescopio con una razón focal de f_4 tiene una distancia focal cuatro veces mayor que el diámetro de su espejo o lente objetivo. Este podría ser un telescopio con espejo objetivo de 4 pulgadas con una distancia focal de 16 pulgadas o uno con espejo objetivo de 16 pulgadas con una distancia focal de 64 pulgadas. Los telescopios con razones focales de f_4 a f_6 se conocen como "rápidos" y son mejores para observaciones de objetos de cielo profundo como galaxias o nebulosas, mientras que los que tienen razones focales de f_{12} o f_{15} son llamados "lentos" y son mejores para observaciones planetarias con alto aumento, aunque con ambos tipos se pueden ver todos los objetos, cercanos o lejanos.¹

Poder de resolución.

Cuando se observan objetos celestes, no solo queremos que se vean brillantes sino que tengan buena definición (que no sean borrosos). A esto se le llama poder de resolución y casi siempre se da en segundos de arco. Entre menor sea el poder de resolución, más detalles se podrá ver.

Potencia.

Otro punto importante a conocer es la potencia máxima. Lo máximo que un telescopio puede dar de aumento es de unos 50 aumentos por pulgada de apertura y no más. Así un telescopio de 4 pulgadas podrá dar aumentos máximos de 200x y uno de 10 pulgadas de 500x. Este aumento es el resultante de dividir la distancia focal del aparato (en mm) entre la distancia focal del lente ocular (también en mm) que se use. Por ejemplo, si se usa un ocular de 20 mm en un telescopio de 600 mm de distancia focal, eso da un aumento de $600/20$ o 30x y si se cambia el ocular por uno de 4 mm eso da $600/4$ o 150x.

Magnitud límite.

Los primeros telescopios se utilizaban simplemente de modo visual, es decir, el astrónomo se limitaba a observar la imagen del firmamento a través de un ocular, y el papel del receptor de la luz era confiado al ojo humano. En este caso, la magnitud límite depende principalmente de las dimensiones del colector de luz (lente o espejo) según la ecuación 1.1:

$$m = 16 + 54 \log D$$

Ec. 1.1

Donde m es la magnitud límite y D es el diámetro del telescopio expresado en metros. En los telescopios más modernos, el ojo humano ha sido sustituido por detectores artificiales, como placas fotográficas o los más modernos detectores de estado sólido que, a diferencia del ojo humano, son capaces de acumular el flujo luminoso recogido durante largos intervalos de tiempo. Esto permite

¹ Berry, Richard. **Build your own telescope.**

detectar objetos todavía más débiles. Por tanto, la magnitud límite depende también de la duración de la observación según la ecuación 1.2:

$$m = 12.5 + 54 \log D + 2.54 \log t \quad \text{Ec. 1.2}$$

Naturalmente, la utilización de estos detectores permite no sólo aumentar notablemente la eficacia de un telescopio, sino también poder registrar las imágenes obtenidas para someterlas a un análisis más exhaustivo.

1.3 DISEÑO Y MAQUINADO DE LOS TELESCOPIOS.

La constante búsqueda por aumentar la capacidad en los telescopios y los instrumentos utilizados en la astronomía ha provocado que quienes los fabrican tengan que recurrir a las técnicas de fabricación más avanzadas, pues se trata de instrumentos con intervalos de precisión requeridos de hasta 5 μm . Han sido en realidad los avances en procesos de manufactura y materiales los que han permitido el desarrollo de la tecnología de observación astronómica. En el siglo XVII los instrumentos se elaboraban a mano y la calidad dependía de la habilidad manual de quien pulía los lentes o los espejos. Actualmente el uso de programas de cómputo así como las máquinas herramientas operadas por control numérico permiten alcanzar con mayor facilidad las precisiones requeridas.

Es el Instituto de Astronomía el principal exponente de la investigación astronómica del país, por lo que tanto el diseño como la fabricación de instrumentos nuevos es una necesidad que debe buscar satisfacer por sí mismo. Para esto es importante que el Departamento de Instrumentación se integre a la práctica de técnicas modernas de fabricación, es decir el uso de diseño y manufactura asistidos por computadora (CAD/CAM).

1.4 SCIDAR GENERALIZADO MEXICANO

La turbulencia atmosférica (Fig. 1.7) es un fenómeno que afecta significativamente la observación astronómica. Este fenómeno consiste en variaciones de temperatura en el aire que modifican su densidad provocando cambios en su índice de refracción, lo que se manifiesta como deformaciones en el frente de onda generado por la fuente de luz.

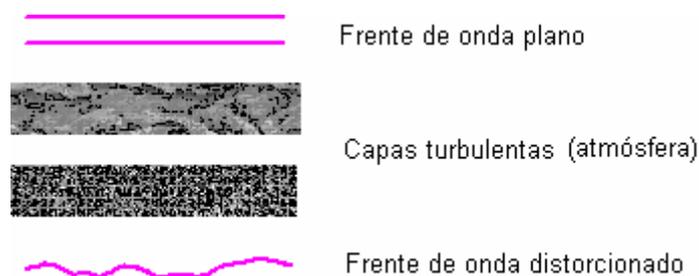


Fig. 1.7 Efecto de la turbulencia atmosférica en un frente de onda de una fuente de luz.

En el año 1974 Rocca, Roddier y Vernin desarrollan el concepto de SCIDAR (Scintillation Detection And Ranging), que consiste en realizar un análisis estadístico basado en un conjunto de imágenes de una estrella binaria, obtenidas en intervalos de tiempo muy cortos, de tal forma que se puedan apreciar las variaciones producidas por la turbulencia atmosférica. Este análisis permite determinar distintos parámetros como la intensidad de la turbulencia y la velocidad a la que se desplaza dicha capa en función de la altura.

Sin embargo SCIDAR clásico tiene una limitante importante, no permite realizar análisis sobre capas inferiores a 1km de altura. Esta limitante es solucionada en SCIDAR generalizado (Ávila et. al. 1997). La corrección consiste en modificar la imagen mediante dispositivos ópticos para llevarlas a un plano virtual algunos kilómetros por debajo del nivel del suelo, esto permite que las capas inferiores se encuentren a una distancia suficiente del plano de estudio para poder ser analizadas.

El sistema de SCIDAR generalizado consiste en un dispositivo que recibe la imagen captada por el telescopio, la modifica y envía a un detector de imágenes que la digitaliza para ser enviada a una computadora. Una vez que se encuentra en la computadora, cada imagen es comparada con la anterior, en forma inmediata se procesan los datos obtenidos de la comparación y se arrojan valores que al conjugarlos permiten obtener perfiles de turbulencia y velocidad de las capas turbulentas.

Actualmente se desarrolla en el Instituto de Astronomía de la UNAM el proyecto SCIDAR Generalizado Mexicano (SGM) (Fig. 1.8), el cual tiene como primer objetivo realizar mediciones sobre turbulencia atmosférica en el Observatorio de San Pedro Mártir, B.C. Sin embargo pretende ser un instrumento que pueda ser adaptado a diferentes telescopios para obtener mediciones sobre la turbulencia atmosférica en diversos observatorios.

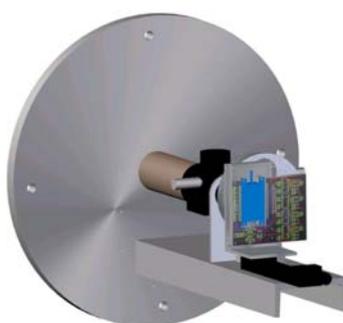


Fig. 1.8. Modelo virtual del SGM

Para este proyecto se requiere la participación de especialistas en óptica, mecánica, electrónica y computación, para lograr que el equipo funcione adecuadamente. En lo relativo a la mecánica, se destaca el diseño y fabricación de las piezas que integran el dispositivo, cuya dificultad radica en

las precisiones requeridas por el diseño óptico, en el que las posiciones tanto de los lentes como de los filtros juegan un papel fundamental.²

² Ávila, Remy. Estudios de turbulencia óptica en la atmósfera terrestre.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 PROCESOS DE DISEÑO MECÁNICO TRADICIONAL.

El diseño consiste esencialmente en la elaboración de un plan para satisfacer una necesidad específica. Implica un proceso de análisis y transformación de ideas que van desde lo más general hasta generar una solución específica la cual satisfaga mejor la situación planteada³.

Para esto se puede aplicar una metodología que permita obtener soluciones satisfactorias a cualquier problema en forma clara, rápida y ordenada. El diseño mecánico no es la excepción, pues también requiere una metodología de trabajo en la cual sean considerados todos los elementos, factores y parámetros que definen el problema y su solución. Aunque existen diversas metodologías diferentes para definir este proceso, en realidad existen elementos comunes que son los que dan forma al diseño mecánico (Fig. 2.1).

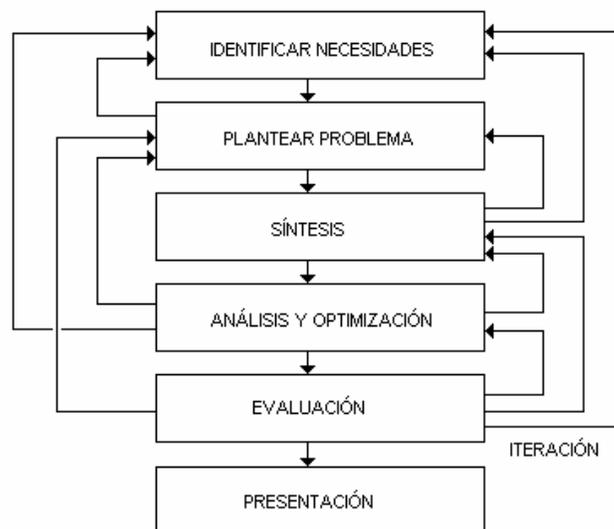


Fig. 2.1 Proceso de diseño mecánico.

³ Shigley, Robert. **Diseño en ingeniería mecánica.**

- Identificar necesidades: En principio el diseño surge a partir de una necesidad, sin embargo en la mayoría de los casos no se presenta de forma obvia, pues esta se puede manifestar por sus consecuencias, directas o indirectas, y es necesario realizar un análisis previo para determinar el origen y así identificar la necesidad concreta que se debe satisfacer. Este proceso puede ser en ocasiones complicado y puede significar una inversión de tiempo y trabajo significativa. El buen desarrollo de esta etapa es de suma importancia para definir el rumbo del proceso de diseño, pues si la necesidad primera no es identificada debidamente, se puede encaminar el diseño hacia una solución a un problema no existente o bien de poca importancia para el objetivo principal.

Para identificar las necesidades reales es necesario que el diseñador tenga un conocimiento sólido del sistema sobre el cual está trabajando, y muchas veces es la experiencia tanto en el manejo de dicho sistema como en el diseño lo que hace posible que se cumpla el objetivo, o por lo menos facilita notablemente el trabajo.

Dentro del diseño mecánico la manifestación de las necesidades depende del tipo de problema que se desea solucionar. En algunos casos lo que se busca es la corrección de errores o bien la optimización en sistemas existentes; en estos casos la necesidad se manifestará a través de los resultados parciales o finales del proceso que desarrolla el sistema.

En otros casos se trata de mejorar un sistema existente cuya función es la que determina la necesidad básica que se desea cubrir, sin embargo en este caso las necesidades a identificar se encuentran en la mejora de calidad de los resultados que se desean obtener del mismo.

Por último se puede tratar de una necesidad nunca antes cubierta y que requiere una solución que tendrá que ser totalmente nueva, para la cual habrá que acotar perfectamente los alcances del nuevo sistema por desarrollar, de lo contrario la definición del problema puede resultar ambigua.

- Definición del problema: Una vez identificada la necesidad que se desea cubrir, se debe establecer cuál es la forma en la que se va a enfrentar. Es común que exista cierta confusión entre identificar necesidades y definir problemas, sin embargo existe una diferencia clara entre estas dos etapas. En la definición del problema es necesario hacer un análisis profundo de las condiciones que afectan el sistema actual, o bien, que afectarán al nuevo sistema.

Dentro del análisis deben incluirse todos los factores que puedan estar involucrados con el diseño, fabricación y operación de el sistema, de tal forma que puedan evitarse en la medida de lo posible imprevistos durante el

proceso que pueden resultar muy costosos tanto en dinero, como en tiempo y trabajo.

Una vez recopiladas dichas condiciones, es necesario priorizar y determinar los factores críticos, los de mediana importancia así como los de poca trascendencia, pues éste será el orden de importancia que se deberá respetar al momento de tomar decisiones durante el proceso de diseño. A este conjunto de condiciones y factores se les llama especificaciones de diseño y son las reglas bajo las cuales debe llevarse a cabo el proceso. En el caso del diseño mecánico, la mayoría de estas especificaciones son valores numéricos, máximos o mínimos que definen los límites bajo los cuales debe encontrarse la fabricación u operación para arrojar resultados satisfactorios.

- **Síntesis:** Una vez definidos los parámetros de diseño comienzan a desarrollarse ideas para la solución del problema. Este proceso comienza desde ideas burdas sobre soluciones generales, las cuales posteriormente deben ser analizadas, aceptadas o desechadas hasta seleccionar las más viables y desarrollarlas adaptándolas a las especificaciones del problema. La generación de estas ideas debe estar apegada en la mayoría de los casos a estándares establecidos en códigos y normas tanto nacionales como internacionales.
- **Análisis y optimización:** Una vez que se han generado opciones para la solución del problema, estas son analizadas y comparadas para determinar cual es la mejor solución.

En realidad este proceso es cíclico, primero se elabora una síntesis de ideas que se establecen como posibles soluciones, son analizadas y es entonces cuando se pueden apreciar las ideas que resultan funcionales o viables y las que no lo son. Las que son aceptadas se llevan nuevamente a la etapa de síntesis donde son integradas junto con ideas nuevas que corrigen las fallas de la solución anteriormente propuesta. Este ciclo puede repetirse un gran número de veces hasta alcanzar un diseño que resulte satisfactorio y viable para cumplir su objetivo.

Existe una diferencia entre soluciones funcionales y soluciones óptimas. Las soluciones funcionales son aquellas que resuelven el problema y por tanto cumplen con su objetivo primordial, sin embargo siempre existe la posibilidad de crear soluciones que no solo cumplan con ese objetivo sino que puedan resultar también una solución a un problema secundario. La optimización consiste en realizar tantas mejoras como sea posible a un diseño funcional de tal forma que pueda traer ventajas adicionales a la solución del problema. Este tipo de ventajas pueden ser en cuanto a costo, tiempo, trabajo, peso, accesibilidad, facilidad de ensamble, mantenimiento e incluso estética, por mencionar algunas.

- Evaluación: Una vez completado el diseño, debe ser evaluado en su funcionamiento, para determinar si cumple o no con las expectativas planteadas originalmente para entonces aprobarlo a rechazarlo, lo cual significa retomar el diseño en alguna de las etapas anteriores y rediseñar corrigiendo las fallas del modelo original.
- Difusión: Aunque en muchos casos la obtención de un diseño funcional se considera el fin último del diseño mecánico, en realidad en la mayoría de los casos es necesario la difusión del proyecto para que éste cumpla con su objetivo, por lo que es importante considerar la presentación del proyecto como parte del proceso.

Por lo general el diseño mecánico es un trabajo que se elabora en equipo, por lo que no es suficiente creer que una solución propuesta es la mejor alternativa, es necesario demostrar y fundamentar que en realidad lo es, por lo que la habilidad para manifestar claramente las ideas y explicar los conceptos aplicados en el diseño es muy importante para cumplir este objetivo. La forma más común para hacer esto es la publicación y presentación de artículos así como la generación de patentes.

En muchos casos parte del objetivo del diseño consiste en su éxito comercial, por lo que su adecuada difusión será fundamental en alcanzar dicho fin.

Prototipos.

Cuando se trata de diseñar elementos mecánicos, muchas veces se trata de piezas de complicada fabricación o bien de un costo muy elevado, y en la mayoría de los casos no existe una certeza absoluta de su buen funcionamiento, es por eso que comúnmente se recurre a la fabricación de prototipos funcionales elaborados en forma más simple, de tal forma que se pueda comprobar la utilidad del concepto desarrollado antes de ser elaborado en forma definitiva. Esto en principio puede significar tiempo, trabajo y costos adicionales, pero de presentar un error de diseño puede significar un enorme ahorro tanto de recursos como de tiempo y trabajo.

Planos.

Es parte fundamental en el diseño mecánico la elaboración de planos de fabricación y ensamble de los elementos diseñados. Como ya se mencionó antes, el diseño es generalmente un trabajo de conjunto por lo que la forma más utilizada de exponer claramente las ideas es a través de imágenes que cualquier otro individuo involucrado en el diseño y fabricación de dicho elemento debe ser capaz de comprender e interpretar para la correcta ejecución del mismo.

Para alcanzar un pleno entendimiento de estas ideas, no solo entre compañeros de un mismo equipo de trabajo, sino de cualquier otro que deseé conocer y

entender estas ideas, se han estandarizado las formas en las que se elaboran los planos, de tal forma que actualmente existen normas bajo las cuales se ejecutan los planos y que van desde la forma y tamaño del papel, la orientación, perspectiva y disposición de las vistas, los tipos de línea, la simbología, unidades, las cotas y en general la forma de plasmar toda la información requerida para definir perfectamente el diseño y no dejar lugar a ambigüedades e interpretaciones.

Originalmente la elaboración de dibujos se realizaba a mano y requería una mayor inversión de tiempo, sin embargo el uso de las herramientas de computo se ha desarrollado enormemente en este rubro, y actualmente existen una gran cantidad de programas de dibujo técnico CAD (Computer Aided Design), las cuales por lo general se apegan a las normas y estándares de dibujo antes mencionados y permiten elaborar planos con inversiones de tiempo y trabajo mucho menores, con la ventaja además de poder realizar correcciones en forma fácil y casi inmediata.

Pruebas y simulaciones.

Antes de dar por concluido un proceso de diseño y fabricación, es necesario asegurarse que el diseño funciona, pues aunque en teoría todos los elementos cumplen su función, pueden existir factores no considerados en el diseño que pueden alterar el funcionamiento de uno o varios elementos.

Para garantizar el correcto funcionamiento del diseño, deben realizarse pruebas durante el desarrollo del proyecto, el proceso de fabricación y también sobre los prototipos realizados. Dentro del diseño mecánico existen muchos tipos de pruebas que se pueden ejecutar en diversas etapas del proceso de diseño.

Durante el proceso de diseño de detalle, se pueden realizar análisis geométricos y algebraicos que permitan predecir, si se realizan las consideraciones adecuadas, el comportamiento de los diferentes elementos que componen el diseño. Actualmente existen herramientas computacionales capaces de simular las condiciones físicas bajo las que se encuentra sometido algún elemento, aunado a las propiedades del material que lo compone para así predecir el comportamiento y suponer desde una etapa temprana del diseño la viabilidad del mismo. Este conjunto de programas computacionales se conocen como CAE (Computer Aided Engineering), y pueden resultar sumamente confiables si son utilizadas en forma adecuada, de lo contrario pueden arrojar resultados considerablemente alejados del comportamiento real de un elemento.

Dentro del diseño, la selección de materiales es muy importante y esta se basa en las propiedades físicas, químicas y mecánicas que presenta. Al elegir un material el diseñador se basa en las propiedades que especifica el fabricante, sin embargo estas pueden variar por los mismos procesos de fabricación, almacenaje, embalaje o transporte, por lo que puede ser necesario realizar pruebas sobre el material si alguna de las propiedades del mismo es un factor crítico de diseño.

Cuando las especificaciones de diseño marcan tolerancias específicas en las dimensiones de los elementos, será necesario recurrir a pruebas de metrología para determinar si el proceso de fabricación logró dar a cada pieza las dimensiones dentro del rango especificado en el diseño.

Finalmente, una vez que se encuentra terminado un prototipo funcional será necesario evaluar su operación y determinar si esta se encuentra dentro de lo previsto por la idea original del diseño.

Dentro de la instrumentación astronómica, todos estos factores antes mencionados resultan críticos dentro del diseño mecánico, por lo que es necesario recurrir tanto a pruebas virtuales mediante herramientas CAE, como a pruebas de materiales, de metrología y de operación para garantizar el correcto funcionamiento de los dispositivos, ya que en la mayoría de los casos el orden de magnitud de las tolerancias permitidas así como las condiciones ambientales o de solicitaciones mecánicas suelen ser factores críticos del diseño.

2.2 PROCESOS DE MAQUINADO CONVENCIONAL.

El objetivo fundamental en los Procesos de Manufactura por arranque de viruta es obtener piezas de configuración geométrica requerida y acabado deseado. La operación consiste en arrancar de la pieza bruta el excedente del metal por medio de herramientas de corte y máquinas adecuadas (Fig. 2.2).

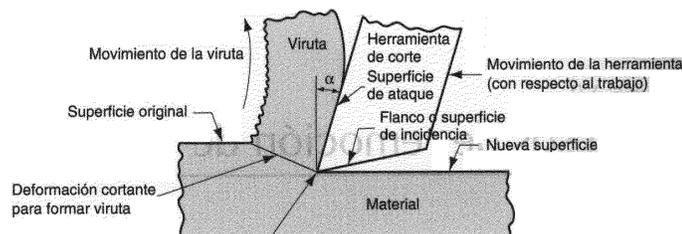


Fig. 2.2 Proceso de corte por arranque de viruta.

Profundidad de corte

Se denomina profundidad de corte a la profundidad de la capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta; generalmente se designa con la letra t

En las máquinas donde el movimiento de la pieza es giratorio (Torneado y Rectificado) (Fig. 2.3), la profundidad de corte se determina según la ecuación 2.1:

$$t = \frac{D_f - D_i}{2} \quad \text{Ec.2.1}$$

en donde:

D_i = Diámetro inicial de la pieza (mm).

D_f = Diámetro final de la pieza (mm).

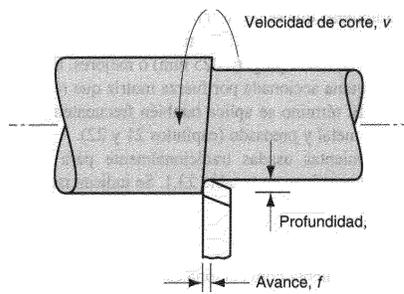


Fig. 2.3 Movimiento rotativo de la pieza.

En el caso de superficies planas (Fresado, Cepillado y Rectificado de superficies planas) (Fig. 2.4), la profundidad de corte se obtiene de la ecuación 2.2:

$$t = E - e \quad \text{Ec. 2.2}$$

en donde:

E = espesor inicial de la pieza (mm).

e = espesor final de la pieza (mm).

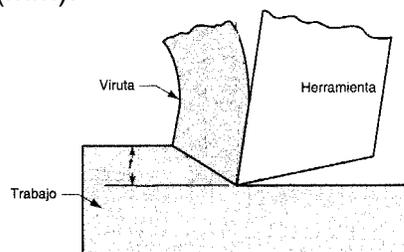


Fig. 2.4 Maquinado de superficies planas.

Velocidad de avance

Se entiende por avance el movimiento de la herramienta respecto a la pieza o de esta última respecto a la herramienta en un periodo de tiempo determinado (Fig. 2.5, 2.6, 2.7).

El avance se designa generalmente por la letra s y se mide en milímetros por una revolución del eje del cabezal o porta-herramienta, y en algunos casos en milímetros por minuto.

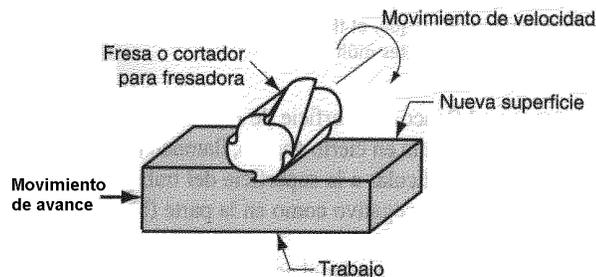


Fig. 2.5 Movimiento de avance en fresado.

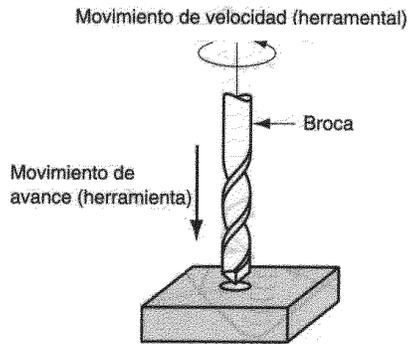


Fig. 2.6 Movimientos de avance en taladrado

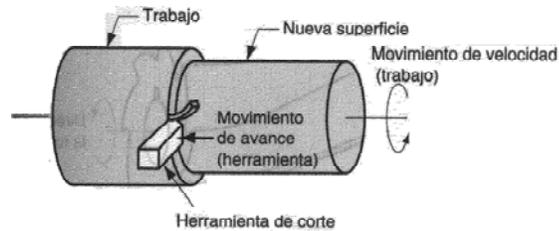


Fig. 2.7 Movimiento de avance en torneado

Velocidad de corte

Es la distancia que recorre el filo de corte de la herramienta al pasar en dirección del movimiento principal (Movimiento de Corte) respecto a la superficie que se trabaja: El movimiento que se origina puede ser rotativo o alternativo; en el primer caso, la velocidad de corte o velocidad lineal relativa entre pieza y herramienta corresponde a la velocidad tangencial en la zona que se está efectuando el desprendimiento de la viruta, es decir, donde entran en contacto herramienta y pieza. En el segundo caso la velocidad relativa en un instante dado es la misma en cualquier punto de la pieza o la herramienta⁴.

En el caso de máquinas con movimiento giratorio (Torno, Taladro, Fresadora, etc.), la velocidad de corte está dada por la ecuación 2.3:

$$V_c = \pi D n \quad (\text{m/min}) \text{ ó } (\text{ft/min}) \quad \text{Ec. 2.3}$$

En donde:

D = diámetro (m) ó (ft).

n = número de revoluciones por minuto a que gira la pieza o la herramienta.

Para máquinas con movimiento alternativo (Cepillos, Escoplos, Brochadoras, etc.), la velocidad de corte corresponde a la velocidad media y está dada por la ecuación 2.4:

$$V_c = \frac{L}{T} \quad (\text{m/min}) \text{ ó } (\text{ft/min}) \quad \text{Ec. 2.4}$$

en donde:

L = distancia recorrida por la herramienta o la pieza (m) ó (ft).

T = tiempo necesario para recorrer la distancia L (min).

⁴ Groover, Mikell P. **Fundamentos de manufactura moderna.**

Procesos más comunes.

Existe una gran variedad de operaciones que trabajan bajo el principio de arranque de viruta, cada uno permite obtener geometrías diferentes mediante diferentes tipos de herramientas y movimientos. Sin embargo el principio de arranque de viruta siempre es igual, un movimiento relativo entre el filo de la herramienta y la pieza de trabajo.

Dentro de las operaciones más relevantes se encuentran el fresado, torneado y taladrado. Estas son las tres operaciones más comunes ya que con ellas se pueden generar una enorme variedad de superficies y geometrías, aunque en muchos casos es necesario contar con maquinas herramientas de características diferente para lograr ciertas geometrías o acabados.

La fresadora (Fig. 2.8) consta de un cuerpo o bancada, un carro sobre el que se encuentra la mesa encima de la cual se coloca el material a cortar y un husillo al que se le acoplan las herramientas de corte. Normalmente la mesa se puede mover en una dirección, que se le llama movimiento longitudinal. La mesa está montada sobre el “carro”, que le da un movimiento perpendicular al primero, llamado movimiento transversal. En el caso de una fresadora vertical de torreta, el husillo se encuentra en el cabezal de la máquina y puede subir o bajar accionado por una palanca o una manivela, aunque también en muchos casos la bancada es la que tiene también la capacidad de subir y bajar, quedando el cabezal fijo. En muchos casos el cabezal tiene la capacidad de girar sobre un eje para inclinar la herramienta. Con esta herramienta se pueden generar principalmente superficies planas, ya sean horizontales, verticales o con cierto grado de inclinación. También se pueden generar ciertas variantes de superficies más complejas agregando elementos de sujeción especiales.



Fig. 2.8 Fresadora.

El torno (Fig. 2.9) esta formado por un cabezal giratorio, generalmente dispuesto en forma horizontal y en el cual se monta la pieza. La herramienta se coloca en una porta herramienta capaz de desplazarse a todo lo largo del eje de giro de la pieza en forma paralela a éste, además de poder acercarse o alejarse del mismo.

De esta forma se obtienen piezas de revolución, ya sea cilíndricas o bien cónicas, cuando se combinan ambos movimientos de la herramienta en forma simultánea. En este caso se trata de un movimiento rotatorio continuo donde el movimiento de corte es realizado por la pieza mientras que el movimiento de avance esta dado por la herramienta.

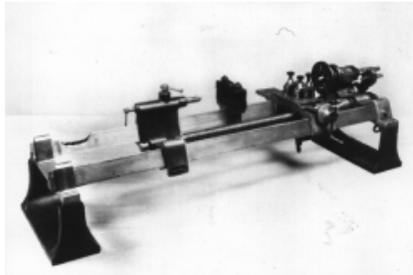


Fig. 2.9 Torno.

El taladro de banco (Fig. 2.10) es una de las herramientas más sencillas y su utilidad se reduce a la formación de barrenos en el material. Para lograr esto el taladro cuenta con un banco sobre el cual se coloca y sujeta la pieza, mientras que en la parte superior se encuentra el husillo sobre el cual se coloca la herramienta giratoria, teniendo la capacidad de desplazarse únicamente hacia arriba y abajo para perforar el material.

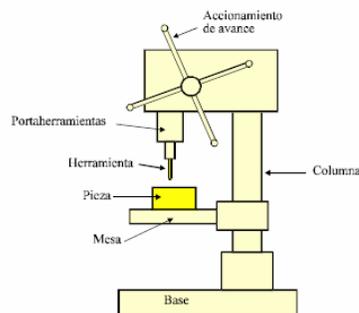


Fig. 2.10 Taladro de banco.

En la tabla 2.1 se presentan las diferentes operaciones de maquinado según el tipo de movimiento que realizan tanto la pieza de trabajo como la herramienta.

MOVIMIENTO DE TRABAJO	MÁQUINA	MOVIMIENTO DE CORTE REALIZADO POR:	MOVIMIENTO DE AVANCE REALIZADO POR
ROTATORIO CONTINUO	TORNO PARALELO TORNO REVOLVER TORNO AUTOMÁTICO TORNO COPIADOR TORNO VERTICAL	PIEZA	HERRAMIENTA
ROTATORIO CONTINUO	TALADRO DE: COLUMNA RADIAL MÚLTIPLE	HERRAMIENTA	HERRAMIENTA
ROTATORIO CONTINUO	MANDRINADORA	HERRAMIENTA	HERRAMIENTA O PIEZA
RECTILÍNEO ALTERNATIVO	LIMADORA CEPILLO	HERRAMIENTA PIEZA	PIEZA HERRAMIENTA
RECTILÍNEO INTERMITENTE	BROCHADORA	HERRAMIENTA	INCREMENTO DE LOS DIENTES
ROTATORIO CONTINUO	FRESADORA: HORIZONTAL VERTICAL UNIVERSAL	HERRAMIENTA	PIEZA
ROTATORIO CONTINUO	SIERRA DE DISCO	HERRAMIENTA	HERRAMIENTA
RECTILÍNEO CONTINUO	SIERRA CINTA	HERRAMIENTA	HERRAMIENTA
ROTATORIO CONTINUO	RECTIFICADORA: UNIVERSAL VERTICAL SIN CENTROS FRONTAL	HERRAMIENTA	HERRAMIENTA O PIEZA
ROTATORIO ALTERNADO	ROSCADORA	HERRAMIENTA	HERRAMIENTA
RECTILÍNEO ALTERNADO	GENERADORA DE ENGRANES CON SISTEMA PFAUTHER	HERRAMIENTA	PIEZA

Tabla 2.1 Operaciones de maquinado según los movimientos de pieza y herramienta.

2.3 PROCESO DE DISEÑO DE ELEMENTOS MECÁNICOS POR CAD/CAM.

Dado las características que requieren los elementos mecánicos que conforman los instrumentos astronómicos, tales como su alta precisión y su confiabilidad, es necesario recurrir al máximo aprovechamiento de las herramientas tecnológicas disponibles, así como a procedimientos ordenados y bien definidos para obtener diseños funcionales con la mayor cantidad de ventajas posibles y reducir errores, fallas y costos entre otras cosas.

Esta propuesta toma como base las actividades que se consideran indispensables para la elaboración de un diseño completo, y el orden de estas etapas parte de los elementos que se requieren concluidos para el desarrollo de cada una de éstas.

