

RESUMEN

El presente proyecto de grado consigue cumplir con los objetivos propuestos al determinar el diseño de una minifresadora didáctica controlada por un PC, la simulación de su funcionamiento y el costo estimado para su construcción.

El diseño determina las características y especificaciones técnicas de cada una de las partes y piezas que componen esta máquina y además contempla aspectos teóricos y prácticos utilizados generalmente en la construcción de este tipo de maquinas herramientas de alta precisión. Tal es el caso del uso de tornillos de bolas y guías lineales, para obtener la precisión establecida de 0.02 mm, correspondiente al posicionamiento de la herramienta para ejecutar el trabajo de maquinado. Estos tornillos y guías tienen en su interior rodamientos que disminuyen al máximo la fricción en el movimiento de los ejes X, Y y Z, y esto a su vez, logra que los motores encargados de generar el movimiento sean más pequeños y de menor torque que si se utilizara otro tipo de mecanismo para el movimiento de estos ejes. Adicionalmente, se contempla el uso de un husillo motorizado, utilizado en la industria de las máquinas herramientas por su amplia gama de tamaños, potencias, velocidades de giro, etc. El husillo motorizado es el motor encargado de generar el giro de la herramienta para realizar el maquinado.

La simulación se realiza con ayuda del software de diseño mecánico Solid Works y se obtienen resultados de deflexión y esfuerzos que confirman que el modelo cumple con los parámetros establecidos de diseño. El modelo contiene todas las partes y piezas especificadas en la parte del diseño.

Por último, se presenta el costo estimado que supondría la construcción de la máquina herramienta del presente proyecto, tanto de las partes y piezas que se encuentran en el mercado local como en el extranjero.

ANTECEDENTES

Como parte del programa de ciencia y tecnología para el desarrollo (CYTED), creado por iniciativa en España en 1984, se han estructurado las redes temáticas, conformadas por universidades y centros de investigación de diferentes países iberoamericanos, que son verdaderas asociaciones de unidades de investigación de los países miembros en temas de interés común. Estas redes temáticas desarrollan actividades de formación, capacitación, intercambio, movilización e interacción científica. El organismo signatario por parte del Ecuador al CYTED es el CONACYT, y el Ecuador se remite únicamente al área de biología y química, mientras que en otras áreas de investigación tiene muy poca o ninguna participación.

Los organismos miembros de esta red son la Escuela Politécnica Nacional, la Universidad Central y la ESPOL.

Dentro del programa de CYTED, en 1998 los países de Argentina, Colombia, Costa Rica, Cuba, Portugal, México, España y Ecuador formaron la RED IBEROAMERICANA DE AUTOMATIZACION DE PROCESOS DE MECANIZADO (RIBAMEC) con el objetivo de fomentar la investigación sobre control y automatización de procesos de mecanizado.

La ESPE a través de los laboratorios de CAD/CAM y MÁQUINAS Y HERRAMIENTAS formó parte de la RIBAMEC durante sus 4 años de vigencia.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El laboratorio de CAD / CAM y el laboratorio de Máquinas y Herramientas formaron parte de la RIBAMEC y para la fecha en que fue aprobado este proyecto de grado, la RIBAMEC mantuvo dos reuniones en las que la ESPE no participó por no disponer de proyectos de investigación dentro de los campos de automatización de mecanizado, razón por la cual se buscó el desarrollo de varias tecnologías que fomenten la investigación y creación de sistemas en este campo.

Por lo tanto, se define el problema como la necesidad de que la ESPE y el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, tengan un aporte al desarrollo de nuevas tecnologías en nuestro medio, las cuales permitan realizar la automatización de máquinas de mecanizado dando además un realce a la investigación de la Escuela y promoviendo el desarrollo de este campo en las futuras promociones de la Carrera.

OBJETIVOS Y ALCANCE

Objetivo General.-

- ✓ Diseñar y simular una mini fresadora didáctica controlada por PC.

Objetivos Específicos.-

- ✓ Diseñar una mini fresadora didáctica.
- ✓ Seleccionar el sistema de interface entre la fresadora y el computador.
- ✓ Simular movimientos, esfuerzos y deformaciones de la mini fresadora didáctica, con el uso de programas especializados de diseño mecánico y simulación de esfuerzos.
- ✓ Calcular costo estimado de fabricación de la máquina.
- ✓ Levantar planos y diagramas de fabricación y montaje mecánicos y eléctricos.

Alcance:

El alcance del presente proyecto contempla el diseño mecánico, eléctrico y de control de la minifresadora didáctica controlada por un PC. También contempla la simulación del funcionamiento del modelo, las deflexiones y los esfuerzos generados al realizar el trabajo de maquinado de acuerdo a los parámetros establecidos de diseño y por último, el costo a la fecha, que tendría la construcción de la minifresadora, con todas sus partes y piezas, siendo algunas de estas compradas en el mercado local y otras, importadas.

CAPITULO I

PROCESOS DE FRESADO

1.1 Tipos de fresadoras

Se puede definir como fresadora a una máquina herramienta que aprovecha el movimiento rotatorio de una herramienta cilíndrica, llamada fresa, provista en su superficie o periferia de una serie de cuchillas que sirven para arrancar una porción de viruta del material a maquinar y mediante este proceso dar forma al mismo.

En la actualidad se encuentran diversas formas y tipos de máquinas fresadoras, las cuales son utilizadas en diversas aplicaciones. Las fresadoras se pueden clasificar en:

1.1.1 Máquina fresadora horizontal.

Esta máquina se presta para toda clase de trabajos de fresado. Su característica es el husillo de fresar dispuesto horizontalmente.



Fig. 1.1: Fresadora Horizontal ¹

¹ Imagen tomada de http://latheking.tradeindia.com/Exporters_Suppliers/Exporter13139.187631/Horizontal-Milling-Machine.html al 14 de febrero del 2010.

El proceso de fresado realizado por esta máquina se denomina fresado horizontal o cilíndrico. En el fresado horizontal la fresadora experimenta una carga irregular en virtud de la forma de coma de las virutas. Es difícil evitar un ligero golpe en la periferia, cuya consecuencia es una señal ondulada que se forma a cada revolución de la fresa².

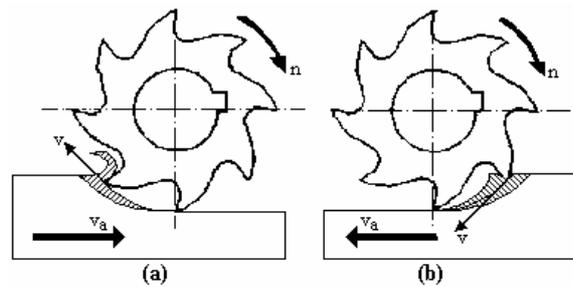


Fig. 1.2: Movimiento de avance en el fresado cilíndrico. (a) Fresado de contramarcha; (b) fresado a favor del avance

1.1.2 Máquina de fresar vertical.

Con esta máquina se realizan principalmente trabajos de fresado vertical o frontal. El husillo de fresar está dispuesto verticalmente en el cabezal porta fresas. Este cabezal puede girar de tal modo que el husillo puede adoptar también una posición inclinada².



Fig. 1.3: Fresadora vertical³

² Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 142.

³ Imagen tomada de <http://www.cancelarich.com.ar/fresadorafc3a.htm> al 14 de febrero del 2010.

En el fresado frontal, cada diente arranca una viruta de espesor uniforme. La carga de la fresadora es por esta razón uniforme. El rendimiento de viruta es, por lo general, un 15 a 20% más alto que en el fresado cilíndrico. El pequeño golpe que pueda producirse en la periferia de la fresa frontal no tiene influencia alguna sobre la lisura de la superficie y las superficies obtenidas presentan por eso una superficie más lisa⁴.

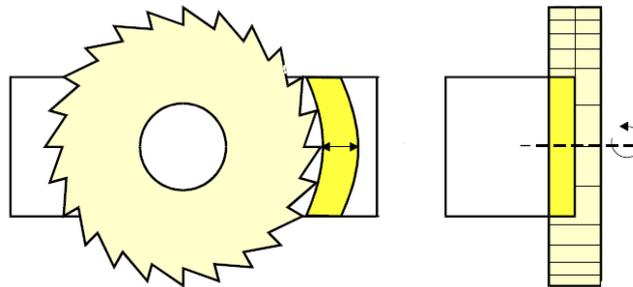


Fig 1.4: Esquema de fresado vertical o frontal

1.1.3 Máquina de fresar universal.

La característica principal de esta máquina es la de que la mesa de fresar puede girar hacia la derecha o hacia la izquierda. Con esto se hace posible la ejecución de muchos más trabajos, como, por ejemplo, el fresado de ranuras en espiral⁵.

1.1.4 Máquinas de fresar especiales.

Entre estas se encuentran:

- La fresadora paralela que sirve para trabajar piezas de grandes dimensiones y pesadas, la fresadora para planear que realiza trabajos en serie.

⁴ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág. 141.

⁵ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág. 144.

- Máquinas de fresar roscas, como su nombre lo indica, para fresar roscas, máquinas fresadoras para ruedas dentadas para realizar ruedas dentadas.
- Máquinas fresadoras para copiar que sirven para mecanizar piezas provistas de superficies de límites irregulares por medio de plantillas.

1.2 Herramientas utilizadas en el proceso.

Las fresas se hacen preferentemente de acero rápido (SS). Para grandes rendimientos de viruta se emplean fresas las cilíndricas y los platos o cabezales de cuchillas, con filo de metal duro.

Como el acero rápido es un material sumamente costoso, en el caso de fresas grandes se hace el cuerpo de la fresa con acero de construcción y se le insertan cuchillas de acero rápido⁵. Las fresas se hacen en una gran variedad de formas y tamaños. Todas las fresas presentan elementos comunes, siendo algunos de los principales los mostrados en la figura 1.5(a), el diámetro exterior D de la fresa, el diámetro interior d , donde encaja el árbol porta fresa, el ancho b de la fresa; en la figura 1.5(b) el ángulo de filo α , el ángulo de incidencia β , el ángulo de ataque δ . La figura 1.5(c) muestra una fresa circular de filos helicoidales, la cual presenta los mismos elementos que la fresa circular de dientes rectos.

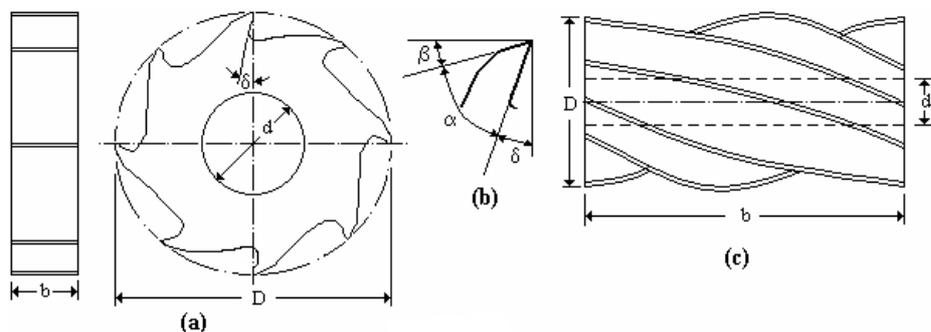


Fig. 1.5: Elementos de una fresa circular.

1.2.1 Clasificación de las herramientas de fresado.

Las fresas pueden clasificarse de varias maneras como por ejemplo por la finalidad o uso de las mismas (fresas para cuñeros, fresas para ranuras en T, cortadores de engranes, etc.); por sus características de construcción (fresas macizas, fresas con puntas de carburo, fresas de cuchillas postizas, etc.); por el método de montaje (del tipo de árbol, del tipo de mango, etc.) y la más utilizada por el rebajo o característica de los dientes.

Esta última se divide en dos categorías, fresas de perfil que producen superficies planas, curvas o irregulares, con los dientes afilados sobre la faja y las fresas formadas que se afilan sobre la cara para conservarles su forma de la sección transversal verdadera.

Las herramientas dispuestas en el borde de la fresa pueden efectuar el corte de dos modos distintos: periférico y frontal. En el primer caso, el eje de rotación de la fresa es paralelo a la cara de la superficie de la pieza en que se hace la viruta, mientras que el segundo caso es perpendicular.



Fig. 1.6: Herramientas de corte periférico y frontal⁶

Las fresas pueden también clasificarse según la forma de sus dientes en fresas de dientes puntiagudos, cabezal porta cuchillas, fresas con despulla, fresa compuesta. En su mayoría se encuentran normalizados.

⁶ Enciclopedia Monitor. Ed. Salvat. Tomo 7. pág.: 2796.

1.2.1.1 Fresas de dientes puntiagudos.

El rendimiento de corte de la fresa y la calidad superficial de la pieza dependen principalmente de los filos de la fresa. Estos son cuneiformes y se obtienen por fresado. La magnitud de los ángulos de corte está relacionada con el material que se vaya a trabajar, es así que un paso pequeño es apropiado para fresado de materiales duros como acero, un paso mediano es conveniente para un fresado de acero blando y un paso grande es adecuado para fresar un material o metal ligero⁷.

Tabla 1.1 Valores normativos para número de dientes y ángulos de corte en fresas⁸.

α Angulo de incidencia γ Angulo de Ataque λ Angulo de inclinación del filo respecto al eje. d1 Diámetro de la fresa en mm. Z Número de dientes Tipo de herramienta N: Para aceros ordinarios de construcción (aceros con resistencia a la tracción hasta 1 kN / mm ²), fundición gris blanda, metales no féreos de dureza media. Tipo de herramienta H: Para metales especialmente duros y tenaces. Tipo de herramienta W: Para materiales de especial blandura y tenacidad.												
Clase de Fresa	Tipo herr.	Diámetro de la fresa d1 (mm)								Ángulos en las fresas		
		Número de dientes Z								α	γ	λ
Fresa cilíndrica DIN 884		d1	40	50	63	80	100	125	160			
	N	z	6	6	8	8	10	12	14	5-8°	10°	35-40°
	H	z	10	12	12	14	16	18	20	3-5°	5°	30°
	W	z	4	4	6	6	8	8	10	8-12°	25°	45°
Fresa frontal cilíndrica DIN 1880		d1	40	50	63	80	100	125	160			
	N	z	8	8	10	12	14	16	18	5-8°	10°	20-25°
	H	z	16	16	18	20	24	26	28	3-5°	5°	15°
	W	z	4	5	6	8	10	10	12	8-12°	22°	30°
Fresa De disco DIN 885		d1	50	63	80	100	125	160	200			
	N	z	8	10	10	12	14	16	18	5-8°	10°	15-20°
	H	z	14	16	16	20	24	26	28	3-5°	5°	10°
	W	z	6	6	6	8	10	10	10	8-12°	25°	20-30°
Fresa angular DIN 842		d1	40	50	63	80	100	125	160			
	N	z	12	14	16	18	20	22	24	5-8°	0	0
	W	z	6	6	6	8	10	10	12	8-12°	20°	8-15°

⁷ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 145.

⁸ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 146.

Fresa de vástago DIN 844 / 845 (Extracto)		d1	3	5	8	10	16	20	25	32	40	63			
	N	Z	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	8-10°	10°	20°
	H	Z	6	6	6	8	10	10	10	12	12	12	4-6°	5°	15°
	W	Z	3	3	3	3	3	4	4	5	5	-	8-12°	20°	30°
Fresa de vástago para ranuras en T DIN 851 (Extracto)		d1	12.5	16	22	25	32	40	50	63	75	85			
	N	z	8	8	10	10	12	12	12	14	14	14	5-8°	10°	10°

Al fresar materiales blandos se pueden producir grandes cantidades de viruta, las cuales son recibidas y separadas gracias a grandes huecos existentes entre diente y diente. Las fresas normalizadas se clasifican en los tipos, N, H y W. Los filos pueden estar dispuestos paralelamente al eje de la fresa o tener forma helicoidal.

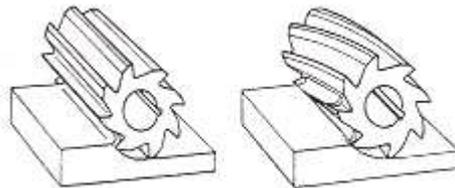


Fig. 1.7: Disposición de los filos.

Los filos helicoidales, pueden tener inclinación a la derecha o a la izquierda, dan lugar, en el arranque de viruta, a un empuje en dirección axial. Este empuje debe estar dirigido contra el cabezal, pues de lo contrario, se soltaría del husillo el vástago de la fresa⁹.

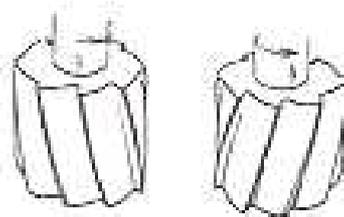


Fig. 1.8: Dirección del corte e inclinación de los filos.

⁹ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 145.

Según normas DIN, la fresa se dice que es de corte a la izquierda cuando gira en sentido contrario a las agujas del reloj mirándola desde el lado del accionamiento, y que es de corte a la derecha cuando el giro es en el mismo sentido de las agujas del reloj.

1.2.1.2 Cabezal porta cuchillas

Los cortes van fijados en forma de cuchillas en un cuerpo o cabezal, pudiéndose reponer por separado en caso de deterioro. Se emplean para el fresado frontal de grandes superficies¹⁰.

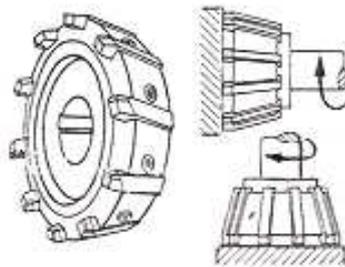


Fig. 1.9: Cabezal portacuchillas.