En forma general se puede dividir el proceso en diseño y fabricación del elemento mecánico, sin embargo dado el carácter de cíclico que presenta el proceso completo, en la mayoría de los casos será necesario volver a etapas de diseño una vez comenzado el proceso de fabricación de la pieza.

Esta secuencia de actividades esta basada en procesos de diseño mecánico, uso de programas de CAD/CAM, así como herramientas de CNC y uso de instrumentos de medición de alta precisión, según los requerimientos de cada etapa y los elementos a los que se tiene acceso dentro del Instituto de Astronomía para su aprovechamiento.

A continuación se presentan las etapas que se consideran elementales para el buen desarrollo de este proceso, en el orden que se considera adecuado para su completa ejecución⁵.

- **DISEÑO CONCEPTUAL:** Dentro de este proceso se define el tipo de solución que se dará al problema del que se parte, en este caso se definen los parámetros que deberá cubrir el elemento por diseñar y las especificaciones que lo caracterizan. Se plantea de manera muy general el tipo de elemento mecánico que se requiere, por lo que una vez concluido este proceso se tendrá una primera idea de las principales características como geometría, dimensiones y materiales.

Durante este proceso pueden encontrarse ciertas inconveniencias o contradicciones en las especificaciones planteadas al principio, lo que puede significar modificaciones en las mismas, siempre que esto no implique consecuencias en el concepto esencial del diseño, es decir, hasta donde el propio diseño lo permita. Esta posibilidad significa un primer retorno a esta etapa, es decir, que existe la opción de realizar modificaciones a conceptos desarrollados en esta etapa una vez que se ha concluido y se encuentra en desarrollo una etapa posterior del proceso.

Al realizar un estudio de posibilidades resulta muy útil hacer un análisis general de los conceptos más significativos del diseño, como su viabilidad técnica y económica, disponibilidad de materiales, etc. Estos son aspectos relativamente fáciles de analizar desde un concepto elemental del diseño, y pueden ahorrar mucho tiempo y trabajo descartando ideas complicadas, costosas o incluso imposibles en su ejecución.

- **GENERACIÓN DE CONCEPTOS:** Esta es la etapa creativa del proceso de diseño, pues es aquí donde se deben generar una gran cantidad de opciones para el la posible solución. Generalmente se habla de esta etapa como un proceso que no debe tener restricciones, sin embargo siempre

⁵ Shigley, Robert E. **El Proyecto en la ingeniería mecánica.**

esta limitado por las condiciones y especificaciones previamente establecidas durante el diseño conceptual.

Durante este proceso se generan un significativo número de opciones, principalmente geométricas, apegándose a las especificaciones de diseño que puedan resultar funcionales a la apreciación del diseñador.

- **MEJOR CONCEPTO:** Éste es el proceso de análisis de las opciones viables. Durante este proceso es necesario hacer un desglose de todas las características, ventajas y desventajas de cada una de ellas, de tal manera que mediante una evaluación de las mismas se pueda seleccionar la más conveniente según el criterio que se aplique. Uno de los métodos de selección de alternativas más común es la matriz de decisión, en la cual se pueden evaluar las opciones bajo todos los criterios, priorizando cada uno de ellos y calificando cada alternativa, de tal forma que se puede hacer una evaluación numérica de cada opción. También se pueden tomar decisiones a través de métodos estadísticos y teoría de probabilidad.
- **DISEÑO PRELIMINAR:** Al haber elegido una solución se comienza con el diseño preliminar, etapa esencialmente técnica en la que se establece una configuración total del sistema. Requiere análisis cinemáticos así como un estudio de las interacciones de los diferentes elementos que componen dicho sistema. El objetivo principal de esta etapa es detallar los resultados de la síntesis del diseño conceptual mediante dibujos, esquemas y planos con objeto de validar los requisitos de tamaño y funcionalidad de las especificaciones.

Durante esta fase raramente se logra cumplir con todas las especificaciones y requisitos, por lo tanto será aquí donde se presente un primer retorno a la etapa inicial, donde se buscara hacer adaptaciones a ciertas especificaciones que otorguen libertad al diseño.

Mientras se elaboran los bosquejos para el diseño preliminar, se puede trabajar en probar la idea, determinar algunas propiedades de los materiales, para evaluar el dispositivo, o bien para determinar algún parámetro desconocido. Ciertas áreas del diseño preliminar pueden quedar pendientes en su desarrollo de acuerdo a la información disponible, esos pendientes dan lugar a una siguiente etapa del proceso de diseño.

- **DISEÑO MECÁNICO:** Una vez elegido un modelo, se debe hacer un diseño técnicamente más detallado de la pieza, donde deben adaptarse todos los requerimientos técnicos, dimensiones, tolerancias, sollicitaciones y respuestas mecánicas, y en general cualquier característica de tipo técnico del elemento mecánico.

Durante el diseño mecánico quedarán establecidos todos los parámetros que hayan quedado pendientes durante el diseño preliminar, de tal forma que una vez terminado el diseño mecánico se habrán definido todos los parámetros concernientes al elemento que se diseña, principalmente dimensiones, propiedades y materiales. Todos estos resultados quedan plasmados en los planos de fabricación de la o las piezas, así como el ensamble y montaje si es el caso.

- **MODELADO EN CAD:** Definidas las características geométricas y dimensionales, la pieza es modelada en un programa de Diseño Asistido por Computadora (CAD), en el cual se deben respetar sus propiedades, de tal forma que se pueda obtener un modelo fiel.

Este es un proceso que se realiza de forma casi simultánea con el proceso de diseño mecánico, pues actualmente los programas computacionales no sirven únicamente para dibujar planos, sino como herramientas de diseño que permiten analizar muchas de las condiciones de trabajo y son capaces de determinar muchas de las características propias del diseño.

Aunado a los programas de CAD se encuentran los programas de CAE, los cuales utilizados adecuadamente son capaces de simular condiciones de operación y determinar con alta confiabilidad muchas de las especificaciones que se deben cumplir, o bien las capacidades de los elementos diseñados previamente.

- **SELECCIÓN DE PROCESOS DE FABRICACIÓN:** Estando definida la geometría, tolerancias y dimensiones es posible seleccionar los métodos que se utilizaran para fabricar la pieza. En este caso los principales criterios de selección serán en primer lugar su material y geometría, en segundo lugar su acabado, teniendo en cuenta siempre los recursos disponibles para su fabricación.
- **GENERACIÓN DE RUTA DE MAQUINADO:** Esto se realiza una vez seleccionados los procesos de fabricación. Se seleccionan las herramientas a utilizar y mediante programas de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) se genera la ruta de maquinado a partir del modelo antes elaborado en CAD y el modelo del que se parte. En el Instituto de Astronomía el software para diseño y manufactura es Unigraphics, el cual genera una ruta de manufactura con su propio lenguaje, por lo que es necesario llevarlo a un post-procesador para que interprete correctamente estas instrucciones y las traduzca al código G. Elegir la ruta de maquinado correcta puede ser sumamente complicado, y su optimización aún más, aún cuando Unigraphics cuenta con herramientas para hacerlo. Sin embargo en este caso la optimización de la ruta de corte no es de especial importancia, ya que en este caso la velocidad de producción no es una variable de interés.

El post-procesador debe contar con información específica de la máquina que se va a utilizar para generar las instrucciones correctas, pues aunque el código G es un lenguaje estandarizado, cada marca y modelo, tanto de controles como de máquinas herramientas presentan algunas diferencias en cuanto a la forma de interpretarlas, o en muchos casos puede haber instrucciones que no sea capaz de entender.

Al elaborar la ruta de maquinado debe buscarse que la pieza se pueda elaborar en el menor número de procesos, es decir, que se debe evitar en la medida de lo posible la necesidad de desmontar y volver a montar la pieza para continuar con el maquinado, ya que esto puede modificar las referencias del sistema.

- **SIMULACIÓN:** En general los programas de ejecución elaborados por el software de manufactura y el post-procesador son difícilmente entendibles para una persona. Aún cuando sea estudiado por una persona con un amplio conocimiento y experiencia en el uso de herramientas de control numérico y código G, las secuencias pueden contener cientos o incluso miles de instrucciones, cuyo análisis resultaría sumamente tardado y cansado. En estos casos resulta sumamente útil el uso de programas de simulación que permitan apreciar en forma visual el comportamiento de una máquina herramienta ante las instrucciones generadas por el programa de CAM. Por lo regular este tipo de programas son capaces de detectar errores dentro de la secuencia y notificarlos para su corrección.
- **VERIFICACIÓN DE PROCESO DE MAQUINADO:** Antes de comenzar la fabricación de la pieza, es conveniente realizar algunas pruebas con la máquina para comprobar que no exista alguna instrucción que pueda ocasionar un impacto de la herramienta con algún otro elemento. Una primera verificación puede realizarse en vacío, regulando la velocidad de movimiento de la herramienta, esto garantiza que no exista ningún contacto entre la herramienta y cualquier otro elemento de la misma máquina. Una segunda prueba de verificación puede ser la fabricación de la pieza en algún otro material diferente al metal, como madera o unicel. Esta prueba permite corroborar que durante el proceso no existe ningún impacto a velocidad de avance rápido entre la herramienta y la pieza o los elementos de sujeción. Una vez tomadas estas precauciones se puede proceder a la fabricación de la pieza. El uso de máquinas de control numérico dentro de la instrumentación astronómica se debe a la alta precisión que pueden alcanzar, por lo que cualquier impacto fuerte entre la herramienta y algún elemento dentro de la máquina puede resultar en daños a la misma y por consecuencia un decremento en la calidad de los elementos mecánicos por fabricar.

- **FABRICACIÓN DE LA PIEZA:** Realizada la verificación del proceso, se puede proceder a la fabricación de la pieza en el material seleccionado. Para realizar esto el programa estará dentro del control de la máquina listo para correr, así que solo restará tomar las precauciones debidas para que la pieza se fabrique con la calidad requerida. Dentro de las precauciones que se deben tomar en cuenta están: la orientación correcta de los ejes de la máquina respecto a los establecidos durante el modelado de la pieza, establecer correctamente los orígenes del modelo respecto al de la máquina, colocar adecuadamente los elementos de sujeción para evitar que interfieran con la trayectoria de la máquina.
- **METROLOGÍA Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO:** Haciendo hincapié en una de las prioridades de la fabricación de elementos mecánicos para la instrumentación astronómica, es de suma importancia realizar pruebas de metrología a la pieza terminada para comprobar que sus dimensiones cumplen con las especificaciones requeridas. En muchos casos no pueden realizarse fácilmente estas pruebas, sin embargo la mejor forma de comprobar su funcionalidad es haciéndolas trabajar, y realizando pruebas de funcionamiento que comprueben que la pieza cumple con el objetivo para el que fue creada.

2.3.1 SOFTWARE

Un sistema CIM (Manufactura Integrada por Computadora) se define como la aplicación integrada de conceptos y técnicas de organización y gestión de la producción, junto con las nuevas tecnologías de diseño, fabricación e información, con el objeto de diseñar, fabricar y distribuir un producto acorde a las necesidades de mercado, con calidad, óptimo nivel de servicio y los menores costos.

Dentro de esta definición queda claro el concepto de integración en el desarrollo de sistemas de diseño y la producción que deben ir orientados al necesario intercambio de información entre los sistemas CAD (Diseño Asistido por Computadora, por sus siglas en inglés). y los sistemas CAM (Manufactura Asistida por Computadora), lo que conlleva a la necesaria interrelación entre los programas de computadora y las máquinas de control numérico.

Al igual que ocurre con el dibujo manual, con un programa de CAD se puede conseguir cualquier geometría, por muy compleja que sea, creando cuantos objetos gráficos básicos sean precisos, enlazados entre sí, hasta formar las figuras adecuadas al proyecto. Un programa de CAD es capaz de crear, modificar e imprimir figuras geométricas elementales (líneas, arcos, rectángulos, elipses, etc.), con propiedades individuales propias (color, tipo de línea, medidas, etc.).

El proceso general de trabajo se basa en dos fases: subdividir el dibujo en entidades gráficas básicas, y después, seleccionar la función que hay que ejecutar

e introducir los datos que solicita el programa, repitiendo esta acción cuantas veces sea preciso.

Lo primero que se debe comprender cuando trabajamos con un programa de CAD, es su lógica interna, es decir, su forma de entender la racionalización del proceso de diseño.

Podemos encontrar dos sistemas de trabajo en los programas de CAD. Uno es cuando ha sido diseñado para trabajar directamente con medidas y unidades reales, sin límites de espacio. En este caso no debemos preocuparnos de las escalas y los formatos de papel hasta que tengamos que trazar el dibujo. En cambio, si el programa ha sido creado para trabajar con formatos de papel y escalas desde el principio, aunque parezca más cómodo, implica un serio recorte de libertad. Es más lógico trabajar con dimensiones reales en el proceso de diseño y con escalas y papeles en el trazado. Existen programas que permiten los dos métodos.

Los programas de CAD emplean tres tipos de entidades:

Dibujos: Formados por múltiples figuras geométricas enlazadas entre sí, que utilizan la memoria necesaria para almacenar los datos (en forma vectorial) de cada una de las figuras que lo componen, pudiendo ser editados con todas las herramientas del programa.

Símbolos: Se insertan en el dibujo utilizando un punto de conexión, consumiendo sólo la memoria que utilice dicha conexión y que sólo pueden editarse con las funciones específicas del programa.

Imágenes: Se utilizan para guardar imágenes en formato de mapa de puntos correspondientes a vistas determinadas, con la única utilidad de ser visualizadas, o bien, para poder incorporar las imágenes como fondos de los diseños. Para conseguir el dibujo definitivo, los programas de CAD utilizan funciones capaces de crear figuras geométricas básicas, ya sean de dos dimensiones, como puntos, líneas rectas, líneas curvas, circunferencias, elipses, textos, etc., o bien, tridimensionales, como prismas, cilindros, esferas, etc.

El proceso es muy simple, el usuario activa la opción que le interesa, el programa solicita los datos necesarios para dibujar el objeto gráfico seleccionado, y cuando se introducen, crea la figura que corresponde a dichos datos. Los datos solicitados pueden ser introducidos con el cursor o tecleando los valores adecuados. Cuando los datos se introducen con el cursor, es importante que se pueda ver la solución provisional, según se mueve el cursor por la pantalla, mediante una visualización dinámica.

Cada figura básica debe ser definida por distintas combinaciones de datos, y así, los datos para definir una circunferencia pueden ser el centro y un punto de la

circunferencia, tres puntos de la circunferencia, los puntos extremos de un diámetro.

Las funciones de edición que posee cada programa de CAD utilizan los vectores de los objetos gráficos del dibujo para modificarlos, borrarlos, aumentarlos, reducirlos, moverlos, etc. por medio de operaciones matemáticas, manteniendo de esta forma, la exactitud que exige el dibujo técnico.

El proceso de la mayoría de las funciones de edición (mover, copiar, borrar, estirar, girar, etc.), precisa que se introduzcan los datos que marcan la modificación que se quiera ejecutar (distancias, puntos, ángulos, etc.) y que se seleccione la parte del dibujo que se desea editar. Según sea que se seleccionen las figuras antes o después de fijar los parámetros de la función invocada, se podrá o no visualizar dinámicamente el resultado de la operación de edición.

Existen programas de CAD que parten de geometrías planas para formar objetos sólidos, por medio de operaciones como extrusión y revolución. Siguiendo un procedimiento de dibujo plano, generación de sólidos, y aplicando operaciones booleanas se puede modelar cualquier objeto en 3 dimensiones, incluso definiendo propiedades de materiales.

Los programas CAM son aplicaciones que parten de los modelos generados en CAD para definir la metodología de fabricación de las piezas mediante la definición de procedimientos de maquinado en hervientas de control numérico.

Estos programas cuentan con librerías sobre cada tipo de operación que puede ser realizada por máquinas herramienta de control numérico, de tal forma que al definir las geometrías iniciales y finales que se desean obtener, el usuario puede elegir el tipo de operación más adecuado, las herramientas específicas para cada operación y los parámetros de corte. Algunos programas CAM pueden calcular dichos parámetros definiendo previamente las propiedades mecánicas del material, tanto de la pieza como de la herramienta y el acabado que se desea. Una vez que se han definido todas las variables, el programa diseña una ruta de maquinado, la cual puede ser también optimizada, y posteriormente genera una secuencia de comandos e instrucciones ordenadas que definen dicho procedimiento de maquinado.

Esta secuencia es generada por el programa utilizando un lenguaje propio y que no puede ser entendido por una Máquina de Control Numérico, por lo que es necesario el uso de un post-procesador, el cual traduce la secuencia de instrucciones al lenguaje estándar de las máquinas herramienta, el Código G.

Los post-procesadores son programas que deben ser diseñados en forma exclusiva para cada conjunto de programa CAM y Máquina de Control Numérico, ya que aunque se está utilizando un código estandarizado, cada máquina posee capacidades diferentes, por lo que pueden generarse instrucciones que la máquina no se capaz de ejecutar, o bien que no pueda interpretar adecuadamente.

2.3.2 MÁQUINAS AUTOMÁTICAS Y DE CONTROL NUMÉRICO.

El objetivo del control numérico es lograr la automatización en la fabricación de piezas. Deberá tenerse en consideración que la automatización no siempre implica producción masiva, la automatización puede observarse también como la manufactura de piezas que cumplen con especificaciones rigurosas.

Con las máquinas automáticas se logra lo siguiente:

- Reproducción de piezas similares
- Control de calidad en los acabados y en las dimensiones
- Menor participación de los operadores de las máquinas
- Control de la producción

En las operaciones de automatización se pueden incluir las siguientes acciones⁶

- Alimentación del material a procesar
- Procesamiento del material de acuerdo a las necesidades
- Transferencia de productos de unas máquinas a otras
- Inspección de trabajos
- Expulsión de trabajos terminados

Cuando una máquina puede recibir sus instrucciones por medio de un código numérico se dice que la máquina es de control numérico. Por lo regular estos códigos son aceptados por las máquinas herramientas por medio de tarjetas, cintas o programas de computadora.

Una máquina automática con o sin control numérico es una máquina que permite la fabricación, de manera repetida, de piezas con menor participación del hombre en la operación de la máquina. Su objeto no es fabricar muchas piezas sino fabricarlas sin que el hombre se preocupe por su operación.

Los centros de maquinado CNC son máquinas automáticas en las que su objetivo es la producción a gran velocidad de muchas piezas u objetos.

Las máquinas herramienta automáticas logran su objetivo de operación por medio de motores especiales que manejan a las piezas o a las herramientas de corte de acuerdo a las necesidades de la manufactura. Los motores ejecutan los movimientos que los operadores harían para producir las piezas. Las operaciones de inspección y auto corrección se llevan a cabo por medio de sensores, los que pueden ser mecánicos, eléctricos, electrónicos, sonoros, magnéticos, térmicos o de detección de luz.

⁶ Ruiz, Lino. **El control numérico computarizado en el desarrollo industrial.**

Los sistemas de control de las máquinas automáticas pueden ser de ciclo abierto o cerrado. Los primeros reciben las instrucciones y las ejecutan al pie de la letra, deteniendo su acción cuando los sensores reciben la información de que se ha cumplido con lo programado.

Los sistemas de bucle cerrado son aquellos que tienen retroalimentación, esto quiere decir que cuando los sensores reciben información diferente a la que deben estar recibiendo tratan de corregir la operación del motor.

Las máquinas de control numérico tienen una parte mecánica que es operada por motores, engranes, poleas, pistones y palancas. Estos aditamentos son alimentados por energía que es enviada por sensores, o dispositivos electrónicos que controlan en tiempo y en características la energía que va a generar la operación mecánica de las máquinas. Los sensores o dispositivos electrónicos son activados por señales que provienen de un controlador, el que puede ser programado directamente o por medio de una computadora con el software adecuado.

2.4 PROCESOS DE MANUFACTURA AVANZADA

La aplicación de los sistemas computacionales para el diseño y la manufactura han tenido un amplio desarrollo y se han extendido a diversos sectores productivos. Es importante conocer sus componentes y lo que implica su implementación en el medio industrial bajo la óptica de las medianas y pequeñas empresas de manufactura con altos niveles de calidad.

La manufactura integrada por computadora (CIM) reconoce que los diferentes pasos en el desarrollo de productos manufacturados están interrelacionados y pueden ser ajustados de manera más eficiente y efectiva con el uso de computadores.

A pesar de que CIM implica integrar todos los pasos de un proceso de manufactura, en la práctica muchas compañías han logrado grandes beneficios al implementar sistemas CIM parciales, es decir, en solo algunas áreas de la empresa. De hecho, se cree que aún no existe ninguna empresa que haya logrado una integración total del sistema⁷.

CIM incluye todas las actividades desde la percepción de la necesidad de un producto; la concepción, el diseño y el desarrollo del producto; también la producción, distribución y soporte del producto en uso. Toda acción envuelta en estas actividades usa datos, ya sean textuales, gráficos o numéricos. La computadora, hoy en día es la herramienta más importante en la manipulación de datos, ofrece la real posibilidad de integrar las ahora fragmentadas operaciones de

⁷ Jiménez, Ricardo. **Ingeniería de manufactura. CNC.**

manufactura en un sistema operativo único. Este acercamiento es lo que se denomina manufactura integrada por computadora.

En el sistema CIM existen cinco áreas fundamentales:

- Administración general del negocio
- Definición del producto y del proceso
- Planificación y control del proceso
- Automatización de la fábrica
- Administración de las fuentes de información

Cada una de estas cinco áreas es un compuesto de otros procesos más específicos de manufactura, los cuales han demostrado una afinidad entre ellos. La primera área rodea a las otras cuatro, y la quinta es la pieza fundamental del proceso.

La manufactura física de un producto envuelve un número de tecnologías interrelacionadas. Luego de haber usado el CAD y el CAE para crear y analizar el diseño y usando el CAM para organizar la metodología y controlar los pasos individuales de manufactura, la unidad de manufactura debe ahora controlar el procesamiento de los materiales que serán parte de un producto o una pieza.

Diferenciando de la etapa de diseño, la manufactura física está relacionada no solo con software, sino también con hardware; es por esto que el proceso se complica. Se han desarrollado nuevos tipos de máquinas, para así lograr mejores resultados.

La manufactura física puede ocupar tres tipos de subsistemas, los que se detallan a continuación⁸:

- Maquinaria para manufactura: Incluye máquinas herramientas, sistemas flexibles de manufactura (FMS), equipos de ensamblaje automático, líneas de transferencia y equipos de inspección. Los sistemas flexibles de manufactura son difíciles de diferenciar con los de celdas flexibles. En ambos existen pequeños grupos de máquinas herramientas unidas por equipamiento de manejo de materiales, todo controlado por computadoras bajo el mando de una computadora central, el cual puede procesar piezas en orden aleatorio. La implementación exitosa del concepto de celdas flexibles envuelve mejoras no solo al nivel de integrar físicamente el sistema, sino también al relacionar el flujo de información, lo cual le permite operar eficientemente el equipo que posee.
- Maquinaria auxiliar para manufactura: Es la maquinaria que mejora la eficiencia de las máquinas herramientas y equipo de ensamble coordinando

⁸ Universitas Miguel Hernández. **Control Numérico (I), Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas.**

los movimientos de materiales y la colocación y el desmonte de las piezas en las máquinas, de tal manera que el flujo productivo no se detenga. Entre estas máquinas se pueden destacar los sistemas de almacenamiento automático, los vehículos guiados automáticamente, y los robots, los cuales son una de las tecnologías más versátiles en la tecnología CIM.

- Controles automáticos: El control computacional permite a las máquinas comunicarse y coordinar sus actividades con otros sistemas basados en computadoras dentro del ambiente CIM. Existe una gran variedad de tipos de controles.

2.4.1 CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA.

El uso de nuevas tecnologías en la industria y la investigación es un recurso cada vez mas utilizado para mantenerse a un nivel de producción competitivo. Sin embargo el desarrollo tecnológico tan rápido impide en la mayoría de los casos que la nueva tecnología pueda ser asimilada en su totalidad y por lo tanto pueda ser aprovechada al máximo. Por esta razón deben ser tomados en cuenta varios factores como capacidades reales de crecimiento, expectativas, costo y tiempo.

Las principales razones por las cuales se recurre a la automatización de las plantas productivas son las siguientes:

- Mayor complejidad en los diseños.
- La diversidad en los productos hacen necesaria la flexibilización de los sistemas de manufactura.
- Existe cada vez una mayor exigencia en las precisiones.
- El costo de fabricación de moldes se hace cada vez mas elevado por lo que es necesario minimizar errores.
- El tiempo de entrega de los productos tiende a ser cada vez más reducido.

Para cubrir de forma satisfactoria las nuevas exigencias se han desarrollado básicamente cuatro formas de automatización industrial:

El Control Automático de Procesos. Se refiere usualmente al manejo de procesos caracterizados de diversos tipos de cambios (generalmente químicos y físicos); un ejemplo de esto lo podría ser el proceso de refinación de petróleo.

El Proceso Electrónico de Datos. Frecuentemente es relacionado con los sistemas de información, centros de cómputo, etc. Sin embargo en la actualidad también se considera dentro de esto la obtención, análisis y registros de datos a través de interfases y computadoras.

La Automatización Fija. Es aquella asociada al empleo de sistemas lógicos tales como los sistemas de relevadores y compuertas lógicas; sin embargo estos sistemas se han ido flexibilizando al introducir algunos elementos de programación como en el caso de los Controladores Lógicos Programables (PLC's).

Las máquinas de control numérico computarizado. Este tipo de control se ha aplicado con éxito a Máquinas de Herramientas de Control Numérico. Entre éstas podemos mencionar:

- Fresadoras.
- Tornos.
- Máquinas de electroerosionado.
- Máquinas de corte por hilo.

El mayor grado de flexibilidad en cuanto a automatización se refiere es el de los robots industriales que en forma más genérica se les denomina como Celdas de Manufactura Flexible.

Generalidades del CNC.

CNC se refiere al control numérico de máquinas, generalmente máquinas herramientas. Normalmente este tipo de control se ejerce a través de una computadora y la máquina está diseñada a fin de obedecer las instrucciones de un programa dado.

Esto se ejerce a través del siguiente proceso:

- Programación.
- Interfase.
- Máquinas herramientas CNC.

La interfase entre el programador y la máquina herramienta de control numérico se realiza a través de la unidad de control de la máquina. Ésta se transmitía originalmente en forma de cintas perforadas y codificadas y ahora en forma electrónica.

Características del CNC.

Las máquinas herramientas de control numérico poseen las siguientes ventajas respecto a las tradicionales⁹.

- Mayor precisión y mejor calidad de productos.
- Mayor uniformidad en los productos producidos.
- Un operario puede operar varias máquinas a la vez.
- Fácil procesamiento de productos de apariencia complicada.

⁹ Igual a la referencia 6

- Flexibilidad para el cambio en el diseño y en modelos en un tiempo corto.
- Fácil control de calidad.
- Reducción en costos de inventario, traslado y de fabricación en los modelos y abrazaderas.
- Es posible satisfacer pedidos urgentes.
- Se reduce la fatiga del operador.
- Mayor seguridad en las labores.
- Aumento del tiempo de trabajo en corte por maquinaria.
- Fácil control de acuerdo con el programa de producción lo cual facilita la competencia en el mercado.
- Fácil administración de la producción e inventario lo cual permite la determinación de objetivos o políticas de la empresa.
- Permite simular el proceso de corte a fin de verificar que este sea correcto.

Sin embargo no todo es ventajas y entre las desventajas podemos citar:

- Alto costo de la maquinaria.
- Falta de opciones o alternativas en caso de fallas.
- Es necesario programar en forma correcta la selección de las herramientas de corte y la secuencia de operación para un eficiente funcionamiento.
- Los costos de mantenimiento aumenta, ya que el sistema de control es más complicado y surge la necesidad de entrenar al personal de servicio y operación.
- Es necesario mantener un gran volumen de producción a fin de lograr una mayor eficiencia de la capacidad instalada.

El uso del CNC requiere también de una adecuada capacitación de los operarios, por lo cual es necesario que éstos cuenten con ciertas aptitudes y conocimientos.

- El operador de CNC deberá tener conocimientos en geometría, álgebra y trigonometría.
- Deberá conocer sobre la selección y diseño de la herramienta de corte.
- Dominar los métodos de sujeción.
- Uso de instrumentos de medición y conocimientos de metrología.
- Interpretación de Planos.
- Conocimientos de la estructura de la máquina CNC.
- Conocimientos del proceso de transformación mecánica.
- Conocimientos de la programación CNC.
- Conocimientos del Mantenimiento y operación CNC.
- Conocimientos generales de programación y computadores personales.

Uso del CNC.

El uso del CNC se encuentra limitado principalmente por el alto costo de la infraestructura requerida, pero también por el proceso de adaptación que requiere físicamente la planta o taller, además del personal que en la mayoría de los casos debe pasar por un proceso de capacitación, lo que por supuesto significa cierto costo adicional no solo en dinero sino también en tiempo.

En la mayoría de los casos la transformación debe ser evaluada no solo desde el punto de vista económico sino también desde el punto de vista práctico, pues si el personal disponible no es susceptible de recibir la capacitación necesaria, el aprovechamiento puede ser poco o incluso nulo.

2.5 EVOLUCIÓN CAD/CAM

La automatización de los procesos industriales a través de los años ha dado lugar a un avance espectacular de la industria. Todo ello ha sido posible gracias a una serie de factores entre los que se encuentran las nuevas tecnologías en el campo mecánico, la introducción de los computadores, y sobre todo el control y la regulación de sistemas y procesos.

La incorporación de las computadoras en la producción es el elemento puente que está permitiendo lograr la automatización integral de los procesos industriales. La aparición de la microelectrónica y de los microprocesadores ha facilitado el desarrollo de técnicas de control complejas, la robotización, la implementación de sistemas de gobierno y la planificación. Todos estos elementos llevan consigo la reducción de costos, el aumento de la productividad y la mejora de calidad del producto.

La primera época de la automatización estuvo marcada por la aplicación de dispositivos capaces de controlar una secuencia de operaciones y el comienzo del estudio sobre la regulación automática. Además, a nivel de empresa, se desarrolló el concepto de producción continua tanto para la fabricación de productos típicamente continuos, como para los de tipo discreto.

La segunda época, desde la 2da. Guerra Mundial hasta nuestros días, se ha caracterizado por la aparición de la microelectrónica y con ello la de las computadoras, y a su vez por el gran avance de la Teoría del Control. También en ésta época, la introducción de los robots industriales en la fabricación de series pequeñas y medianas ha incrementado sustancialmente la flexibilidad y autonomía de la producción.

El diseño y fabricación con ayuda de computadoras, comúnmente llamado CAD/CAM, es una tecnología que podría descomponerse en numerosas disciplinas pero que normalmente, abarca el diseño gráfico, el manejo de bases de

datos para el diseño y la fabricación, control numérico de máquinas herramientas, robótica y visión computarizada.

Históricamente los CAD comenzaron como una ingeniería tecnológica computarizada, mientras los CAM eran una tecnología semiautomática para el control de máquinas de forma numérica.

Los fabricantes del sector CAD siempre han sido punteros en aprovechar la tecnología informática más avanzada. Técnicas como el diseño vectorial, la organización de los proyectos en capas, la medición automatizada, el trabajo directo con objetos y procedimientos, la ampliación de los programas con extensiones especializadas o el diseño con modelos 3D, tienen su origen en aplicaciones de CAD, aunque en la actualidad se pueden encontrar en otros tipos de programas.

La evolución y desarrollo de las aplicaciones CAD han estado íntimamente relacionados con los avances del sector informático. El nacimiento del CAD, lo podemos situar al final periodo de las computadoras de primera generación, pero tiene su pleno desarrollo a partir de la aparición de las computadoras de cuarta generación en que aparecen los circuitos de alta escala de integración (LSI) y ya están desarrollados plenamente los lenguajes de alto nivel.

Es importante destacar el gran interés estratégico que desde el principio ha tenido el CAD para las empresas, por el impacto enorme en la productividad. Las grandes empresas desde el principio han apostado por el CAD y ello supone importantes inversiones, que lógicamente potencian y convierten el CAD en un producto estratégico con un gran mercado¹⁰.

2.6 DISEÑO CONCURRENTE

Se puede definir el Diseño Concurrente, como una metodología en la cual el diseño del producto y el proceso de fabricación están estrechamente interrelacionados. Se trata de realizar todas las actividades implicadas en el desarrollo de un nuevo producto al mismo tiempo, esto es, de manera paralela. Pretende que los desarrolladores, desde un principio, tengan en cuenta todos los elementos del ciclo de vida del producto, desde el diseño conceptual, hasta su disponibilidad incluyendo calidad, costos y necesidades de los usuarios.

Sustituye el clásico entorno de trabajo en el desarrollo y fabricación del producto basado en un diagrama secuencial de actuación de los distintos departamentos, por un trabajo concurrente, simultáneo, con un equipo que comparte la misma información y dispone de herramientas análogas desde que se inicia el proceso de diseño¹¹.