1.2.1.3 Fresas con despulla.

Para fresar superficies sinuosas no se puede emplear las fresas de dientes en punta, ya que al afilar la pieza se cambiaría su perfil. Para curvas, arcos circulares y toda clase de perfiles, así como, con frecuencia, también, para fresado de ranuras, se emplean estas fresas de forma torneadas. El torneado resulta necesario para mantener el ángulo de incidencia. El ángulo de ataque, vale, generalmente, 0°. El re afilado se verifica a costa de la superficie de ataque, con lo cual el perfil se mantiene invariable.

¹⁰ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 148.

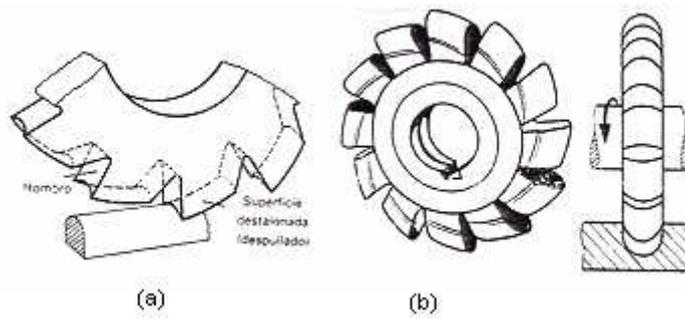


Fig. 1.10: Fresa con despulla. (a) Forma de filos en fresa con despulla; (b) fresa de forma con despulla⁹.

1.2.1.4 Fresa compuesta.

Se designan con el nombre de compuestos aquellos útiles de fresar que están constituidos a base de la reunión de varias fresas de dientes puntiagudos o de fresas con despulla en diámetros diversos. Se pueden fresar así, de una vez, perfiles de las más variadas formas. El empleo de fresas compuestas brinda multitud de posibilidades en el trabajo y ahorra el uso de fresas de forma, más caras¹¹.

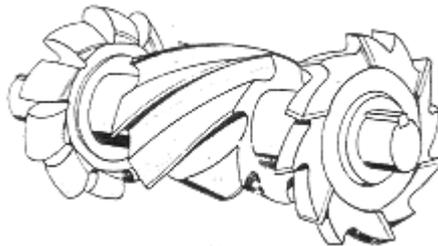


Fig. 1.11: Fresa compuesta, formada a base de una fresa de disco de dientes cruzados, de una fresa cilíndrica y de una fresa de forma con despulla¹⁰.

1.3 Materiales utilizados en el proceso

Mediante fresado puede proveerse a piezas de los más diversos materiales como por ejemplo, aceros, fundición de hierro, metales no férricos y materiales

¹¹ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling, Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 148.

sintéticos, de superficies curvas o planas, de entalladuras, de ranuras, de dentados, etc.¹²

Las herramientas de corte deben poseer ciertas características específicas, entre las que se destacan: resistencia mecánica, dureza, tenacidad, resistencia al impacto, resistencia al desgaste y resistencia a la temperatura (porque en un proceso de mecanizado con herramientas tradicionales $T^0_{herramienta} > T^0_{pieza} > T^0_{viruta}$; con herramientas más avanzadas se logra concentrar el aumento de temperatura en la viruta). La selección de la herramienta de corte va a depender de la operación de corte a realizar, el material de la pieza, las propiedades de la máquina, la terminación superficial que se desee, etc.

Para cumplir con cada uno de estos requerimientos han surgido herramientas formadas por diferentes aleaciones. Los materiales para las herramientas de corte incluyen aceros al carbono, aceros de mediana aleación, aceros de alta velocidad, aleaciones fundidas, carburos cementados, cerámicas u óxidos y diamantes.

Para conocer las aleaciones de aceros para herramientas hay que saber las funciones que cumplen cada uno de los elementos que forman la aleación. El resumen de estas características se entrega en la tabla 1.2. Los elementos se agregan para obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste, mayor tenacidad al impacto, mayor dureza en caliente en el acero, y una reducción en la distorsión y pandeo durante el templado¹³.

¹² Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 140.

¹³ Información obtenida de www2.ing.puc.cl/icm/docencia/cursos/programas.html al 14 de febrero del 2010.

Tabla 1.2: Características de los elementos que componen las herramientas de corte.

Elemento	Cantidad	Propiedades
Carbono, C	0,6 % - 1,4 %	- Forma carburos con el hierro. - Aumenta la dureza. - Aumenta la resistencia mecánica. - Aumenta la resistencia al desgaste.
Cromo, Cr	0,25 % - 4,5 %	- Aumenta la resistencia al desgaste. - Aumenta la tenacidad.
Cobalto, Co	5 % - 12 %	- Se emplea en aceros de alta velocidad. - Aumenta la dureza en caliente. - Permite velocidades y temperaturas de operación más altas manteniendo la dureza y los filos.
Molibdeno, Mo	Hasta 10 %	- Elemento fuerte para formar carburos. - Aumenta la resistencia mecánica. - Aumenta la resistencia al desgaste. - Aumenta la dureza en caliente. - Siempre se utiliza junto a otros elementos de aleación.
Tungsteno, W	1,25 % - 20 %	- Mejora la dureza en caliente. - Aumenta la resistencia mecánica.
Vanadio, V	Aceros al Carbono 0,20 % - 0,5 % Aceros Alta Veloc. 1 % - 5 %	- Aumenta la dureza en caliente. - Aumenta la resistencia a la abrasión.

El siguiente cuadro muestra como difieren las propiedades de los distintos tipos de herramientas.

Tabla 1.3: Propiedades de herramientas

	Aceros al carbono	Aceros alta velocidad	Aleación de cobalto	Carburos cementados	Carburos revestidos	Cerámicas	Nitruro de boro cúbico	Diamante
Dureza en caliente	-	-	-	Aumentando	-	-	-	→
Tenacidad	-	-	-	Disminuyendo	-	-	-	→
Resistencia al impacto	-	-	-	Disminuyendo	-	-	-	→
Resistencia al desgaste	-	-	-	Aumentando	-	-	-	→
Resistencia a melladura	-	-	-	Disminuyendo	-	-	-	→
Velocidad de corte	-	-	-	Aumentando	-	-	-	→
Resistencia a cambios T°	-	-	-	Disminuyendo	-	-	-	→
Costo	-	-	-	Aumentando	-	-	-	→
Profundidad de corte	Baja a media	Baja a alta	Baja a alta	Baja a alta	Baja a alta	Baja a alta	Baja a alta	Muy baja
Acabado esperable	Regular	Regular	Regular	Bueno	Bueno	Muy bueno	Muy bueno	Excelente

Los materiales más comunes para las fresas son el acero de alta velocidad o aceros rápidos M2 y M7 y, para fresado de frente, el carburo C-6 y C-7. Las velocidades recomendadas son semejantes a las del torneado. El avance puede variar desde 0.003 plg. (0.076 mm) por diente para aleaciones de alta temperatura, hasta 0.022 plg (0.56 mm) por diente para aleaciones de aluminio y magnesio.

Las herramientas del tipo N se usan para el maquinado de aceros ordinarios de construcción, aceros con resistencia a la tracción hasta 1 kN / mm², fundición gris blanda, metales no ferrosos de dureza media.

Las herramientas tipo H, utilizadas para materiales especialmente duros y de gran tenacidad, y las herramientas del tipo W para materiales de especial blandura y tenacidad.¹⁴

1.4 Refrigeración en el proceso de corte

Para mejorar las condiciones durante el proceso de maquinado, se utiliza un fluido que baña el área en donde se está efectuando el corte. Los objetivos principales de este fluido son:

- a) Ayudar a la disipación del calor generado.
- b) Lubricar los elementos que intervienen en el corte para evitar la pérdida de la herramienta.
- c) Reducir la energía necesaria para efectuar el corte
- d) Proteger a la pieza contra la oxidación, y la corrosión.
- e) Arrastrar las partículas del material (medio de limpieza).
- f) Mejorar el acabado superficial.

¹⁴ Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. pág.: 146.

Las propiedades esenciales que los líquidos de corte deben poseer son las siguientes:

1. Poder refrigerante. Para ser bueno el líquido debe poseer una baja viscosidad, la capacidad de bañar bien el metal (para obtener el máximo contacto térmico); un alto calor específico y una elevada conductibilidad térmica.
2. Poder lubricante. Tiene la función de reducir el coeficiente de rozamiento en una medida tal que permita el fácil deslizamiento de la viruta sobre la cara anterior de la herramienta.

Tabla 1.4: Utilización de fluidos de corte dependiendo del material a trabajar¹⁵.

MATERIAL A TRABAJAR	LUBRICANTE O REFRIGERANTE
Aceros de bajo carbono	Aceite emulsionable 1 : 20
Aceros de alto carbono	Aceite emulsionable 1 : 10
Aceros aleados	Aceite sulfurado Aceite mezclado (mineral y animal)
Aceros aleados duros	Aceites sulfurados densos Mezcla aceite mineral
Fundición suave (HD 180)	En seco – chorro de aire
Fundición dura (mayor a 180)	Kerosene, aceite mineral fluido o soluble en petróleo
Fundición acerada y maleable	Aceite emulsionable 1:30
Bronce	En seco
Metal amarillo	Aceite soluble 1:40
Cobre	Aceite soluble 1:30 para desbaste

¹⁵ Guía para prácticas en máquinas fresadoras quinto curso. Inst. Tec. Salesiano Don Bosco. pág.: 23.

Cobre	Mezcla de aceite animal y aceite mineral para acabado
Aluminio	En seco
Aleaciones blandas	Aceite soluble 1:40 Agua enjabonada
Aluminio	Aceite soluble 1:40
Aleaciones duras	Aceite mineral fluido
Aleaciones de magnesio	En seco Chorro de aire
Materias plásticas	En seco Chorro de aire

La elección del fluido de corte se basa en criterios que dependen de los siguientes factores:

a) Del material de la pieza en fabricar. Para las aleaciones ligeras se utiliza petróleo; para la fundición, en seco. Para el latón, bronce y cobre, el trabajo se realiza en seco o con cualquier tipo de aceite que esté exento de azufre; para el níquel y sus aleaciones se emplean las emulsiones. Para los aceros al carbono se emplea cualquier aceite; para los aceros inoxidable auténticos emplean los lubricadores al bisulfuro de molibdeno.

b) Del material que constituye la herramienta. Para los aceros al carbono dado que interesa esencialmente el enfriamiento, se emplean las emulsiones; para los aceros rápidos se orienta la elección de acuerdo con el material a trabajar. Para las aleaciones duras, se trabaja en seco o se emplean las emulsiones.

c) Según el método de trabajo. Para los tornos automáticos se usan los aceites puros exentos de sustancias nocivas, dado que el operario se impregna las manos durante la puesta a punto de la máquina; para las operaciones de

rectificado se emplean las emulsiones. Para el taladrado se utilizan los aceites puros de baja viscosidad; para el fresado se emplean las emulsiones y para el brochado los aceites para altas presiones de corte o emulsiones¹⁶.



Fig. 1.12: Fresado de aluminio utilizando taladrina

1.5 Productos de fresado

Mediante el proceso de fresado podemos obtener diversas formas y figuras como guías, ruedas dentadas, figuras hexagonales, chaveteras, superficies planas, superficies curvas, canales, entalladuras, etc.

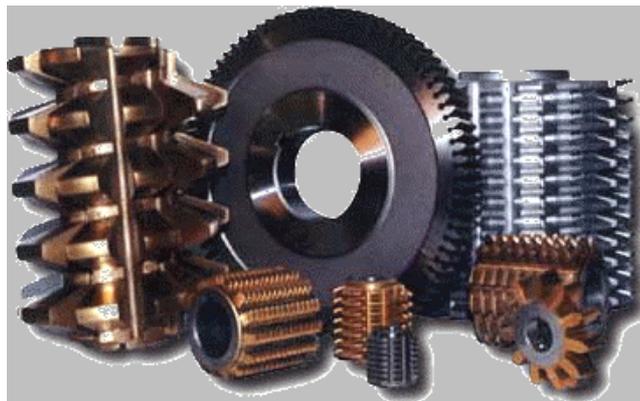


Fig. 1.13: Productos de fresado¹⁷

¹⁶ Información obtenida de www.monografias.com al 14 de febrero del 2010.

¹⁷ Imagen tomada de <http://www.analitica.com.mx> al 20 de enero del 2010.

1.6 Automatización del proceso de fresado.

Merece ser destacado el hecho, de que la constante investigación en el área de la microelectrónica, favorece las innovaciones que continuamente se dan en este campo, que cada vez van siendo más potentes y sofisticadas.

Existen cinco formas de automatizar en la industria moderna, de modo que se deberá analizar cada situación a fin de decidir correctamente el esquema más adecuado.

Los tipos de automatización son:

- Control automático de procesos
- El procesamiento electrónico de datos
- La automatización fija
- El control numérico computarizado
- La automatización flexible.

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 inter fases y computadores.

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 (PLC'S) O Controladores Lógicos Programables.

Las máquinas de control numérico computarizado poseen un mayor nivel de flexibilidad. Este tipo de control se ha aplicado con éxito a máquinas de herramientas de control numérico (MHCN). Entre las MHCN podemos mencionar:

- Fresadoras CNC.
- Tornos CNC.
- Máquinas de Electro erosionado
- Máquinas de Corte por Hilo, etc.

El control numérico de las máquinas herramientas para los tres ejes, se realiza mediante el proceso de interpolación cuya precisión depende de la potencia del cálculo del microprocesador y del algoritmo que se emplea, lo que significa un papel preponderante del software de estos sistemas y por este motivo una gran operatividad para futuros cambios, lo cual unido a la reducción en el costo del equipo y la mejora del mantenimiento, hacen del micro procesador un elemento idóneo en esta área.

El objeto del control numérico es lograr la automatización en la fabricación de piezas. Deberá tenerse en consideración que la automatización no implica producción masiva, la automatización debe observarse como la manufactura de piezas que cumplen con especificaciones rigurosas y en las que para su fabricación intervino poco la mano del hombre.

El objeto de las máquinas automáticas es poder reproducir las piezas diseñadas el número de veces que sea necesario y disminuir al máximo la intervención del hombre en la operación de la máquina.

Con las máquinas automáticas se logra lo siguiente:

- * Reproducción de las piezas con gran similitud
- * Alta calidad en los acabados y en las medidas
- * Poca participación de los operadores de las máquinas
- * Control de la producción

En las operaciones de automatización se pueden incluir las siguientes acciones:

- * 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

La automatización implica autocorrección, esto significa que para lograr la automatización de una máquina herramienta no sólo es necesaria la coordinación de las partes de la máquina, sino que también deberá incluirse que la máquina debe inspeccionar y con los servomecanismos adecuados, corregir las deficiencias o variaciones detectadas.

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.

Es importante no confundir a una máquina automática con un centro de maquinado.

Una máquina automática con o sin control numérico es una máquina que permite la fabricación, de manera repetida, de piezas con muy poca 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 totalmente automáticas en las que su objetivo es la producción a gran velocidad de muchas piezas u objetos. En la operación de estas máquinas tampoco participa el hombre.

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.

Automatización flexible. Es mayor grado de flexibilidad en cuanto a automatización se refiere, presente en Robots industriales que en forma más genérica se les denomina como "Celdas de Manufactura Flexible".¹⁸

¹⁸ Microprocesadores. J. M. ANGULO. Ed. Paraninfo. 3ra ed. 1984. pag: 198, 199, 205, 209.

CAPITULO II

DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO Y ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.

2.1 REQUERIMIENTOS GENERALES.

La mini fresadora tendrá como aplicación el maquinado de relieves en superficies de acrílico, madera y aluminio, es decir, materiales de baja dureza. Con este fin la velocidad del motor eléctrico principal será regulada por un controlador, y dependerá del material y del trabajo a realizar. Adicionalmente, las herramientas a usarse serán fresas de vástago y la máquina será controlada y manejada por un programa CAD/CAM.

2.1.1 Consideraciones de diseño.

- **Rigidez de la máquina:** Las cantidades permisibles de flexión en el bastidor y demás elementos deben ser pequeñas para alcanzar un alto grado de precisión.
- **Elementos de precisión:** La selección de los elementos que conforman los mecanismos de movimiento deberán garantizar las características dimensionales para lograr la precisión deseada.
- **Elementos compatibles con la aplicación:** Los elementos que conformarán la máquina propuesta serán de última tecnología, siendo de aplicación específica en procesos de mecanizado.
- **Control de la máquina:** El control que manejará la máquina será flexible, compatible con los elementos de la máquina y amigable (entorno gráfico para el usuario).

2.1.2 Parámetros generales de diseño.

Los parámetros de diseño mecánico a considerarse son los siguientes:

- ✓ Dimensiones de la mesa de trabajo.
- ✓ Área efectiva de maquinado.
- ✓ Peso de la carga en la mesa.
- ✓ Velocidad de giro de la herramienta.
- ✓ Potencia.
- ✓ Precisión.

2.1.2.1 Dimensiones de la mesa.

Las dimensiones preestablecidas para este proyecto son de 600 mm en el eje “X” y 300 mm en el eje “Y”. Por lo cual el área de maquinado no deberá superar estas dimensiones.

La mesa se soportará en una estructura que brinde equilibrio, absorba vibraciones y resista las cargas del maquinado.

2.1.2.2 Área Efectiva de Maquinado.

El área efectiva de maquinado de la mini fresadora es de:

$$a_{efectiva} = x \cdot y = 0.080 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.1)$$

Donde: **x** Distancia efectiva de maquinado en el eje “X”; 0.40 [m]
 y Distancia efectiva de maquinado en el eje “Y”; 0.20 [m]
 a_{efectiva} Área efectiva de maquinado. [m²]

2.1.2.3 Peso de la carga en la mesa.

Para determinar el peso de carga de la mesa de trabajo se tiene en cuenta las características de los materiales a maquinar y sus dimensiones. Considerando como materiales al acrílico, madera y aluminio.

A partir de la ecuación de densidad de materiales se tiene que:

$$\delta = \frac{m}{v} \quad (2.2)$$

Donde:	δ	densidad del material	[kg/m ³]
	m	masa de material	[kg]
	v	volumen del material	[m ³]

El volumen máximo para los materiales a maquinar será:

$$v = a \cdot b \cdot c = 0.008 \quad [m^3] \quad (2.3)$$

Donde:	a	longitud del material	0.40	[m]
	b	ancho del material	0.20	[m]
	c	espesor del material	0.10	[m]
	v	volumen del material a fresar		[m ³]

La densidad de los materiales a maquinar es:

$$\delta_{\text{acrílico}} = 1800 \left[\frac{kg}{m^3} \right]^{19}$$

$$\delta_{\text{madera}} = 1070 \left[\frac{kg}{m^3} \right]^{20} \quad (\text{Considerando una madera fuerte como el roble})$$

¹⁹ Información obtenida de <http://html.rincondelvago.com/materiales-sinteticos.html> al 13 de febrero del 2010.

$$\delta_{aluminio} = 2698 \left[\frac{kg}{m^3} \right]^{21}$$

Reemplazando la ecuación 2.3 en la ecuación 2.2, se tiene:

$$m_{acrilico} = 14.40 \text{ [kg]}$$

$$m_{madera} = 8.56 \text{ [kg]}$$

$$m_{aluminio} = 21.58 \text{ [kg]}$$

2.1.2.4 Velocidad de giro de la herramienta.

La velocidad de operación o de giro en el fresado se obtiene a partir de las características de la herramienta y del material a maquinar.

Partiendo de la ecuación de velocidad de corte se determina la velocidad de giro de la herramienta. Esta velocidad es utilizada en el proceso de fresado y se considerará también para el cálculo de las cargas en las mesas “X” e “Y” y en el requerimiento de potencia para la operación del equipo.

La velocidad de giro de la herramienta en el fresado está dado por:

$$n = \frac{v_{corte} \cdot 1000}{D \cdot \pi} \text{ [rpm]}^{22} \tag{2.4}$$

Donde:	v_{corte}	velocidad de corte	[m/min]
	D	diámetro de la herramienta	[mm]
	n	velocidad de giro	[rpm]

²⁰ Información obtenida de <http://www.ucn.cl/facultadesinstitutos/laboratorio/propiedades%20f%EDsicasm3.htm> al 13 de febrero del 2010.

²¹ Información obtenida de <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm> al 13 de febrero del 2010.

²² Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985. Pág.: 99.

Debido a características de diseño se establece que el diámetro máximo **D** de la herramienta será de 10mm.

Por lo tanto, las velocidades a las que trabajará la máquina serán:

$$v_{\text{corte acrilico}} = 70 \left[\frac{m}{\text{min}} \right]^{23}$$

$$\Rightarrow n_{\text{acrilico}} = 2228 \text{ [rpm]}$$

$$v_{\text{corte aluminio}} = 350 \left[\frac{m}{\text{min}} \right]^{24}$$

$$\Rightarrow n_{\text{aluminio}} = 11140 \text{ [rpm]}$$

2.1.2.5 Potencia.

Para el cálculo de la potencia requerida, se toma en cuenta los procesos de fresado frontal que desarrollará la máquina y del proceso de taladrado que se puede presentar como trabajo inicial en el maquinado de una pieza.

2.1.2.5.1 Potencia requerida para fresado.

La potencia neta para el proceso de fresado se calcula en base a la expresión:

$$P_{\text{neto}} = \frac{a_a \cdot a_r \cdot s' \cdot V_p}{1000 \cdot V_p} [kW]^{25} \tag{2.5}$$

Donde:	a_a	profundidad de corte axial	[mm]
	a_r	profundidad de corte radial	[mm]
	s'	avance de la mesa	[mm/min]
	V_p	índice de arranque de metal	[cm ³ /min.kW]

²³ Alrededor de las Máquinas - Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. Pág.: 153.

²⁴ Alrededor de las Máquinas - Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. Pág.: 153.

²⁵ Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985. Pág.: 103.

Considerando que la mayor potencia requerida será la necesaria para maquinar el aluminio, se realizará el cálculo para ésta:

Por lo tanto se tiene que:

$a_a = 3$ [mm] Profundidad de corte por pasada recomendada²⁶.

a_r se obtiene de:

$$\frac{D}{a_r} = \frac{4}{3} \quad (2.6)$$

Donde:

$$D = 10 \text{ [mm]}$$

$$\Rightarrow a_r = 7.5 \text{ [mm]}$$

s' vienedada por:

$$s' = s_z \cdot z \cdot n \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right] \quad (2.7)$$

Donde: s_z avance por diente [mm]
 z número de dientes herramienta [mm]
 n velocidad de giro maquinado Al [rpm]

Para los valores de:

$$s_z = 0.07 \left[\frac{\text{mm}}{\text{diente}} \right] \quad (2.9)$$

$$z = 4 \quad [\text{dientes}]$$

²⁶ Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985. Pág.: 91.

²⁷ Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985. Pág.: 8.

²⁸ Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985. Pág.: 99.

²⁹ Alrededor de las Máquinas - Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. Pág.: 153.

$$n = 11140 \text{ [rpm]}$$

Resolviendo, se tiene que:

$$\Rightarrow s' = 3119 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

Para el aluminio se tiene que:

$$V_p = 82 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{min} \cdot \text{kW}} \right]^{30}$$

Resolviendo la ecuación 2.5, se obtiene la potencia neta para el fresado del aluminio.

$$P_{\text{neto}} = 0.856 \text{ [kW]} \approx 1.14 \text{ [hp]}$$

2.1.2.5.2 Potencia requerida para taladrado.

Para el cálculo de la potencia es necesario obtener la fuerza de corte específica por hilo, la misma que para el taladrado está definida por la ecuación:

$$K_{cfz} = K_c * \left(\frac{0.4}{f_z * \text{sen}(Kr)} \right) * 0.29 \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]^{31} \quad (2.8)$$

Donde:

Kc	Fuerza específica de corte para aluminio aleado: 900 [N/mm ²]
Kr	Ángulo de filo de la herramienta: 70°
fz	Avance por filo: 0.1 mm / filo

³⁰ Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985. Pág.: 103.

³¹ Metalcutting Technical Guide. Sandvik Coromant.2005. Pág.: E83 – E84.

Reemplazando estos valores en ecuación 2.8 se tiene:

$$K_{cfz} = 900 * \left(\frac{0.4}{0.1 * \text{sen}(70)} \right) * 0.29 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

$$K_{cfz} = 1111 \left[\frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

La potencia de taladrado está dada por la ecuación:

$$P_t = \frac{D_c * f_n * K_{cfz} * V_c}{240 * 10^3} \quad [kW] \quad (2.9)$$

Donde: **Dc** Diámetro de la broca: 10 [mm]
 fn Avance de la herramienta: 0.2 [mm/rev]
 Vc Velocidad de corte para el taladrado de aluminio 150
 [m/min]³²

Reemplazando estos valores en ecuación 2.9 se tiene:

$$P_t = \frac{10 * 0.2 * 1111 * 150}{240 * 10^3} \quad [kW]$$

$$P_t = 1.38 \quad [kW] \approx 1.86 \quad [hp]$$

La potencia mínima requerida para el diseño de la máquina es la mayor de los procesos de fresado y taladrado, de acuerdo a los cálculos realizados se tiene que la mayor potencia es la del taladrado la cual será considerada para efectos posteriores de diseño.

³² Alrededor de las Máquinas - Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986. Pág.: 103.

2.1.2.6 Precisión.

Los rangos de precisión de una máquina herramienta van de 0.02 mm a 0.002 mm, por lo general³³. Por tal razón se asume como parámetro de diseño una precisión de 0,02 mm, la que se logrará a partir de las características de los motores de paso, diámetro y paso de los tornillos de potencia.

Las cantidades permisibles de flexión del bastidor principal y sus elementos auxiliares deben ser pequeñas para alcanzar un alto grado de precisión. La máquina como estructura no puede estar diseñada por métodos normales de esfuerzo donde el criterio es la capacidad de carga, sino que debe estar diseñada para tener una flexión despreciable.

Como parámetro de diseño se considera el rango de deflexión de una máquina de precisión moderada, comprendido entre 0.0005 y 0.00001 plg / plg de la longitud total del elemento, esto es 0.0127 a 0.000254 mm / mm de la longitud del elemento³⁴.

A pesar de que la rigidez es un factor cualitativo en el diseño de una máquina, esta juega un papel preponderante ya que es un indicador de la precisión en el funcionamiento y operación. Los valores de rigidez varían de acuerdo al diseño y elementos utilizados en la construcción.

2.1.1.7 Notación de Ejes para maquinas herramientas de columna

La estandarización de estas funciones es esencial por que facilita y regula la programación por control numérico. De acuerdo a normas ISO 841³⁵ y BS3635³⁶ se adopta la notación expresada en el siguiente gráfico.

³³ Principios de Ingeniería de Manufactura. Chiles - Black. Ed. CECSA. 1ra ed. 1999. Pág.: 143.

³⁴ Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da ed. 1995. Pág.: 758.

³⁵ Manual de Mecánica Industrial. Máquinas y Control Numérico. Tomo IV. Ed. Cultural. 1999. Pág.:92.

³⁶ Diseño Principios de Ingeniería de Manufactura. Chiles - Black. Ed. CECSA. 1ra ed. 1999. Pág.: 135.

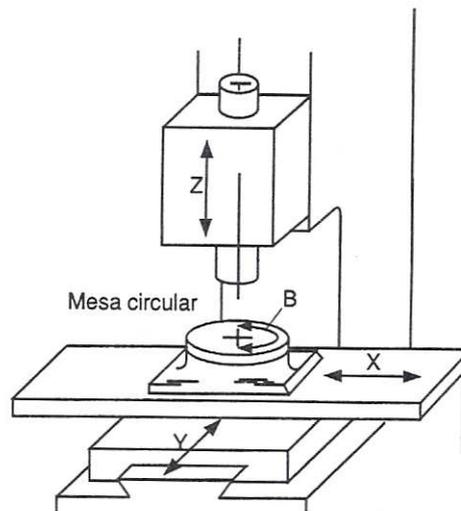


Fig. 2.1: Símbolos convencionales para ejes de taladros y mandrinadoras de una sola columna.

2.1.3 Características operativas.

El ciclo de mecanizado por fresado para la obtención de la pieza final consta de los siguientes puntos:

- ✓ Encendido del sistema.
- ✓ Carga de material a procesar en la mini fresadora.
- ✓ Ingreso de datos en PC.
- ✓ Procesamiento de datos por PC.
- ✓ Decodificación de señal.
- ✓ Mecanizado de relieve.
- ✓ Descarga del material procesado.
- ✓ Obtención de pieza final.

Los procesos de ingreso de datos se los realiza manualmente mediante el teclado al computador, la carga y descarga del material se la realiza manualmente con un operario, en este caso, el alumno.

2.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO MECÁNICO.

Las máquinas-herramientas modernas son núcleos de fabricación flexible capaces de llevar a cabo varias tareas programadas. Los husillos son un componente clave de todas las máquinas-herramienta, y se utilizan para colaborar en la ejecución de distintos tipos de cortes en productos de metal moldeado, entre otros. Estos productos requieren un acabado mediante procesos como el torneado, el cortado, el taladrado, el avellanado, el roscado, el escariado, el rectificado y el fresado para conseguir su forma final y su especificación.

Los husillos son una parte fundamental de cualquier máquina-herramienta. Determinan la calidad del producto final fabricado y la productividad total y la eficiencia de la misma máquina herramienta.

Un husillo es en principio, un eje accionado por un motor que posiciona y proporciona potencia a una herramienta o sujeta una pieza de trabajo. Los husillos pueden funcionar a altas velocidades y tienen un efecto directo sobre la eficacia, la precisión y la productividad total.

Las tendencias específicas del diseño de los husillos indican que predominan tres tipos de configuraciones de husillos adaptados a las distintas necesidades de las aplicaciones.

2.2.1 Análisis de transmisión de potencia a la herramienta.

2.2.1.1 Husillos accionados por correas o bandas.

Para las máquinas herramientas de bajo coste o para las de alto par, se prefieren los husillos accionados por correas o bandas. Los husillos accionados por correas se encuentran en centros de mecanizado, máquinas-herramienta reforzadas y en tornos donde los costes son de importancia crucial.

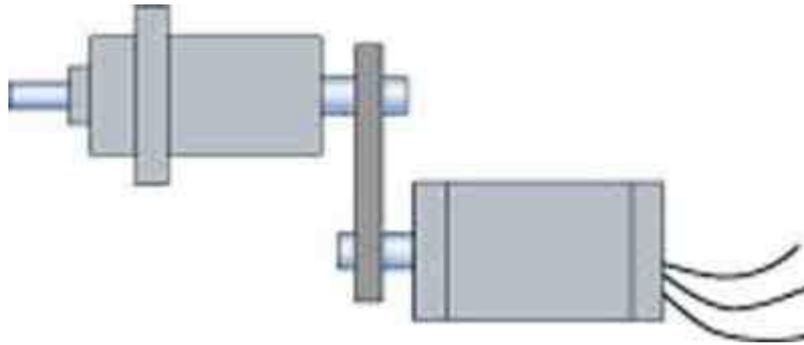


Figura 2.2: Husillo accionado por correa o banda

El mecanismo de accionamiento principal da al husillo de fresar el movimiento de corte o movimiento principal. Con objeto de que la fresa pueda funcionar con la velocidad de corte más apropiada, el número de revoluciones es variable.

Las máquinas herramientas son accionadas por un motor eléctrico y a través de bandas. A través de estos se puede conseguir distintas revoluciones para la herramienta o husillo principal y transmitir la potencia del motor principal a la herramienta de fresar.

Esta función se puede conseguir también con la utilización de elementos eléctricos que nos permitan variar la velocidad de un motor eléctrico como lo son los variadores para motores AC y de reóstatos para motores DC.

La combinación de variadores de velocidad con bandas sincrónicas permite controlar con alta precisión la velocidad de giro del motor y transmitirla al husillo o eje de la herramienta.

Las bandas y las cadenas representan los tipos principales de elementos flexibles para transmitir potencia. A diferencia de los impulsores de engranes que requieren de distancias centrales espaciadas en forma, en alguna medida, reducida y precisa, los impulsores de banda y cadena son capaces de transmitir

potencia entre ejes que se encuentran muy separados. Además la distancia central es inherentemente ajustable y no necesita ser tan precisa como para los impulsores de engrane.³⁷

Las transmisiones que emplean estas bandas son silenciosas, capaces de absorber choques y funcionan con bajas presiones en los cojinetes además se caracterizan por que su eficiencia puede variar desde el 70% al 96%.³⁸

Las bandas se encuentran formadas de cuerda y tela, impregnadas con caucho siendo el material de la cuerda algodón, rayón, fibra sintética o acero. Son comunes en nuestro medio a bajo costo y de fácil remoción. Poseen una vida útil no muy prolongada, lo que se compensa con su costo y facilidad de adquisición

2.2.1.2 Husillos con motores acoplados.

Para las aplicaciones de propósito general que exigen flexibilidad y cambio automático de husillo, se suele recurrir a los husillos con motores acoplados. Los diseños con motores acoplados responden a la necesidad de una producción alta; el espacio para el husillo es limitado, y posee una elevada flexibilidad en caso de utilización y un mejor rendimiento dinámico.

Se está aplicando este diseño de husillo a los nuevos conceptos de máquinas herramienta y a las máquinas herramienta estándar con motores asíncronos, cambio automático de husillo, alto par y alta velocidad. Los husillos con motores acoplados ofrecen un enfoque flexible en el diseño gracias al método de la conexión.

³⁷ Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da ed. 1995. Pág.: 530.

³⁸ Manual del Ingeniero Mecánico. Marks. Ed. Mc Graw Hill. 9na ed. Pág.: 8-63.

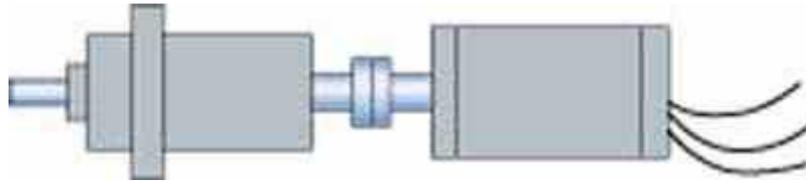


Figura 2.3: Husillo con motor acoplado

2.2.1.3 Husillos motorizados.

Para las máquinas herramienta de rendimiento medio y alto, y para los sistemas de alta velocidad y gran potencia, la opción de diseño que se prefiere en general, suele ser el husillo motorizado. Los husillos motorizados que incorporan tecnología de motor asíncrono o síncrono, aumentarán la velocidad de los husillos hasta una velocidad superior a las 20.000 rpm hasta llegar a 40.000 rpm o incluso más. Este diseño responde a las necesidades de una productividad mayor y una mejor calidad de la pieza de trabajo. Las aplicaciones para estas unidades incluyen centros de mecanizado, fresadoras, rectificadoras, tornos verticales y tornos de alto rendimiento.