¹⁰ Argote Vea – Murguía. **Diseño Asistido por ordenador.**

¹¹ Mesa Plaza Juan Alberto. **Importancia de los programas CAD en la tecnología de diseño industrial.**

La ingeniería concurrente requiere de sistemas de gestión de datos de producto que permitan a los diseñadores e ingenieros acceder y modificar la información relativa a diseño y fabricación de modo integrado. Las tecnologías de apoyo a la función de diseño e ingeniería son un conjunto de herramientas (hardware y software) y procedimientos desarrollados para recoger y canalizar las necesidades de los diseñadores e ingenieros, de modo que permitan abordar el Diseño de un producto de una forma eficiente, relacionando correctamente todos los aspectos y personas que intervienen en dicho diseño y estableciendo así el primer eslabón de la Ingeniería Concurrente. Además, para el éxito de la Ingeniería Concurrente, es importante la introducción de cambios organizacionales y tecnológicos en las compañías.

Las ventajas más relevantes que la ingeniería concurrente genera son¹²:

- Acorta los tiempos de desarrollo de los productos.
- Menores cambios de ingeniería.
- Eleva la productividad.
- Aumenta la flexibilidad.
- Mejor utilización de los recursos.
- Productos de alta calidad.
- Reducción en los costos de desarrollo de los productos.
- Mejoras en calidad.

¹² García Flores, Rodolfo. **Ingeniería concurrente y Tecnologías de la información.**

3 MARCO TEÓRICO

3.1 FUNDAMENTOS DE LOS PROGRAMAS CAD.

El modelo geométrico contiene toda la información necesaria para representar el objeto que se está diseñando, esto es, para realizar todas las operaciones requeridas sobre el modelo: editarlo, visualizarlo, realizar cálculos y simulaciones. En esencia, el modelo geométrico es simplemente un conjunto de datos referentes a la geometría, estructura y propiedades del objeto. Los datos que contenga dependerán de la naturaleza del objeto a diseñar. Además, al momento de diseñar un modelo se debe tener en cuenta que la estructura deberá servir para realizar determinadas operaciones antes mencionadas: edición, visualización, cálculo de propiedades, etc.

En el proceso de diseño se utilizan representaciones gráficas de los objetos a diseñar. En muchos casos estas representaciones son imágenes sintéticas del objeto a diseñar. En estos casos el modelo debe describir la geometría del objeto de la forma más precisa posible. No obstante, en otras situaciones, la información sobre la que se trabaja es un esquema del objeto. En estos casos la información contenida en el modelo debe permitir generar el esquema, pero la geometría del esquema en si no es relevante.

Con frecuencia, determinados símbolos aparecen reiteradamente en el modelo, especialmente en esquemas. En estos casos es útil almacenar la definición geométrica del símbolo una única vez, referenciandola cada vez que se *coloque, o instancie*, éste en el esquema.

El modelo geométrico estaría formado por un lado por la definición de los símbolos, y por otro, por la información de donde se colocan estos en un diseño concreto. Desde el punto de vista del usuario, los símbolos son elementos prediseñados que puede seleccionar, por ejemplo, mediante un menú.

Transformaciones geométricas

Un punto se identifica por sus coordenadas, que están referidas a un sistema coordinado conocido. El sistema de coordenadas utilizado habitualmente es el cartesiano, en el que los ejes son perpendiculares. Especificar un sistema de

coordenadas implica determinar donde se encuentra su origen y cual es la dirección de sus ejes. Lógicamente si cambiamos el sistema de coordenadas cambiará el valor de las coordenadas de los puntos. Las coordenadas de un punto son la combinación de distancias de sus proyecciones sobre los ejes al origen. En un espacio tridimensional los puntos se representan mediante una terna (x,y,z) .

A los puntos y a los elementos geométricos se les pueden aplicar transformaciones geométricas, para modificar, por ejemplo, su posición, orientación o tamaño. Las transformaciones geométricas más utilizadas son:

Escalado, que modifica el tamaño de un elemento. Matemáticamente el resultado de aplicar un escalado con factores S_x, S_y, S_z a un punto (x,y,z) es:

$$(x', y', z') = S_{S_x, S_y, S_z}(x, y, z) = (xS_x, yS_y, zS_z) \quad \text{Ec. 3.1}$$

Rotación, que modifica la orientación del elemento. En dos dimensiones una rotación se especifica por el centro de rotación (que es un punto) y el ángulo rotado (se suelen considerar positivos los ángulos medidos en sentido antihorario). La ecuación de una rotación respecto al origen de ángulo a es:

$$(x', y') = R_a(x, y) = (x \cos(a) - y \sin(a), x \sin(a) + y \cos(a)) \quad \text{Ec. 3.2}$$

En 3D los objetos se rotan respecto a un eje. Si el eje pasa por el origen de coordenadas el eje se puede indicar simplemente como un vector.

Traslación. Una traslación desplaza al elemento al que se le aplica. La traslación se especifica simplemente por el vector que se añade a los puntos:

$$(x', y', z') = T_{T_x, T_y, T_z}(x, y, z) = (x + T_x, y + T_y, z + T_z) \quad \text{Ec. 3.3}$$

De la misma forma en que cambiamos las coordenadas de los objetos aplicándoles transformaciones geométricas, podemos cambiar el sistema de coordenadas; esto es, modificamos nuestro sistema de referencia, con lo que las coordenadas de todos los elementos cambiarán de valor. El efecto de aplicar una transformación al sistema de coordenadas es el inverso al obtenido si se aplica a los objetos. Esta relación nos permite ver las transformaciones aplicadas a los objetos como cambios en el sistema de coordenadas.

Representación de transformaciones geométricas

Las transformaciones geométricas se representan mediante matrices cuadradas de dimensión mayor en uno a la del espacio en el que se aplican. Esto permite representar con la misma notación todas las transformaciones geométricas, incluyendo las traslaciones y las transformaciones de perspectiva, que no son transformaciones afines. Para transformar los puntos, en un espacio de dimensión

n, se pasan estos al espacio de dimensión n+1 (que se suele denominar espacio en coordenadas homogéneas), añadiendo la última componente (denominada homogénea) con valor 1. Seguidamente se multiplica el punto por la matriz, y finalmente se proyecta el resultado en el espacio de dimensión n, dividiendo todas las coordenadas por el valor resultante de la componente homogénea, que no tiene por que ser uno. Esquemáticamente, en 3D, el proceso es el siguiente:

1.- Pasar a coordenadas homogéneas

$$(x, y, z) \rightarrow (x, y, z, 1) \quad \text{Ec. 3.4}$$

2.- Aplicar transformación

$$(x', y', z', w') = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 3.5}$$

3.- Proyectar al espacio 3D

$$(x'', y'', z'') = (x'/w', y'/w', z'/w') \quad \text{Ec. 3.6}$$

Normalmente no es necesario modificar las componentes de la matriz de transformación directamente. Cualquier librería gráfica calcula internamente las matrices de transformación a partir de parámetros, como el eje y ángulo de giro.

Trabajar de esta forma permite, entre otras cosas concatenar las transformaciones geométricas. Esto es, en el caso de que a un conjunto de puntos se le deba aplicar una secuencia de transformaciones, se pueden multiplicar previamente las matrices, aplicando la transformación resultante a los puntos. De este modo se aplica una única transformación a cada punto. Esta estrategia es ampliamente usada por los sistemas gráficos, componiendo incluso las transformaciones de modelado con las de visualización.

Representación de curvas y superficies.

Las curvas y superficies poseen una representación matemática precisa, bien estudiada y suficientemente flexible. No obstante, y salvo raras excepciones, no es factible, en un sistema CAD, representar una curva, o superficie, mediante una ecuación, debido fundamentalmente a la necesidad de editar la representación. Comenzaremos estudiando su representación matemática, para justificar la representación computacional que se hace en sistemas CAD. A nivel matemático, las curvas y superficies se pueden representar como ecuaciones de varias formas, atendiendo a como aparezcan las distintas variables involucradas.

Ecuaciones explícitas, en las que aparece de forma explícita una de las variables en función de las otras dos. Estas expresiones tienen alguna de las formas siguientes:

$$z = f(x, y) \quad \text{Superficie.} \quad \text{Ec. 3.7}$$

$$y = f_1(x) \quad z = f_2(x) \quad \text{Curva en el espacio.} \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$y = f(x) \quad \text{Curva en un plano.} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Estas expresiones se suelen utilizar para curvas y superficies univaluadas, como las que se suelen obtener como resultado de procesos de medida experimental. La evaluación de la superficie es más fácil. Sin embargo es difícil utilizarlas para casos generales, dado que las superficies que nos encontramos en la realidad, y que queremos modelar no serán, normalmente, univaluadas.

Ecuaciones implícitas, expresadas como una ecuación de las variables igualada a cero. En ellas no aparece ninguna variable despejada, por lo que su evaluación puede ser compleja. La expresión tendrá una de las formas siguientes:

$$f(x, y) = 0 \quad \text{Ec. 3.10}$$

$$f(x, y, z) = 0 \quad \text{Ec. 3.11}$$

Un caso notable de curvas y superficies que se pueden expresar usando ecuaciones implícitas son las cuadráticas. Por ejemplo un círculo de radio unitario se puede expresar como

$$x^2 + y^2 - 1 = 0 \quad \text{Ec. 3.12}$$

Las ecuaciones implícitas poseen la ventaja de ser orientables, es decir, es factible determinar hacia que lado de la superficie, o curva, se encuentra un punto sustituyendo sus coordenadas en la ecuación. Por el contrario, las ecuaciones implícitas pueden ser difíciles de evaluar. A partir de una expresión explícita se puede obtener una implícita. Obviamente, el recíproco no es siempre cierto.

Ecuaciones paramétricas. La curva o superficie se describe en base a un conjunto de parámetros que la recorren, como un conjunto de ecuaciones que permiten obtener cada una de las coordenadas a medida que el parámetro evoluciona sobre el elemento. Una curva se expresa usando un parámetro, u , que toma valores en un intervalo predeterminado, y dos o tres ecuaciones (según que se defina en el plano o el espacio). Así, una curva en el plano se define mediante el par de ecuaciones:

$$\begin{aligned} x &= f_1(u) \\ Y &= f_2(u) \end{aligned} \quad u \in [u_1, u_2] \quad \text{Ec. 3.13}$$

Una superficie se describe en base a dos parámetros, (u, v) , que describen dos direcciones ortogonales sobre ella, y a tres ecuaciones que expresan las coordenadas en base a estos parámetros:

$$\begin{aligned} x &= f_1(u, v) \\ y &= f_2(u, v) \\ z &= f_3(u, v) \end{aligned} \quad u \in [u_1, u_2] \quad v \in [v_1, v_2] \quad \text{Ec. 3.14}$$

Modificando los valores de los parámetros se recorre la superficie, obteniéndose las coordenadas de los puntos que están sobre ella. Las expresiones paramétricas presentan la ventaja de ser flexibles, aunque no son orientables. Por otra parte, cualquier expresión explícita se puede poner, trivialmente, en forma paramétrica. En aplicaciones de diseño se suelen utilizar expresiones *paramétricas* por su generalidad.

No obstante, no es suficiente con la utilización de una expresión paramétrica. La necesidad de editar la curva, o superficie, obligaría a modificar, tanto los intervalos de variación de los parámetros como las funciones que describen las coordenadas (f_1, f_2, f_3) . Esto último no es factible, en un caso general, a menos que se fije la forma de estas funciones, haciendo que su modificación implique el cambio de un número reducido de parámetros cuyo efecto en la forma de la curva sea predecible. Una forma de conseguir esto es utilizar funciones polinómicas:

$$X(u) = X_o + X_1u + X_2u^2 + \dots + X_nu^n \quad \text{Ec. 3.15}$$

El conjunto de curvas que se pueden generar depende del grado de los polinomios usados. En cualquier caso, la especificación de una curva se hace con una secuencia finita de parámetros. No obstante, eso no es suficiente para el diseño de curvas, es necesario además, que los parámetros que introduzca el usuario sean relevantes para él, es decir, que el usuario pueda intuir el valor de los parámetros a partir de la forma de la curva. La relación entre la forma de la curva y los coeficientes del polinomio¹³.

3.1.1 PROCESO DE DISEÑO

En el ciclo de diseño de una curva, o superficie, el usuario solo trabaja con los puntos de control, que son en sí la representación de la curva, o superficie, en el modelo. Por lo tanto, en el proceso de diseño el usuario seleccionará y modificará los puntos de control, hasta que se obtenga la curva o superficie deseada. El proceso puede comenzar con valores predeterminados asignados a los puntos de control.

¹³ Torres, J.C. **Diseño Asistido por Ordenador. Tema 2 Modelado Geométrico**

En este proceso, el dibujo de la curva debe realizarse repetidas veces, al menos cada vez que el usuario mueve un punto, e idealmente mientras éste mueve los puntos con el dispositivo de entrada (durante el ciclo de realimentación). Por este motivo, cuando la máquina no es suficientemente potente, la visualización durante la edición se simplifica, aproximando la superficie como una malla de curvas.

3.1.2 DIBUJO DE LAS CURVAS.

Es necesario visualizar los elementos generados. El método más simple para visualizar una curva es el basado en la aproximación del segmento por una poligonal (Fig. 3.1). Para ello basta con evaluar la curva en una secuencia de valores del parámetro, dibujando la poligonal que une los puntos así obtenidos. Si el conjunto de puntos generados es suficientemente grande, no se apreciará la aproximación. Debe tenerse en cuenta que el que los puntos en coordenadas paramétricas estén equiespaciados no implican que los estén los puntos evaluados en coordenadas reales. Existen métodos adaptativos, basados en la elección de los vértices de la poligonal en función de la curvatura o de la distancia al último punto. En cualquier caso, lo que se aproxima es la imagen y no la representación de la curva en sí.



Fig. 3.1 Aproximación de una curva por una poligonal.

3.1.3 VISUALIZACIÓN DE SUPERFICIES.

El método descrito previamente para dibujar una curva nos permitirá aproximar una superficie paramétrica por una malla de triángulos. Para ello evaluaremos la superficie en un subconjunto de puntos del espacio paramétrico distribuidos en una rejilla. Por cada cuatro puntos vecinos se forman dos triángulos. Cada trozo de superficie que se aproxima mediante dos triángulos se denomina parche. La calidad de la imagen depende del número de parches, y también de como se dibujen estos. La figura 3.2 muestra la misma superficie dibujada con un mayor número de parches y suavizando el color dentro de cada parche.

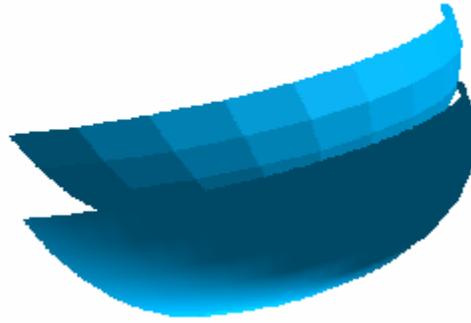


Fig. 3.2 Una misma superficie con diferente tamaño de parche.

Tal como indicamos anteriormente, una superficie se puede también visualizar dibujando una familia de curvas contenidas dentro de ésta. Las curvas se obtienen normalmente fijando el valor de uno de los parámetros (denominándose en este caso isoparamétricas). La figura 3.3 muestra la misma superficie anterior dibujada como un conjunto de curvas isoparamétricas.

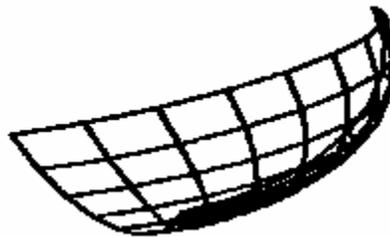


Fig. 3.3 Superficie formada por curvas isoparamétricas.

3.1.4 MÉTODOS DE DISEÑO

La mayor parte de los métodos de diseño de curvas y superficies se basan en la utilización de puntos de control a partir de los cuales se define ésta como un promedio de los puntos de control:

$$P(u) = \sum_{i=1}^n P_i \cdot B_i(u) \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde P_i son los puntos de control y $B_i(u)$ son funciones de forma, dadas en forma paramétrica.

Existen diversos métodos de diseño de curvas, con diferentes características. Entre estas, cabe destacar el *carácter* del método (que puede ser *local* o *global*) y el comportamiento respecto a los puntos de control (interpolante o no). Un método tiene carácter local cuando la modificación de un punto de control afecta solamente a la forma de la curva, o superficie, en las proximidades del punto de control. Por el contrario, en un método global, la modificación de un punto de control afecta a toda la curva, o superficie. Es más fácil editar una curva o

superficie utilizando un método local, ya que permite ajustar la forma de la curva parte por parte.

Decimos que un método interpola a los puntos de control cuando el elemento generado (curva o superficie) pasa por ellos. Habitualmente es necesario usar polinomios continuos a trozos, para conseguir métodos de diseño local, lo que influye en el grado de continuidad de la curva. El grado de continuidad indica el número de veces que se puede derivar su ecuación obteniendo una función continua.

Geoméricamente esto está relacionado con la continuidad del elemento. Una curva con continuidad C^0 es continua, pero su pendiente no. Si la continuidad es C^1 la curva y su pendiente son continuas.

La continuidad depende de la forma en que está parametrizada la curva. Para que la curva sea continua en un punto, sus vectores tangentes a izquierda y derecha deben coincidir. No obstante, la magnitud del vector tangente no influye en la apreciación que podemos hacer de continuidad en el punto. Por este motivo, se suele hablar de continuidad geométrica, notada con G , en lugar de continuidad matemática. Una curva tiene continuidad geométrica en un punto si las tangentes a izquierda y derecha tienen la misma dirección, independientemente de la magnitud del vector tangente. Por este motivo, la continuidad matemática implica continuidad geométrica (salvo el caso especial en que el vector tangente es nulo). Normalmente se requiere como mínimo continuidad G^1 y con frecuencia G^2 .

También se debe tener en cuenta la influencia del grado del polinomio de las funciones de forma. Cuando mayor sea el grado del polinomio más restricciones podremos aplicar a la curva (ya que hay más coeficientes), pero también será mayor oscilación de ésta, y más costoso su cálculo.¹⁴

3.2 FUNDAMENTOS DE OPERACIÓN DEL CNC

3.2.1 CARACTERÍSTICAS.

El control numérico es una forma de automatización programable en la cual el equipo de proceso se controla a través de números, letras y otros símbolos. Estos números, letras y símbolos están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para desarrollar una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión cambia, se cambia el programa de instrucciones. La capacidad de cambiar el programa hace que el control numérico sea apropiado para volúmenes de producción bajos o medios, dado que es más fácil escribir nuevos programas que realizar cambios en los equipos de procesado.

¹⁴ Torres J.C. *Diseño Asistido por ordenador. Tema 3 Diseño de curvas y superficies.*

La aplicación del control numérico abarca gran variedad de procesos. Aquí se dividen las aplicaciones en dos categorías, aplicaciones con máquina herramienta, tales como el taladrado, laminado, torneado, etc., y aplicaciones sin máquina herramienta, tales como el ensamblaje, trazado e inspección. El principio de operación común de todas las aplicaciones del control numérico es el control de la posición relativa de una herramienta o elemento de procesado con respecto al objeto a procesar.

Los sistemas de control numérico son aquellos que, en base a una serie de instrucciones codificadas (programa), gobiernan todas las acciones de una máquina o mecanismo al que le ha sido aplicado haciendo que éste desarrolle una secuencia de operaciones y movimientos en el orden previamente establecido por el programador.

Las acciones de una máquina que se controlan a través de estos sistemas son:

- Movimientos de los carros y cabezal.
- El valor y sentido de las velocidades de avance y de corte.
- Los cambios de herramientas y piezas por maquinar.
- Las condiciones de funcionamiento de la máquina (bloqueos, refrigerantes, lubricación, etc.).
- El estado de funcionamiento de la máquina (detección de fallas).
- Coordinación y control de las propias acciones del sistema (flujos de información, sintaxis de programación, diagnóstico de funcionamiento, comunicación con otros dispositivos).

Para todo proceso se requieren tres elementos que se deben conjugar:

- El programa, que contiene la información precisa para que se desarrollen las operaciones. El programa se escribe en un lenguaje específico compuesto por letras y números.
- El control numérico, que debe interpretar las instrucciones contenidas en el programa, convertirlas en señales que accionen los dispositivos de las máquinas y comprobar su resultado.
- El equipo de proceso que realiza el trabajo final, compuesto por la máquina herramienta y los motores y controles de movimiento.

Debido a las diferencias que existen entre las máquinas que son susceptibles de ser gobernadas por un control numérico, a las dificultades técnicas en el diseño de los controladores y a condicionantes de tipo económico, han aparecido diversos tipos de control numérico que pueden clasificarse de varias maneras:

Clasificación según el sistema de referencia.

Para programar los sistemas de control numérico es necesario establecer un sistema de referencia estándar en el que puedan ser especificadas las diferentes posiciones relativas de la máquina herramienta con respecto al trabajo a realizar.

El propósito de los sistemas de referencia es localizar la herramienta en relación con la pieza a ser maquinada. Dependiendo del tipo de máquina de control numérico el programador puede tener varias opciones para especificar esta localización.

En el caso de sistemas de referencia fijos, el origen siempre se localiza en la misma posición con respecto a la mesa de trabajo. Normalmente, esta posición es la esquina inferior izquierda de la mesa de trabajo y todas las posiciones se localizan a lo largo de los ejes XY positivos y relativos a ese punto fijo de referencia.

En el caso de sistemas de referencia flotante, más comunes en las modernas máquinas de control numérico, permiten que el operador fije el origen del sistema en cualquier posición de la mesa de trabajo. A esta característica se le llama origen flotante. El programador es el que decide donde debe estar situado el origen. Esta decisión corresponde a la conveniencia de la parte de programación. Por ejemplo, la pieza a trabajar puede tener una simetría y convendría situar el origen en el centro de esa simetría. La localización de esta referencia se realiza al principio de la operación, el operador mueve la herramienta mediante control manual al punto que se desea como origen del sistema de referencia e indica a la máquina que en ese punto se encuentra el origen.

Clasificación según el control de trayectorias

Según el mecanismo bajo el cual se controla el movimiento de la herramienta en el espacio coordinado se puede clasificar de la siguiente forma:

- CN punto a punto
- CN paraxial
- CN continuo o de contorneado

El control numérico punto a punto controla únicamente el posicionado de la herramienta en los puntos donde debe ser realizada una operación de maquinado realizando los desplazamientos en vacío según trayectorias paralelas a los ejes o a 45 grados sin ninguna coordinación entre los sistemas de control de cada uno. Se utiliza fundamentalmente en máquinas taladradoras, punzonadoras, punteadoras y en algunas mandrinadoras. La coordinación entre ejes no es necesaria porque lo importante es alcanzar un punto dado en el mínimo tiempo y con la máxima precisión posible. El maquinado no comienza hasta que se han

alcanzado todas las cotas en los diversos ejes para dicho punto. El camino seguido para ir de un punto a otro no importa con tal de que no existan colisiones.

El control numérico paraxial permite controlar la posición y trayectoria durante el maquinado del elemento desplazable, siempre que esta última sea paralela a los ejes de la máquina y, en algunos casos, a 45 grados. En principio es aplicable a cualquier tipo de máquina herramienta. Su uso en la práctica se reduce al gobierno de taladradoras y fresadoras.

El control numérico de contorneado o continuo fue el primero en aparecer para después quedar en un segundo plano frente a los sistemas punto a punto y paraxiales y, posteriormente, con los avances en la tecnología electrónica e informática, desplazar a los otros dos sistemas siendo el más utilizado en la mayor parte de las máquinas herramienta.

Los sistemas de control numérico de contorneado controlan no sólo la posición final de la herramienta sino el movimiento en cada instante de los ejes y coordinan su movimiento usando técnicas de interpolación lineal, circular y parabólica. La denominación de continuo viene dada por su capacidad de un control continuo de la trayectoria de la herramienta durante el mecanizado, y de contorneado por la posibilidad de realizar trayectorias definidas matemáticamente de formas cualesquiera obtenidas por aproximación.

Este tipo de control de contorneado se aplica a tornos, fresadoras, centros de maquinado y, en general, a cualquier tipo de máquina que deba realizar mecanizados según una trayectoria más o menos compleja.

Según el tipo de accionamiento

Según el tipo de accionamiento pueden ser: hidráulicos, eléctricos o neumáticos.

Según el ciclo de control

El control del sistema se puede realizar de dos formas: en ciclo cerrado, donde a través de sensores se mide el valor a la salida, y se compara en todo instante con un valor de referencia proporcionando una adecuada señal de control; o en ciclo abierto donde no existe tal realimentación.

Clasificación según la tecnología de control

Si atendemos a la clasificación según la forma física de realizar el control encontramos los siguientes tipos de control numérico.:

- Control Numérico (CN)
- Control Numérico Computerizado (CNC)
- Control Numérico Adaptativo (CNA)

La denominación de Control Numérico (CN) se utiliza para designar aquellos controles donde cada una de las funciones que realiza el control son implementadas por un circuito electrónico específico únicamente destinado a este fin, realizándose la interconexión entre ellos con lógica cableada.

Sus características principales son las de trabajar sin memoria, con una cinta perforada como medio de introducción del programa que se ejecuta de forma secuencial. Los equipos de control son de gran volumen y difícil mantenimiento.

El tipo de controles basados en circuitos específicos y lógica cableada (CN) ha caído en desuso con la aparición de los Controles Numéricos Computerizados (CNC), basados en el uso de uno o varios microprocesadores que sustituyen a los circuitos de lógica cableada de los sistemas CN, poco fiables y de gran tamaño.

Los CNC incluyen una memoria interna de semiconductores que permite el almacenamiento del programa, de los datos de la máquina y de las compensaciones de las herramientas. Por otra parte, incorporan un teclado que facilita la comunicación y el grado de interactividad con el operario y permiten la ruptura de la secuencia de los programas, la incorporación de subrutinas, los saltos condicionales y la programación paramétrica. De esta forma, se facilita una programación más estructurada y fácil de aprender. Por otra parte, se trata de equipos compactos con circuitos integrados, lo que aumenta el grado de fiabilidad del control y permite su instalación en espacios reducidos y con un nivel de ruido elevado.

Actualmente, todos los controles que se fabrican son del tipo CNC, quedando reservado el término CN para una referencia genérica sobre la tecnología, de tal forma que se utiliza la denominación CN (Control Numérico) para hacer referencia a todas las máquinas de control numérico.

El Control Numérico Adaptativo (CNA) es la tendencia actual de los controles. En ellos el controlador detecta las características del mecanizado que está realizando y en función de ellas optimiza las velocidades de corte y los avances; en otras palabras, adapta las condiciones teóricas o programadas del mecanizado a las características reales del mismo. Para ello, hace uso de sistemas sensoriales de fuerza y deformación en la herramienta, par, temperatura de corte, vibraciones, potencia, etc.

Las razones de la introducción del CNA residen en la variación de las condiciones de corte durante el maquinado por varios motivos:

- Geometría variable de la sección de corte (profundidad y anchura) por la complejidad de la superficie a mecanizar, típico de las operaciones de contorno.
- Variaciones en la dureza y en la maquinabilidad de los materiales.
- Desgaste de las herramientas, incrementándose el esfuerzo de corte.

Características de las Máquinas herramienta de Control Numérico (MHCN)

Las condiciones de funcionamiento de las máquinas de CN y sus requerimientos de precisión y fiabilidad obligan a una tecnología de fabricación distinta a la empleada para las máquinas convencionales. Los puntos más importantes en los que hay que poner atención son los siguientes:

Mecanismos de posicionamiento: Los mecanismos de posicionamiento tienen como objeto conducir los dispositivos móviles (carros, husillos, etc.) automáticamente a una posición determinada según una trayectoria especificada con unas condiciones adecuadas de precisión, velocidad y aceleración.

Los componentes básicos de los mecanismos de posicionamiento son los accionadores y el propio sistema de control de posicionamiento. Por accionadores se entienden aquellos dispositivos que permiten realizar algún movimiento (motores, válvulas, etc.), incluyendo todos los dispositivos asociados de regulación y amplificación de la señal de mando. El control de posicionamiento de una máquina herramienta de CN puede realizarse mediante el uso de dos sistemas de servomecanismos de posicionado, Sistemas de ciclo cerrado o de ciclo abierto

En los sistemas de ciclo cerrado las órdenes suministradas a los motores proceden de las informaciones enviadas por la unidad de cálculo del CN y de los datos suministrados por el sistema de medida de la posición real y de la velocidad real montado sobre la máquina. El principio de los servomecanismos de posición en ciclo cerrado consiste en comparar en todo momento la posición del móvil con la orden dada. La señal enviada al accionador es función de la relación entre la posición y la orden.

Usualmente se utilizan dos ciclos de retorno de información, uno para el control de posición y otro para el control de la velocidad de desplazamiento del móvil, debido a que antes de llegar a la cota deseada se disminuye la velocidad para alcanzar el posicionado correcto. Para la mayoría de los accionamientos de las máquinas herramienta de control numérico con control de posicionamiento en ciclo cerrado se utilizan motores de corriente continua de imán permanente y de baja inercia debido a su funcionamiento flexible, con aceleraciones rápidas y regulaciones de velocidad proporcionales a la tensión. La tendencia actual, sin embargo, es hacia la incorporación de motores de corriente alterna a los sistemas de accionamiento por sus mejores prestaciones y menor mantenimiento.

En los sistemas de ciclo abierto se elimina el retorno de la información de posición y velocidad del móvil. Se utilizan forzosamente motores de pasos para el movimiento de los ejes, debido a que un motor de este tipo tiene un rotor que efectúa una rotación de un ángulo determinado cada vez que recibe un impulso eléctrico.

El motor de pasos permite el control de desplazamientos y velocidades de manera muy simple. Se alimenta con trenes de impulsos eléctricos cuyo número tiene relación con la posición que se desea alcanzar, y su cadencia (número de impulsos por unidad de tiempo) establece la velocidad de giro.

Este tipo de sistemas se utiliza en general para aquellas máquinas en las que no es necesario controlar en todo momento la velocidad de avance y la posición de la herramienta como es el caso de punteadoras, taladradoras, plegadoras, etc.

Los inconvenientes principales que presentan este tipo de motores son la posible pérdida de pasos en el desplazamiento por un esfuerzo elevado en el eje del motor, lo que conduce a un error de posición; limitaciones de potencia y par intrínsecas a las características del motor; debido a su avance por impulsos producen un peor acabado de las piezas a mecanizar. Su principal ventaja es su bajo costo.

Sistemas de medida: Los sistemas de medida de posición y velocidad son la base para los CN que utilizan un sistema de posicionamiento en ciclo cerrado. También existen máquinas que incorporan sistemas de medida de herramientas y piezas. Para la medida de los desplazamientos y velocidades se utilizan los captadores. Un captador de posición mide una magnitud geométrica, transformándola en una señal eléctrica capaz de ser analizada por el equipo de control.

En cuanto a la captación de la velocidad el dispositivo más utilizado es la dinamo taquimétrica o tacodinamo montada sobre el mismo eje motor que genera, al girar, una tensión eléctrica proporcional a su velocidad.

Los sistemas de medida de herramientas y piezas se apoyan normalmente en los sistemas de medida de desplazamientos, permitiendo realizar algunas funciones de medición e inspección de piezas y herramientas, actualizar los valores de los correctores de las herramientas (parámetros que identifican geoméricamente a cada útil), y efectuar parte de las labores del control de calidad sobre la propia máquina.

Básicamente, los sistemas de medida se basan en sensores situados en el portaherramientas o en sistemas independientes de tipo neumático, inductivo u óptico, pudiendo realizar las comprobaciones de cotas de maquinado sin descargar la pieza o herramienta de la máquina.

Diseño de las Máquinas Herramienta de Control Numérico: En principio un control numérico se puede adaptar a cualquier tipo de máquina herramienta convencional, tanto de arranque de viruta como de trazado y deformación. Sin embargo, las características de precisión y de fiabilidad exigidas en estas máquinas en condiciones duras de utilización hacen que sea necesario modificar las características de diseño de las mismas.

Estructuralmente, las Máquinas Herramienta de Control Numérico son máquinas más rígidas y con menos vibraciones que las convencionales, gracias al uso de bastidores de chapa soldada y de hormigón (sustituyendo a la clásica fundición) y de construcción modular.

En el diseño de su cadena cinemática se busca disminuir los juegos, rozamientos, vibraciones e inercias de las masas móviles para mejorar las características de precisión y repetibilidad del posicionado de la herramienta, aumentando la rigidez de las guías y utilizando materiales con bajo coeficiente de fricción o sistemas hidrostáticos de rodamiento.