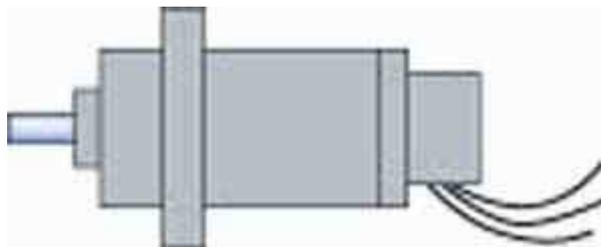


Figura 2.4: Husillo motorizado

Las alternativas de diseño mecánico están referidas al método de transmisión de potencia y de la generación de movimiento para cada uno de los ejes en la mesa y herramienta de fresar.

2.2.2 Análisis del mecanismo de avance, movimientos longitudinal y transversal de la mesa.

Para realizar el maquinado de la pieza, la mesa debe moverse en sentido lateral y longitudinal, mientras que la herramienta se debe desplazar en altura.

2.2.2.1 Tornillos de Potencia

Los tornillos de potencia están diseñados para convertir el movimiento giratorio en movimiento lineal y ejercer la fuerza necesaria para mover una pieza de una máquina a lo largo de una trayectoria deseada. Los tornillos de potencia operan con base en el principio de la cuerda de tornillo y la tuerca con la que enlaza. Si el tornillo se apoya en cojinetes y gira en tanto se evita que la tuerca gire, la tuerca se enroscará a lo largo del tornillo. En caso de que constituya parte integral de la máquina, por ejemplo, la que sostiene la cortadora de un torno, el tornillo impulsará el soporte de la cortadora a lo largo de la cama de la máquina para hacer un corte. Por el contrario, si la tuerca se mantiene fija, el tornillo es el que se desplaza.

Los tornillos de potencia se caracterizan por tener 3 tipos de cuerdas, la primera es una cuerda cuadrada, la segunda cuerda Acme y la tercera es una cuerda trapezoidal³⁹. De estas tres la cuadrada y la trapezoidal son las más eficientes. Es decir, requieren un torque mínimo para desplazar una carga particular a lo largo del tornillo.

Para conseguir estos movimientos se puede utilizar tornillos de potencia movidos por motores de paso, los mismos que transmitirán el movimiento a una tuerca que a su vez sostiene a la mesa de trabajo.

³⁹ Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da ed. 1995. Pág.: 728.

Los tornillos de potencia no son fáciles de conseguir en nuestro medio y su costo es relativamente alto, se encuentran en medidas superiores a los 6 milímetros de paso como una restricción para su maquinado.

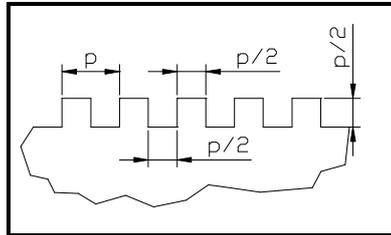


Fig. 2.5: Tornillo de potencia de cuerda cuadrada.

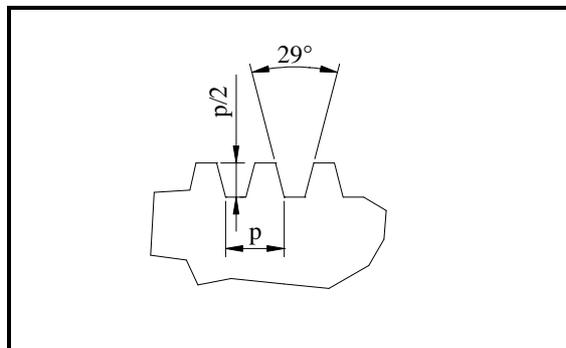


Fig. 2.6: Tornillo de potencia de cuerda Acme.

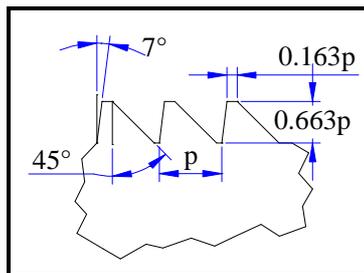


Fig. 2.7: Tornillo de potencia de cuerda trapezoidal.

2.2.2.2 Husillos roscados y guías de movimiento lineal con rodamientos de bolas.

También como reemplazo de los tornillos de potencia se puede aplicar el uso de husillos roscados con rodamientos de bolas movidos por motores de paso, y guías de movimiento lineal con rodamientos de bolas, los cuales son utilizados para mecánica de precisión en el maquinado de piezas.

Este conjunto se caracteriza por tener una mayor eficiencia y por lo tanto menor pérdida de potencia debido al mínimo rozamiento generado entre tuerca y tornillo en el movimiento de avance de las mesas de trabajo y a la mínima fricción generada entre las guías que direccionan el movimiento de éstas. Poseen además un movimiento suave debido a la eliminación de contacto entre esferas, con una baja variación en torque que puede ser obtenida debido a que las esferas se encuentran alineadas uniformemente.

En cuanto a la función del tornillo de cabeza redonda es similar a un tornillo de potencia, no obstante su configuración es distinta. La tuerca contiene numerosas bolas que hacen contacto con los hilos de la cuerda del tornillo, lo cual genera una fricción muy baja y una alta eficiencia, si se le compara con tornillos de potencia. En las herramientas mecánicas modernas, equipos de automatización, sistemas de dirección de vehículos, y actuadores de aeronaves se emplean tornillos de cabeza redonda a fin de obtener alta precisión, respuesta rápida y operación suave.

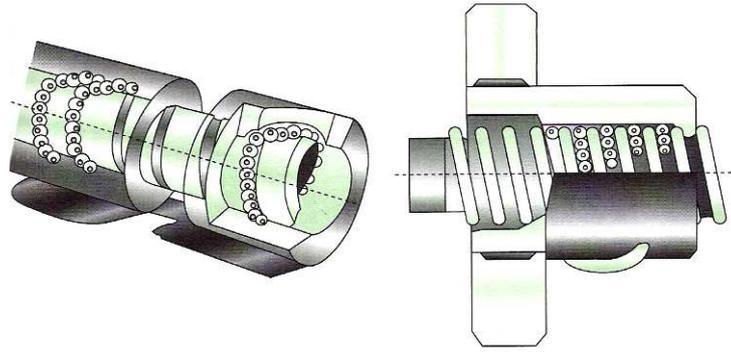


Fig. 2.8: Husillo roscado con rodamiento de bolas

Para el caso de las guías de movimiento lineal con rodamiento de bolas, el coeficiente de rozamiento se minimiza de tal forma que la fuerza y el torque requeridos para el movimiento de una carga es muy inferior a la que se requeriría con guías de alto acabado superficial y lubricación.

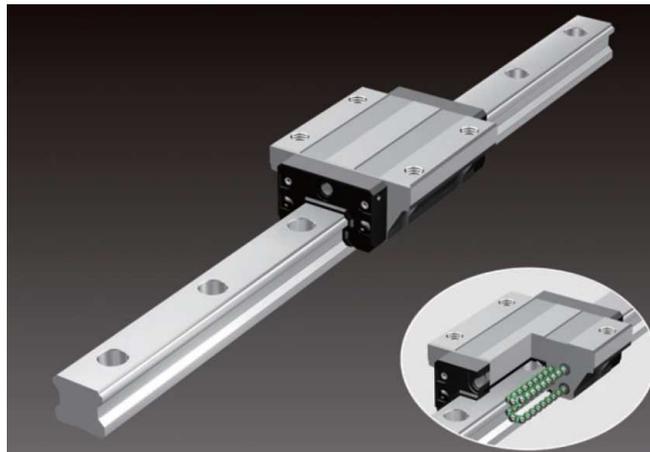


Fig. 2.9: Guía de movimiento lineal con rodamiento de bolas

2.3 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO ELÉCTRICO Y CONTROL

2.3.1 Análisis de alternativas de diseño eléctrico.

2.3.1.1 Alternativas para Motor principal (Giro de Herramienta)

Como alternativas de diseño para el motor principal, encargado de transmitir el movimiento a los mecanismos que a su vez generan el movimiento de la herramienta en el proceso de fresado, se tienen:

- ✓ Motor de corriente alterna.
- ✓ Motor de corriente continua.
- ✓ Motores universales
- ✓ Motores DC sin escobillas
- ✓ Motores de inducción AC de una fase.
- ✓ Motores de inducción AC de tres fases.
- ✓ Motores sincrónicos AC de una fase.
- ✓ Servo motores.
- ✓ Husillos motorizados.

El sistema de alimentación de energía eléctrica va a depender del tipo de motor seleccionado de acuerdo a su voltaje y requerimiento de carga.

2.3.1.1.1 Motores de corriente alterna.

Como su nombre lo indica, requieren corriente alterna. Estos usualmente están catalogados de acuerdo a su potencia, la misma que se indica en HP.

Estos motores pueden venir con varios rangos de velocidad, los cuales están especificados en RPM, bajo condiciones de trabajo y carga.

Cuando un motor AC trabaja por debajo de su carga de operación, la velocidad de rotación de su eje se encuentra a la velocidad de carga máxima. Los

motores AC son ampliamente usados en cualquier aplicación que requiera velocidad variable, bajo precio.

2.3.1.1.2 Motores de corriente continua.

Requieren corriente directa para funcionar. Este tipo de motores, son motores eléctricos que utilizan la electricidad y un campo magnético para producir torque con el cual gira el eje del motor.

Un motor DC simple requiere dos magnetos de polaridad opuesta y una bobina eléctrica. Esta bobina cumple el propósito de un electro magneto. Con los magnetos dentro del motor se atraen y repelen unos a otros, haciendo que el motor DC gire.

2.3.1.1.3 Motores universales.

Estos motores pueden usar AC o DC y operan a altas velocidades con la restricción de ser utilizados en periodos prolongados.

2.3.1.1.4 Motores DC sin escobillas.

Motores preferidos en el manejo de husillos, presentan una vida útil prolongada, además de una mayor eficiencia que los motores de AC y no producen excesivo calor.

2.3.1.1.5 Motores de inducción AC de una fase.

Este tipo de motor tiene un campo magnético giratorio con el cual produce el torque de arranque.

2.3.1.1.6 Motores de inducción AC de tres fases.

Son usados en aplicaciones de alta potencia en máquinas herramientas. Poseen tres campos magnéticos los cuales incrementan el torque de arranque significativamente.

2.3.1.1.7 Motores sincrónicos AC de una fase.

Giran de forma sincrónica con la frecuencia de corriente principal. Estos motores magnetizan su rotor sin necesidad de una corriente de inducción.

2.3.1.1.8 Servomotores.

Son tipos especiales de moto reductores, que proporcionan más potencia y tienen controles más finos. Son usados comúnmente en el manejo de husillos de sistemas de precisión de máquinas CNC. Los principales tipos de servo motores son DC y AC.

2.3.1.1.9 Husillos motorizados.

Los husillos motorizados, son una categoría común de motores utilizados en varias aplicaciones industriales, éstos han llegado a ser los más comunes en los nuevos centros de maquinado.

La unidad de husillo motorizado, es generalmente la opción preferida para trabajo en altas velocidades, sistemas con requerimientos de media a alta potencia y máquinas herramientas de alto rendimiento.

Estos husillos motorizados de alta velocidad, tiene el motor integrado al eje. El motor está construido directamente con el eje, lo cual elimina la necesidad de bandas o engranes para la transmisión de potencia.

Estos husillos están disponibles en una amplia variedad de tamaños y modelos en un diseño compacto.

Altamente recomendados para alta productividad, donde hay poco espacio para el eje y una alta flexibilidad en términos de servicio y un comportamiento dinámico mejorado.

Gracias a la utilización de husillos motorizados, los centros de maquinado de última tecnología, pueden alcanzar velocidades mayores a 100000 RPM, cosa poco probable con el uso de mecanismos de transmisión de potencia con bandas.

Los husillos motorizados se usan en todas las aplicaciones de máquinas herramientas, por ejemplo pulido, fresado, taladrado, torneado, etc.

Un husillo motorizado está compuesto de los siguientes elementos:

- El husillo.
- El motor
- Sistema de sujeción de herramientas.

El husillo se mantiene en posición mediante el uso de rodamientos de alta precisión que giran hasta la máxima velocidad y soportando las exigencias de potencia del tipo de motor utilizado.

Características de los husillos motorizados.

- Disponibilidad en diferentes tamaños.
- Robusta combinación de velocidad y potencia para las diferentes necesidades de mecanizado.
- El husillo es comandado por un motor AC o DC, que presenta una vida útil prolongada de los rodamientos, baja emisión de calor y mejores tolerancias.

- Puede trabajar con motores sincrónicos o asíncrónicos, los mismos que generan el movimiento del husillo.
- Su sistema de accionamiento ofrece alta resolución de posicionamiento, con alta potencia sobre un alto rango de velocidades, a un torque máximo y gran precisión de la orientación del husillo.
- En su gran parte los husillos motorizados, tiene un diseño resistente, que le permite tener una prolongada vida útil, con periodos libres de mantenimiento.

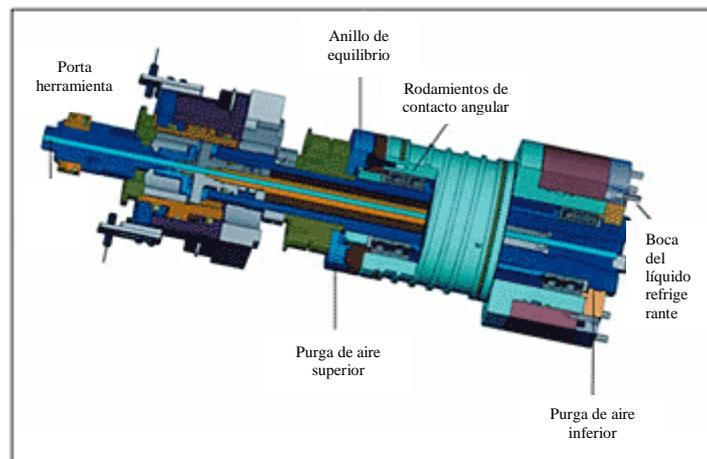


Fig. 2.10: Husillo motorizado

2.3.1.2 Para Motores Secundarios

Como alternativas de diseño eléctrico para los motores secundarios, encargados de transmitir movimiento a mecanismos de posicionamiento de mesas y cabezal de herramienta, se tienen:

- ✓ Servomotores.
- ✓ Motores de Paso.

2.3.1.2.1 Servomotores

Un servomotor es un dispositivo pequeño que tiene un eje de rendimiento controlado. Este puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal de que una señal codificada exista en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia.

En la práctica, se usan servos para posicionar superficies de control como el movimiento de palancas, pequeños ascensores y timones. Ellos también se usan en radio control, títeres, y por supuesto, en robots.

Los servos son sumamente útiles en robótica. Los motores son pequeños, tienen internamente una circuitería de control y es sumamente poderoso para su tamaño. Un servo normal o Standard como el HS-300 de Hitec tiene 42 onzas por pulgada o mejor 3kg por cm. de torque que es bastante fuerte para su tamaño.

Un servo, por consiguiente, no consume mucha energía. Se muestra en la Figura 2.11 la composición interna de un servo motor en el cuadro de abajo. Se podrá observar la circuitería de control, el motor, un juego de piñones, y la caja. También se puede ver los 3 alambres de conexión externa. Uno es para alimentación Vcc (+5volts), conexión a tierra GND y el alambre blanco es el alambre de control.



Fig. 2.11: Composición interna de un servomotor

El motor del servo tiene algunos circuitos de control y un potenciómetro (una resistencia variable) esta es conectada al eje central del servo motor. En la figura anterior se puede observar al lado izquierdo del circuito. Este potenciómetro permite a la circuitería de control, supervisar el ángulo actual del servo motor. Si el eje está en el ángulo correcto, entonces el motor está apagado. Si el circuito chequea que el ángulo no es el correcto, el motor girará en la dirección adecuada hasta llegar al ángulo correcto. El eje del servo es capaz de llegar alrededor de los 180 grados. Normalmente, en algunos llega a los 210 grados, pero varía según el fabricante. Un servo normal se usa para controlar un movimiento angular de entre 0 y 180 grados. Un servo normal no es mecánicamente capaz de retornar a su lugar, si hay un mayor peso que el sugerido por las especificaciones del fabricante.

La cantidad de voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que éste necesita viajar. Así, si el eje necesita regresar una distancia grande, el motor regresará a toda velocidad. Si este necesita regresar sólo una pequeña cantidad, el motor correrá a una velocidad más lenta. A esto se le llama control proporcional⁴⁰.

El trabajo con servomotores juega un papel muy importante en el área industrial, ya que la tendencia en esta área es de automatizar las Máquinas-Herramientas. Un servomotor (Servo) es un dispositivo electromecánico en el cual una entrada eléctrica determina la posición de un motor con la ayuda de un codificador óptico (*encoder*).

Este se encuentra adaptado al servomotor, del cual se obtiene una serie de pulsos que indican la posición en que se encuentra el servo, además del sentido de giro. Los servos se utilizan extensivamente en robótica, coches, aviones y en barcos radio-controlados, por nombrar algunos. La importancia de conocer la posición de un servomotor es que en base a esta se puede conocer la velocidad y

⁴⁰ Información obtenida de <http://ccc.inaoep.mx/fpgacentral/reconfig/2003/articulos/TCR11.pdf> al 13 de febrero del 2010.

aceleración del dispositivo que lo utiliza haciendo uso, por ejemplo, de un controlador.

En lo que respecta al campo de aplicación del *encoder*, lo tiene mayormente, en los sistemas de control de movimiento. El *encoder* entrega una serie de pulsos en cuadratura a través de dos canales, y dependiendo de la secuencia que estos tengan se obtiene el incremento o decremento de la posición en que se encuentre el servo. Hay un tercer canal, llamado Índice, el cual indica el término de una vuelta completa del encoder. En la Figura 2.12 es mostrada la serie de pulsos que entrega este dispositivo a través de sus tres canales:

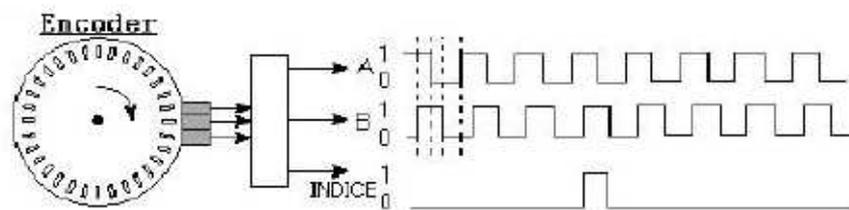


Fig. 2.12: Forma de onda entregada por un encoder

La serie de pulsos entregada por el *encoder* es relativa, mientras que a la salida del contador de pulsos se obtiene una posición absoluta. El ambiente industrial actual, es decir, la automatización de máquinas exige nuevos sistemas digitales que sean compatibles con demás sistemas, para lograr un sistema mucho más complejo y obtener una solución a problemas mayores⁴¹.

2.3.1.2.2 Motores de Paso

Como todo motor, es en esencia un conversor electromecánico, que transforma la energía eléctrica en mecánica; pero de un modo tan peculiar que constituye en la actualidad una categoría aparte.

⁴¹ Información obtenida de <http://www.todorobot.com.ar/documentos/servomotor.pdf> al 13 de febrero del 2010.

En efecto, mientras que un motor convencional gira libremente al aplicar una tensión comprendida dentro de ciertos límites (que se corresponden de un lado al par mínimo capaz de vencer su propia inercia mecánica, y de otro a sus propias limitaciones de potencia); el motor paso a paso está concebido de tal manera que gira un determinado ángulo proporcional a la "codificación" de tensiones aplicadas a sus entradas (4, 6, etc.). La posibilidad de controlar en todo momento esta codificación permite realizar desplazamientos angulares lo suficientemente precisos, dependiendo el ángulo de paso (o resolución angular) del tipo de motor (puede ser tan pequeño como $1,80^\circ$ hasta unos 15°). De este modo, si por ejemplo el número de grados por paso es de $1,80^\circ$, para completar una vuelta serán necesarios 200 pasos.

De la misma manera que se puede posicionar el eje del motor, es posible controlar la velocidad del mismo, la cual será función directa de la frecuencia de variación de las codificaciones en las entradas. De ello se deduce que el motor paso a paso presenta una precisión y repetitividad que lo habilita para trabajar en sistemas abiertos sin realimentación.

Sus principales aplicaciones se pueden encontrar en robótica, tecnología aeroespacial, control de discos duros, flexibles, unidades de CD-ROM o de DVD e impresoras, en sistemas informáticos, manipulación y posicionamiento de herramientas y piezas en general. ⁴²

Principio de funcionamiento

Los motores eléctricos, en general, basan su funcionamiento en las fuerzas ejercidas por un campo electromagnético y creadas al hacer circular una corriente eléctrica a través de una o varias bobinas. Si dicha bobina, generalmente circular y denominada estator, se mantiene en una posición mecánica fija y en su interior, bajo la influencia del campo electromagnético, se coloca otra bobina, llamada rotor, recorrida por una corriente y capaz de girar sobre su eje, esta última tenderá a buscar la posición de equilibrio magnético, es decir, orientará sus polos NORTE-

⁴² Información obtenida de http://autric.com/Microbotica%20y%20Mecatronica/motores_paso_a_paso.htm al 13 de febrero del 2010.

SUR hacia los polos SUR-NORTE del estator, respectivamente. Cuando el rotor alcanza esta posición de equilibrio, el estator cambia la orientación de sus polos, aquel tratará de buscar la nueva posición de equilibrio; manteniendo dicha situación de manera continuada, se conseguirá un movimiento giratorio y continuo del rotor y a la vez la transformación de una energía eléctrica en otra mecánica en forma de movimiento circular.

Aun basado en el mismo fenómeno, el principio de funcionamiento de los motores de corriente continua, los motores paso a paso son más sencillos si cabe, que cualquier otro tipo de motor eléctrico.

La Figura 2.13 ilustrar el modo de funcionamiento de un motor paso a paso, suponiendo que las bobinas L1 como L2 poseen un núcleo de hierro dulce capaz de imantarse cuando dichas bobinas sean recorridas por una corriente eléctrica. Por otra para el imán M puede girar libremente sobre el eje de sujeción central.

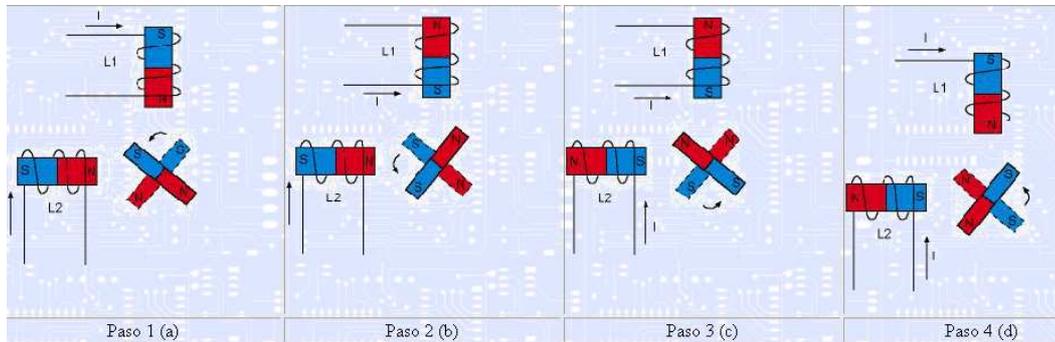


Fig. 2.13: Principio de funcionamiento de un motor paso a paso

Inicialmente, sin aplicar ninguna corriente a las bobinas (que también reciben el nombre de fases) y con M en una posición cualquiera, el imán permanecerá en reposo si no se somete a una fuerza externa. Si se hace circular corriente por ambas fases como se muestra en la Figura 2.13(a), se crearán dos polos magnéticos NORTE en la parte interna, bajo cuya influencia M se desplazará hasta la posición indicada en dicha figura.

Si se invierte la polaridad de la corriente que circula por L1 se obtendrá la situación magnética indicada en la Figura 2.13(b) y M se verá desplazado hasta la nueva posición de equilibrio, es decir, ha girado 90 grados en sentido contrario a las agujas del reloj.

Invirtiendo ahora la polaridad de la corriente en L2, se llega a la situación de la Figura 2.13 (c) habiendo girado M otros 90 grados. Si, finalmente se invierte de nuevo el sentido de la corriente en L1, M girará otros 90 grados y se habrá obtenido una revolución completa de dicho imán en cuatro pasos de 90 grados.

Por tanto, si se mantiene la secuencia de excitación expuesta para L1 y L2 y dichas corrientes son aplicadas en forma de pulsos, el rotor avanzará pasos de 90 grados por cada pulso aplicado. Por lo tanto se puede decir que un motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte impulsos eléctricos en un movimiento rotacional constante y finito dependiendo de las características propias del motor.

El modelo de motor paso a paso que se ha analizado, recibe el nombre de bipolar ya que, para obtener la secuencia completa, se requiere disponer de corrientes de dos polaridades, presentando tal circunstancia un inconveniente importante a la hora de diseñar el circuito que controle el motor. Una forma de paliar este inconveniente es la representada en la Figura 2.14, obteniéndose un motor unipolar de cuatro fases, puesto que la corriente circula por las bobinas en un único sentido.

Si inicialmente se aplica la corriente a L1 y L2 cerrando los interruptores S1 y S2, se generarán dos polos NORTE que atraerán al polo SUR de M hasta encontrar la posición de equilibrio entre ambos como puede verse en la Figura 2.14(a). Si se abre posteriormente S1 y se cierra S3, por la nueva distribución de polos magnéticos, M evoluciona hasta la situación representada en la Figura 2.14(b).

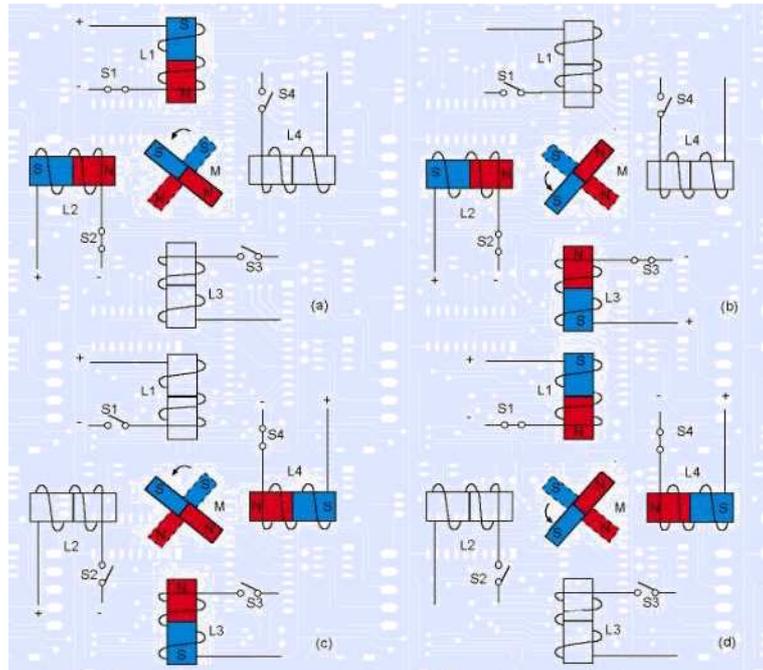


Fig. 2.14: Principio básico de un motor unipolar de cuatro fases.

Siguiendo la secuencia representada en la Figuras 2.14(c) y (d), de la misma forma se obtienen avances del rotor de 90 grados habiendo conseguido, como en el motor bipolar de dos fases, hacer que el rotor avance pasos de 90 grados por la acción de impulsos eléctricos de excitación de cada una de las bobinas. En uno y otro caso, el movimiento obtenido ha sido en sentido contrario al de las agujas del reloj; ahora bien, si las secuencias de excitación se generan en orden inverso, el rotor girará en sentido contrario, por lo que se puede deducir que el sentido de giro en los motores paso a paso es reversible en función de la secuencia de excitación y, por tanto, se puede hacer avanzar o retroceder al motor un número determinado de pasos según las necesidades.

El modelo de motor paso a paso expuesto, salvo su valor didáctico, no ofrece mayor atractivo desde el punto de vista práctico, precisamente por la amplitud de sus avances angulares.

Una forma de conseguir motores PAP de paso más reducido, es la de aumentar el número de bobinas del estator, pero ello llevaría a un aumento del

coste y del volumen y a pérdidas muy considerable en el rendimiento del motor, por lo que esta situación no es viable. Hasta ahora y para conseguir la solución más idónea, se recurre a la mecanización de los núcleos de las bobinas y el rotor en forma de hendiduras o dientes, creándose así micropolos magnéticos, tantos como dientes y estableciendo las situaciones de equilibrio magnéticos con avances angulares mucho menores, siendo posible conseguir motores de hasta de 500 pasos.

Tipos de motores de paso

Desde el punto de vista de su construcción existen los siguientes tipos de motores paso a paso.

- **De imán permanente:** es el modelo analizado anteriormente; el rotor es un imán permanente en el que se mecanizan un número de dientes limitado por su estructura física. Ofrece como principal ventaja que su posicionamiento no varía aún sin excitación y en régimen de carga.
- **De reluctancia variable:** Los motores de este tipo poseen un rotor de hierro dulce que en condiciones de excitación del estator y bajo la acción de su campo magnético, ofrecen menor resistencia a ser atravesado por su flujo en la posición de equilibrio. Su mecanización es similar a los de imán permanente y su principal inconveniente radica en que en condiciones de reposos (sin excitación) el rotor queda en libertad de girar y, por lo tanto, su posicionamiento de régimen de carga dependerá de su inercia y no será posible predecir el punto exacto de reposo.
- **Híbridos:** Son combinación de los dos tipos anteriores; el rotor suele estar constituido por anillos de acero dulce dentado en un número ligeramente distinto al del estator y dichos anillos montados sobre un imán permanente dispuesto axialmente.

- Motores Unipolares:** En este tipo de motores, todas las bobinas del estator están conectadas en serie formando cuatro grupos. Estos a su vez, se conectan dos a dos, también en serie, y se montan sobre dos estatores diferentes, tal y como se aprecia en la Figura 2.15. Según puede apreciarse en dicha figura, del motor paso a paso salen dos grupos de tres cables, uno de los cuales es común a dos bobinados. Los seis terminales que parten del motor, deben ser conectados al circuito de control, el cual, se comporta como cuatro conmutadores electrónicos que, al ser activados o desactivados, producen la alimentación de los cuatro grupos de bobinas con que está formado el estator. Si se genera una secuencia adecuada de funcionamiento de estos interruptores, se pueden producir saltos de un paso en el número y sentido que se desee.

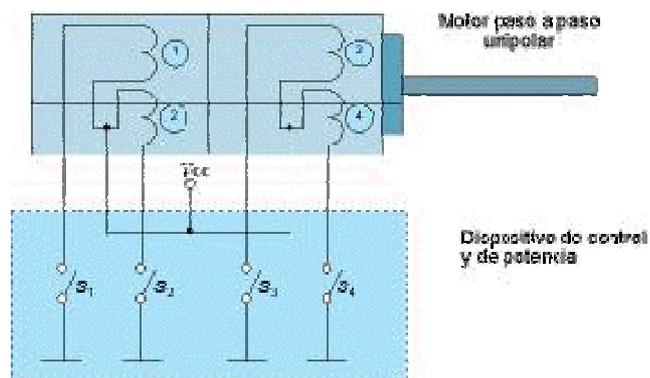


Fig. 2.15: Control de motor Unipolar.

- Motores Bipolares:** En este tipo de motores las bobinas del estator se conectan en serie formando solamente dos grupos, que se montan sobre dos estatores, tal y como se muestra en la Figura 2.16.

Según se observa en el esquema de este motor salen cuatro hilos que se conectan, al circuito de control, que realiza la función de cuatro interruptores electrónicos dobles, que nos permiten variar la polaridad de la alimentación de las bobinas. Con la activación y desactivación adecuada de dichos interruptores

dobles, se puede obtener las secuencias adecuadas para que el motor pueda girar en un sentido o en otro.

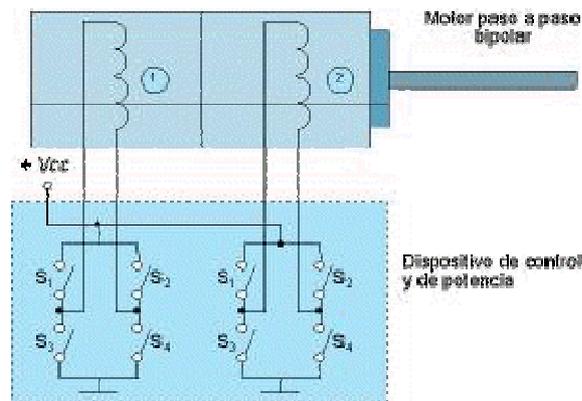


Fig. 2.16: Control de motor bipolar.

La existencia de varios bobinados en el estator de los motores de imán permanente, da lugar a varias formas de agrupar dichos bobinados, para que sean alimentados adecuadamente. Estas formas de conexión permiten clasificar los motores paso a paso en dos grandes grupos:

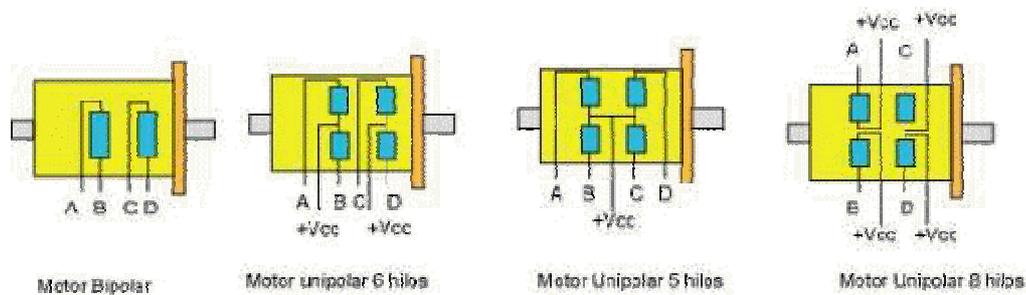


Fig. 2.17: Disposición de las bobinas de motores paso a paso a) bipolar
b) unipolar con 6 hilos c) unipolar a 5 hilos d) unipolar a 8 hilos

Hay que tener en cuenta que los motores unipolares de seis u ocho hilos, pueden hacerse funcionar como motores bipolares si no se utilizan las tomas centrales, mientras que los de cinco hilos no podrán usarse jamás como bipolares, porque en el interior están conectados los dos cables centrales.

En el caso de los unipolares lo normal es encontrarnos con cinco, seis u ocho terminales, ya que además de los bobinados hay otros terminales que corresponden con a las tomas intermedias de las bobinas, los cuales se conectan directamente a positivo de la fuente de alimentación para su correcto funcionamiento. En las figuras 2.17(b), 2.17(c) y 2.17(d) se pueden apreciar como están conectados internamente los terminales de estos tipos de motores.

2.3.1.2.3 Características de los motores de paso.

Desde el punto de vista mecánico y eléctrico, es conveniente conocer el significado de algunas de las principales características y parámetros que se definen sobre un motor paso a paso:

- **Par dinámico de trabajo:** Depende de sus características dinámicas y es el momento máximo que el motor es capaz de desarrollar sin perder paso, es decir, sin dejar de responder a algún impulso de excitación del estator y dependiendo, evidentemente, de la carga.