Asimismo, se han mejorado la estabilidad y la uniformidad térmica de las máquinas mediante sistemas de refrigeración de herramienta, pieza y máquina, además de incluir sistemas de evacuación de virutas.

Sistemas de cambio de herramientas y de piezas: Con la intención de proporcionar a la máquina el mayor grado de automatismo, se hace necesario incluir algún sistema que permita reducir al mínimo los tiempos en los que no está maquinando. Entre los sistemas utilizados se encuentran los de cambio automático de herramientas y de piezas.

Los cambiadores automáticos de herramientas permiten reducir al mínimo los tiempos de cambio de útiles, evitando el proceso de reglaje en el cambio y permitiendo realizar distintos tipos de piezas con una preparación mínima de la máquina.

Básicamente, hay dos tipos de sistemas de cambio de herramientas, torreta giratoria y almacén de herramientas. El primero es utilizado normalmente en tornos y taladros, pudiendo contener hasta 12 herramientas entre las que se pueden encontrar útiles motorizados para realizar taladrados y operaciones de fresado, convirtiendo al torno en un centro de maquinado.

Girando la torreta se sitúa la herramienta en posición de trabajo, siendo el tiempo de cambio de herramienta del orden de apenas algunos segundos. La identificación de la herramienta se hace en base a la posición que ocupa dentro de la torreta, por lo que ésta debe ser tenida en cuenta cuando se carga la torreta y cuando se realiza el programa.

El almacén de herramientas se utiliza para aquellas máquinas que requieren un elevado número de útiles para realizar un trabajo. Físicamente se trata de almacenes de tambor o de cadena con un manipulador asociado que se encarga de trasladar la herramienta desde el almacén hasta el husillo de trabajo. En este caso, se suelen utilizar sistemas de identificación que consisten en disponer de un código sobre la herramienta y un procedimiento de lectura de ese código. Algunos códigos utilizados son los de anillos montados en el mango de la herramienta que presionan una fila de interruptores reproduciendo un código binario o el basado en cápsulas magnéticas incorporadas sobre la propia herramienta.

El cambio automático de piezas es otro sistema que han incorporado algunas máquinas para reducir los tiempos de carga y descarga de la pieza. Existe una amplia variedad de sistemas entre los que se pueden citar robots, manipuladores y alimentadores automáticos.

En los tornos se utilizan normalmente robots o manipuladores que pueden desde realizar únicamente la carga y descarga de pieza, hasta identificarlas, realizar un control sobre las mismas, clasificarlas y situarlas en posiciones específicas.

En los centros de maquinado se suele utilizar el sistema de cambio automático sobre los que van fijados las herramientas de sujeción de la pieza. De este modo, la carga y descarga se realiza fuera de máquina mientras se está mecanizando otra pieza. Existen sistemas de carrusel o de línea que permiten el funcionamiento en modo automático de un centro de maquinado durante varias horas.

Sistema de control

La arquitectura del sistema de control de un Control Numérico comprende los siguientes elementos:

- Unidad de entrada-salida de datos.
- Unidades de memoria fija (ROM) y volátil (RAM).
- Uno o varios microprocesadores.
- Visualizador de datos.
- Unidad de enlace con la máquina.

Unidad de entrada-salida de datos: La entrada y salida de datos en los equipos de CN se puede realizar de varias formas, por cinta perforada (ya obsoleto), por el panel de control, por dispositivos magnéticos o por comunicación con una computadora externa.

La aparición del CNC ha hecho posible la introducción de datos de una manera más cómoda mediante el uso de otros periféricos conectados al CN. Uno de ellos es el panel de control que han incorporado la mayor parte de los CN modernos. Este panel de control lleva incorporado un teclado y una serie de selectores y pulsadores que abarcan todas las informaciones codificadas necesarias para la programación. Este panel se emplea para realizar modificaciones sobre los programas introducidos previamente en memoria, para programar directamente sobre la máquina y para controlar y verificar el funcionamiento de la máquina herramienta.

Básicamente, en la programación directa sobre la máquina se trata de introducir el programa a través de un teclado funcional incorporado en el equipo o conectado al mismo de modo que su uso pueda ser compartido por varios CN. El inconveniente que presenta la programación directa sobre la máquina es que se consume tiempo máquina en el tecleo y que se suelen producir errores.

Tales inconvenientes han quedado solucionados en parte por la posibilidad con la que cuentan los CN modernos de introducción de programas mientras la máquina está trabajando (modo "background") y la de detección automática de errores de sintaxis y geométricos en los datos.

La interacción que permite el uso del teclado del panel de control ayuda a una fácil corrección de programas, la introducción de correctores de herramientas, su uso en trabajos normalmente reservados a máquinas convencionales con alto grado de interactividad hombre-máquina y el control total de la máquina desde un puesto centralizado.

Como inconvenientes principales de la programación a pie de máquina se encuentran el que todavía debe disponerse de documentos en papel con el programa, en un ambiente de taller poco propicio para su manejo y la limitación de memoria de los CN, que requiere la carga y descarga de programas en producción de series cortas, por saturación de su capacidad de almacenamiento.

La solución a una parte de los inconvenientes que presenta la introducción de datos vía teclado o por cinta perforada viene de la mano del uso de periféricos magnéticos, con una alta capacidad de almacenamiento de programas en un volumen reducido y transportables. El lector-grabador magnético se conecta al CN mediante un cable (usualmente RS- 232C V24), pudiendo cargar y descargar los programas en ellos almacenados o que piensan ser usados. Con ello se evita la repetición de una tarea tediosa y poco fiable, como es la del tecleo sobre el propio CN, y la saturación de la memoria con programas de maquinado de piezas que no son lo suficientemente repetitivas como para tenerlos permanentemente.

La comunicación con computadoras externas consiste en la transmisión y recepción de programas entre un ordenador externo y el Control Numérico de una o varias máquinas herramienta. La comunicación se realiza a través de un cable de conexión usando, normalmente, la norma RS-232C, de modo que el desarrollo y almacenamiento de los programas se efectúa utilizando los recursos de la computadora más aptos que los del CN. Este tipo de técnica conocida con el nombre de Control Numérico Directo (CND, o DNC) permite no sólo la carga y descarga de programas de una manera mucho más rápida y fiable que los métodos anteriores, sino que, además, permite la gestión de las máquinas herramientas de control numérico desde un puesto no situado en taller, para realizar labores de control y gestión de datos de producción de varias máquinas, la edición y corrección de programas en un teclado más ergonómico que el del CN y la conexión de sistemas de diseño y generación automática de programas de maquinado (CAD/CAM).

El impacto que provoca el uso de computadoras externas a la propia máquina ha sido un paso fundamental hacia la automatización, con el objetivo de conseguir una planificación de la fabricación.

El costo de un sistema DNC dependerá del tipo de computadora externa utilizada y del número de máquinas que deseen conectarse. La configuración típica necesita una computadora personal tipo PC compatible, el programa de comunicaciones y el cable de conexión.

Unidades de memoria fija (ROM) y volátil (RAM): La unidad de memoria fija o ROM (Read Only Memory) incluida en los CN, tiene como función almacenar las instrucciones, funciones y subprogramas registrados por el fabricante y que no deben ser modificados para el uso de la máquina. Como su nombre indica, es una memoria de datos que sólo puede leerse y no modificarse por el usuario o por la máquina.

La tecnología usada es la de transistores MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) y permite conservar los datos durante un tiempo muy superior al de la vida de la máquina. La memoria volátil o RAM (Random Acces Memory) se puede leer y escribir y, por tanto, posee la capacidad de ser modificada por el usuario. En ella se registran los programas de usuario y es utilizada internamente por el control. La tecnología usada para su fabricación también es la MOS con dos modalidades: dinámicas y estáticas. Las dinámicas precisan de un circuito externo que refresque la información consumiendo menos energía y siendo más baratas que las estáticas que no lo requieren. De cualquier modo, las más empleadas son las estáticas en las que (al igual que ocurre con las dinámicas) la información permanece siempre y cuando se mantenga la alimentación de la unidad de memoria mediante una batería auxiliar de Ni-Cd normalmente disponible en los CN.

La capacidad de las memorias RAM o de almacenamiento de programas es variable dependiendo del fabricante, existiendo desde memorias de 8 Kb hasta memorias de varios miles de Kb e incluso más. Lo normal es una memoria de 32 Kb, puesto que, aunque la mayor parte de los CN permiten su ampliación, la capacidad de trabajar en DNC en modo infinito (el ordenador envía el programa por bloques manejables por la memoria del CN) de muchos controladores evita el problema de las limitaciones de capacidad de memoria.

Microprocesadores: El microprocesador o Unidad Central de Proceso (CPU) es el encargado del control de los elementos que componen la máquina en función del programa que ejecuta. Básicamente, accede a las instrucciones del programa, las decodifica y ejecuta las acciones especificadas. Existen microprocesadores de 8, 16 y hasta 32 bits, en función del grado de complejidad y de la rapidez requerida. Una instrucción completa puede codificarse mediante 1, 2 ó 3 bytes. Entre sus funciones están también las de calcular todas las operaciones aritmético-lógicas que requiere, de lo cual se encarga la Unidad Aritmético Lógica (ALU).

Existen CN que disponen de varios microprocesadores, cada uno de los cuales se encarga de una función específica y que trabajan de una forma coordinada.

Visualizadores de datos: Son monitores que permiten que el operador controle la marcha de la programación o del proceso de mecanizado, además de conocer el estado de la máquina a través de los mensajes que aparecen en el mismo.

Actualmente, casi todos los visualizadores de datos son monitores de vídeo TRC (Tubo de Rayos Catódicos) o pantallas de cristal líquido LCD, permitiendo incluso la posibilidad de generar imágenes en color y gráficos.

Unidad de enlace con la máquina: El CN está enlazado con la máquina herramienta a través de los mecanismos de control sobre los motores que accionan los órganos móviles (husillos de los carros y mesas) para que su movimiento se ajuste a lo programado.

Otro tipo de enlaces son los que se establecen con el sistema eléctrico de la máquina herramienta para controlar la velocidad del husillo, el cambio de herramientas y otras funciones como la marcha y paro, la conexión del refrigerante, etc.¹⁵

3.2.2 PROGRAMACIÓN

Las máquinas herramienta de control numérico funcionan a través de instrucciones dadas previamente para su operación, de tal manera que las operaciones de maquinado son realizadas de principio a fin sin la intervención del operario. Estas instrucciones son ingresadas al control de la máquina en forma de programas, los cuales tienen un lenguaje específico que el control es capaz de interpretar y transformar en operaciones de la máquina.

En un principio los fabricantes de máquinas y controles desarrollaban sus propios lenguajes de programación, pero pronto fue necesario estandarizar este lenguaje. Actualmente se utiliza el código G como lenguaje de programación para Control Numérico. Este lenguaje se encuentra bajo los estándares ISO 6983, EIA RS274 y DIN 66024 y 66025.

Una vez almacenado el programa en la memoria, inicia su lectura para su posterior ejecución. Los bloques se van leyendo en forma secuencial. En ellos se encuentra toda la información necesaria para la ejecución de una operación de maquinado.

Una vez interpretado un bloque de información, la unidad de cálculo se encarga de crear el conjunto de órdenes que serán utilizadas para gobernar la máquina herramienta. Como ya se dijo, este bloque suministra la información necesaria para la ejecución de una operación de maquinado. Por lo tanto, una vez el programa en la memoria, se inicia su ejecución. El control lee un número de bloques necesario para la realización de un ciclo de trabajo. Estos bloques del

¹⁵ Igual a la referencia 8

programa son interpretados por el control, que identifica la nueva posición por alcanzar (x, y, z del nuevo punto en el caso de un equipo de tres ejes), velocidad de avance con la que se realizará el trayecto, forma a realizar el trayecto, otras informaciones como compensación de herramientas, cambio de herramienta, sentido de giro, refrigeración, etc. La unidad de cálculo, de acuerdo con la nueva coordenada a alcanzar, determina el camino a recorrer para los diversos ejes.

La función principal de un control numérico es gobernar los motores (servomotores) de una máquina herramienta, los cuales provocan un desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza situada sobre la mesa. Si consideramos un desplazamiento en el plano, será necesario accionar dos motores, en el espacio, tres motores.

Estructura de los programas.

Un programa es un listado de operaciones que debe realizar la máquina en forma secuencial (Fig. 3.4). Cada línea del listado se le llama bloque y cada uno de estos contiene las instrucciones que debe ejecutar la máquina en un paso. Los bloques están formados por palabras, que son instrucciones formadas por letras y números las cuales definen una acción que debe realizar la máquina o bien un parámetro de trabajo para la misma.

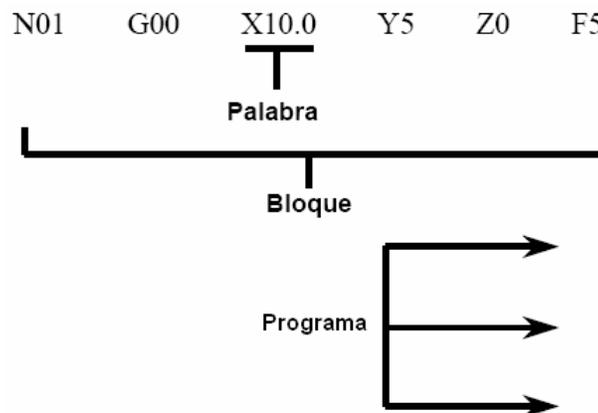


Fig. 3.4 Estructura de los programas en código G.

Por lo general los bloques están numerados en forma creciente, por medio de la palabra N___ al principio de cada línea, sin embargo esto no es necesario para todos los controles, solo algunos requieren de la numeración. Esto puede resultar muy útil durante la revisión o corrección del programa, ya que estos pueden ser tan largos que sería confuso tratar de identificar cada etapa del programa únicamente por las instrucciones de operación, que pueden llegar a repetirse muchas veces en un mismo programa.

Una vez numerado el bloque, la siguiente palabra será una instrucción para la máquina, las cuales pueden ser de dos tipos, las funciones G que son para el movimiento de la máquina, definición de unidades o de origen de referencia y

compensaciones. Existen además las funciones M (Misceláneas), las cuales indican operaciones secundarias de la máquina tales como la forma de terminar un programa, arranque y paro del refrigerante, cambio de herramienta, etc. El formato de estas instrucciones es escribiendo con mayúscula la letra G o M (según sea el caso) seguido del número correspondiente al comando específico.

Para muchas de las instrucciones, ya sean G o M, es necesario definir algunos parámetros, como coordenadas, velocidades o número de herramienta, esto se define escribiendo una nueva palabra a continuación de la instrucción y en el mismo bloque, la cual estará formada nuevamente por una letra mayúscula seguida del número que corresponde al parámetro definido.

Cada instrucción puede demandar uno o varios parámetros según lo que requiera para ejecutarse adecuadamente, por ejemplo la instrucción G01, que se refiere a un movimiento en línea recta y comenzando en su posición actual, requiere conocer las coordenadas del punto final, es decir X,Y,Z además de la velocidad de avance a la cual se debe desplazar la herramienta.

De esta forma una instrucción para un movimiento recto de la herramienta tendría la siguiente estructura:

N_ _ _ _ G01 X_ _ Y_ _ Z_ _ F_ _

En general las letras utilizadas para definir el tipo de valor que se está ingresando son las siguientes:

- **N** Número de bloque
- **G** Función general de operación de la máquina.
- **M** Función miscelánea
- **X** Coordenada x
- **Y** Coordenada y
- **Z** Coordenada z
- **A** Coordenada a (Solo para máquinas de cuatro ejes).
- **I** Localización en x del centro de un arco.
- **J** Localización en y del centro de un arco.
- **K** Localización en z del centro de un arco.
- **S** Velocidad de giro del husillo.
- **F** Velocidad de avance.
- **H** Parámetro numérico preestablecido para compensaciones.
- **R** Radio de curvatura.
- **O** Nombre del programa.
- **T** Número de herramienta

Un programa debe seguir una secuencia ordenada en las instrucciones, por lo que no se deben incluir en los bloques más de una operación que deba ser ejecutada a un mismo tiempo, por ejemplo no deben existir dos funciones de movimiento

diferentes en un mismo bloque, o bien una función de movimiento y un cambio de herramienta. De la misma forma no deben combinarse en el mismo bloque dos instrucciones contradictorias, como definir un sistema de coordenadas absoluto y un sistema incremental.

Existen también algunas instrucciones que una vez que son activadas no es necesario ingresarlas nuevamente hasta que hayan sido cancelada o anuladas por una instrucción que la niegue, tal es el caso de las instrucciones G90 y G91, las cuales definen el tipo de sistema coordinado que se utilizará en todas las instrucciones subsecuentes hasta ser cancelada o anulada. De la misma forma se pueden definir las instrucciones de movimiento, tales como G00, G01, G02 o G03, las cuales no requieren ser ingresadas mas que una vez y en adelanta solo se requieren las coordenadas para que se realice la operación, esto hasta que se defina una instrucción de movimiento diferente que la cancele. A este tipo de comandos se les llama modales.

También los parámetros de corte solo requieren ser definidos en una primera instancia, en adelante todas las operaciones de corte serán realizadas con bajo la misma velocidad de giro y de avance, hasta que esta sea definida nuevamente con otra instrucción¹⁶.

En el apéndice 1 se anexa un listado completo de los comandos más importantes del Código G y su función.

3.3 POST-PROCESADORES

Cada día se incorporan al mercado sistemas de CAD/CAM con mejores capacidades que permiten construir modelos geométricos rápida y eficientemente con superficies de forma libre. El implementar estos programas de diseño geométrico en una planta implica no solamente la transferencia de datos sin complicaciones de formato, sino también que las máquinas herramienta estén capacitadas para interpretar los diferentes formatos de datos y maquinara dichas geometrías. El proceso de generación de código de control numérico debe incluir el dominio de las bases teóricas para implementar óptimamente diferentes trayectorias y formas geométricas en máquinas herramienta adecuadas.

Comúnmente las características de procesamiento de una computadora sobrepasan las del control de una máquina herramienta. Esto significa que, para la mayoría de los programas de diseño mecánico, se supone una máquina herramienta de características adecuadas a él, lo cual normalmente no sucede, ya que el desarrollo del ámbito computacional es de mucho mayor velocidad que el de las máquinas herramienta. Esto sucede básicamente por las siguientes razones:

¹⁶ Igual a la referencia 7.

- La computadora se ha convertido en un producto casero, por lo que el número de personas a nivel mundial que trabajan sobre desarrollos y mejoras para las computadoras es mucho mayor al de las máquinas herramienta.
- Tanto la construcción como los códigos de programación para una máquina herramienta están casi estandarizados en su totalidad (salvo un pequeño conjunto de códigos específicos), lo cual no ocurre con las computadoras cuyos estándares son determinados prácticamente por el momento del mercado.
- El costo de venta de una máquina herramienta es mucho mayor que el de una computadora, y en consecuencia las capacidades innovativas en las nuevas generaciones de máquinas herramienta suceden a intervalos mayores.
- El atraso tecnológico de algunos países con respecto a otros obliga que en muchas empresas se trabaje con equipos parcial o totalmente obsoletos.

Hoy en día es frecuente encontrar modelos tridimensionales hechos por computadora con propósitos diferentes a los de maquinado, compuestos de geometrías más complejas que las líneas y arcos. Ejemplos de ello son las geometrías que se usan en el análisis de elemento finito, representación tridimensional, animaciones, etc. Estas geometrías tienen una estructura de datos que almacena formatos compuestos por coordenadas de puntos, superficies y vectores, formando mallas.

Existen casos en los que es deseable utilizar éstas geometrías ya construidas con el propósito de fabricar:

- Prototipos rápidos.
- Moldes.
- Modelos con especificaciones no rigurosas de exactitud.

Sin embargo existe poca, y en ocasiones nula compatibilidad entre los formatos de datos que manejan los sistemas de CAM (normalmente formatos no estandarizados especificados por el fabricante) y los de las geometrías tridimensionales de propósito diferente al maquinado.

Los fabricantes de sistemas de CAM usualmente ofrecen módulos (que se compran por separado) de conversión de formatos llamados post-procesadores. Sin embargo, la efectividad de éstos depende en gran medida de la geometría a convertir, ya que estas tienen que cumplir con condiciones de interpolación y construcción¹⁷.

¹⁷ Lopez, G.F. Eugenio **Generación de código G de maquinado en 3D para modelos basados en mallas.**

4 DESARROLLO

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

4.1.1 NECESIDADES GENERALES

Actualmente el Instituto de Astronomía de la UNAM genera y participa en proyectos de desarrollo tecnológico enfocados principalmente a la observación astronómica, tanto en México como en el extranjero. Parte importante de estos proyectos es el trabajo conjunto de investigadores en la rama astronómica y el equipo técnico del departamento de instrumentación, el cual está formado por especialistas en óptica, mecánica y electrónica.

Tratándose de instrumentación astronómica, la óptica es la que dirige el diseño de los instrumentos, por lo que una vez que se ha realizado un diseño óptico, es necesario continuar con el mecánico y el electrónico ajustándose a las especificaciones planteadas por la primera.

El Instituto de Astronomía cuenta con un taller mecánico dotado de máquinas herramientas manuales y automáticas, así como un Centro de Maquinado Vertical de Control Numérico, con lo que se pueden fabricar piezas especializadas y de precisiones por debajo de los 15 μm .

En la industria en un primer plano de eficiencia los procesos de fabricación están diseñados para la reducción de costos. Esto se logra incrementando los volúmenes de producción y reduciendo al máximo los tiempos y los costos de los insumos tales como materiales y herramientas.

En el caso de la instrumentación astronómica las principales necesidades están enfocadas a la calidad del producto. Los volúmenes de producción son muy bajos, por lo general no es necesario fabricar más de una pieza y el tiempo de fabricación no es un factor crítico.

Sin embargo existen otros factores que llegan a complicar la fabricación de algunas piezas, tales como las precisiones y materiales, que en algunos casos llegan a ser poco comunes y es necesario importarlos específicamente para este fin.

SCIDAR Generalizado Mexicano es un instrumento diseñado en este instituto específicamente para su uso en el Observatorio Astronómico de San Pedro Mártir, B.C. Su diseño comprende elementos ópticos, que se han seleccionado dentro de productos comerciales, mecánicos y electrónicos. Para el correcto funcionamiento del instrumento, éste ha sido diseñado en el Instituto de Astronomía y su fabricación será coordinada por el taller mecánico del mismo. De este conjunto de piezas, existen dos cuya precisión en su maquinado es fundamental para el correcto funcionamiento, por lo que será necesario que estas piezas se fabriquen mediante un proceso de manufactura por control numérico con el soporte de herramientas CAD/CAM.

4.1.2 SITUACIÓN ACTUAL DEL INSTITUTO DE ASTRONOMÍA

Recientemente y buscando la forma de ampliar sus capacidades para satisfacer sus propias necesidades, el Instituto adquirió un Centro de Maquinado Vertical de Control Numérico, además de la licencia para el uso de Unigraphics, el programa de CAD/CAM que servirá como el sistema base para el modelado de las piezas.

Sin embargo este instituto no cuenta con el personal capacitado para el manejo de estos recursos, por lo que es necesario desarrollar un mecanismo bajo el cual sean los operarios actuales los que lleven a cabo todo el proceso de fabricación de las piezas, de una forma segura, confiable y eficiente.

Para lograr esto, será necesario llevar a la práctica un proceso completo de modelado y fabricación de piezas, a partir del cual se obtendrá como resultado una estructura básica del procedimiento adecuado para ello, incluyendo precauciones, recomendaciones y normas que permitan al usuario obtener una pieza con la calidad requerida.

Es importante mencionar que este documento no pretende ser un manual práctico para la fabricación de piezas, es necesario que el usuario posea nociones básicas de diseño, procesos de corte y control numérico para el uso de este equipo. Este documento servirá como un manual de referencia durante el proceso y ayudará a resolver los problemas más comunes que se pueden presentar durante su desarrollo, así como para manifestar las precauciones y normas específicas que se deben respetar durante el uso del equipo, de manera que se convierta en un procedimiento factible para este departamento.

Teniendo como antecedentes el diseño mecánico final de las ruedas de lentes y de filtros del instrumento SCIDAR, este documento plantea el procedimiento completo, desde el modelado hasta la fabricación y verificación de las piezas observando en cada etapa cualquier situación específica que se presente en el desarrollo, aislando los factores más importantes y planteando una solución general que pueda servir como referencia para cualquier evento similar.

4.2 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO.

4.2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PIEZAS.

Las piezas por fabricar son dos discos de aluminio 6160 de 110 mm de diámetro, uno de 8 mm de espesor, y el otro de 11 mm. Ambos Discos estarán montados sobre un mismo eje para lo cual llevarán un barreno en el centro de 6.75 mm con una caja en la parte superior de 15.87 mm de diámetro y 5.5 mm de profundidad para alojar un rodamiento SKF 625 .

La primera es una rueda de filtros (Fig. 4.1), que llevará cuatro agujeros pasados de 22 mm de diámetro ubicados alrededor del centro a una distancia de 30 mm de éste, y a 90° entre cada uno de ellos. Tres de estos barrenos albergarán filtros, mientras que el cuarto será únicamente para permitir el libre paso de la luz.

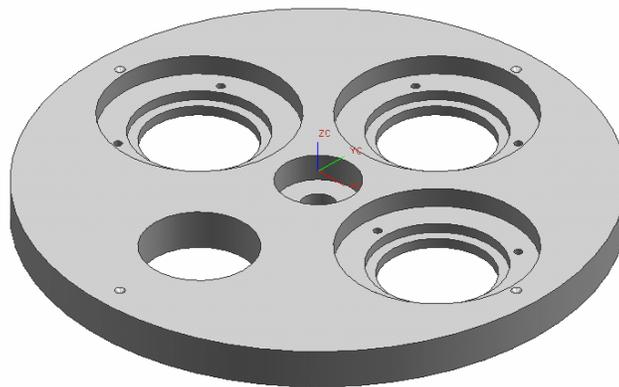


Fig. 4.1 Modelo de la rueda de filtros.

En el caso de los agujeros en los que se montarán filtros se maquina una caja con una profundidad de 2 mm y 26 mm de diámetro, es en esta caja donde se colocará el filtro, y además se maquina otra caja de 37 mm de diámetro y 4 mm de profundidad, en la cual entrará una tapa para sostener el filtro la cual se sujeta a la rueda mediante tres tornillos M1.6 colocados en forma radial a 120°.

La segunda es una rueda de lentes (Fig. 4.2), esta llevará seis barrenos distribuidos de igual forma a cada 60°, al igual que la rueda de filtros, ésta también tendrá un agujero simple para permitir el libre paso de la luz, mientras que los otros cinco servirán para albergar lentes de diferentes características. En este caso existen lentes de diferentes tamaños por lo que 3 de los agujeros serán de 4 mm de diámetro, uno más de 9 mm y un último de 11 mm. Para los primeros se maquina una caja de 24 mm de diámetro, para el de 9 mm la caja será de 28 mm de diámetro y finalmente una caja de 29.5 mm de diámetro, todos a una profundidad de 8 mm.

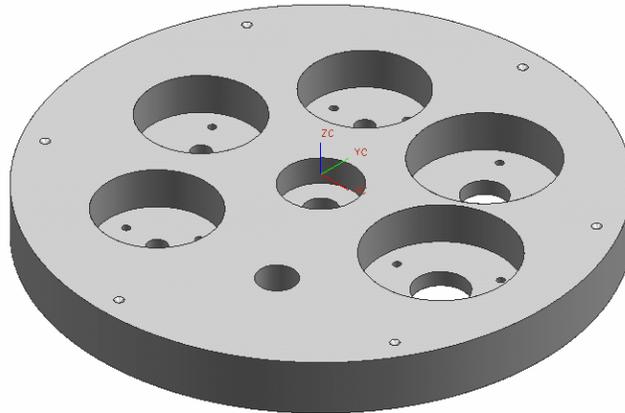


Fig. 4.2 Modelo de la rueda de lentes.

4.2.2 CÁLCULO DE TOLERANCIAS.

Las piezas por fabricar en este caso, parecen en principio 2 elementos simples y cuya fabricación no debe representar mayor dificultad, sin embargo la precisión con la que sean fabricados es de suma importancia para el buen funcionamiento del instrumento. El objetivo principal de estas piezas es mantener en una posición específica tanto los lentes como los filtros a través de los cuales debe pasar la luz para finalmente llegar al dispositivo que procesa la imagen (CCD). Para esto es importante conocer las dimensiones de los diferentes elementos involucrados a partir de los cuales se determinan las tolerancias.

Este instrumento puede operar con 5 diferentes lentes, de los cuales dependerá el tamaño de la pupila, es decir, el diámetro del haz de luz. Dicho haz de luz deberá llegar finalmente al CCD, el cual está compuesto por una matriz de 80 x 80 píxeles, cuyas dimensiones son de 24 x 24 μm , es decir que la superficie fotosensible es de 1.92 x 1.92 mm ¹⁸.

En teoría el CCD deberá estar perfectamente centrado en el eje del telescopio, partiendo de esto podemos suponer que un desplazamiento de la imagen en el CCD solo puede ser causado por un error en la posición del lente o el filtro. En el documento estudio de tolerancias de centrado de las lentes se determina a partir de la distancia focal, y la distancia entre el CCD y el colimador (conjunto de lente y filtro) y por medio de triángulos semejantes, un valor máximo entre el eje del telescopio y el eje del lente. Este valor máximo, que en este caso es la tolerancia, se puede calcular de la siguiente forma:

$$tol = \frac{f}{78 + f} \times n \times pix \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde f es la distancia focal, n el número de píxeles que se puede desplazar la imagen sobre el CCD y pix es el tamaño del píxel, que en este caso es de 24 μm .

¹⁸ Ávila, Remy. **Critical Design Review.**

En el caso más crítico (Fig. 4.3) se tiene una distancia focal $f = 20$ mm. Considerando un diámetro máximo de la pupila de 1.17 mm tendremos entonces que el máximo desplazamiento que puede tener sobre el CCD es de $375 \mu\text{m}$, lo que equivale aproximadamente a 16 píxeles. Aplicando estos valores a la ecuación 4.1 se obtiene una tolerancia de $78 \mu\text{m}$, como desplazamiento máximo de la imagen¹⁹.

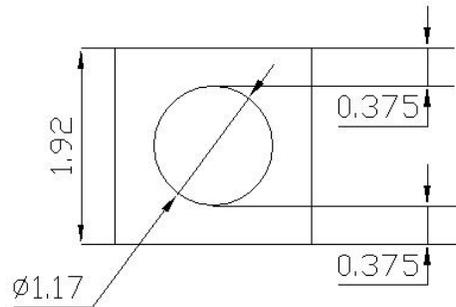


Fig. 4.3 Análisis de tolerancias para el caso más crítico (cotas en mm).

La tolerancia que se considera a partir de estos cálculos como aceptable, es el presupuesto de error del cual se puede disponer para la fabricación de las ruedas de lentes y filtros, ya que después de realizar un análisis de las piezas, existen diferentes variables y dimensiones que resultan críticas para el buen funcionamiento del sistema.

4.2.3 ANÁLISIS DE VARIABLES CRÍTICAS Y TOLERANCIAS.

Condiciones críticas.

El haz de luz debe pasar primero a través de los lentes y posteriormente por los filtros. Para cumplir con esta condición es necesario que exista perpendicularidad entre los lentes y el haz de luz, además de que éste debe pasar por el lente a una distancia no mayor de $78 \mu\text{m}$ del centro, esto con la finalidad de evitar efectos de refracción y desviaciones de la luz. En el caso de los filtros no es necesario garantizar que la luz pase por el centro, puesto que éstos son planos, sin embargo es importante garantizar que la luz pase en forma perpendicular, así que debemos garantizar paralelismo entre ambas ruedas.

Características geométricas y dimensiones críticas en el diseño.

1.- Para garantizar perpendicularidad entre el haz de luz y los lentes es necesario que los barrenos que albergan a cada lente sean paralelos al barreno central, esto se puede lograr durante el maquinado, elaborando todos los barrenos en una misma operación y sin desmontar la pieza. También será necesario que durante el proceso de ensamble se garantice el paralelismo entre el eje óptico del telescopio y el eje de giro de los discos. Mientras los barrenos sean todos

¹⁹ Cuevas, Salvador. SGM. Óptica, Estudio de tolerancias del centrado de lentes.

paralelos al eje de giro de las ruedas, no es necesario que las superficies de las ruedas sean perfectamente paralelas entre sí, o bien perpendiculares a los barrenos.