Generalmente se ofrecen, por parte del fabricante, curvas denominadas de arranque sin error (pull-in) y que relaciona el par en función el número de pasos.

Hay que tener en cuenta que, cuando la velocidad de giro del motor aumenta, se produce un aumento de la f.c.e.m. en él generada y, por tanto, una disminución de la corriente absorbida por los bobinados del estator, como consecuencia de todo ello, disminuye el par motor.

- **Par de mantenimiento:** Es el par requerido para desviar, en régimen de excitación, un paso el rotor cuando la posición anterior es estable; es mayor que el par dinámico y actúa como freno para mantener el rotor en una posición estable dada.

- **Par de detención:** Es un par de freno que siendo propio de los motores de imán permanente, es debida a la acción del rotor cuando los devanados del estator están desactivados.
- **Angulo de paso:** Se define como el avance angular que se produce en el motor por cada impulso de excitación. Se mide en grados, siendo los pasos estándar más importantes los siguientes:

Tabla: 2.1 Grados de impulso más frecuentes de motores de paso

Grados por impulso de excitación	Nº de pasos por vuelta
0,72°	500
1,8°	200
3,75°	96
7,5°	48
15°	24

- **Número de pasos por vuelta:** Es la cantidad de pasos que ha de efectuar el rotor para realizar una revolución completa; evidentemente es

$$NP = \frac{360}{\alpha} \quad (2.10)$$

Donde NP es el número de pasos y α el ángulo de paso.

- **Frecuencia de paso máximo:** Se define como el máximo número de pasos por segundo que puede recibir el motor funcionando adecuadamente.
- **Momento de inercia del rotor:** Es su momento de inercia asociado que se expresa en gramos por centímetro cuadrado.

- **Par de mantenimiento, de detención y dinámico:** Definidos anteriormente y expresados en mili Newton por metro.

Sistema de control de los motores de paso

Para realizar el control de los motores paso a paso, es necesario como se ha visto generar una secuencia determinada de impulsos. Además es necesario que estos impulsos sean capaces de entregar la corriente necesaria para que las bobinas del motor se exciten, por lo general, el diagrama de bloques de un sistema con motores paso a paso es el que se muestra en la Figura 2.18.

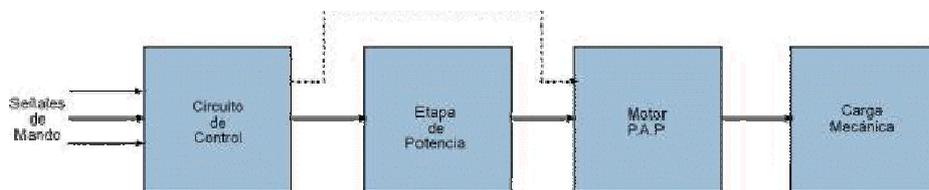


Fig. 2.18: Diagrama de bloques de un sistema con motor paso a paso.

Secuencia del circuito de control

Existen dos formas básicas de hacer funcionar los motores paso a paso atendiendo al avance del rotor bajo cada impulso de excitación:

- **Paso completo** (*full step*): El rotor avanza un paso completo por cada pulso de excitación y para ello su secuencia ha de ser la correspondiente a la expuesta anteriormente, para un motor como el de la Figura 2.14, y que se presentada de forma resumida en la Tabla 2.2 para ambos sentidos de giro, las X indican los interruptores que deben estar cerrados (interruptores en ON), mientras que la ausencia de X indica interruptor abierto (interruptores en OFF).

Tabla 2.2: Secuencia de excitación de un motor paso a paso completo

Paso	S1	S2	S3	S4
1	X			X
2			X	X
3		X	X	
4	X	X		
1	X			X
Sentido horario (a)				

Paso	S1	S2	S3	S4
1	X	X		
2		X	X	
3			X	X
4	X			X
1	X	X		
Sentido antihorario (b)				

- Medio paso (Half step):** Con este modo de funcionamiento el rotor avanza medio paso por cada pulso de excitación, presentando como principal ventaja una mayor resolución de paso, ya que disminuye el avance angular (la mitad que en el modo de paso completo). Para conseguir tal cometido, el modo de excitación consiste en hacerlo alternativamente sobre dos bobinas y sobre una sola de ellas, según se muestra en la Tabla 2.3 para ambos sentidos de giro.

Tabla 2.3: Secuencia de excitación de un motor paso a paso en medio paso.

Paso	Excitación de Bobinas			
	S1	S2	S3	S4
1	X			X
2				X
3			X	X
4			X	
5		X	X	
6		X		
7	X	X		
8	X			
1	X			X
Sentido horario (a)				

Paso	Excitación de Bobinas			
	S1	S2	S3	S4
1	X	X		
2		X		
3		X	X	
4			X	
5			X	X
6				X
7	X			X
8	X			
1	X	X		
Sentido antihorario (b)				

Según la Figura 2.14 al excitar dos bobinas consecutivas del estator simultáneamente, el rotor se alinea con la bisectriz de ambos campos magnéticos;

cuando desaparece la excitación de una de ellas, extinguiéndose el campo magnético inducido por dicha bobina, el rotor queda bajo la acción del único campo existente, dando lugar a un desplazamiento mitad.

Por ejemplo, la secuencia presentada en la Tabla 2.3: en el paso 1, y excitadas las bobinas L1 y L2 de la Figura 2.14 mediante la acción de S1 y S2, el rotor se situaría en la posición indicada en la Figura 2.14(a); en el paso 2, S1 se abre, con lo que solamente permanece excitada L2 y el rotor girará hasta alinear su polo sur con el norte generado por L2. Supuesto que este motor tenía un paso de 90 grados, en este caso sólo ha avanzado 45 grados. Posteriormente, y en el paso 3, se cierra S3, situación representada en la Figura 2.14(b), con lo que el rotor ha vuelto a avanzar otros 45 grados. En definitiva, los desplazamientos, siguiendo dicha secuencia, son de medio paso.

La forma de controlar los motores de paso pueden ser a través de un controlador proporcionado por el fabricante el mismo que contiene dentro de su circuito interno las protecciones necesarias para el motor, la fuente de poder y adicionalmente vienen con un software especializado para el manejo de los mismos, estos sistemas pueden tener la posibilidad de manejar micro pasos o fracciones de paso que le dan al sistema una mayor precisión y control.

Otra forma de controlar los motores de paso es mediante el uso de circuitos integrados especializados (PIC), acompañado por una serie de instrumentos adicionales como tarjetas de control para cada motor, sensores tacométricos, finales de carrera, sensores de posición, fuentes de poder para cada motor, y para su control es necesario elaborar un programa basado en lenguaje ensamblador que integre la funcionalidad de cada motor teniendo como datos de entrada los valores de posición, velocidad del eje y como datos de salida una serie de pulsos eléctricos que excitarán cada bobina de los motores de paso, estos sistemas se caracterizan por perder fácilmente el conteo o posición de los motores, dando como resultado un control no preciso e inestable. ⁴³

⁴³ Información obtenida de http://autric.com/Microbotica%20y%20Mecatronica/motores_paso_a_paso.htm al 13 de febrero del 2010.

2.3.2 Análisis de alternativas de diseño de control

Para poder diseñar un adecuado sistema de control es necesario definir las variables a medir y seleccionar la instrumentación más adecuada.

2.3.2.1 Variables y parámetros a medir y controlar

Para una fresadora es necesario medir:

- Número de revoluciones de los motores de paso. (Velocidad)
- Número de revoluciones del motor principal de la herramienta. (Velocidad)
- Posición de la herramienta en el eje "Z". (Posición)
- Posición de la mesa de trabajo en relación al eje "Y". (Posición)
- Posición de la mesa de trabajo en relación al eje "X". (Posición)

Se debe medir el número de revoluciones de los motores de paso para controlar la velocidad de acercamiento y posición de la herramienta en el eje "Z" así como el movimiento de las mesas en los ejes "X" e "Y".

Se debe medir y controlar el número de revoluciones que va a tener la herramienta (fresa) para dar un buen acabado y desbaste del material a maquinar.

Controlar la posición de la herramienta para determinar la profundidad del maquinado, la ubicación de la herramienta en el eje "Z" y la distancia entre la mesa del eje "X" y el eje "Z".

Controlar la posición de las mesas de trabajo para ejecutar los movimientos necesarios con el fin de maquinar los relieves deseados.

2.3.2.2 Instrumentación

Del punto anterior se sabe que se necesita controlar la velocidad de los motores de paso y la posición de las mesas, para ello se tienen las siguientes alternativas de instrumentación.

Detectores de proximidad

Los medidores de posición pueden del tipo mecánico y los más utilizados del tipo eléctrico que pueden ser clasificados como inductivos, capacitivos, ópticos y ultrasónicos.

En la industria los más ocupados son los medidores de posición eléctrico del tipo inductivo y también los del tipo capacitivo ya que su señal es usada para alimentar instrumentos registradores o controladores.

No se debe dejar de lado a los micro switches de final de carrera que también cumple una función parecida.

Los detectores de posición inductivos sirven para detectar la proximidad de piezas metálicas en un rango desde 1 mm a 30 mm, con resolución del orden de la décima de milímetro. El campo de aplicación más importante de este tipo de detectores es como final de carrera con ventajas sobre los electromagnéticos como la ausencia de contacto, la robustez mecánica, la resistencia a ambientes agresivos y su bajo costo.

El principio de funcionamiento de los detectores capacitivos, y las características constructivas son muy similares a las descritas para los inductivos, la diferencia radica en que en este caso el elemento sensible es el condensador del circuito oscilador, formado por dos aros metálicos concéntricos situados en la cara sensible, y cuyo dieléctrico es el material de la zona sensible. Este tipo de sensores permite detectar materiales metálicos o no, pero su sensibilidad se ve muy afectada por el tipo de material y grado de humedad ambiental del cuerpo a detectar. Las aplicaciones típicas son en la detección de materiales no metálicos como vidrio, cerámica, plástico, madera, agua, aceite, cartón, papel, etc.

Los detectores ópticos, emplean fotocélulas como elementos de detección. A veces disponen de un cabezal que contiene un emisor de luz y la fotocélula de detección del haz reflejado sobre el objeto. Otros trabajan en modo barrera y se utilizan para cubrir mayores distancias, con fuentes luminosas independientes del detector. Ambos tipos suelen trabajar con frecuencias en la banda de infrarrojos.

Los detectores ultrasónicos Están basados en la emisión-recepción de ondas ultrasónicas. Cuando un objeto interrumpe el haz, el nivel de recepción varía y el receptor lo detecta, la gran ventaja frente a las fotocélulas está en la detección de objetos transparentes, como cristal, plásticos, etc. Sin embargo no podrán ser usados en ambientes en los que el aire circule con flujo muy turbulento o con contaminación acústica elevada dada su dependencia de este medio para la transmisión de la onda de ultrasonido.

2.3.2.3 Alternativas de control

Se tiene que los posibles sistemas de control para la presente aplicación son los siguientes:

- Control basado en un micro controlador PIC
- Programa de Control computarizado proporcionado por el fabricante de los motores

2.3.2.3.1 Control basado en un microcontrolador PIC (Peripheral Interface Controller)

Recibe el nombre de **controlador** el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera las señales adecuadas que accionan los efectores que intentan llevar el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta, posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de **micro controlador**. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado.

Un micro controlador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un micro controlador dispone normalmente de los siguientes componentes:

- Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para Contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un micro controlador disponen de las siguientes ventajas:

- Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.
- Aumento de la fiabilidad: al reemplazar el micro controlador por un elevado número de elementos disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.

- Reducción del tamaño en el producto acabado: La integración del micro controlador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.
- Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de *controlador empotrado* (embedded controller)⁴⁴.

CARACTERISTICAS RELEVANTES

Se comienza describiendo las características más representativas de los PIC.

1ª. La arquitectura del procesador sigue el modelo Harvard

En esta arquitectura, el CPU se conecta de forma independiente y con buses distintos con la memoria de instrucciones y con la de datos.

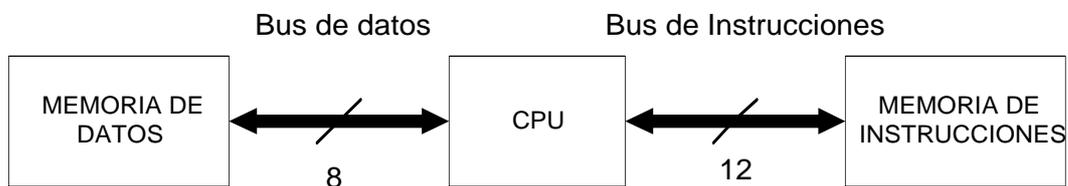


Fig. 2.19: Arquitectura de un PIC

La arquitectura Harvard permite al CPU acceder simultáneamente a las dos memorias. Además, propicia numerosas ventajas al funcionamiento del sistema como se irán describiendo.

2ª. Se aplica la técnica de segmentación (“pipe-line”) en la ejecución de las instrucciones.

⁴⁴ Información obtenida de <http://www.abcdatos.com/tutoriales/tutorial/19747.html> al 13 de febrero del 2010.

La segmentación permite al procesador realizar al mismo tiempo la ejecución de una instrucción y la búsqueda del código de la siguiente. De esta forma se puede ejecutar cada instrucción en un ciclo (un ciclo de instrucción equivale a cuatro ciclos de reloj).

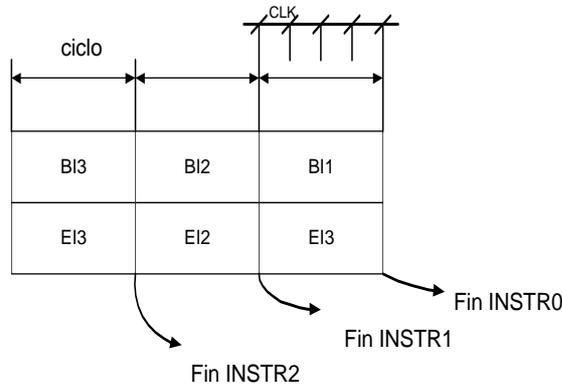


Figura 2.20: Segmentación de un PIC

La segmentación permite al procesador ejecutar cada instrucción en un ciclo de instrucción equivalente a cuatro ciclos de reloj. En cada ciclo se realiza la búsqueda de una instrucción y la ejecución de la anterior.

Las instrucciones de salto ocupan dos ciclos al no conocer la dirección de la siguiente instrucción hasta que no se haya completado la de bifurcación.

3ª. El formato de todas las instrucciones tiene la misma longitud

Todas las instrucciones de los micro controladores de la gama baja tienen una longitud de 12 bits. Las de la gama media tienen 14 bits y más las de la gama alta. Esta característica es muy ventajosa en la optimización de la memoria de instrucciones y facilita enormemente la construcción de ensambladores y compiladores.

4ª. Procesador RISC (Computador de Juego de Instrucciones Reducido)

Los modelos de la gama baja disponen de un repertorio de 33 instrucciones, 35 los de la gama media y casi 60 los de la alta.

5ª. Todas las instrucciones son ortogonales

Cualquier instrucción puede manejar cualquier elemento de la arquitectura como fuente o como destino.

6ª. Arquitectura basada en un banco de registros.

Esto significa que todos los objetos del sistema (puertos de E/S, temporizadores, posiciones de memoria, etc.) están implementados físicamente como registros.

7ª. Diversidad de modelos de micro controladores con prestaciones y recursos diferentes.

La gran variedad de modelos de micro controladores PIC permite que el usuario pueda seleccionar el más conveniente para su proyecto.

8ª. Herramientas de soporte potentes y económicas

La empresa Microchip y otras que utilizan los PIC ponen a disposición de los usuarios numerosas herramientas para desarrollar hardware y software. Son muy abundantes los programadores, los simuladores software, los emuladores en tiempo real, ensambladores, Compiladores C, Intérpretes y Compiladores BASIC, etc.⁴⁵

Cabe anotar que un controlador necesita de instrumentación que genere información de entrada, esta será procesada y por intermedio de sus esquemas de salida enviará sentencias a los actuadores que ejecuten las órdenes de acuerdo a la programación definida en el mismo.

⁴⁵ Información obtenida de <http://www.todopic.com.ar/apuntes/> al 13 de febrero del 2010.

2.3.2.3.2 Control proporcionado por el fabricante de los motores

De acuerdo a la aplicación y a las características de diseño mecánico el proveedor mediante una serie de diagramas sugiere un conjunto de soluciones en equipos y sus respectivos controladores. Para conseguir este fin debe estar completamente definido el objetivo del diseño y sobre todo deben estar definidos los rangos de aplicación del equipo a diseñar.

Dentro de las soluciones expuestas por lo fabricantes la más sobresaliente es el uso de los driver packs, término utilizado para un conjunto de equipos que garantizan el correcto control y funcionamiento de uno y hasta tres motores de paso.

Los principales elementos que ayudan a definir un driver pack son:

1. Motor (es) de paso compatibles con el tipo de trabajo a realizar.
2. Un driver para cada motor utilizado.
3. Fuente de poder compatible con el motor de paso y el driver.
4. Indexador o generador de pulsos (puede ser simple, doble o múltiple).
5. Interface para conectar el dispositivo de control con el Indexador.
6. Driver Pack en conjunto. Figura 2.21⁴⁶

⁴⁶ Catálogo Anaheim Automation's motion control products. 2000. Págs.: 64 – 68.

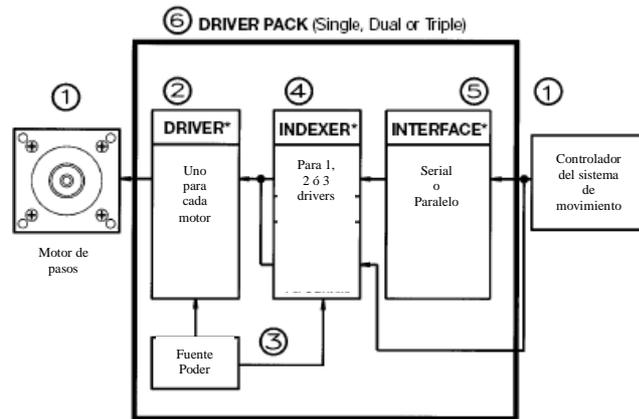


Figura 2.21: Driver pack para motores paso a paso.

Para los motores de paso seleccionados se ha investigado las sugerencias del mismo fabricante el cual garantiza una completa compatibilidad entre los controladores y los motores solicitados, además permite seleccionar un lenguaje de control conocido en el medio mecánico como lo es el lenguaje de “Código G”, una concatenación con un PC mediante un programa de visualización gráfica que facilita el trabajo del operador.

2.4 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.4.1 Selección de la alternativa de diseño mecánico.

Para la selección de la mejor alternativa se debe utilizar una matriz de decisión, la misma que dirá según los factores de ponderación cual es la mejor opción en diseño mecánico.

Utilizando esta matriz se toma en cuenta algunos factores de comparación relacionados con cada sistema, se asignan factores de ponderación que proporcionan una importancia relativa de cada factor.

Los factores se califican de acuerdo a una escala numérica, generalmente de 1 al 10, y se los multiplica por su factor de ponderación, cuya suma debe ser

igual a uno. Finalmente se suman las calificaciones ponderadas y la alternativa elegida es la que haya obtenido la mayor calificación.

2.4.1.1 Transmisión de potencia a la herramienta

Para la selección de la alternativa de transmisión de potencia se consideran los siguientes factores:

Rendimiento: Relación entre la potencia de entrada vs. la potencia de salida. Se considera a potencia de salida como la potencia de entrada menos las pérdidas debido a fricción.

Vida útil: Periodo de tiempo para el cual el fabricante garantiza la duración y el correcto funcionamiento de los elementos que provee.

Seguridad en el uso: Entiéndase como la ausencia de riesgos al operar la máquina.

Demanda de servicio: Intervalo prolongado de actividades de mantenimiento para la operación normal de los componentes.

Facilidad de montaje: Ausencia de requerimientos y procedimientos complicados que requieran tiempos prolongados de montaje o reposición de piezas.

Tabla 2.4: Matriz de decisión para diseño mecánico del mecanismo de transmisión de potencia.

Factor	Factor de ponderación	Husillo Bandas	Husillo Acoplado	Husillo Motorizado
Rendimiento.	0,30	7	8	9
		2,1	2,4	2,7

Vida útil.	0,20	8	9	10
		1,6	1,8	2
Seguridad en el uso.	0,15	6	8	9
		0,9	1,2	1,35
Demanda de servicio	0,25	5	8	9
		1,25	2,0	2,25
Facilidad de montaje.	0,10	6	7	10
		0,6	0,7	1
Total	1	6,45	8,1	9,3

De los factores seleccionados el de mayor ponderación es el rendimiento debido a requerimiento en diseño de máquinas herramientas por lo que el sistema de husillo motorizado es el de mayor calificación. Como segundo factor se tiene la demanda de servicio, ya que el equipo debe operar por prolongados periodos con el menor número de interrupciones por mantenimiento. De las tres alternativas se tiene que el husillo motorizado es la mejor alternativa para el diseño de una máquina herramienta de alta tecnología.

En conclusión, el sistema de transmisión de potencia por husillo motorizado es la mejor opción, por lo que será motivo de estudio y desarrollo en los siguientes capítulos.

2.4.1.2 Mecanismo de avance y movimiento

Para la selección de la alternativa de diseño del mecanismo de avance y movimiento transversal y longitudinal de la mesa de trabajo se consideran los siguientes factores:

Precisión: Calidad de precisión o exactitud que pueden entregar los elementos que conforman el sistema o alternativa de estudio.

Vida útil: Periodo de tiempo para el cual el fabricante garantiza la duración y el correcto funcionamiento de los elementos que provee.

Facilidad de montaje: Ausencia de requerimientos y procedimientos complicados que requieran tiempos prolongados de montaje o reposición de piezas.

Seguridad en el uso: Entiéndase como la ausencia de riesgos al operar la máquina.

Demanda de servicio: Intervalo prolongado de actividades de mantenimiento para la operación normal de los componentes.

Tabla 2.5: Matriz de decisión para diseño mecánico del mecanismo de avance y movimiento transversal y longitudinal de la mesa de trabajo.

Factor	Factor de ponderación	Tornillo de potencia	Husillos y guía de bolas
Precisión.	0.30	8	9
		2,4	2,7
Menor Fricción	0.25	5	9
		1,25	2,25
Facilidad de montaje.	0.20	7	8
		1,4	1,6
Menor torque	0.15	6	9
		0,90	1,35
Demanda de servicio	0.10	8	9
		0,80	0.90
Total	1	6,75	8,8

De los factores escogidos el factor de mayor ponderación es la precisión, la misma que determina una de las principales variables de la máquina herramienta.

Como segundo factor se tiene la menor fricción, ya que la eficiencia de la máquina es un factor económico preponderante en el uso de la misma. De las dos alternativas se tiene que el tornillo de potencia se pueden utilizar sin complicaciones para nuestra aplicación cuando la eficiencia del equipo esté en un segundo plano.

En conclusión el mecanismo de husillo roscado y guía con rozamiento de bolas es la mejor opción y será motivo de estudio y desarrollo en los siguientes capítulos.

2.4.2 Selección de la alternativa eléctrica.

Para la selección de estas alternativas se debe utilizar el mismo proceso de selección para el caso anterior.

2.4.2.1 Motor Principal

Dentro de variedad de motores antes expuestos se han seleccionado tres finalistas, los mismos que agrupan las características fundamentales de operación de los mismos. Estos son Motores AC, servomotores y husillos motorizados.

Para la selección de la alternativa de diseño eléctrico del motor principal se consideran los siguientes factores:

Diseño de aplicación: El motor deberá estar diseñado para desempeñar las funciones de taladrado y fresado requeridas por la máquina herramienta.

Bajo requerimiento de espacio: El motor deberá estar de acuerdo a los requerimientos de rendimiento de la máquina herramienta.

Demanda de Servicio: Intervalo prolongado de actividades de mantenimiento para la operación normal de los componentes.

Facilidad de montaje: Ausencia de requerimientos y procedimientos complicados que requieran tiempos prolongados de montaje o reposición de piezas.

Seguridad en el uso: Entiéndase como la ausencia de riesgos al operar la máquina.

Tabla 2.6: Matriz de decisión para selección del motor principal.

Factor	Factor de ponderación	Motor AC	Servo motor	Husillo motorizado
Diseño de aplicación	0,30	7	8	9
		2,1	2,4	2,7
Bajo requerimiento de espacio	0,25	5	8	9
		1,25	2,00	2,25
Demanda de servicio	0,20	8	9	9
		1,60	1,80	1,80
Facilidad de montaje	0,15	7	8	9
		1,05	1,20	1,35
Seguridad en uso	0,10	8	8	9
		0,80	0,80	0,90
Total:	1	6,8	8,2	9

Como conclusión se tiene que el husillo motorizado es la mejor opción para el diseño de nuestro sistema eléctrico.

2.4.2.2 Motores Secundarios

Para la selección de la alternativa de diseño eléctrico de los motores secundarios se consideran los siguientes factores:

Con el fin de seleccionar los motores más adecuados se hará una evaluación de las alternativas existentes, teniendo en cuenta los factores de ponderación pertinentes del caso.

Se utiliza como factores de decisión:

Facilidad de montaje: Se entiende por facilidad de montaje a la facilidad y estandarización de dimensiones de acuerdo a normas internacionales.

Complejidad del circuito de control: Circuito de baja complejidad y fácil adquisición.

Precisión: Número de pasos para conseguir una precisión de maquinado de 0,02 mm.

Tabla 2.7: Matriz de decisión para selección de los motores secundarios.

Factor	Factor de ponderación	Motor de paso	Servo Motor
Precisión	0,40	9	8
		3,60	3,20
Complejidad Circuito. de control	0,35	9	7
		3,15	2,45
Facilidad de montaje	0,25	8	7
		2,00	1,75
Total:	1	8,75	7,40

De este cuadro se puede concluir que el motor de paso es el que mejor cumple los parámetros de diseño predeterminados y objeto de selección en siguientes capítulos.

2.4.3 Selección de la alternativa de control.

Las alternativa de control de los motores seleccionados (motor de paso y husillo motorizado) se determinarán más adelante una vez sean definidos los requerimientos de potencia y torque para la aplicación de fresado objeto de esta investigación.

CAPITULO III

DISEÑO DE LA MÁQUINA.

3.1 DISEÑO MECÁNICO.

Después de haber establecido los parámetros de diseño se procederá a realizar el cálculo del diseño mecánico de los elementos que son indispensables y cumplen una función principal para el correcto funcionamiento de la máquina. Los elementos a calcular y seleccionar son:

- Guías de movimiento lineal con rodamiento de bolas.
- Selección de los tornillos con rodamiento de bolas.
- Cálculo de soldadura.

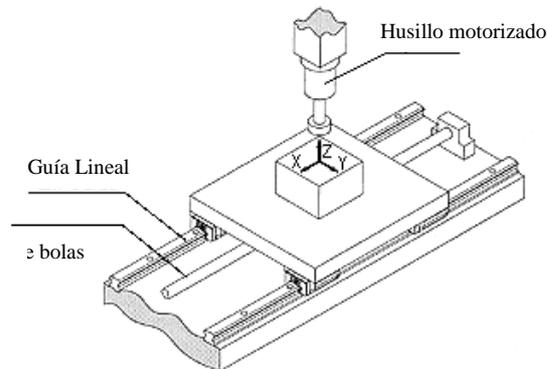


Fig. 3.1: Esquema mecánico base del diseño.

Cada uno de estos cálculos será desarrollado de acuerdo a especificaciones que fueron expuestas en capítulo anterior. Los datos de parámetros generales de diseño de la máquina pueden ser modificados si no es posible su adquisición o manufactura.

3.1.1 Selección de guías de movimiento lineal con rodamientos de bolas.

Para seleccionar las guías de movimiento lineal es necesario determinar las condiciones de uso. Para el caso en estudio se tiene:

- Dimensión de la máquina:

Dimensión Eje X:	750 mm
Dimensión Eje Y:	750 mm
Dimensión Eje Z:	850 mm

- Longitud total de las guías:

Dimensión Eje X:	600 mm
Dimensión Eje Y:	600 mm
Dimensión Eje Z:	480 mm

- Carreras de las mesas:

Carrera mesa X:	400 mm
Carrera mesa Y:	400 mm
Carrera mesa Z:	300 mm

- Orientación de montaje:

Orientación Eje X:	Montaje en pared.
Orientación Eje Y:	Horizontal.
Orientación Eje Z:	Vertical.

- Cargas sobre guías de mesa Y:

W_m	Peso de la mesa:	50.66 kg =	500 N
W_g	Peso bloques de guías:	1.50 kg =	15 N
F_F	Carga de fresado:	7.48 kg =	147 N
F_P	Carga de taladrado:	54.13 kg =	531 N
W_m	Peso de material	22 kg =	216 N
W_{TY}	Carga total Y		1262 N

- Cargas torre porta herramienta Z:

P_m	Peso Motor Principal:	21 kg	=	206 N
C_m	Peso Mesa:	62.90 kg	=	617 N
C_g	Peso Guías:	1.21 kg	=	12 N
C_t	Peso Tornillo bolas:	0.702 kg	=	7 N
C_s	Peso Soportes tornillo:	0.524 kg	=	5.20 N
W_{mp}	Peso Motor de paso:	3 kg	=	29.50 N
F_P	Carga de taladrado:	-54.13 kg	=	-531 N
W_{TZ}	Carga total Z:			346 N (Con fuerza de taladrado)
				877 N (Sin fuerza de taladrado)

- Magnitud de cargas para mesa X:

W_{my}	Peso torre Z	877 N
W_{mx}	Peso mesa X	150 N
W_{Txy}	Tuercas X y Z	0.73 kg = 7.12 N
W_{bg}	Bloques guías	3 kg = 29.41 N
W_{tx}	Carga total X	1063 N

El cálculo de la vida útil de las guías lineales se realiza de manera similar a la de un rodamiento, estimando la vida útil en kilómetros lineales de recorrido antes de la aparición de la primera falla en las superficies de las guías o bloques de montaje del sistema.

Para el diseño y selección de estos elementos nos basaremos en las recomendaciones y teoría desarrollada por THK®, fabricante de este tipo de elementos de alta precisión. Ver anexo A.

3.1.1.1 Cálculo de guía de movimiento lineal del eje X.

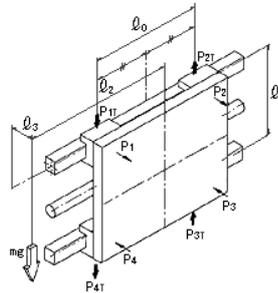


Fig. 3.2: Esquema de montaje del eje X (tipo pared).

Tipo de instalación: Pared
Tipo de movimiento: Aceleración y desaceleración variable.

Condiciones de Operación:

Tiempo requerido de vida útil (km):	75000
Código de guías seleccionadas:	SHS15
Peso de la mesa de trabajo m_1 (kg):	15.30
Peso Torre m_2 (kg):	90.00
Velocidad de movimiento de la mesa (m/s):	0.052
Tiempo en conseguir velocidad máxima t_1 (s)	0.05
Distancia entre bloques (sentido axial) l_0 (mm):	250
Distancia entre guías l_1 (mm):	235

Los cálculos se ejecutan bajo algoritmos propios del fabricante THK en su página web <https://tech.thk.com/index.html>, como se muestra a continuación.

1. Selección del tipo, montaje y número de guías y bloques de las guías lineales a ser usadas en el eje X.

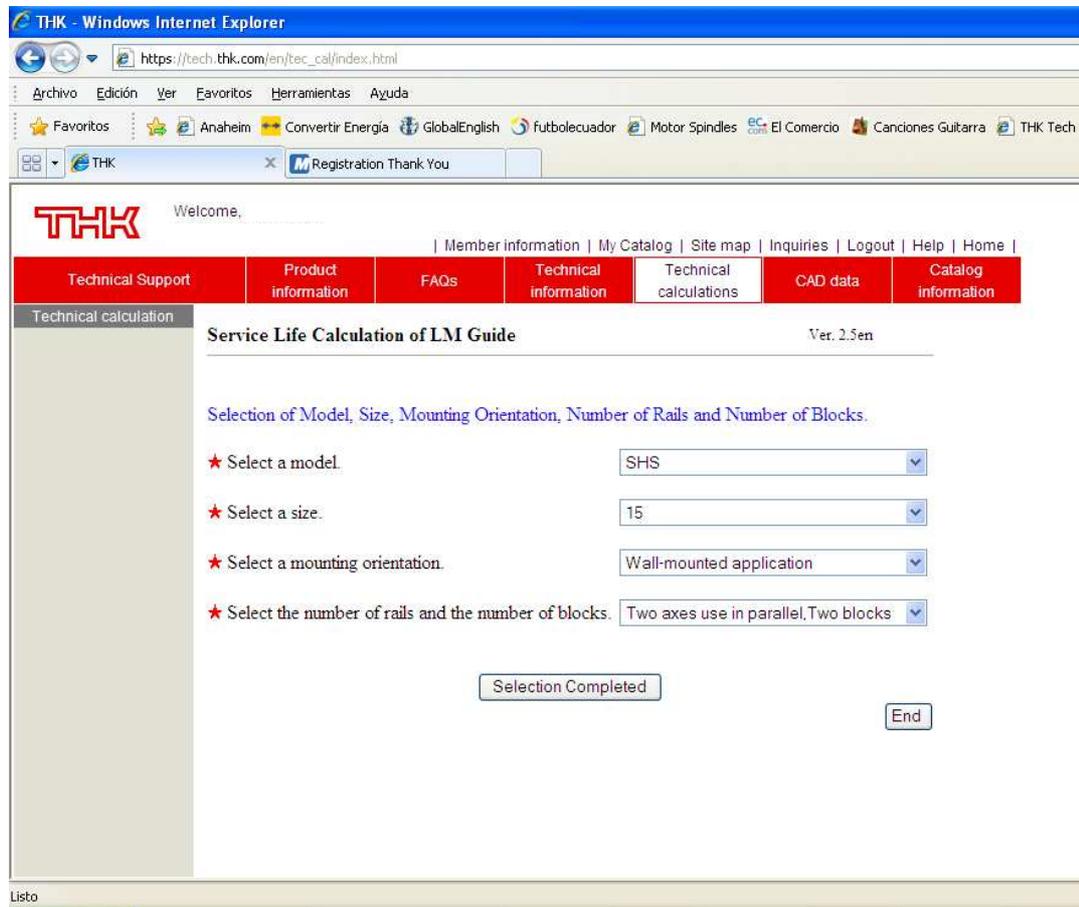


Fig. 3.3: Selección del tipo, montaje y número de guías lineales en el eje X.