2.- Para centrar adecuadamente el lente con el eje óptico del telescopio, se requiere que:

- a) La rueda se encuentre colocada adecuadamente en su posición, es decir que en primera instancia esto dependerá del ensamble.
- b) El lente se encuentre colocado adecuadamente respecto al eje de giro de la rueda, que es en este caso la referencia de la pieza. La magnitud importante es la distancia entre el eje de giro y el centro del lente.
- c) La posición angular de la rueda sea la correcta, para lo cual se utiliza un opresor, que deberá estar ensamblado a la base de la rueda. La muesca será la que defina esta posición angular.

De esta manera quedan definidas las variables relevantes para el proceso de maquinado de la pieza que es la posición de la lente y la posición de la muesca respecto a la referencia.

Estas dos dimensiones definen una región de tolerancia cuya geometría esta definida por dos arcos de circunferencia entre dos líneas que forman un ángulo entre ellas de 0.2979° , todo esto sobre una superficie curva. Para hacer un análisis podemos aproximar esta geometría a un cuadrado de $156 \mu\text{m}$ por lado. Sin embargo la especificación marca que el haz de luz no debe pasar a más de $78 \mu\text{m}$, lo cual es en realidad una circunferencia de $78 \mu\text{m}$ de radio alrededor del centro del lente, por lo que existirían zonas dentro de nuestra región de tolerancia que estarían a más de $78 \mu\text{m}$ de distancia del centro. Es necesario hacer un nuevo análisis de dicha región para definir las dimensiones de tolerancia reales de cada variable, para que en su combinación obtengamos una región de tolerancia dentro de las especificaciones (Fig. 4.4).

Puesto que la posición se encuentra definida por dos parámetros, los cuales forman una región de tolerancia que se aproxima en su geometría a un cuadrado, mientras que la región de tolerancia ideal que marcan las especificaciones es un círculo, es necesario que el cuadrado se encuentre inscrito en el círculo, con esto garantizamos que las fronteras de la región de tolerancia real cumplen con la especificación.

De esta forma se obtiene un nuevo cuadrado cuyas dimensiones son de 0.11 mm por lado.

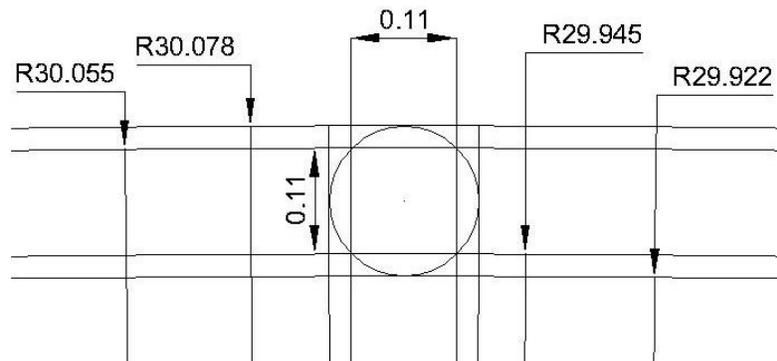


Fig. 4.4 Regiones de tolerancia según las variables críticas (cotas en mm).

De esta forma se tiene una nueva región de tolerancia aplicable para las condiciones de maquinado de la pieza en la que se involucran dos dimensiones críticas. Partiendo de esto se puede determinar que la variación en la posición de cada lente puede alcanzar un máximo de $55 \mu\text{m}$ tanto en la dirección radial como en la posición tangencial en forma independiente.

Basándonos en la experiencia de otros procesos se ha observado que el centro de maquinado con el que se fabricarán estas piezas es capaz de localizar coordenadas específicas sobre el plano con un error no mayor a $20 \mu\text{m}$. De esta manera se puede disponer de estos $20 \mu\text{m}$ para la tolerancia de maquinado y quedarán $35 \mu\text{m}$ para tolerancia del presupuesto de error en el montaje de la rueda y el posicionamiento del opresor.

4.3 ESPECIFICACIONES DE LOS RECURSOS DISPONIBLES.

4.3.1 SOFTWARE Y EQUIPO DE CÓMPUTO.

Para el proceso de modelado, generación de rutas de maquinado y obtención de los programas de fabricación, se requiere un programa CAD/CAM. El Instituto de Astronomía cuenta con licencia para el uso de Unigraphics NX.

UNIGRAPHICS es un conjunto de herramientas CAD/CAM/CAE que cubren todo el ciclo de desarrollo de una pieza, desde el diseño hasta la obtención de la pieza terminada.

El principio de operación es la utilización del modelo tridimensional como punto de partida, facilitando la creación de vistas, secciones, detalles y proyecciones de un modo automático. Cualquier alteración del producto podrá ser automáticamente incorporada al proceso de manufactura sin necesidad de realizar de nuevo todo el proceso²⁰.

²⁰ Unigraphics Solutions do Brasil Ltda. **Unigraphics CAM. Maquinado en alta velocidad de corte.**

Sus principales aplicaciones son:

- Fresado de 2 a 5 ejes
- Torneado de 2 a 5 ejes
- Electroerosión por hilo
- Simulación de movimiento de la herramienta y análisis de colisiones
- Biblioteca de herramientas
- Módulos para creación de post-procesadores
- Estrategias de maquinado predefinidas.
- Operaciones de acabado.

Además de este programa es útil contar con un post-procesador que permita adaptar adecuadamente Unigraphics con el control de la Máquina, sin embargo el Instituto no dispone actualmente de uno, por lo que es importante utilizar otro tipo de aplicaciones para verificar el comportamiento del programa generado por Unigraphics, simularlo y editarlo en forma rápida y sencilla. Para esto se utiliza Cut Viewer, una versión gratuita de prueba que permite simular la operación de maquinado verificando posibles colisiones de la herramienta y dando fácil acceso al programa para cualquier corrección o incluso anotaciones.

Finalmente se requiere también una computadora que cuente con un puerto serial (RS232) para transmitir los programas en formato .txt hacia el control de la máquina.

4.3.2 ESPECIFICACIONES DEL CENTRO DE MAQUINADO.

Para la fabricación de las piezas el Instituto cuenta en su taller mecánico con un Centro de Maquinado Vertical marca Sharp modelo SV 2412 (Fig. 4.5), con las siguientes características:

- Control FANUC serie OMD (Fig. 4.6)
- Desplazamiento de 12" en el eje x , 24" en el eje y , 18" en el eje z .
- Velocidad máxima del husillo de 8,000 rpm.
- Motor de 7.5 hp digital.
- Carrusel para 10 herramientas.
- Velocidad en movimiento rápido de 0.33 m/s.
- Carga máxima sobre la bancada de 300 kg
- Dimensiones de 1.72 x 1.72 x 2.21 m.
- Requerimientos de energía de 220 V, 3 fases, 60 Hz.
- Peso total de la máquina de 2086 kg (Sin líquido refrigerante).
- Sistema de lubricación automático.
- Alarma de falta de lubricante.
- Sistema de enfriamiento con bomba.
- Lámpara de trabajo de halógeno.
- Diámetro máximo de herramienta de 3.9"



Fig. 4.5 Centro de maquinado vertical Sharp 2412



Fig. 4.6 Panel de Control Fanuc serie OMD

El control FANUC tiene la capacidad de controlar los tres ejes en forma simultánea, con un incremento mínimo de 0.0001". Se pueden ingresar dimensiones de hasta 8 dígitos; permite controlar manualmente la velocidad de avance durante el maquinado desde 0% hasta 150%, la velocidad de posicionamiento de 100% hasta la velocidad de avance, así como la velocidad de giro de la herramienta. Permite realizar compensaciones por longitud y diámetro de las herramientas, así como la programación de diferentes sistemas de referencia, los cuales pueden también rotarse. Este control permite operar a la máquina en forma totalmente automática, o bien en forma manual.

4.4 MODELADO.

El modelado de las piezas consiste en dibujarlas por medio de Unigraphics, respetando en forma exacta todas las características geométricas especificadas en el diseño.

En este caso el diseño mecánico del instrumento se llevo a cabo modelando todas las piezas en SolidWorks, por lo que existen dos opciones para el modelado en Unigraphics, importar las piezas de un programa a otro o bien partir del diseño original para modelar nuevamente la pieza.

El uso de traductores para la importación y exportación de archivos no incluye todas las dimensiones especificadas en la pieza, por lo que puede significar modelos subdimensionados. En este caso las piezas por fabricar son de geometrías simples, por lo que resulta más conveniente realizar nuevamente el modelado completo partiendo del diseño original.

Para comenzar el modelado es importante asegurarse que se está utilizando el sistema de unidades adecuado, esto se elige al momento de crear el archivo. El programa siempre crea las piezas con dimensiones en pulgadas, a menos que se especifique el uso de dimensiones milimétricas (Fig. 4.7).

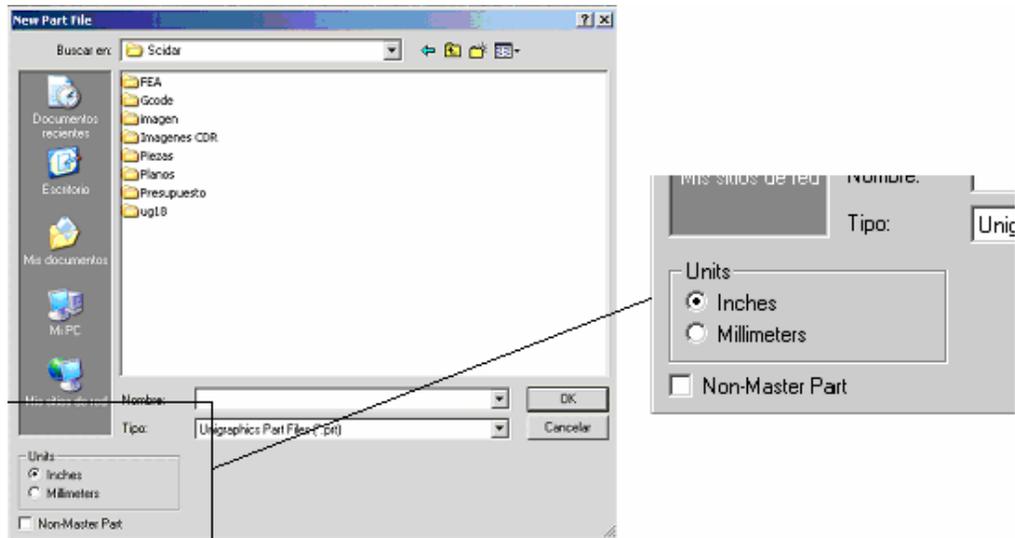


Fig. 4.7 En la ventana para crear una pieza nueva se especifica el sistema de unidades.

Las ruedas son creadas a partir de una geometría cilíndrica, y posteriormente se realizan todas las cavidades. Por comodidad lo más fácil es crear las piezas con su eje correspondiente al eje z del sistema de referencia, y su base sobre el plano x,y , aunque será necesario desplazar el origen de referencia una vez que se hayan determinado las dimensiones de la pieza base.

Por facilidad en el manejo de coordenadas, resulta útil crear las cavidades coincidiendo con algún eje del sistema de referencia, esto permitirá en el futuro ubicar fácilmente cada operación.

Contando con el cilindro base se realizan las operaciones correspondientes a barrenos y cajas. Para este tipo de geometrías resulta muy útil el uso de arreglos circulares para repetir operaciones similares, no solo por ahorro de tiempo, también permite realizar cambios en las dimensiones de todas las operaciones repetidas con solo modificar la original. La principal ventaja de esto es evitar omisiones en alguna corrección.

En ocasiones es necesario recurrir a geometrías auxiliares como planos, ejes o puntos para usarlos como referencia en el trazado, por lo que es necesario dibujarlas antes de comenzar una operación, de lo contrario habrá que interrumpir el proceso para dibujar la geometría auxiliar y después comenzar nuevamente desde el principio.

Es conveniente para cada operación el uso de una capa diferente. Esto permite ubicar y aislar fácilmente cada operación y así modificarla o bien ocultar ciertas geometrías. Para tener un mayor control sobre las capas se pueden asignar

grupos de capas para diferentes tipos de operaciones. Por ejemplo las capas 1 a 20 para crear esquemas, 21 a 40 para operaciones y 41 a 60 para geometrías auxiliares.

El procedimiento de modelado de las ruedas consiste en formar primero una geometría cilíndrica de base (Fig. 4.8), la cual tiene como eje, el correspondiente eje z del sistema de referencia. Sobre esta figura se realizan las operaciones de las cavidades.

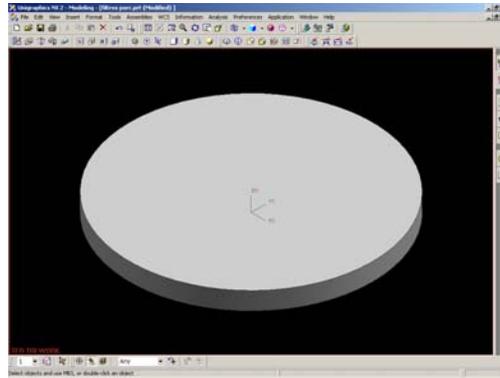


Fig 4.8 Geometría cilíndrica inicial.

Primero se forma un barreno pasado de 22 mm de diámetro y se ubica en su posición. A continuación se crea también una de las muescas para el opresor. Ambas operaciones se seleccionan para realizar un arreglo circular, en el cual se multiplican por cuatro estas operaciones con una separación de 90° alrededor del centro del cilindro (Fig. 4.9).

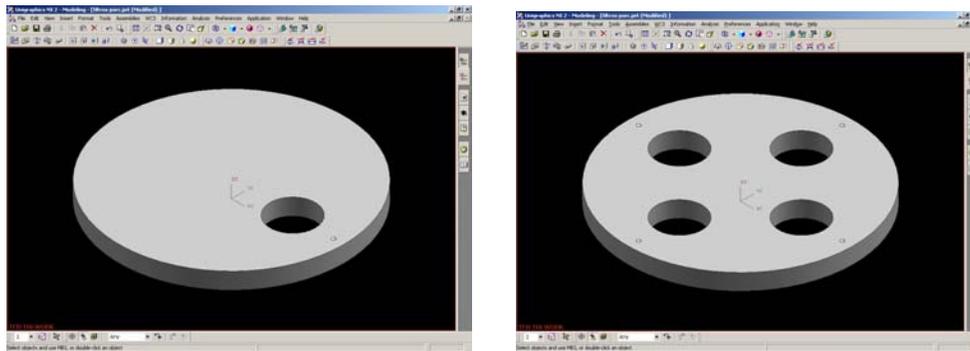


Fig. 4.9 Arreglo circular de los barrenos y muescas.

Sobre cualquiera de los barrenos ahora existentes en la pieza se crean las cajas que albergan los filtros y las tapas. Sobre este mismo espacio se crean los barrenos para los tornillos. Estos también son creados por medio de un arreglo circular. Primero se realiza uno y después se crea un arreglo circular alrededor del centro del barreno. Al realizar el arreglo circular se especifica que se trata de un arreglo de 3 barrenos a 120° de separación y alrededor del centro del barreno. Teniendo estas operaciones completas, se genera una vez más un arreglo circular, esta vez se trata solo de 3 repeticiones separándose 90° , con lo que se crearan las cajas sobre 3 de los cuatro barrenos, dejando el último como un agujero simple (Fig. 4.10).

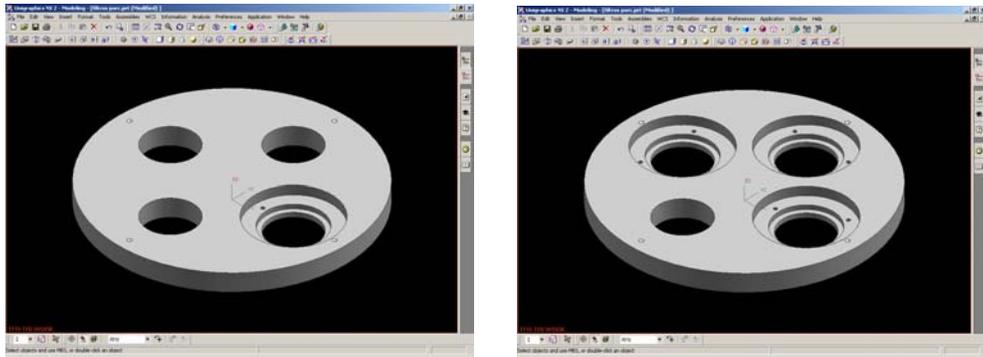


Fig. 4.10 Cajas y barrenos de tornillos, todo se multiplica con arreglos circulares.

Finalmente se crea el barreno central que corresponde al rodamiento para el eje, el cual es de 16 mm de diámetro y se coloca justo en el centro de la rueda (Fig. 4.11)

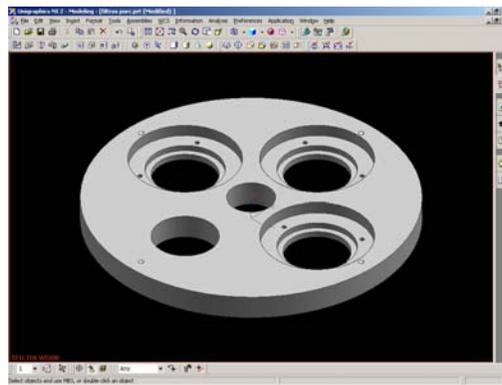


Fig. 4.11 Barreno central para el rodamiento del eje.

La rueda de lentes es un poco más compleja, ya que los lentes son de diferente diámetro, además de que las coordenadas de los centros en algunos casos son números irracionales. Se parte de una misma geometría cilíndrica cuyo eje corresponde al eje z . Para localizar los centros de los barrenos se crea un croquis sobre la superficie del cilindro y cuyo origen de referencia corresponda con el del cilindro. Sobre este diagrama se dibujan seis líneas que parten del centro de la circunferencia, y se les asigna una longitud de 30 mm y a cada una se le indica un ángulo diferente correspondiente a los múltiplos de 60° . De esta forma el extremo de cada línea corresponderá a la posición del centro del barreno (Fig. 4.12).

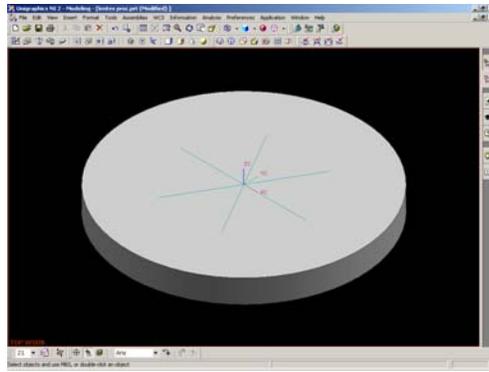


Fig. 4.12 Geometría inicial y croquis para ubicar los centros de los barrenos.

Cerrando este croquis se realizan las operaciones de los barrenos de 11 mm, 9 mm y 4 mm, junto con las cajas correspondientes (Fig. 4.13).

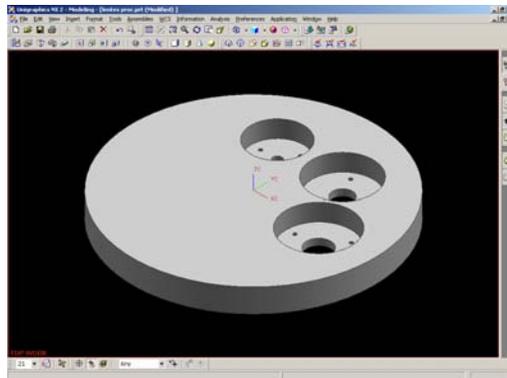


Fig. 4.13 Se realizan en forma individual las operaciones de diferentes dimensiones.

Para la posición de los barrenos correspondientes a los tornillos se utilizan las mismas líneas auxiliares como referencia, pues solo es necesario crear el barreno más cercano al centro de la rueda, los demás se crean de la misma forma que en la rueda de filtros con arreglos circulares.

Puesto que existen tres lentes con diámetro de 4 mm, solo es necesario realizar esta operación una vez, junto con su correspondiente caja y barrenos para después generar las otras dos por medio de arreglos (Fig. 4.14).

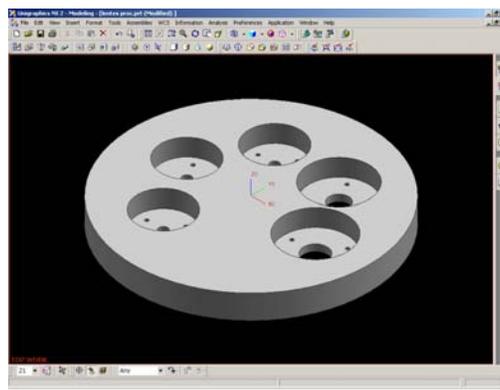


Fig. 4.14 Arreglo de las operaciones similares.

Finalmente se generan los agujeros simples, uno para el paso de la luz y el del centro correspondiente al rodamiento para el eje. También se crean las muescas para el opresor, colocándose a 60° cada una perfectamente alineadas con cada lente (Fig. 4.15).

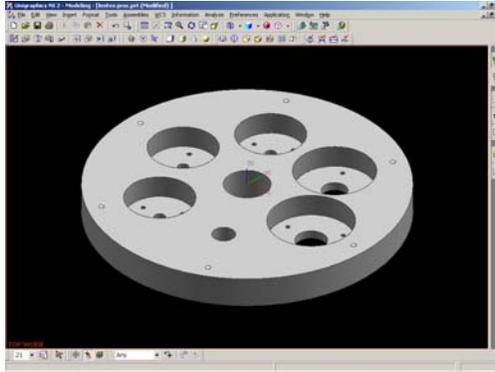


Fig. 4.15 Rueda de lentes completa.

Para el proceso de modelado se deben considerar los siguientes puntos:

- Seleccionar las unidades para el modelo al momento de crear el archivo.
- Uso de arreglos y dimensiones paramétricas para mantener congruencia en el modelo.
- La importación de archivos genera modelos subdimensionados (En algunos casos).
- El uso de capas permite mejores visualizaciones.
- Es necesario crear geometrías auxiliares para determinar con exactitud ciertas posiciones, o bien como referencia para otras operaciones.

Dentro del proceso de modelado se debe incluir también la pieza base de la que parte el proceso de fabricación. En la mayoría de los casos este puede ser muy simple, ya que se parte de piezas elementales como placas o bloques cuya geometría resulta simple. Solo en aquellos casos donde sea necesario realizar operaciones sobre una pieza preformada, será necesario modelarla en su totalidad o por lo menos las geometrías y dimensiones trascendentes. En el caso de las ruedas partimos de placas con espesores de por lo menos 4 mm superiores al de cada rueda, los cuales se sujetarán por los bordes extremos en el eje x.

La pieza base es necesaria para definir algunas operaciones de maquinado, especialmente aquellas que generan la geometría externa de la pieza. Este elemento se encuentra en el mismo espacio de la pieza por fabricar, por lo que al momento de ser creado, el diseñador tendrá diversas opciones para crear el nuevo objeto (Fig. 4.16).

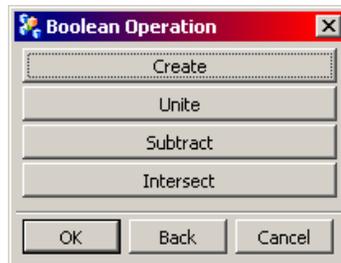


Fig. 4.16 Alternativas para crear un sólido sobre otro.

Existen cuatro operaciones booleanas que puede ejecutar el programa al momento de generar el sólido: Intersectar las piezas generará solo aquellas partes en las que existen ambos objetos, sin embargo en este caso por encontrarse un objeto totalmente inmerso en el otro, esta operación no está permitida; Sustraer la pieza implica eliminar la intersección de ambos sólidos, pero por la misma razón que en la intersección, en este caso la sustracción no es válida; Unir las piezas genera un solo objeto a partir de los dos originales, en este caso ello significaría que todo se convierta en un mismo objeto con la geometría y dimensiones originales, perdiendo así la geometría de la pieza final; La operación indicada para esto es simplemente crear la geometría, esto permite mantener las dos geometrías independientemente de que una se encuentre totalmente inmersa en la otra. Sin embargo al momento de crear la geometría el sólido generado no permitirá ver la geometría final. Para esto se modifica la visualización del objeto dando transparencia al mismo de manera que se puedan ver ambos objetos simultáneamente.

4.5 GENERACIÓN DE RUTAS DE MAQUINADO.

Para comenzar con esta etapa del proceso es necesario definir ciertos parámetros que permitan acotar los alcances y capacidades de los recursos disponibles. Esto nos permitirá definir que tipo de operaciones podemos realizar para la fabricación de las piezas, si la máquina es capaz de realizarlas todas o si es necesario realizar operaciones posteriores; de ser así, es necesario también definir el orden de las mismas.

Para la fabricación de las ruedas contamos con un centro de maquinado vertical de tres ejes, que permite generar superficies, planas o curvas, combinando movimientos en dos o hasta tres ejes, en forma frontal o lateral, de tal forma que en la mayoría de los casos la única superficie que no puede cortar es la base de la pieza. Este tipo de equipos permiten el maquinado de cavidades cuyo perfil se encuentra limitado por las dimensiones de la herramienta y siempre que la entrada de la misma se encuentre en la parte superior de la pieza. Además podemos incluir operaciones de taladrado.

Conociendo las capacidades de la maquina podemos elegir las operaciones que se realizarán para fabricar las piezas. En ambos casos es posible dar forma a las piezas realizando un careado de la superficie superior, dando la forma circular mediante un corte lateral. También se maquinarán las cavidades para los lentes y

filtros, concluyendo con secuencias de taladrado para el barrenado del eje y los correspondientes a los tornillos para fijar las tapas de lentes y filtros. De esta forma sabemos que solo será necesario realizar un maquinado posterior de la pieza para retirar el material excedente en la parte inferior de la misma. También será necesario utilizar machuelos de 1.6 mm para los barrenos de los tornillos.

Debemos contar también con las dimensiones iniciales de la pieza de partida, la cual debe ser modelada también sobre la pieza final para definir algunas de las operaciones de corte. Para las ruedas de filtros y lentes de SCIDAR partiremos de placas de aluminio, cuyo espesor será de por lo menos 4 milímetros superior a las ruedas, esto con la finalidad de contar con material suficiente para retirar en la parte de arriba durante el careado y contar también con un excedente en la parte inferior para evitar la mesa de la bancada durante las operaciones de taladrado. Para dar espacio suficiente a las operaciones relativas al careado y perfil de la pieza, partiremos de una placa de 120 x 180 x 12 mm, donde la dimensión mayor corresponderá al eje x.

Los métodos de sujeción de la pieza deben ser también definidos previo a la generación de rutas de maquinado. Al momento de crear ciertas operaciones se debe indicar la presencia de dichos elementos para que el programa evite en todo momento cualquier tipo de colisión entre herramientas y elementos externos, principalmente en las operaciones de forma, contorno y maquinado externo de la pieza, en la formación de cavidades no suelen ser factores importantes, a menos que estas sean cerca del borde de la pieza. Las piezas serán sujetadas en sus extremos correspondientes al eje x, dado que es donde existe un mayor excedente de material que permite mantener las herramientas lejos de los elementos de sujeción. Debemos tomar en cuenta que al maquinar el perfil circular de la pieza, debe existir espacio suficiente para que el cortador pase entre la pieza y los elementos de sujeción evitando cualquier contacto.

Habiendo definido cuales serán las operaciones necesarias para el formado de la pieza, el siguiente paso será elegir las herramientas más adecuadas. Para el careado superior utilizaremos un cortador Sandvik CoroMill RA 245 051R19 12M de 2 in y una profundidad de corte máxima de 6 mm. Los insertos son para maquinado de aluminio R245-12 T3 E-AL. Para el perfil circular y las cavidades utilizaremos un cortador de HSS de 0.5 in de diámetro y cuatro filos. Contaremos también con una broca de 17/64 in para crear el barrenado central para el eje de las ruedas y una más de 1.25 mm para crear los barrenos de los tornillos. Posteriormente se utilizará un machuelo de 1.6 mm para crear la rosca en los barrenos.

Una vez que se han definido las herramientas se puede comenzar a generar las rutas de maquinado. Durante este proceso el programa obtendrá las coordenadas de inicio y fin de cada movimiento, y sea recto o curvo y en cualquier dirección, basándose en las dimensiones geométricas tanto de la pieza como de la herramienta. Esto significa que no habrá ningún tipo de compensación debida al diámetro de la herramienta.

Al definir los parámetros de corte es importante recordar que no se trata de producciones en serie, por lo que la principal prioridad se dará al acabado de las piezas y seguridad. Se evitará usar movimientos rápidos cuando la herramienta se encuentre cerca de la pieza, esto permitirá que el operario pueda detener el avance en forma manual cuando comience a realizarse algún movimiento incorrectamente definido.

RUEDA DE FILTROS.

CAREADO

La primera operación será el careado de la superficie. Las opciones en Unigraphics que se eligen para esta operación son:

Tipo	mill_planar
Subtipo	FACE_MILLING
Programa	NONE
Geometría	WORKPIECE
Herramienta	DOS_PULGADAS
Método	MILL_FINISH

En la selección de geometrías no será necesario utilizar el bloque de la pieza inicial, sin embargo es importante definir la geometría relativa a los elementos de sujeción que deben ser evitados por la herramienta.

Para la geometría *part* se selecciona la pieza final (Fig. 4.17).

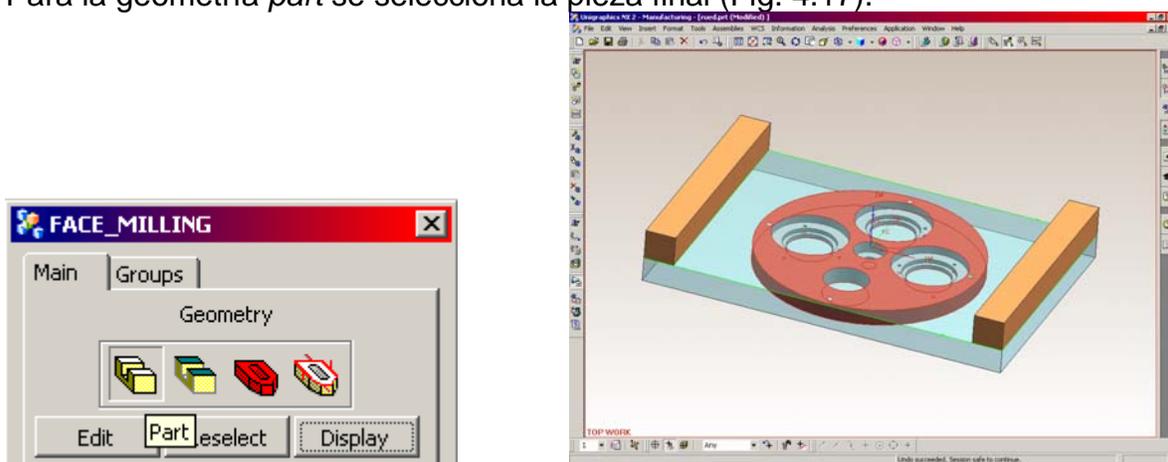
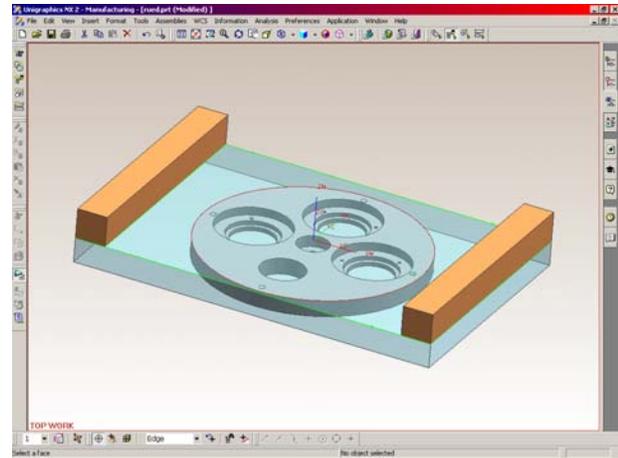
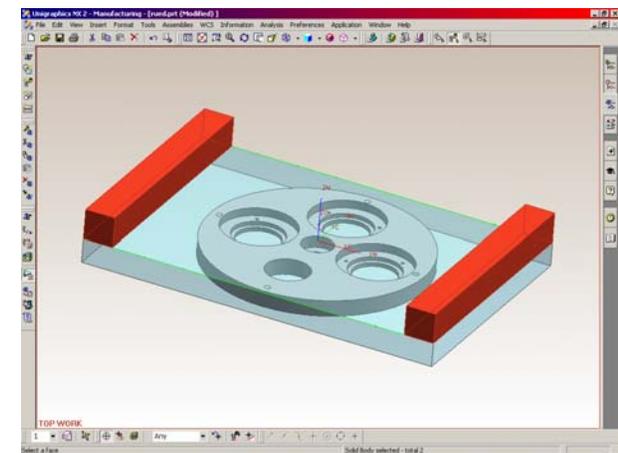


Fig. 4.17 Selección de la geometría *part*

Para la geometría *face* se elige el borde superior de la circunferencia que delimita la pieza final (Fig. 4.18).

Fig. 4.18 Selección de la geometría *face*

La geometría *check body* se refiere a cualquier cuerpo que pueda estar en riesgo de colisión con la herramienta, en este caso se consideran los elementos de sujeción de la pieza (Fig. 4.19).

Fig. 4.19 Selección de la geometría *check body*.

El parámetro *Cut Method* se refiere al patrón que seguirá la herramienta al realizar el corte. Para el careado seleccionamos zigzag (Fig. 4.20).

Fig. 4.20 Simbología de la opción zigzag en el parámetro *cut method*

Para determinar el ancho de corte el fabricante recomienda que éste sea entre 1.2 y 1.5 veces menor al diámetro del cortador. Para mejorar el acabado y dado que el tiempo del proceso no es un factor importante, utilizaremos el valor de 1.5 veces²¹.

²¹ Sandvik CoroMill. **Productos para el mecanizado del metal. Herramientas Rotativas (Catálogo 2001).**

Entonces tenemos que el ancho de corte w será:

$$w = \frac{D}{1.5} = \frac{50.8mm}{1.5} = 33.87mm \quad \text{Ec. 4.2}$$

Este valor se expresa en Unigraphics en términos del porcentaje del diámetro de la herramienta, lo que equivale a un 66.67%.

El parámetro *blank distance* se refiere al espesor del material que será removido en la superficie. En nuestro caso se trata de una capa de 1 mm de espesor.

La profundidad de corte máxima que puede realizarse con esta herramienta según el fabricante es de 6 mm, así que será suficiente con una sola pasada de la herramienta para remover el material deseado.

Existe también la opción de mantener un excedente de material sobre la pieza en caso de que se quiera dar un acabado con una herramienta diferente o bien con otros parámetros de corte. En este caso se realizará la operación completa en una sola pasada, así que el parámetro *Final Floor Stock* tiene un valor igual a cero.

De esta manera quedan definidos los siguientes parámetros:

Stepover	Tool Diameter
Percent	66.67 %
Blank Distance	1.000
Depth per Cut	1.000
Final Floor Stock	0.000

Para crear un acabado uniforme es recomendable que la herramienta comience a cortar en forma lateral y no en forma frontal. Al generar la ruta de maquinado Unigraphics utiliza como punto de inicio una coordenada sobre la pieza de trabajo, a la cual llega primero posicionando la herramienta en las coordenadas x,y para después bajar en z . Para modificar esto se crea un punto fuera de la pieza de trabajo con la altura en la que se realizará el corte y se asigna este punto como el de entrada. De la misma forma se genera otro punto con la misma coordenada en z fuera de la pieza para el término del proceso de corte, definido como el punto de salida, esto garantiza que la herramienta salga en su totalidad de la pieza de trabajo manteniendo la misma altura.

Las coordenadas de estos puntos serán:

Entrada (Engage)		Salida (Retract)	
X	49.60 mm	X	49.60 mm
Y	-90.00 mm	Y	90.00 mm
Z	-1.00 mm	Z	-1.00 mm

Para el cálculo de los parámetros de corte se utilizan los valores propuestos por el fabricante.

Velocidad de giro:

$$N = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_c} \quad \text{Ec. 4.3}$$

De las tablas proporcionadas por el fabricante, se recomienda un valor de v_c de 295 m/min para fresado de gran empañe. Mientras que el diámetro de corte de la herramienta D_c es de 50.8 mm.

Sustituyendo estos valores tenemos:

$$N = \frac{295 \times 1,000}{\pi \times 50.8} = 1,848.45 \text{rpm} \approx 1,850 \text{rpm} \quad \text{Ec. 4.4}$$

La velocidad de avance se calcula de la siguiente forma:

$$f_r = N n_t f \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde:

f_r = Velocidad de avance en mm/min

n_t = Número de dientes o filos de la herramienta.

F = Avance por diente en mm/diente

En este caso el número de filos es 4, mientras que el valor del avance de por diente recomendado por el fabricante es de $f=0.1$ mm/diente. Sustituyendo obtenemos:

$$f_r = (185)(4)(0.1) = 740 \text{mm/min} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Al ingresar en Unigraphics los valores de la velocidad de corte y el avance por diente, automáticamente realiza estos mismos cálculos y asigna la velocidad de giro y avance, sin embargo es posible cambiarla en forma manual si se desea utilizar una velocidad diferente. Además de esto, también es posible que el operario manipule esta velocidad durante el proceso de corte.

Una vez definidos todos los parámetros de la operación, se genera la ruta de maquinado que queda de la siguiente forma (Fig. 4.21):

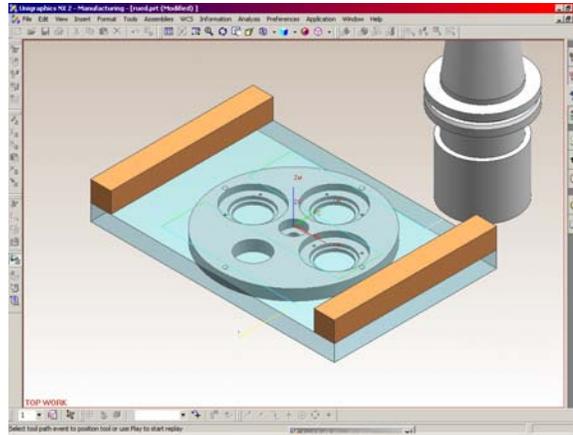


Fig. 4.21 Generación de la ruta de maquinado para el careado de la superficie.

BORDE CIRCULAR

La siguiente operación se trata de dar forma circular a la pieza. Esto lo haremos con un cortador de $\frac{1}{2}$ in que hará cortes en forma circular comenzando en la superficie de la pieza y bajando hasta alcanzar la altura de la pieza. No debe exceder el espesor total de la placa de partida ya que la pieza debe mantenerse unida al resto del material del cual se sujeta a la bancada.

La selección de operaciones se realiza de la siguiente forma:

Tipo	mill_planar
Subtipo	FACE_MILLING
Programa	NONE
Geometría	WORKPIECE
Herramienta	DOS_PULGADAS
Método	MILL_FINISH

La selección de geometrías comienza con la superficie superior de la pieza final referente a la geometría *Part* (Fig. 4.22).

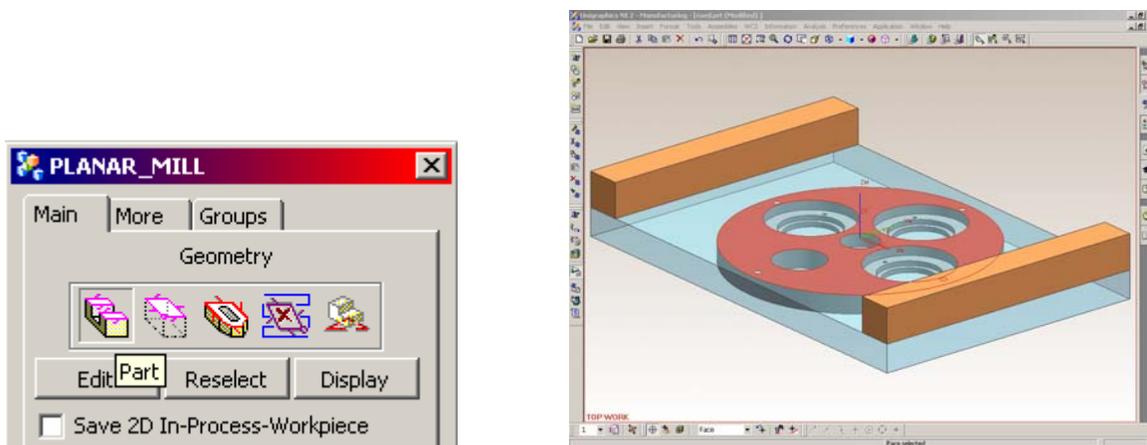


Fig. 4.22 Selección de la geometría *part*

Para la geometría *Blank* se selecciona la superficie superior de la pieza (Fig. 4.23).

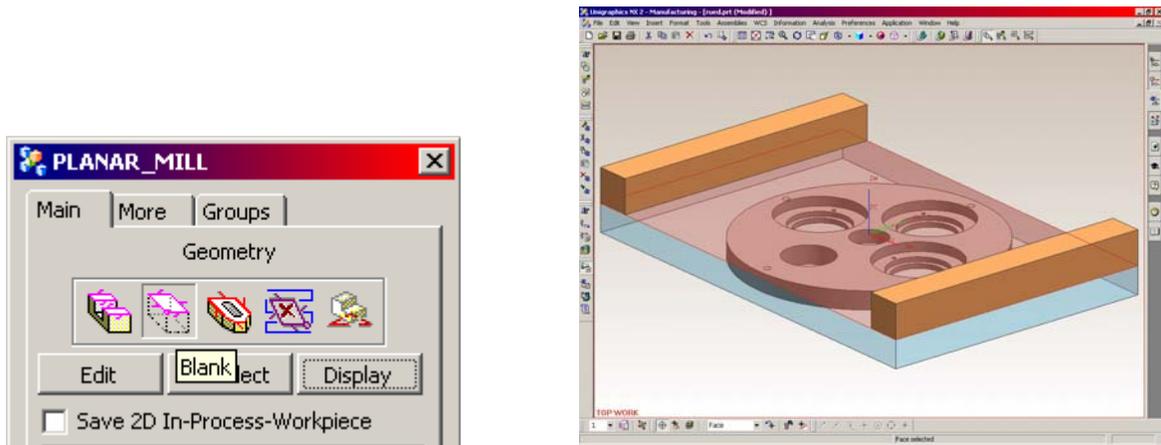


Fig. 4.23 Selección de la geometría *blank*

La geometría *Check* nos permite especificar cual será el perfil que debe seguir el cortador. La selección será el borde externo superior de la pieza final (Fig. 4.24).

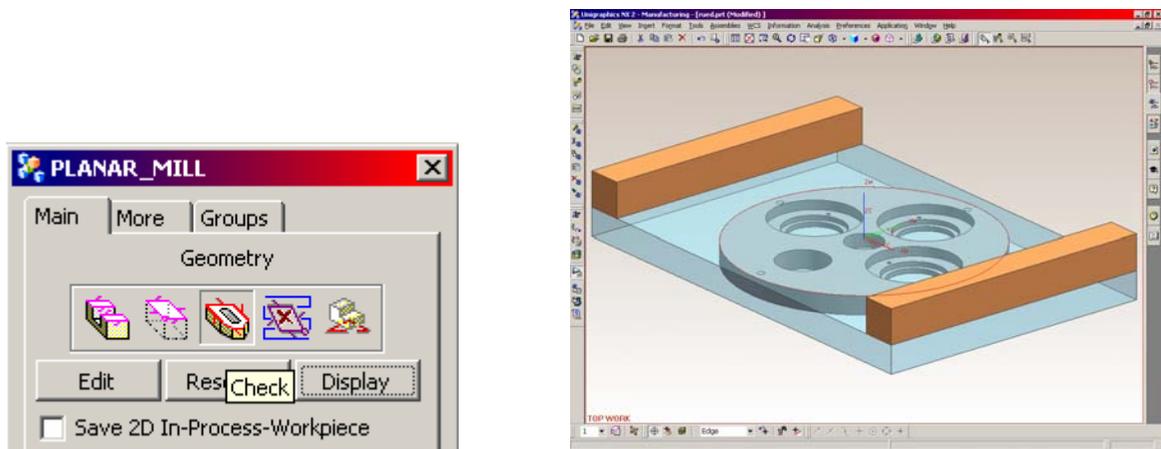


Fig. 4.24 Selección de la geometría *check*.

Finalmente establecemos la altura hasta la que debe cortar el perfil, esto lo hacemos seleccionando la cara inferior de la pieza final (Fig. 4.25).

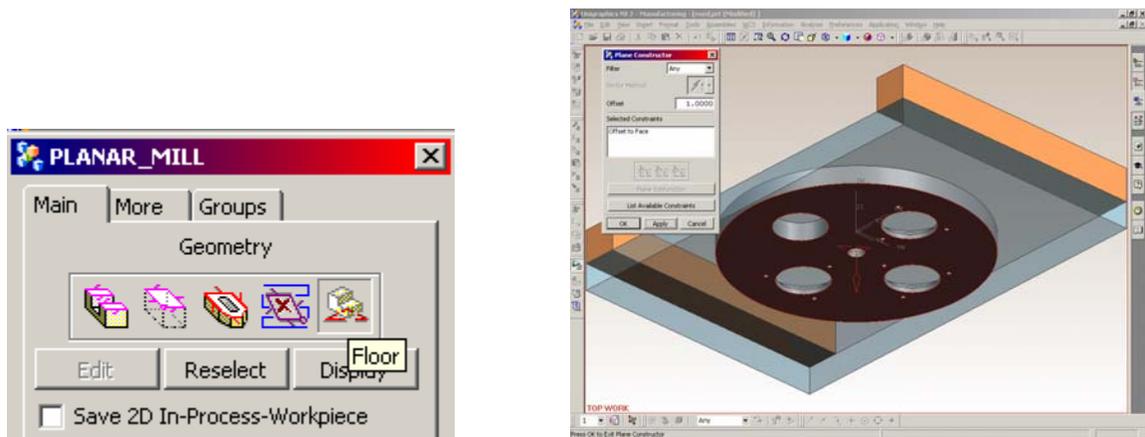


Fig. 4.25 Selección de la geometría *floor*.

El método de corte para esta operación es *profile* (Fig. 4.26)



Fig. 4.26 Simbología para la opción *profile* en el parámetro *cut method*.

Para el cálculo de los parámetros de corte utilizaremos como base una velocidad de corte de 70 m/min y un avance por filo de 0.1 mm/diente. Utilizando estos valores calculamos la velocidad de giro de la herramienta, cuyo diámetro es de ½ in:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D_c} = \frac{70 \times 1,000}{\pi \times 12.7} = 1,754.46 \text{rpm} \approx 1,755 \text{rpm} \quad \text{Ec. 4.7}$$

La velocidad de avance quedará entonces como sigue:

$$f_r = N n_r f = (1,755)(4)(0.1) = 702 \text{mm/min} \quad \text{Ec. 4.8}$$

De la misma forma se pueden ingresar los valores de velocidad de corte y avance y el programa realiza estos mismos cálculos en forma automática.

Una vez ingresados los parámetros de corte, se debe generar y verificar la ruta de maquinado (Fig. 4.27).

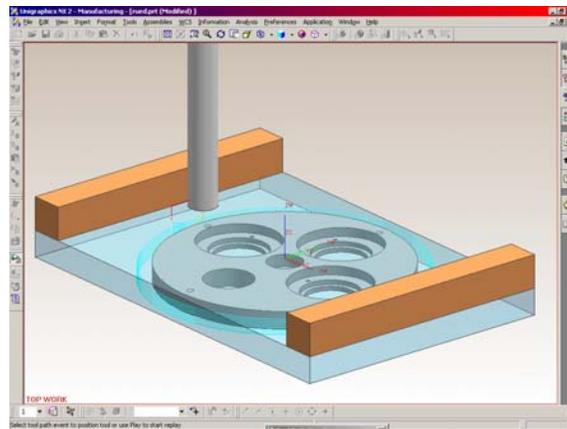


Fig. 4.27 Generación de la ruta de maquinado para el borde circular.

CAVIDADES CIRCULARES

Las cavidades que alojarán a cada filtro con su respectiva tapa se realizarán mediante una operación de fresado utilizando un cortador de acero de alta velocidad (HSS) de media pulgada con 4 filos y que ha sido denominada como MEDIA. Comenzaremos con una de las cajas de diámetro mayor, que se encuentra en la parte superior de la pieza.

La selección de la operación se realiza con las siguientes opciones:

Tipo	mill_planar
Subtipo	PLANAR_MILL
Programa	NONE
Geometría	WORKPIECE
Herramienta	MEDIA
Método	MILL_FINISH

Para la selección de geometrías tampoco es necesario el uso del bloque inicial, ni tampoco será necesario el uso de los bloques que representan los elementos de sujeción, por lo que resulta más práctico eliminar la visualización de éstos para generar las siguientes operaciones.

La selección de geometrías queda de la siguiente forma:

Para la geometría *part* se selecciona la superficie superior de la pieza final (Fig. 4.28).

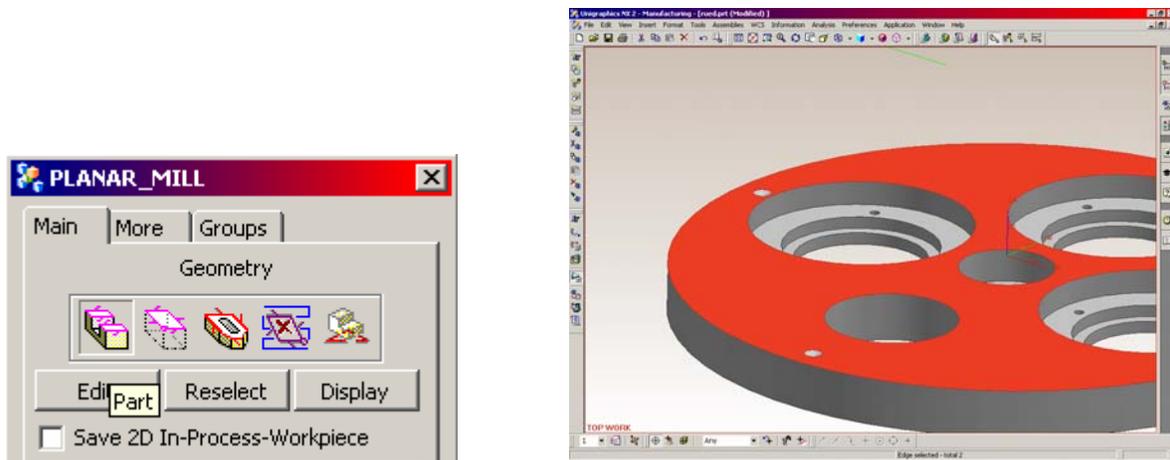


Fig. 4.28 Selección de la geometría *part*

Para la geometría *check* se utiliza el borde superior de la cavidad por cortar (Fig. 4.29).

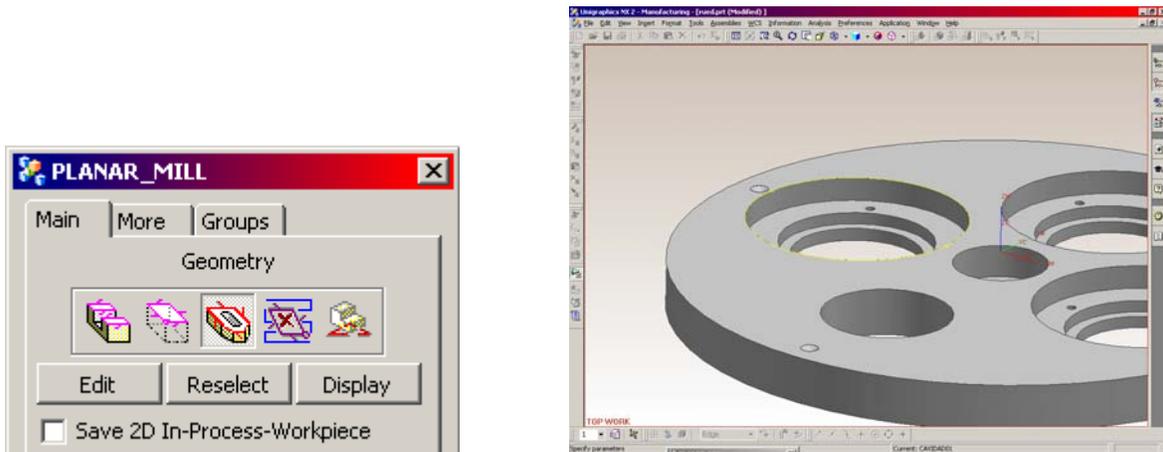


Fig. 4.29 Selección de la geometría *check*

La geometría *floor* corresponde a la superficie inferior de la caja por maquinar (Fig. 4.30).

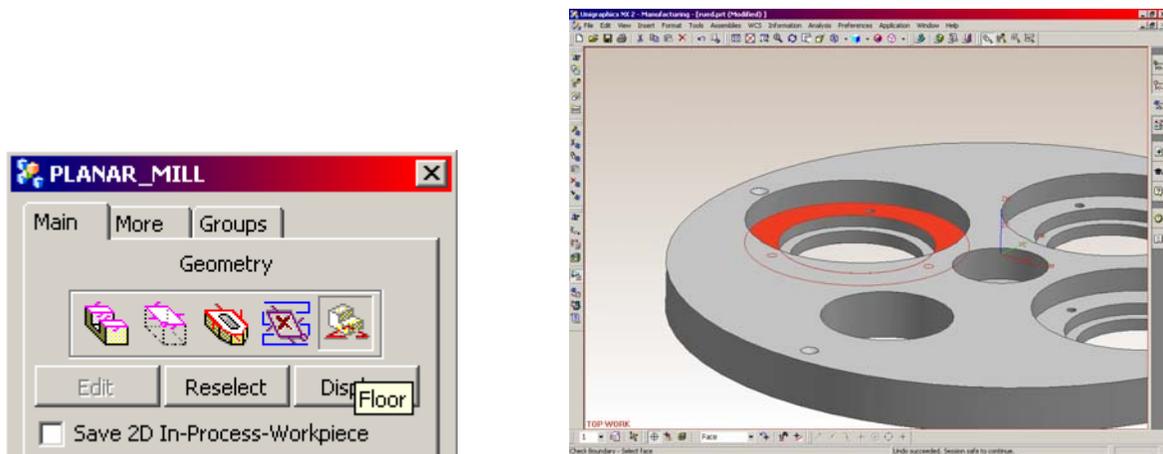


Fig. 4.30 Selección de la geometría *floor*

El método de corte seleccionado para esta operación es *follow part* (Fig. 4.31)



Fig. 4.31 Simbología para la opción *follow part* del parámetro *cut method*

El ancho de corte se recomienda de una décima parte del diámetro de la herramienta, así que los siguientes parámetros quedan de la siguiente forma:

Stepover
Percent

Tool Diameter
10.00 %

La profundidad de corte máxima que usaremos con esta herramienta es de 1 mm, ya usaremos una profundidad de 0.5 mm en la última pasada de la herramienta

para garantizar un mejor acabado. En la ventana de profundidad de corte incluiremos los siguientes valores

Type	User Defined
Maximum	1.00
Minimum	0.00
Inicial	1.00
Final	0.50

Utilizaremos los mismos parámetros de corte que se utilizaron para el borde circular ya que se trata de la misma herramienta.

Al generar la operación, la ruta queda de la siguiente forma (Fig. 4.32):

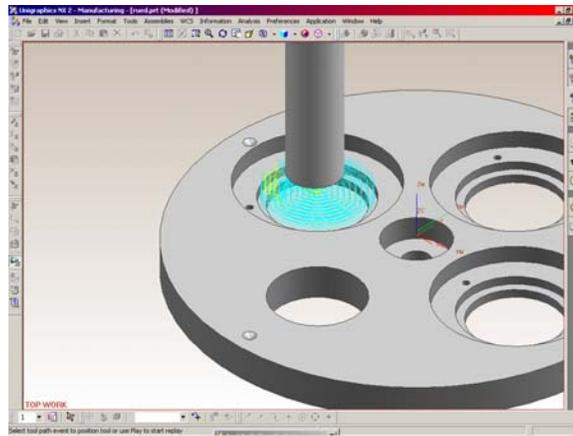


Fig. 4.32 Generación de rutas de maquinado para las cavidades circulares.

Al generar la ruta de maquinado podemos observar que el proceso de corte comienza con un movimiento de aproximación en forma helicoidal sobre el eje de la herramienta para comenzar a realizar la cavidad por el centro, y posteriormente realiza un movimiento circular hasta completar una vuelta, posteriormente incrementa el diámetro y realiza otra vuelta, este procedimiento lo realiza una y otra vez hasta alcanzar el diámetro de la cavidad.

Para todas las cavidades se realiza el mismo procedimiento, utilizando los mismos parámetros de corte. En las cavidades inferiores, que son pasadas, es recomendable dar una profundidad por lo menos 1 mm por debajo de la superficie inferior de la pieza final, para garantizar que al momento de retirar el material del fondo, las cavidades queden perfectamente definidas.

BARRENOS.

Para las operaciones de taladrado se tienen dos herramientas diferentes, una broca para el barreno central y una más pequeña para los tornillos que sujetan las tapas de los filtros.

Comenzando con la operación del barreno central, se realiza la selección de operaciones:

Tipo	Drill
Subtipo	DRILLING
Programa	NONE
Geometría	WORKPIECE
Herramienta	BROCA01
Método	DRILL_METHOD

En la geometría *Holes* se selecciona el barreno central de la pieza, al seleccionarlo éste quedará marcado con un número 1, que representa la secuencia del proceso. En este caso se trata de un barreno único (Fig. 4.33).

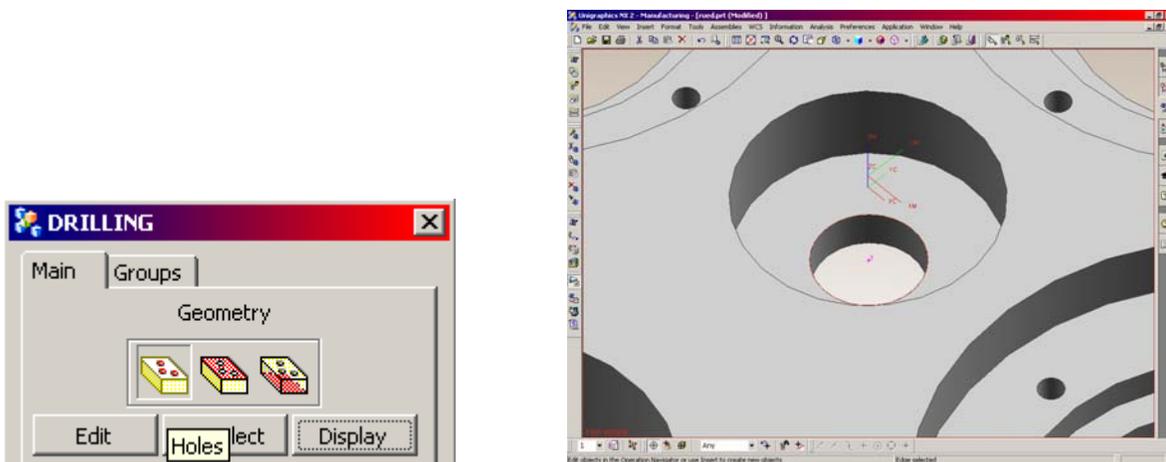


Fig. 4.33 Selección de la geometría *Holes*

Después se selecciona la superficie superior donde comenzará la operación de taladrado, en este caso seleccionamos la superficie inferior de la caja del barreno central (Fig. 4.34).

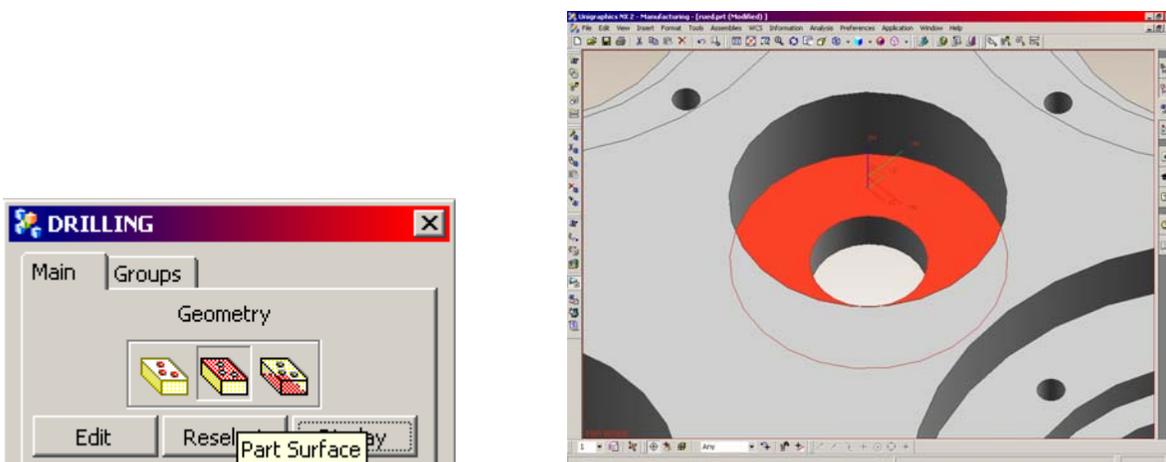


Fig. 4.34 Selección de la geometría *part surface*

Finalmente se selecciona la superficie inferior para el taladrado, que en este caso será la superficie inferior de la pieza (Fig. 4.35).

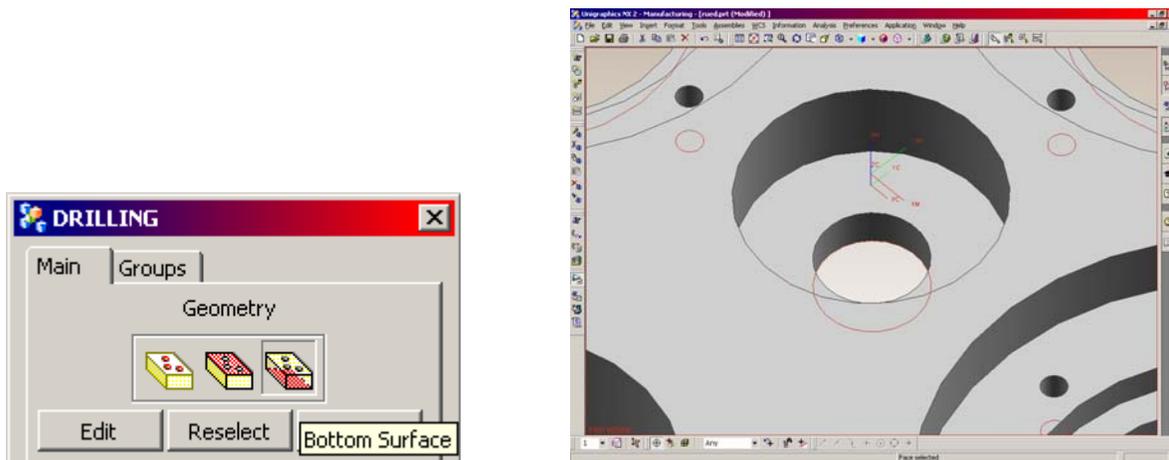


Fig. 4.35 Selección de la geometría *bottom surface*

El eje de la herramienta corresponde al eje z , y el proceso será una operación de taladrado estándar, realizará el barreno completo en un solo movimiento de avance de la herramienta hasta alcanzar la altura especificada. También es necesario especificar una altura de aproximación de la herramienta a partir de la cual comenzará a desplazarse con la velocidad de avance especificada, denominada *Min Clearance*, la cual, para evitar cualquier posible contacto en velocidad de posicionamiento, fijaremos de 2 mm. De igual manera, tratándose de un agujero pasado, es útil determinar un excedente en el movimiento de la herramienta que garantice un barreno de diámetro uniforme, denominado en Unigraphics como *Thru Hole*, y que en este caso será de 1 mm.

Las condiciones de corte recomendadas para este tipo de operaciones es de una velocidad de corte de 70 m/min, y un avance por filo de .025 mm/diente. A partir de éstos parámetros realizamos el cálculo de las velocidades de giro y avance de la herramienta.

La velocidad de giro:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(70)(1,000)}{\pi(6.75)} = 3,300.99rpm \approx 3,300rpm \quad \text{Ec.4.9}$$

Mientras que la velocidad de avance se calcula:

$$f = Nn_1f_r = (3,300)(2)(0.025) = 165mm / \text{min} \quad \text{Ec. 4.10}$$

El taladrado de los barrenos para los tornillos de las tapas de filtros es un poco más delicado debido al diámetro de la herramienta, que para una rosca de 1.6 mm, se recomienda de 1.25 mm. Para evitar que la broca se rompa durante el proceso, es útil desahogar la viruta.

La selección de operaciones para el ciclo de taladrado será la siguiente:

Tipo	Drill
Subtipo	PECK_DRILLING
Programa	NONE
Geometría	WORKPIECE
Herramienta	BROCA02
Método	DRILL_METHOD

La selección de geometrías para esta operación se realiza en forma similar a la anterior con las siguientes diferencias:

Existen dos alternativas para seleccionar los barrenos, la primera es seleccionar todos los barrenos de la pieza en una misma operación, esto representa una sola operación y puede ser optimizada para reducir también el tiempo de la operación. La desventaja de este procedimiento es que el valor del parámetro *Min Clearance*, debe ser mayor a 4.00 para evitar el choque con la pieza al momento de desplazarse de una cavidad a otra. La desventaja de esto radica en que este mismo parámetro será utilizado para el movimiento de salida de desahogue de viruta, lo cual hará más lento el proceso de taladrado de cada hoyo (Fig. 4.36).

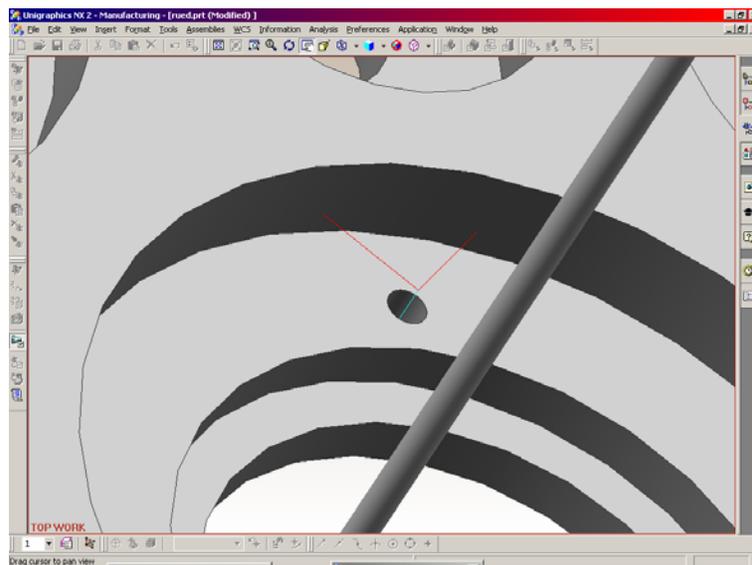


Fig. 4.36 En la imagen se aprecia que la ruta de movimiento de la broca (la línea roja representa el movimiento de la punta de la broca), pasa a través del material.

La segunda alternativa es hacer una operación diferente para cada cavidad, es decir, 3 operaciones para tres barrenos en cada una, sin embargo hacerlo de esta manera se puede Asignar un valor al parámetro *Min Clearance* un valor de 1.00 mm, suficiente para que la herramienta desahogue la viruta y entre de nuevo a realizar el corte.

En este caso elegiremos la primera alternativa.

Para la selección de geometría *Holes*, seleccionamos los 9 barrenos de un mismo diámetro, sin importar el orden, ya que posteriormente realizaremos una optimización del proceso (Fig. 4.37).

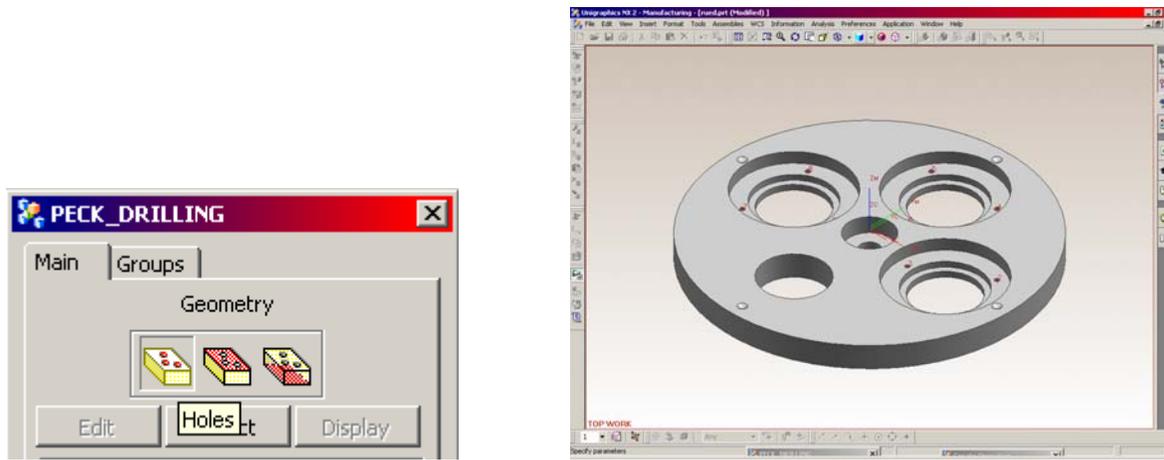


Fig. 4.37 Selección de la geometría *holes*

Para elegir la superficie superior de la pieza utilizamos la opción *Generic Plane*, que permite determinar un plano completo a partir de una superficie del modelo. Utilizando esta opción seleccionamos la base de la caja superior en cualquiera de las tres cavidades (Fig. 4.38).

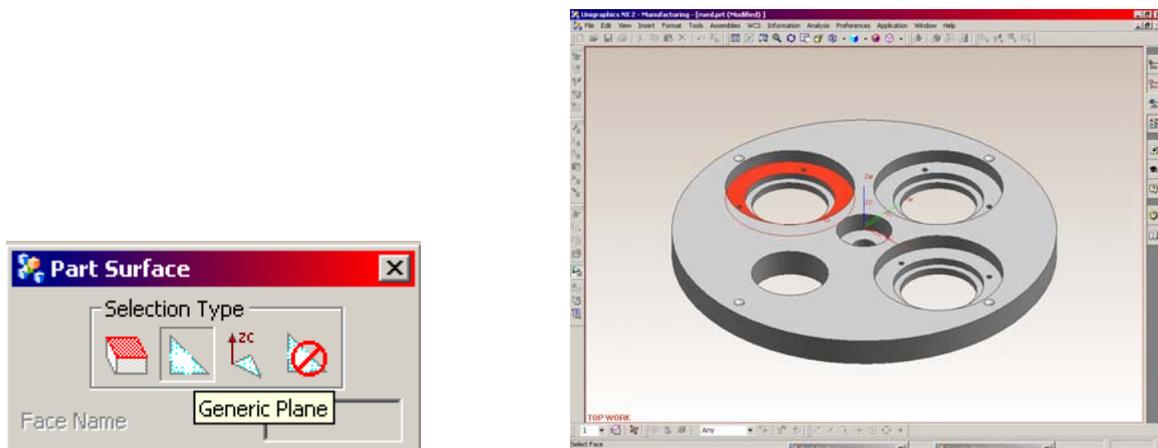


Fig. 4.38 Selección de la geometría *generic plane*

Finalmente la superficie inferior será la misma que en la operación de taladrado anterior.

En el campo *Tool Axis* se elige la opción *+ZM Axis*. En el siguiente campo se elige la opción *Peck Drill*, con lo que se deberán incluir 2 variables más. La primera denominada *Distance* que se refiere a la altura sobre el barreno a la cual debe detener el movimiento de posicionamiento rápido y comenzar a moverse con la velocidad de avance. El segundo parámetro *Set* se refiere al número de veces que debe salir la boca para desahogar la viruta en cada barreno. El primer parámetro lo fijaremos en 1.00 mm, mientras que para el segundo utilizaremos el valor máximo que es 5.

Para cada uno de los movimientos de entrada de la broca, se fija una profundidad, que será suficiente de 1 mm para completar la operación en los 5 movimientos de entrada y salida. Este valor debe ser especificado para cada uno de estos movimientos. De no ser suficiente, en el último movimiento la broca llegará hasta la profundidad requerida.

Para el valor *Min Clearance* que ya se mencionó anteriormente debe superar la superficie superior de la pieza, utilizaremos un valor de 5.00 mm.

El parámetro *Thru Hole* será similar al del taladrado anterior, 1.00 mm.

El cálculo de los parámetros de corte se realiza de manera similar a los anteriores, sin embargo tenderemos que reducir considerablemente la velocidad de corte debido a que el diámetro de la herramienta es muy pequeño y para alcanzar una velocidad de corte de 70 m/min sería necesario una velocidad de giro que la máquina no es capaz de alcanzar.

En este caso usaremos una velocidad de corte de 25 m/min, y un avance por filo de 0.025 mm/diente para calcular la velocidad de giro de la herramienta:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(25)(1,000)}{\pi(1.6)} = 6,366.19rpm \approx 6,360rpm \quad \text{Ec. 4.11}$$

Y la velocidad de avance queda:

$$f = Nn_t f_r = (6,360)(2)(0.025) = 318mm/min \quad \text{Ec. 4.12}$$

Con lo que queda únicamente generar y verificar la secuencia. Durante este proceso es importante revisar que no exista ningún tipo de contacto entre la broca y la pieza durante el movimiento de un hoyo al otro.

MUESCAS

La última operación por generar son las muescas, que se obtienen a partir de un ciclo de taladrado simple a una profundidad cercana a cero, ya que la muesca se forma únicamente con la punta de la broca. El procedimiento de selección se basa únicamente en los agujeros por maquinar.

La operación seleccionada será:

Tipo	Drill
Subtipo	DRILLING
Programa	NONE
Geometría	WORKPIECE
Herramienta	BORCA03
Método	DRILL_METHOD

La selección de geometría queda (Fig. 4.39):

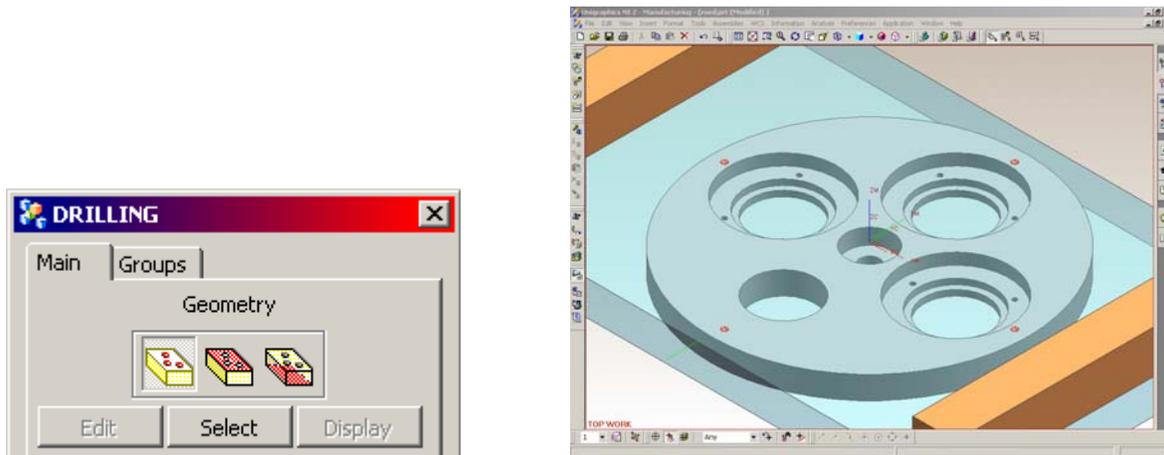


Fig. 4.39 Selección de la geometría Holes

Al parámetro Min Clearance le asignaremos un valor de 3 mm, que es la altura sobre la superficie a la que se desplazará la broca y comenzará a hacer el movimiento de avance.

Los parámetros de corte los calculamos de la misma forma.

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(25)(1,000)}{\pi(2)} = 3,978.87 \text{rpm} \approx 4,000 \text{rpm} \quad \text{Ec. 4.13}$$

$$f = Nn_r f_r = (4,000)(2)(0.025) = 200 \text{mm/min} \quad \text{Ec. 4.14}$$

Esto concluye la generación de rutas de maquinado para la rueda de filtros. El procedimiento para la rueda de lentes será similar.

RUEDA DE LENTES.

La principal diferencia en el procedimiento con respecto a la rueda de filtros radica en la variación de los diámetros de los barrenos y las cavidades para las tapas. En este caso se trata de barrenos que van desde los 4 mm hasta 11 mm, así que lo más conveniente es hacerlos con procesos de taladrado, mientras que las cajas para las tapas se pueden formar de la misma forma que en la rueda de filtros, con procesos de fresado vertical.

Para los barrenos de 8, 9 y 11 mm haremos un barreno preliminar de 4 mm, por lo que el primer ciclo de taladrado incluirá a todos los agujeros pasados correspondientes a cada lente, además del barreno simple que no lleva ningún lente. Esto permite que en cada proceso de taladrado se retire una menor cantidad de material, reduciendo la potencia requerida para los barrenos de mayor diámetro, mejorando también el acabado (Fig. 4.40).

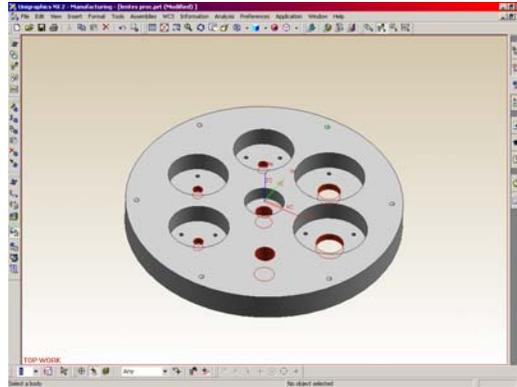


Fig. 4.40 Selección de los barrenos para alojar los lentes.

Los parámetros de corte para este ciclo se obtienen mediante el mismo cálculo que en los procesos anteriores:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(70)(1,000)}{\pi(4)} = 5,570.42rpm \approx 5,570rpm \quad \text{Ec. 4.15}$$

$$f = Nn_t f_r = (5,570)(2)(0.025) = 278.5mm / \text{min} \quad \text{Ec. 4.16}$$

Posteriormente haremos un segundo ciclo de taladrado con la broca de 8 mm, en el cual haremos el agujero simple, y también incluiremos una segunda pasada en el barreno de 11 mm (Fig. 4.41).

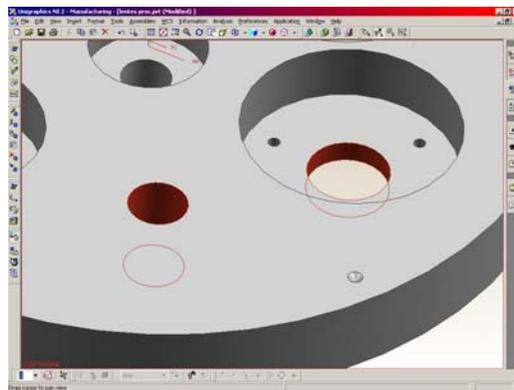


Fig. 4.41 Selección de los barrenos para la operación con la broca de 8 mm.

Para éste segundo ciclo los parámetros de corte son:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(70)(1,000)}{\pi(8)} = 2,785.21rpm \approx 2,800rpm \quad \text{Ec. 4.17}$$

$$f = Nn_t f_r = (2,800)(2)(0.025) = 140mm / \text{min} \quad \text{Ec. 4.18}$$

A continuación se usa la broca de 9 mm para el barreno correspondiente a este diámetro (Fig. 4.42). Se trata de un barreno único cuyos parámetros de corte son los siguientes:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(70)(1,000)}{\pi(9)} = 2,475.74 \text{rpm} \approx 2,500 \text{rpm} \quad \text{Ec. 4.19}$$

$$f = N n_t f_r = (2,500)(2)(0.025) = 125 \text{mm} / \text{min} \quad \text{Ec. 4.20}$$

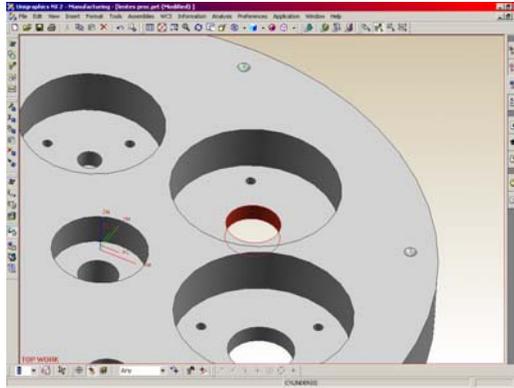


Fig. 4.42 Barreno con la broca de 9 mm.

Finalmente terminamos con el barreno de 11 mm (Fig. 4.43), haciendo una tercera pasada con el diámetro final con los siguientes parámetros de corte:

$$N = \frac{v_c \times 1,000}{\pi \times D} = \frac{(70)(1,000)}{\pi(11)} = 2,025.61 \text{rpm} \approx 2,000 \text{rpm} \quad \text{Ec. 4.21}$$

$$f = N n_t f_r = (2,000)(2)(0.025) = 100 \text{mm} / \text{min} \quad \text{Ec. 4.22}$$

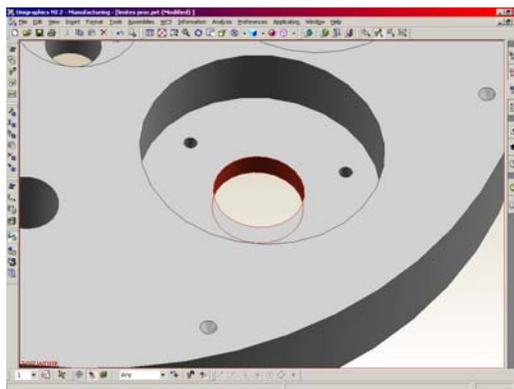


Fig. 4.43 Barreno de 11 mm

El resto de las operaciones seguirán el mismo procedimiento que se utilizó en la rueda de filtros, con los ajustes correspondientes en las dimensiones y número de operaciones (Fig. 4.44).

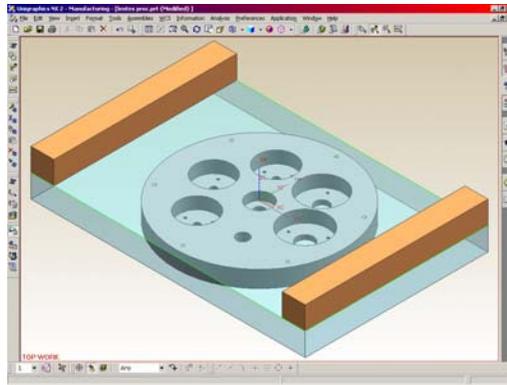


Fig. 4.44 Configuración similar a la rueda de filtros.

El resultado final de este procedimiento es una secuencia de instrucciones ordenadas para cada operación, expresadas en el lenguaje de Unigraphics y que deberán ser traducidas a Código G para ser verificadas y transferidas a la máquina para realizar el proceso de fabricación de la pieza.

4.6 POST-PROCESAMIENTO.

Al generar las rutas de maquinado para las piezas, Unigraphics crea una secuencia de comandos con las instrucciones necesarias para la fabricación de la pieza. Estas instrucciones son principalmente desplazamientos de la herramienta en relación a la pieza, basándose en la geometría de ambas y utilizando los criterios previamente definidos durante el proceso anterior. Sin embargo esta secuencia también contiene instrucciones sobre los parámetros de corte y operaciones auxiliares, como cambios de herramienta, compensaciones de herramienta, arranque y paro del husillo, refrigerante, etc.

El post-procesamiento es un proceso realizado por la computadora en el que traduce las instrucciones a un lenguaje estandarizado para control numérico llamado Código G. Dado que existe una gran diversidad tanto de fabricantes de controles, como programas CAM, lo mejor es realizar el post-procesamiento con un programa diseñado en forma específica para la combinación utilizada, de lo contrario se presentarán errores, ya sea sintácticos o bien de interpretación de instrucciones, que modifican el comportamiento de la máquina.

Existen dos herramientas diferentes para el post-procesamiento de un programa de maquinado. El primero es el GPM (Graphics Postprocessor Module) consiste en la creación de un archivo del tipo CLSF (Cutter Location Source File), es un archivo que contiene todo el conjunto de operaciones e instrucciones en el lenguaje del programa CAM. Este archivo puede ser editado, modificado y optimizado antes de post-procesado. Una vez que está listo el archivo CLSF, se realiza el post-proceso mediante el GPM. Además del archivo CLSF, el GPM requiere un archivo con extensión MDF (Machine Data File), que contiene información sobre la máquina herramienta y el controlador, de tal forma que el post-proceso arroje un programa con instrucciones que el control sea capaz de

interpretar adecuadamente. El Archivo MDF debe ser proporcionado por el fabricante del control.

El uso del GPM parece ser una buena alternativa ante la carencia de un post-procesador exclusivo. Sin embargo no contamos con el archivo MDF, por lo que no es posible seguir este método. La segunda alternativa, y en nuestro caso la única viable es el post-procesamiento mediante el módulo UG/Post. Este módulo es más sencillo pero también acarrea una gran cantidad de errores, ya que únicamente traduce las instrucciones sin conocer de qué control se trata.

El procedimiento para el post-procesamiento es el siguiente:

- Asegurándose que se encuentra seleccionado NC_PROGRAM (Fig. 4.45) en el Navegador de operaciones, se selecciona el módulo UG/Post en la barra de herramientas, o bien en el menú Tools>Operation Navigator>Output>UG/Post Postprocess.

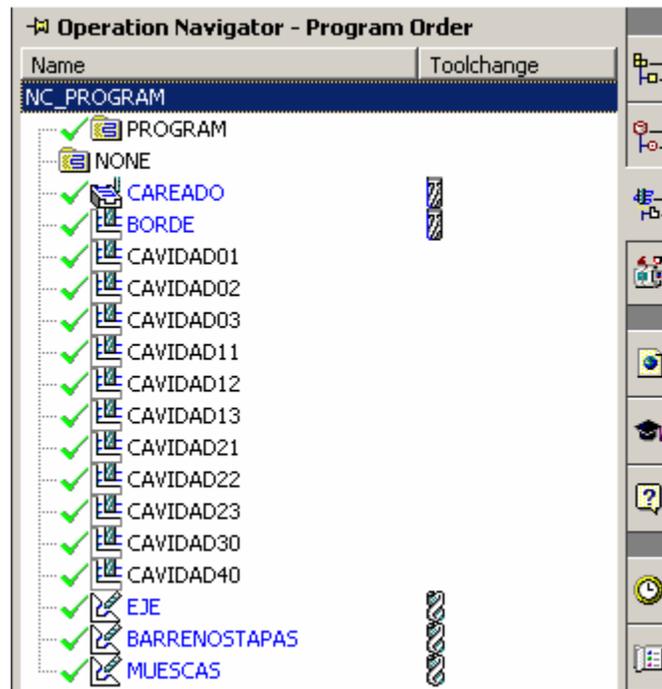


Fig. 4.45 Navegador de operaciones

- Inmediatamente se solicitará la selección del tipo de máquina herramienta con la que se va a trabajar. En nuestro caso elegiremos MILL_3_AXIS (Fig. 4.46).

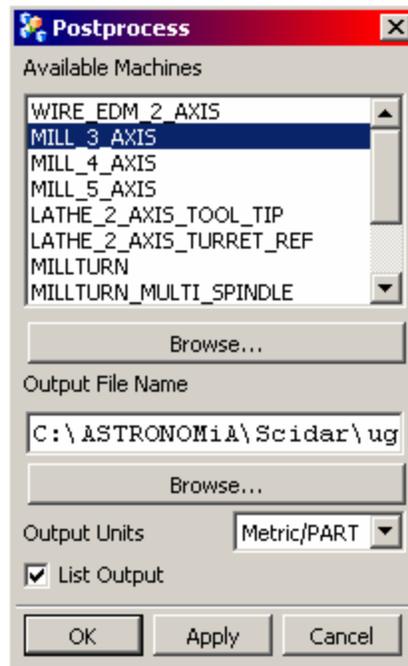


Fig. 4.46 Selección del tipo de máquina herramienta utilizada.

- Además debemos especificar también el nombre y ubicación del archivo que será creado y que contendrá el programa en Código G. También especificaremos el sistema de unidades en el que debe trabajar la máquina, que en este caso será métrico. Por último tenemos la opción de que al concluir el post-proceso se nos muestre el programa completo.
- Al Aceptar el proceso, automáticamente será generado el archivo en formato TXT.

El archivo en formato TXT puede ser fácilmente modificado en cualquier procesador de texto. Esto permite hacer todas las correcciones que sean pertinentes para posteriormente ser enviado al control de la máquina.

DETECCIÓN DE ERRORES EN EL POST-PROCESAMIENTO:

Durante el post-proceso se generan incorrectamente algunas instrucciones, dentro de estos existen algunos que se generan sistemáticamente debido a una instrucción específica. A continuación se presentan los errores detectados en el programa de fabricación de la rueda de filtros.

- Siempre que existe una línea con una instrucción de cambio de herramienta, se sustituye la letra N del número de línea por : (Dos puntos). Para el control este signo no tiene significado alguno, y el número de cuatro dígitos que aparece a continuación no podrá ser interpretado por la máquina adecuadamente.

```
%  
N0010 G40 G17 G90 G70  
N0020 G91 G28 Z0.0  
:0030 T01 M06  
N0040 T02
```

En el listado podemos apreciar que la instrucción de cambio de herramienta cuyo número debe ser N0030, aparece como :0030.

- En ocasiones es posible que el post-proceso arroje instrucciones utilizando “g” (minúscula). El control no es capaz de identificar letras minúsculas, por lo que al momento de transferir el programa omitirá el comando y únicamente aparecerá el número de la instrucción (si dice g01, sólo aparece 01) y al leer el programa se activará la alarma.
- Puesto que la diferencia de alturas entre las diferentes herramientas dependerá del montaje de las mismas, el post-proceso siempre genera una compensación de altura para una herramienta más larga que la herramienta de referencia (herramienta con la que se determina el origen del sistema de referencia) utilizando el parámetro H00 (magnitud de la diferencia de altura respecto a la herramienta de referencia).

```
N0190 T02 M06  
N0200 T03  
N0210 G0 G90 X-63.8285 Y8.1758 S1754 M03  
N0220 G43 Z2. H00
```

En el listado anterior se muestra un procedimiento de cambio de herramienta, en la primera línea se observa que se toma la herramienta T02, mientras que en la cuarta línea, correspondiente a la instrucción de compensación de altura, se utiliza la instrucción G43 y el parámetro H00. Esto debe ser modificado en el programa antes de ser ejecutado. Para realizar este ajuste es necesario que las herramientas se encuentren correctamente montadas en la máquina y en la posición asignada previamente en el programa de maquinado.

Una vez que ha sido determinado el origen del sistema de referencia, se cargan en el usillo una por una todas las herramientas, y se desplazan cuidadosamente hasta que la punta de la herramienta toque la superficie de referencia de la pieza. A continuación se observará la coordenada z (coordenadas absolutas). La magnitud de la coordenada será el valor del parámetro H__, (siempre es positivo), mientras que el signo definirá si se trata de una compensación hacia arriba o hacia abajo.

Cuando una herramienta es más corta que la herramienta de referencia, el signo de la coordenada en z será negativo, y la instrucción adecuada en este caso es G44. Si es positivo, la herramienta es más larga y deberá utilizarse la instrucción G43.

Puesto que esta instrucción es generada sistemáticamente para cualquier instrucción de cambio de herramienta, existirá también una compensación para la herramienta de referencia. En este caso basta con mantener el valor H00 en el programa. El parámetro H00 no puede ser modificado y siempre tendrá un valor igual a cero.

- El origen del sistema de referencia utilizado debe ser establecido una vez que se ha montado la pieza, sin embargo es el programa de corte el que especifica el sistema de referencia sobre el cual deberá trabajar la máquina durante el corte de material. Las máquinas de control numérico pueden contar hasta con 6 sistemas de referencia auxiliares diferentes. El más común es el G54, el cual debe ser especificado en las primeras líneas del programa.

En general cualquier programa funcional para este tipo de operaciones debe contener las siguientes líneas al inicio.

```

%
N0010 G40 G17 G54 G94 G90 G21
N0020 G91 G28 Z0.0
N0030 T0_ M06
N0040 G90
N0050 M03 S_____
N0060 G43 Z_. H0_

```

Donde:

G40	Cancela cualquier compensación de altura
G17	Especifica al plano x,y para las interpolaciones.
G54	Define el sistema de referencia auxiliar, pueden utilizarse otros.
G94	Define el avance por minuto.
G90	Referencia Absoluta
G21	Define las unidades en mm
G91	Referencia incremental
G28	Regresa a la posición de referencia
M03	Enciende el husillo en sentido horario, puede usarse M04 para el sentido antihorario.
G43	Compensación de altura de la herramienta, puede ser G44 si la herramienta es más corta que la de referencia.
M06	Inicia secuencia de cambio de herramienta.

El post-proceso arroja en las líneas iniciales, las siguientes instrucciones:

```
N0010 G40 G17 G90 G70
N0020 G91 G28 Z0.0
N0030 T01 M06
N0040 T02
N0050 G0 G90 X49.6 Y-90. S1848 M03
N0060 G43 Z3. H00
```

Es importante hacer las modificaciones respectivas en el programa antes de ser ejecutado, principalmente incluir los comandos relativos al sistema de referencia y a las especificaciones de sistemas de unidades.

4.7 SIMULACIÓN

La simulación de un programa tiene por objetivo verificar que éste se ejecute adecuadamente al momento de fabricar una pieza. La revisión del programa posterior al post-proceso no garantiza que el programa se ejecute siempre en forma adecuada, sobre todo cuando se trata de secuencias de instrucciones muy largas y que resultaría imposible revisar línea por línea. La simulación consiste en ejecutar el programa, primero en forma virtual y después en la máquina, verificando que las instrucciones se presenten en forma adecuada, y principalmente que no existan choques entre la herramienta con ningún otro elemento.

VERIFICACIÓN DURANTE LA GENERACIÓN DE RUTAS DE MAQUINADO.

La primera etapa de la simulación se realiza desde la generación de las rutas de maquinado. Cada operación puede ser verificada en forma individual y permite una simulación gráfica de las trayectorias de la herramienta (Fig. 4.47). Con este procedimiento podemos apreciar que la secuencia de maquinado se la adecuada, y que las coordenadas generadas para cada movimiento sean las correctas.

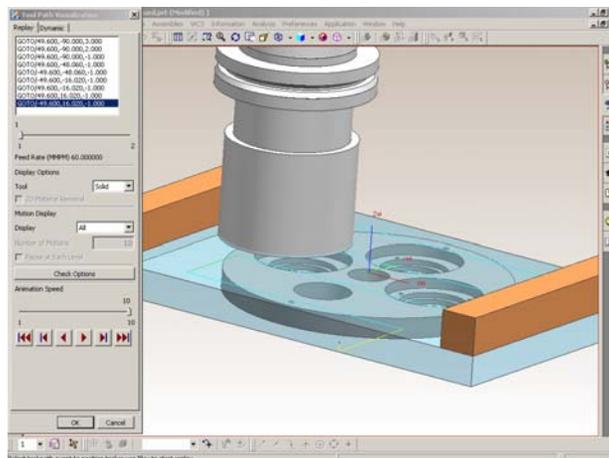


Fig. 4.47 Verificación de la ruta de maquinado para el careado de la rueda de filtros.

Este procedimiento es útil solo para verificar posiciones y rutas de desplazamiento de la herramienta. Los parámetros tales como velocidades de giro, avance y posicionamiento no se muestran en esta simulación, ya que en esta etapa aún no se cuenta con el programa en Código G.

VERIFICACIÓN VIRTUAL.

Existen programas de computadora que verifican en forma virtual una secuencia de instrucciones en Código G. Para ello es necesario ingresar algunos datos adicionales tales como las dimensiones del bloque inicial y las características y tipo de herramienta. Para este procedimiento contamos con un programa llamado CutVewer. Este programa verifica principalmente errores de sintaxis y choques de la herramienta y pieza en velocidad de posicionamiento. Este programa puede determinar también un movimiento inapropiado de la herramienta según su tipo, por ejemplo puede detectar si una broca realiza un movimiento lateral en contacto con la pieza.

Al definir el bloque inicial, solo pueden utilizarse dos geometrías diferentes, un bloque rectangular o circular. Deben introducirse las dimensiones y las coordenadas en las que se encuentra el origen del sistema de referencia (Fig. 4.48).

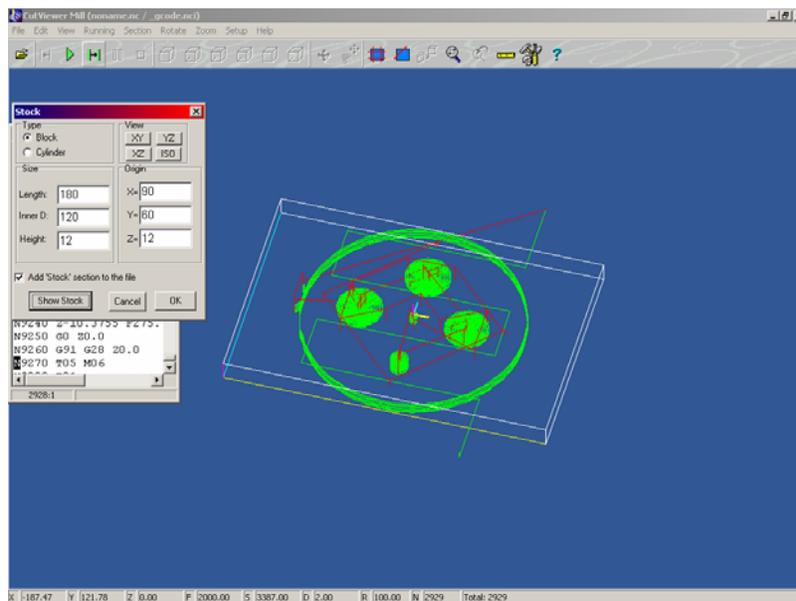


Fig. 4.48 Definición de geometría y dimensiones del bloque inicial.

También deben definirse las dimensiones de cada herramienta, geometría, diámetro, longitud y cualquier otra dimensión crítica de la misma (Fig. 4.49).

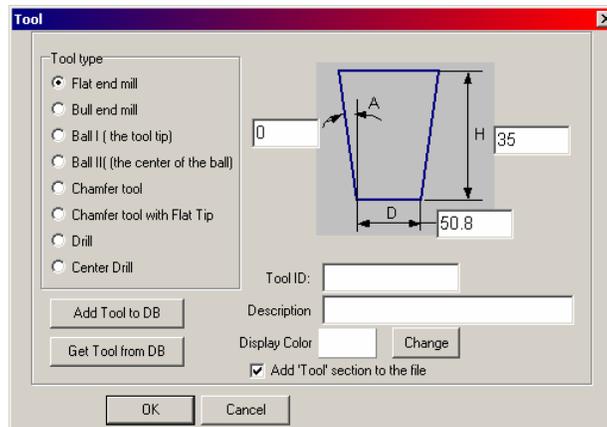


Fig. 4.49 Definición de las dimensiones y geometría de una herramienta.

Una vez que se han definido los parámetros anteriores, se ejecuta el programa completo. Cuando detecte alguna falla en el programa, automáticamente se detendrá, especificando que tipo de error presenta el programa, en que línea y en que posición se encuentra la herramienta (Fig. 4.50).

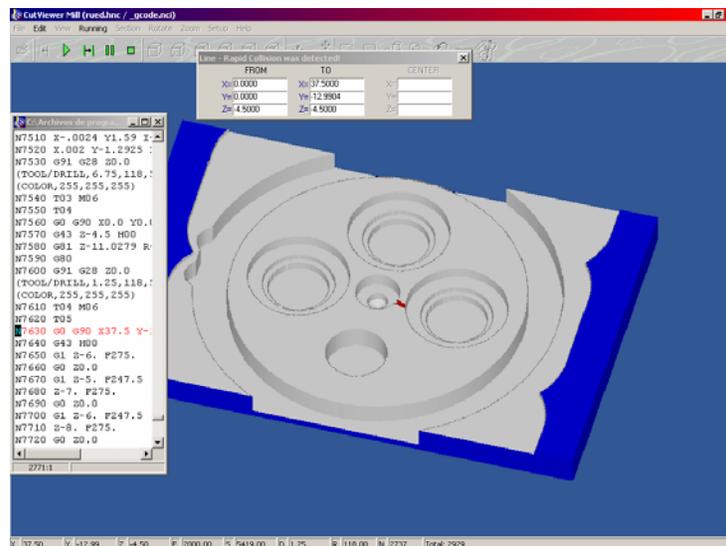


Fig. 4.50 Detección de un choque en el programa, la secuencia se detiene, señalando en rojo la línea en la que se presenta el problema y las coordenadas de inicio y fin del movimiento en el que se presenta la colisión

En la imagen se muestra una señal de colisión con la broca de 1.25 mm durante el posicionamiento, sin embargo al revisar el programa se aprecia que existe un cambio de herramienta y posteriormente un posicionamiento en las coordenadas x,y antes de bajar el cabezal en el eje z , por lo que en realidad no existe tal error en el programa. Esto es un error del programa de verificación, por lo que cada señal de alarma debe ser verificada línea por línea.

.VERIFICACIÓN FÍSICA.

Teniendo el programa de maquinado cargado en la memoria del control, y habiendo establecido los parámetros necesarios tales como el sistema de

referencia y las magnitudes para la compensación de la longitud de herramientas, se pueden hacer varias revisiones del programa antes de ejecutarlo en forma definitiva.

La primera revisión puede hacerse utilizando una opción del control que bloquea el movimiento de los tres ejes de la máquina. Esto permite que el control lea cada instrucción de existir alguna instrucción que no se pueda interpretar adecuadamente. Durante este procedimiento se puede observar en la pantalla del control la posición en la que se debe mover la máquina. Debe tenerse en cuenta que al modificar las coordenadas de la posición en el control sin realizar un movimiento real de la herramienta, el sistema de referencia quedará alterado y deberá reestablecerse antes de comenzar de nuevo la ejecución del programa.

El procedimiento para esta revisión consiste en ejecutar normalmente el programa, activando el botón del panel de control *LOCK*, para activar el bloqueo de movimiento en los tres ejes.

Una vez que el programa se ha ejecutado sin presentar ningún tipo de alarma o error detectable con el procedimiento anterior, el siguiente paso es ejecutar el programa sin herramienta, esto permitirá apreciar si existe algún movimiento del cabezal fuera del rango esperado, así como movimientos a alta velocidad en proceso de corte de material.

Aún cuando se han tomado todas las precauciones anteriores, siempre existe la posibilidad de un error durante la fabricación de la pieza, por lo que siempre es recomendable estar pendiente del proceso de maquinado controlando las velocidades de movimiento con las perillas del panel de control y con fácil acceso al paro de emergencia.

4.8 PREPARACIÓN DEL EQUIPO Y FABRICACIÓN.

El proceso de fabricación comienza con la preparación de la máquina herramienta y el control numérico. Antes de comenzar a maquinar es necesario montar la pieza y herramientas, cargar en la memoria del control numérico el programa de maquinado, establecer el origen del sistema de referencia y determinar las magnitudes y direcciones en las compensaciones de altura.

MONTAJE DE LA PIEZA.

El montaje debe ser congruente con lo planeado desde el modelado, verificando que las dimensiones del bloque inicial correspondan con las planteadas originalmente. Además es necesario que los elementos de sujeción se encuentren dentro del espacio establecido durante el modelado, de lo contrario existe un alto riesgo de impacto con la herramienta. De ser necesario modificar alguna de estas dimensiones, será indispensable también llevar los cambios al programa CAM, y reanudar el procedimiento desde el post-procesamiento y verificación virtual.



Fig. (4.51) Montaje de la pieza.

En el montaje de la pieza es importante verificar que la posición de la pieza sea la adecuada, que la sujeción sea firme, que no exista ninguna libertad de movimiento incluyendo giro de la pieza a causa del par aplicado por la herramienta de corte (Fig. 4.51). Debe existir especial cuidado cuando se trata de materiales frágiles, pues si los elementos de sujeción generan esfuerzos muy grandes sobre el material, éste puede fracturarse durante el montaje o incluso durante la remoción de material.

MONTAJE DE HERRAMIENTAS.

Las herramientas elegidas para la fabricación del material deben ser montadas antes del comienzo del proceso de fabricación. Deben ser adecuadamente colocadas en su respectivo portaherramientas, y cargadas una por una a través de un programa auxiliar con una secuencia de cambio de herramientas, o bien ejecutando las líneas iniciales del programa de fabricación. Las herramientas deben ser colocadas respetando la numeración asignada en el proceso de generación de rutas de corte (Fig. 4.52)



Fig. 4.52 Montaje de las herramientas en el carrusel del amáquina.

TRANSFERENCIA DEL PROGRAMA.

Antes de transferir el programa, debe elegirse un número de programa y revisar que no exista un programa con ese mismo número. El archivo con formato TXT debe llevar por nombre el número de programa elegido con el formato OXXXX.txt, donde XXXX es el número elegido para el programa (Fig. 4.53).



Fig. 4.53 El programa se transfiere al control de la máquina.

ORIGEN DEL SISTEMA DE REFERENCIA.

Para localizar este punto debe montarse la herramienta elegida como herramienta de referencia. Lo más conveniente es elegir una herramienta terminada en punta, como una broca para localizar fácilmente el punto deseado. En nuestro caso, como en la mayoría, lo más fácil y conveniente es utilizar un punto sobre la superficie de la pieza para colocar la punta de la herramienta sobre el punto exacto del origen del sistema de referencia. Cuando la herramienta se encuentra en la posición deseada, deben leerse las coordenadas de posición respecto al origen de referencia de la máquina. Estas coordenadas deben ser ingresadas en el menú de sistemas de referencia auxiliares, específicamente al que hace referencia el programa de maquinado, que usualmente es G54, aunque este puede ser cambiado por G55 o G56, que son los sistemas de referencia auxiliares que puede manejar el control. Las coordenadas deben ser ingresadas incluyendo los signos y finalmente debe oprimirse el botón RESET.

COMPENSACIÓN DE ALTURA DE LAS HERRAMIENTAS.

Para cada herramienta siempre existirá una diferencia de altura respecto a la herramienta de referencia. Para que esto no altere el proceso de corte de una pieza debe determinarse cual es esa diferencia y definir una compensación para cada una de ellas. El procedimiento deberá realizarse una vez que se ha determinado el origen del sistema de referencia. Cada herramienta deberá ser montada en el husillo de la máquina y desplazada hasta que toque la superficie de la pieza en la que se encuentra el origen. Cuando se encuentre en la posición adecuada la herramienta debe tomarse la coordenada en z. La magnitud deberá ser ingresada en el parámetro H que corresponda a la herramienta, mientras que el signo definirá si se trata de una instrucción G43 o G44. Se utiliza G43 cuando se trata de una herramienta más larga que la de referencia, es decir que la

coordenada en z tiene signo positivo. Cuando el signo es negativo se trata de una herramienta más corta que la herramienta de referencia, y deberá utilizarse la instrucción G44²².

Una vez que la máquina esta lista, debe comenzarse el proceso de fabricación (Fig. 4.54), para lo cual únicamente debe mantenerse pendiente en todo momento una persona que verifique que el proceso se desarrolle adecuadamente, que regule la velocidad de avance de la herramienta en caso de que esta no resulte adecuada y que pueda detener el proceso y corregir cualquier problema en caso de presentarse una alarma.



Fig. 4.54 Proceso de fabricación de las piezas.

²² Cantó, Jorge J. **Compensación de Alturas.**

5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 DIAGRAMA DE FLUJO.

Como resultado del procedimiento desarrollado para la fabricación de las piezas, se genera un conjunto de diagramas de flujo que lo describen. El primero es un diagrama general del proceso en el que se describe el orden de las etapas.

El procedimiento comienza una vez que se ha concluido el diseño de la pieza. El modelado es la primera etapa, actualmente la mayoría de los diseños incluyen un modelado, éste puede ser en un programa diferente al programa CAM, por lo que será necesario importarlo o incluso realizar un nuevo modelado a partir de la geometría y dimensiones del modelo original. También es necesario incluir el modelo de la pieza inicial y los elementos de sujeción.

La generación de rutas de maquinado es la etapa más crítica del proceso, ya que es donde se definen los procedimientos de corte del material, secuencia y parámetros de corte. Esta etapa requiere un conocimiento claro tanto de los procesos de corte, las capacidades de la máquina herramienta y del uso del programa CAM, de lo contrario existe la posibilidad de generar rutinas inadecuadas o fuera del alcance de las capacidades del equipo disponible.

El post-proceso sirve para generar una secuencia de instrucciones que el control de la máquina herramienta es capaz de interpretar. Este programa regularmente es generado con ciertos errores, algunos de ellos en forma sistemática y otros a causa de fallas en la generación de rutas de maquinado, así que debe ser revisado y corregido para evitar errores, alarmas y movimientos no deseados durante el proceso de fabricación.

Simular el programa es muy útil para evitar problemas durante el proceso de fabricación. La verificación comienza en realidad desde el proceso de generación de rutas de maquinado, en el que se realiza una verificación de cada operación del proceso. Cuando se ha generado el programa en Código G se pueden usar programas de cómputo de simulación y posteriormente se realiza una verificación física del programa sobre la máquina herramienta.

La preparación del equipo consiste en montar la pieza, herramientas, transferir el programa, determinar el origen del sistema de referencia y finalmente las diferencias de altura de cada herramienta respecto a la herramienta de referencia. Es necesario poner especial cuidado en esta última parte, ya que el sentido de la compensación debe ser indicado en el programa, y un error traerá como consecuencia un choque entre la herramienta y la pieza.

El proceso de fabricación es en realidad solo el resultado de todo el trabajo realizado en las etapas anteriores, pero es importante vigilar este proceso para evitar que cualquier error no detectado en cualquiera de los pasos anteriores, pueda tener consecuencias como daño a la máquina, las herramientas o la pieza.

A continuación se presenta el diagrama de flujo que representa el procedimiento general (Fig. 5.1).



Fig. 5.1 El diagrama muestra la secuencia del proceso de fabricación por control numérico, las etapas en color gris no están incluidas dentro del procedimiento.

Cada etapa de este proceso contiene a su vez un conjunto de actividades que en forma general deben ser cubiertas.

Modelado.

- Selección de unidades.
- Modelado de la pieza final.
- Modelado de la pieza inicial.

Generación de rutas de maquinado.

- Definición de herramientas.
- Selección de operaciones.
- Selección de geometrías.
- Cálculo de parámetros de corte.
- Generación de operaciones.
- Verificación.

Post-procesamiento.

- Selección del tipo de máquina herramienta.
- Generación del programa.
- Detección y corrección de errores sistemáticos.
- Detección y corrección de errores en la ruta de maquinado.
- Inclusión de instrucciones generales de inicio del programa.

Simulación y verificación.

- Verificación de cada operación.
- Simulación virtual.
- Verificación física.

Preparación del equipo.

- Montaje de la pieza.
- Montaje de herramientas.
- Transferencia del programa.
- Definición del origen del sistema de referencia.
- Parámetros de compensación de altura de las herramientas.

Fabricación.

- Vigilancia permanente del proceso.

5.2 DEFINICIÓN DE RETORNOS EN EL DIAGRAMA DE FLUJO

Según lo observado durante el proceso de fabricación de las ruedas de filtros y lente para SCIDAR, existen en forma general 6 retornos entre las distintas etapas, partiendo de los posibles errores que pueden presentarse en etapas anteriores y modificaciones requeridas en el procedimiento.

El diagrama de flujo finalmente queda de la siguiente forma (Fig. 5.2):

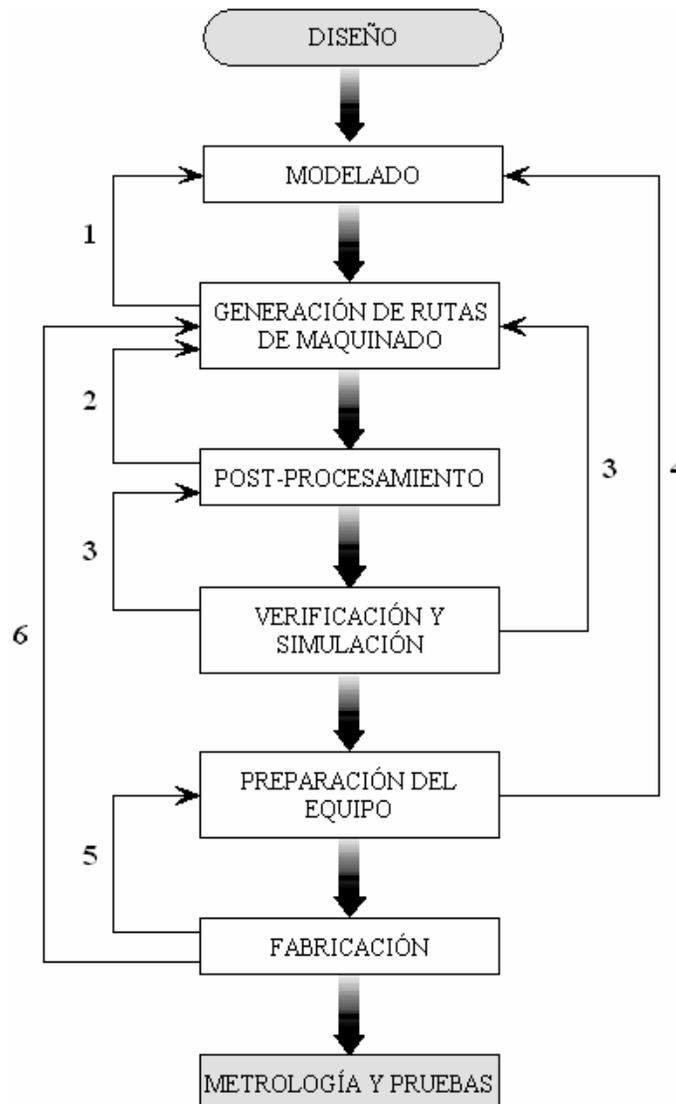


Fig. 5.2 Diagrama de flujo del proceso con retornos.

RETORNOS DEL PROCESO.

1.- Al generar rutas de maquinado pueden presentarse obstáculos que no permitan ciertas operaciones. Esto puede corregirse modificando algunos elementos tales como la pieza inicial o los elementos de sujeción, también puede modificarse en ciertas circunstancias la pieza final, sin embargo esto implica una

modificación al diseño y debe vigilarse que no altere su funcionamiento ni las especificaciones del mismo.

Estas modificaciones se producen por movimientos que no puede realizar la máquina, espacio insuficiente para las herramientas disponibles o falta de disponibilidad de herramientas.

Las modificaciones deben ser verificadas para todos los elementos presentes en el modelo, incluso si se trata de dimensiones parametrizadas, es importante asegurarse que se han hecho las modificaciones correctamente.

2.- La secuencia de instrucciones que se obtienen al generar las rutas de maquinado no contienen toda la información de los movimientos de corte de la herramienta, por lo que pueden producirse instrucciones sobre movimientos o parámetros inadecuados que difícilmente serán detectados antes del post-proceso. En el programa en Código G es factible detectar errores como movimiento de corte con velocidad de posicionamiento, asignación inadecuada de los parámetros de corte. Esto se produce generalmente por una selección inadecuada de geometrías o parámetros durante la generación de rutas de maquinado.

3.- La simulación y verificación es una etapa dirigida específicamente a la detección de errores. Estos errores del programa pueden ser producido por fallas en la generación del programa en código G, la mayoría son errores sistemáticos, pero también pueden presentarse errores sintácticos que tratándose de programas muy largos es difícil detectar en una primera revisión visual. Sin embargo la mayoría de los errores detectados durante la simulación son movimientos inadecuados de la herramienta que se derivan de errores cometidos durante la generación de las rutas de corte, selecciones inadecuadas de geometrías y parámetros.

4.- Durante la preparación del equipo, específicamente durante el montaje de la pieza pueden presentarse problemas que no permitan adaptarse al procedimiento planteado durante el modelado. Estos problemas pueden ser una pieza inicial con geometría o dimensiones diferentes a lo planeado, o problemas para sujetar la pieza o adaptarse a los espacios destinados para los elementos de sujeción. En cualquier caso será necesario hacer las modificaciones pertinentes en el modelo y realizar nuevamente todo el proceso a partir de dicho punto. Esto representa realizar por completo todas las etapas anteriores, por lo que es muy importante verificar la factibilidad del montaje de la pieza durante el proceso de modelado.

5.- Aun después de la verificación física, pueden presentarse problemas durante el proceso de fabricación de las piezas, principalmente debidos a fallas en el montaje de la pieza, en la compensación de altura de las herramientas o alarmas por bajo nivel de aceite o refrigerante.

6.- A pesar de la verificación y simulación de los programas de maquinado, siempre existe la posibilidad de que se presente un error durante la fabricación de la pieza referentes a movimientos y velocidades inadecuadas. Este tipo de errores se producen generalmente desde la generación de rutas de maquinado.

5.3 OBSERVACIONES Y PRECAUCIONES ESPECÍFICAS EN CADA ETAPA DEL PROCESO.

Durante el desarrollo de cada etapa se observaron los diferentes factores que pueden significar errores y problemas durante la fabricación. A continuación se presentan las observaciones y precauciones más importantes que deben tomarse en cuenta para un correcto desarrollo del proceso.

MODELADO.

- Selección de unidades: Se seleccionan al momento de crear el archivo del modelo.
- Congruencia con la pieza inicial y los métodos de sujeción de la pieza en la bancada de la máquina herramienta.
- Seleccionar un origen del sistema de referencia que pueda ser localizado fácilmente por la punta de una herramienta al momento de montar la pieza.

GENERACIÓN DE RUTAS DE MAQUINADO.

- Selección de geometrías.
- Selección de parámetros de corte.

POST-PROCESAMIENTO

- Realizar el post-proceso con la herramienta con UG/Post.
- Cambiar “.” por N en las instrucciones de cambio de herramienta.
- Buscar letras minúsculas en el programa y cambiar por mayúsculas.
- Modificar las líneas iniciales del programa, agregar las instrucciones relativas al sistema de referencia y unidades.

VERIFICACIÓN Y SIMULACIÓN.

- Verificación de cada operación al generar la ruta de maquinado.
- Simulación virtual: verificar que el origen del sistema de referencia coincida con el real.
- Uso de la opción *LOCK* en el panel de control de la máquina herramienta para la simulación física.

PREPARACIÓN DEL EQUIPO.

- El control numérico no debe encenderse en el modo MDI, ni debe ser llevado a esta posición hasta que la pantalla muestre las coordenadas de posición de la herramienta o bien la pantalla de alma. Accionar cualquier botón durante el proceso de encendido en el modo MDI puede modificar parámetros de operación del control manifestándose en comportamiento no deseado de la máquina.
- Montaje de la pieza: Congruente con el modelo. Debe ser firme y restrictivo al movimiento de la pieza en cualquier sentido, incluso al giro.
- Montaje de las herramientas: Verificar que cada herramienta sea colocada según la numeración asignada en el programa CAM.
- Transferencia del programa: Asignar al archivo como nombre el número de programa que ocupará e la memoria del control. Debe quedar el nombre del archivo OXXXX.txt, donde XXXX es el número de programa. Para transferir el programa debe comenzar primero la recepción del CNC y posteriormente comenzar el envío desde la computadora.
- Definición del origen del sistema de referencia. Se determina utilizando la herramienta de referencia. Las coordenadas son transferidas al sistema auxiliar incluyendo los signos.
- Compensación de altura de las herramientas. Se realiza una vez que se ha definido el sistema de referencia. Debe modificarse el programa de la siguiente manera:

G43 para herramientas más largas que la herramienta de referencia.

G44 para herramientas más cortas que la herramienta de referencia.

Asignar para cada herramienta un parámetro H correspondiente al número asignado de la herramienta.

El valor de los parámetros H no tiene signo, solo magnitud.

- Niveles. Revisar niveles de aceite y refrigerante en la máquina antes de comenzar el maquinado. Si el nivel disminuye por debajo del mínimo la máquina se detendrá durante la operación con una señal de alarma. También es necesario revisar que el compresor de aire este encendido.

FABRICACIÓN

- La ejecución de un programa de fabricación debe iniciar siempre desde el principio. Al comenzar operaciones desde líneas intermedias del programa pueden estarse omitiendo instrucciones preparatorias y alterar el comportamiento de la máquina.
- Vigilancia permanente del proceso. Mantenerse siempre al alcance del botón de paro de emergencia.

- Uso del refrigerante durante las operaciones de corte. Evita deformaciones por temperatura en la pieza, que en operaciones de alta precisión es de suma importancia. El refrigerante ayuda a un mejor acabado, arrastrando la viruta fuera de la zona de corte.

Las observaciones y recomendaciones antes mencionadas no son en todos los casos indispensables para el correcto desarrollo del proceso, sin embargo su observación ayuda evitar problemas o resolverlos fácilmente, reducir el tiempo del proceso y mantener la seguridad del equipo así como de las personas involucradas en el proceso.

5.4 CONCLUSIONES

A partir del proceso desarrollado, se obtiene una estructura general para fabricar piezas por CAD/CAM/CNC. Esta estructura parte de un diseño mecánico previo y requiere que hayan sido definidas las especificaciones, tanto de materiales, como geométricas y dimensionales.

Este procedimiento, aunque fue diseñado a partir de los recursos e infraestructura del Taller Mecánico y del Departamento de Instrumentación, permite ser adaptado a condiciones diferentes, siempre que los cambios sean adecuadamente implementados al momento de enlazar cada etapa del proceso.

Las observaciones y precauciones planteadas durante este trabajo fueron las observadas durante el desarrollo del mismo, sin embargo es importante tener en mente que cada vez que se desarrolle un proceso de manufactura diferente, basado o no en esta estructura, pueden presentarse situaciones diferentes y que no estén contempladas en este trabajo, por lo que deberán observarse todas las precauciones y respetar todos los procedimientos de verificación, aun cuando puedan resultar repetitivos.

La ruta de manufactura planteada resulta accesible para personas que posean conocimientos en programas CAD/CAM y experiencia básica en máquinas herramienta de control numérico, por lo que este procedimiento no requiere personal con capacitación previa, puede ser implementado por estudiantes de ingeniería mecánica que hayan cursado asignaturas de manufactura y corte de materiales, que pueden ser estudiantes de servicio social dentro del Instituto de Astronomía.

El proceso de fabricación de las piezas para SCIDAR Generalizado Mexicano se realizó exitosamente, se fabricaron piezas de prueba que cumplen con los requerimientos y las especificaciones demandadas y podrán ser integradas al instrumento una vez que éste se encuentre en su fase de ensamble.

APENDICE 1

COMANDOS CÓDIGO G.

FUNCIONES PREPARATORIAS (G)

G00	1	Positioning (Rapid Traverse)
G01	1	Linear Interpolation (Cutting Feed)
G02	1	Circular Interpolation/Helical CW
G03	1	Circular Interpolation/Helical CCW
G04	0	Dwell, Exact Stop
G09	0	Exact Stop
G10	0	Data Setting
G11	0	Data Setting Mode Cancel
G17	2*	XY Plane Selection
G18	2	ZX Plane Selection
G19	2	YZ Plane Selection
G20	6	Imperial Data Input (inches)
G21	6	Metric Data Input (Millimetres)
G27	0	Reference Point Return Check
G28	0	Return to Reference Point
G29	0	Return from Reference Point
G30	0	Second Reference Point Return
G31	0	Skip Function
G33	1	Thread Cutting
G39	0	Corner Offset Circular Interpolation
G40	7	Cutter Compensation Cancel
G41	7	Cutter Compensation Left
G42	7	Cutter Compensation Right
G43	8	Tool Length Compensation + Direction (positiv)
G44	8	Tool Length Compensation + Direction (negativ)
G49	8*	Tool Length Compensation Cancel
G50	11	Scaling Cancel
G51	11	Scaling
G54	14*	Work Co-ordinate System 1 Selection
G55	14	Work Co-ordinate System 2 Selection

G56	14	Work Co-ordinate System 3 Selection
G57	14	Work Co-ordinate System 4 Selection
G58	14	Work Co-ordinate System 5 Selection
G59	14	Work Co-ordinate System 6 Selection
G60	0	Single Direction Positioning
G61	15	Exact Mode Stop
G62	15	Automatic Corner Override
G63	15	Tapping Mode
G64	15*	Cutting Mode
G65	0	Macro Call, Macro Command
G66	12	Macro Modal Call
G67	0*	Macro Modal Call Cancel
G68	16	Co-ordinate Rotation
G69	16*	Co-ordinate Rotation Cancel
G73	9	High Speed Peck Drilling Cycle
G74	9	Counter Tapping Cycle
G76	9	Fine Boring Cycle
G80	9*	Canned Cycle Cancel
G81	9	Drilling Cycle, Spot Boring
G82	9	Drilling Cycle, Counter Boring
G83	9	Deep Hole Peck Drilling Cycle
G84	9	Tapping Cycle
G85	9	Boring Cycle
G86	9	Boring Cycle
G87	9	Back Boring Cycle
G88	9	Boring Cycle
G89	9	Boring Cycle
G90	3*	Absolute Command
G91	3	Incremental Command
G92	0	Programming of Absolute Zero Point
G94	5*	Feed per Minute
G95	5	Feed per Revolution
G98	10*	Return to Initial Level in Canned Cycle
G99	10	Return to R Point Level in Canned Cycle

FUNCIONES MISCELANEAS (M)

M00*	Program Stop
M01*	Optional Stop
M02*	Program Reset
M03	Spindle Forward (clockwise)
M04	Spindle Reverse (counter clockwise)
M05*	Spindle Stop
M06	Automatic Tool Change
M07	Coolant "B" On
M08	Coolant "A" On
M09*	Coolant Off

M10	Vice/Work Clamp Open
M11	Vice/Work Clamp Close
M13	Spindle Forward and Coolant On
M14	Spindle Reverse and Coolant On
M15	Program Input using MIN P (special function) mig Spindle Orientation
M20	ATC Arm In
M21	ATC Arm Out
M22	ATC Arm Down
M23	ATC Arm Up
M24	ATC Drawbar Unclamp
M25	ATC Drawbar Clamp
M27	Reset Carousel to Pocket One
M28	Reset carousel to pocket position
M29	Select DNC mode
M30	Program Reset and Rewind
M31	Increment parts counter
M37	Door open to stop
M38	Door Open
M39	Door Close
M40	Parts catcher extend
M41	Parts catcher retract
M43	Swarf conveyor forward
M44	Swarf conveyor reverse
M45	Swarf conveyor stop
M48	Lock % feed and % speed at 100 %
M49	Cancel M48 (default)
M62	Auxiliary Output 1 On
M63	Auxiliary,Output 2 On
M64	Auxiliary Output 1 Off
M65	Auxiliary Output 2 Off
M66	Wait for Auxiliary Output 1 On Input
M67	Wait for Auxiliary Output 2 On Input
M68	Only index with all axes at home position
M69	Index turret anywhere
M70	Mirror in X On
M71	Mirror in Y On
M73	Mirror in IV on
M76	Wait for Auxiliary Output 1 Off
M77	Wait for Auxiliary Output 2 Off
M80	Mirror in X Off
M81	Mirror in Y Off
M83	Mirror in Z Off
M98	Sub Program Call
M99	Sub Program End and Return

REFERENCIAS.

1. Berry, Richard. **Build your own telescope**. Willmann-Bell, Inc. E.U. 1994
2. Avila, Remy. **Estudios de Turbulencia Óptica en la Atmósfera Terrestre con el SCIDAR Generalizado**. CRyA-IA-UNAM 2005.
3. Shigley, Robert E. **Diseño en Ingeniería Mecánica**.
4. Groover, Mikell P. **Fundamentos de Manufactura Moderna**. Pearson Educación, 1996.
5. Shigley, Robert E. **El Proyecto en Ingeniería Mecánica**.
6. Ruiz, Lino. **El control numérico computarizado en el desarrollo industrial**.
7. Jiménez, Ricardo. **Ingeniería de Manufactura. CNC**.
8. **Control Numérico (I). Tecnología de Fabricación y Tecnología de Máquinas**. Area de Ingeniería en Sistemas y Automática. Escuela Politécnica Superior de Elche, Universitas Miguel Hernández.
9. Igual a la referencia 6.
10. Argote Vea – Murguía, José Ignacio. **Diseño Asistido por Ordenador**. <http://personal.telefonica.terra.es/web/cad/index.htm>
11. Mesa Plaza Juan Alberto. **Importancia de los programas CAD en la tecnología en diseño industrial**. <http://orbita.starmedia.com/~itmdiplomadospti/juanplaza/proyimpcad.htm>
12. García Flores, Rodolfo. **Ingeniería concurrente y tecnologías de la información**. Ingenierías, Enero – Marzo 2004 Vol VII No. 22.

13. Torres, J.C. **Diseño Asistido por Ordenador Tema 2.** Ingeniería Informática, Dpt. Lenguajes y Sistemas Informáticos. ETS, Ingeniería Informática, Universidad de Granada.
14. Torres, J.C. **Diseño Asistido por Ordenador Tema 3.** Ingeniería Informática, Dpt. Lenguajes y Sistemas Informáticos. ETS, Ingeniería Informática, Universidad de Granada.
15. Igual a la referencia 8.
16. Igual a la referencia 7.
17. Lopez, G.F. Eugenio. **Generación de código de maquinado en 3D para modelos basados en mallas.** Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL, México 2001.
18. Avila, Remy. **SCIDAR Generalizado Mexicano. Critical Design Review.** IA-UNAM 2004.
19. Cuevas, Salvador. **SCIDAR Generalizado Mexicano. Óptica, Estudio de tolerancias del centrado de las lentes.** IA-UNAM 2003
20. Unigraphics Solutions do Brasil Ltda. **Unigraphics CAM – Maquinado en alta velocidad de corte.**
21. **Productos para el mecanizado del metal. Herramientas Rotativas.** Sandvik Coromil. (Catálogo 2001).
22. Cantó, Jorge J. **Compensación de alturas.** IA-UNAM 2005.