2. Ingreso de datos de las condiciones de trabajo a las que estarán expuestas las guías del eje X.

The screenshot shows a web browser window displaying the THK website. The page title is "Service Life Calculation of LM Guide" (Ver. 2.5en). The page is divided into several sections:

- Navigation Bar:** Includes links for Member information, My Catalog, Site map, Inquiries, Logout, Help, and Home.
- Menu Bar:** Contains buttons for Technical Support, Product information, FAQs, Technical information, Technical calculations, CAD data, and Catalog information.
- Input Velocity Conditions:**
 - Velocity: $V = 0.052$ (m/s)
 - Acceleration time: $T1 = 0.05$ (s)
 - Load factor: $fw = 1.2$
 - Stroke length: $Ls = 400$ (mm)
 - Number of reciprocations per minute: $n = 3$ (min^{-1})
- Velocity-Time Graph:** A trapezoidal graph showing Velocity (m/s) on the y-axis and Time (s) on the x-axis. The graph is divided into three segments: acceleration time ($T1$), constant velocity time (Ls), and deceleration time ($T1$). The total stroke length is indicated as Ls .
- Mounting Orientation:** Wall-mounted application
- Number of Rails and Number of Blocks:** Two axes use in parallel, Two blocks
- Model Number:** SHS15
- Footnote:** *When the mouse pointer is over the categories, quick explanation will be appeared.
- Buttons:** Back, to the next page, and End.

Fig. 3.4: Ingreso de datos de las condiciones de trabajo de las guías lineales en el eje X.

3. Ingreso de datos de cargas y distancias a las que trabajarán las guías del eje X.

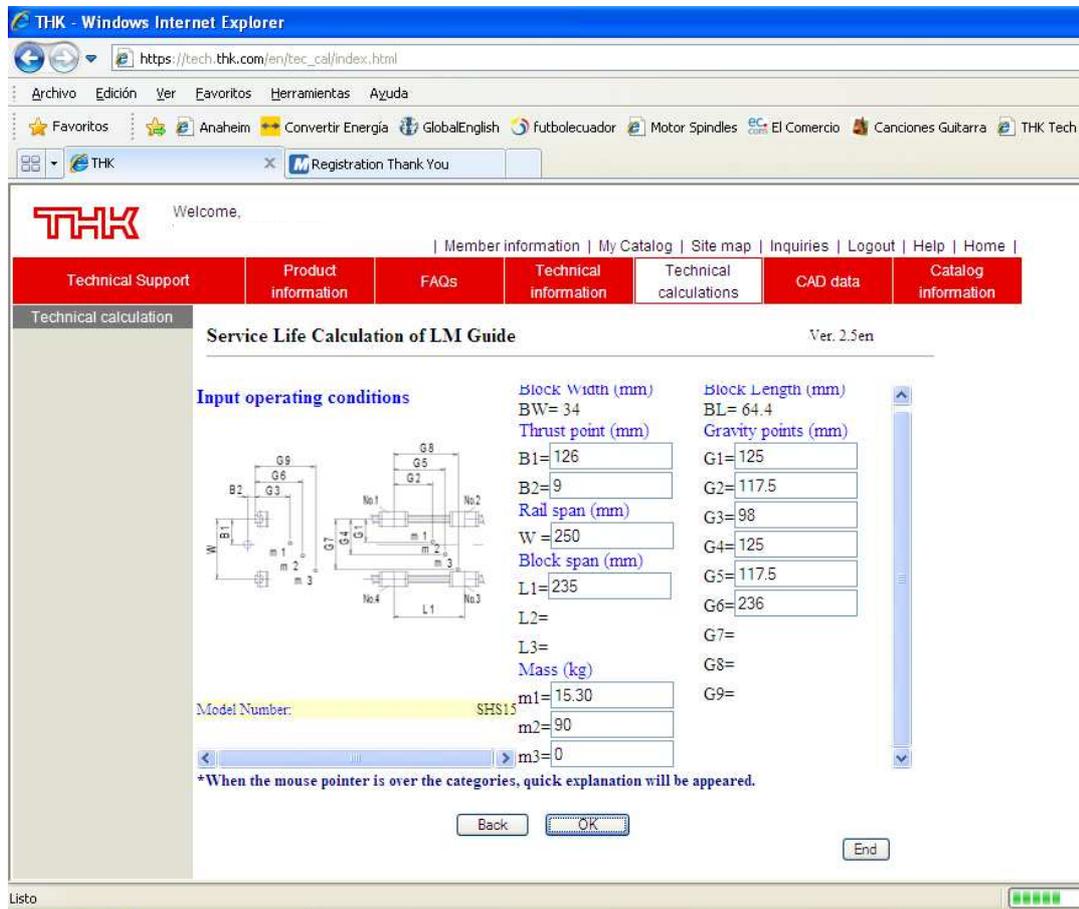


Fig. 3.5: Ingreso de datos de cargas y distancias de trabajo de las guías lineales en el eje X.

Como resultado se obtiene que la vida útil antes de producirse la falla es de 260819 km, valor superior al tomado como parámetro de diseño. La página completa de resultados se encuentra en el anexo B.

3.1.1.2 Cálculo de guía de movimiento lineal del eje Y.

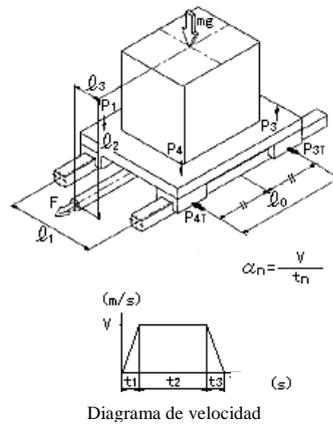


Fig. 3.6: Esquema de montaje del eje Y (tipo horizontal).

Tipo de instalación: Horizontal
 Tipo de movimiento: Aceleración y desaceleración variable.

Condiciones de Operación:

Tiempo requerido de vida útil (km):	75000.
Código de guías seleccionadas:	SHS15
Peso de la mesa de trabajo m_1 (kg):	50.66
Peso del material a maquinar m_2 (kg):	21.58
Carga de taladrado m_3 (kg):	50.13
Velocidad de movimiento de la mesa (m/s):	0.052
Tiempo en conseguir velocidad máxima t_1 (s)	0.05
Distancia entre bloques (sentido axial) W (mm):	500
Distancien entre guías l_1 (mm):	175.6

Los cálculos se ejecutan bajo algoritmos propios del fabricante THK en su página web <https://tech.thk.com/index.html>, de igual manera que el caso anterior y como se muestra a continuación.

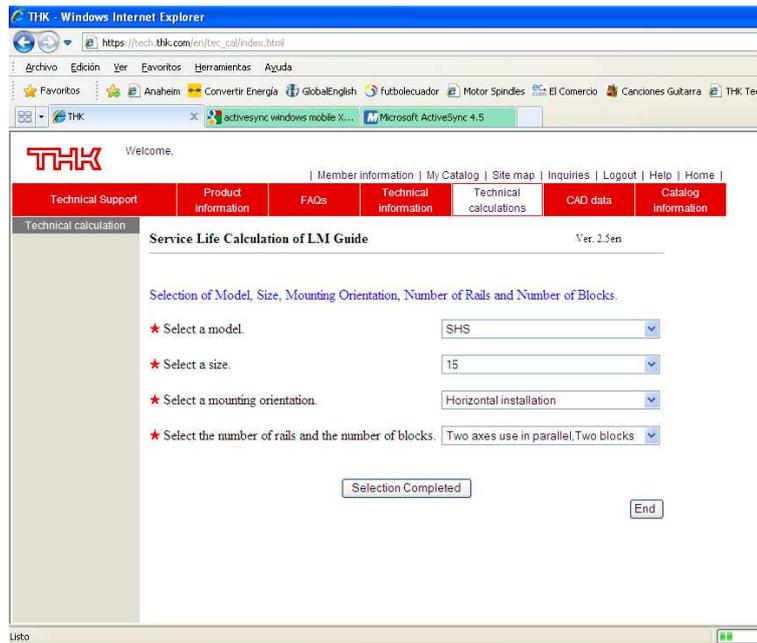


Fig. 3.7: Selección del tipo, montaje y número de guías lineales en el eje Y.

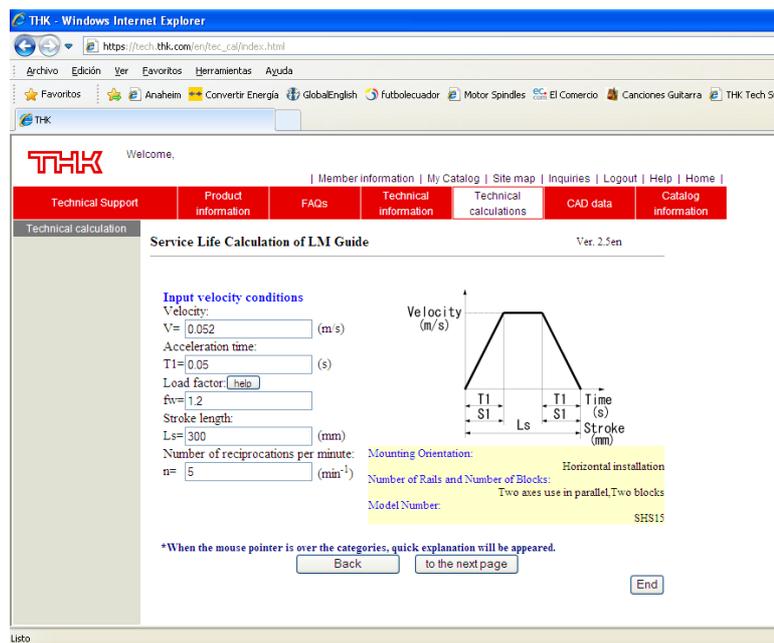


Fig. 3.8: Ingreso de datos de las condiciones de trabajo de las guías lineales en el eje Y.

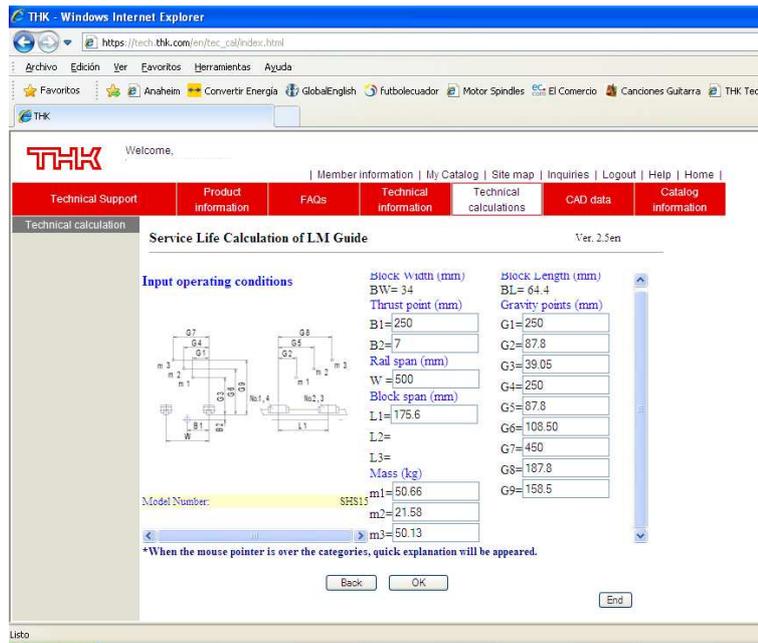


Fig. 3.9: Ingreso de datos de cargas y distancias de trabajo de las guías lineales en el eje Y.

Como resultado se obtiene que la vida útil antes de producirse la falla es de 530530 km, valor superior al tomado como parámetro de diseño. La página completa de resultados se encuentra en el anexo C.

3.1.1.3 Cálculo de guía de movimiento lineal del eje Z.

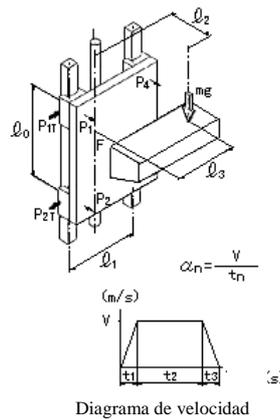


Fig. 3.10: Esquema del montaje del eje Z (tipo vertical)

Tipo de instalación: Vertical
 Tipo de movimiento: Ascenso y descenso.

Condiciones de Operación:

Tiempo requerido de vida útil (km): 70000.
 Código de guías seleccionadas: **SHS15**
 Peso de torre m_1 (kg): 90
 Peso de husillo motorizado m_2 (kg): 21
 Longitud entre guía W (mm): 235.6
 Distancia entre bloques (sentido axial) l_0 (mm): 131.6

Los cálculos se ejecutan bajo algoritmos propios del fabricante THK en su página web <https://tech.thk.com/index.html>, de igual manera que el caso anterior y como se muestra a continuación.

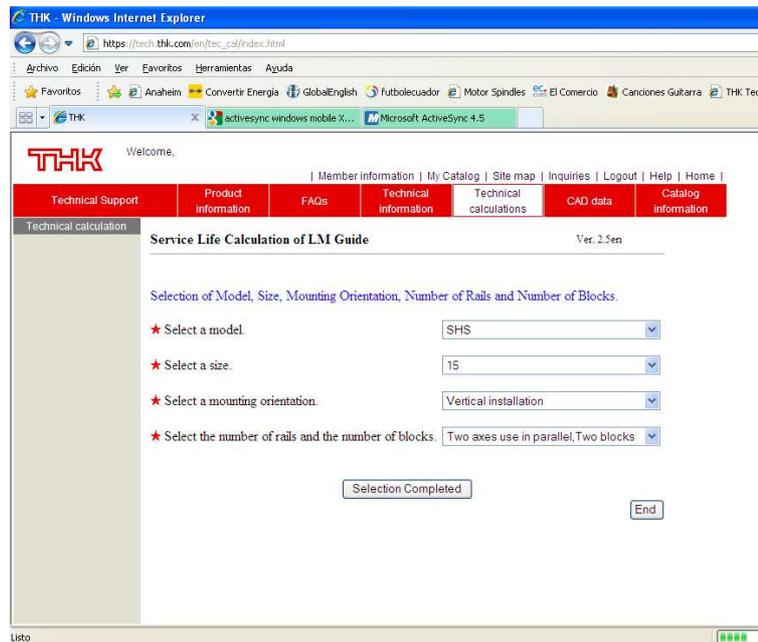


Fig. 3.11: Selección del tipo, montaje y número de guías lineales en el eje Z.

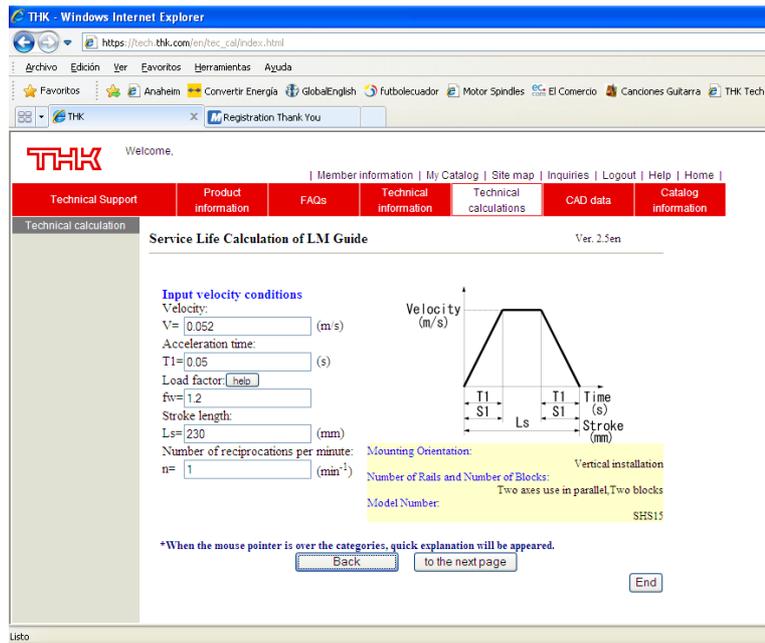


Fig. 3.12: Ingreso de datos de las condiciones de trabajo de las guías lineales en el eje Z.

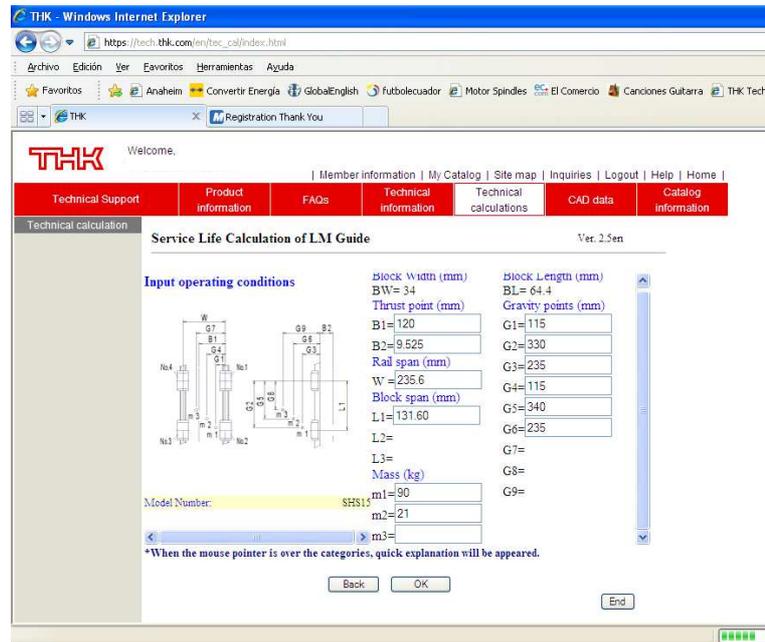


Fig. 3.13: Ingreso de datos de cargas y distancias de trabajo de las guías lineales en el eje Z.

Como resultado se obtiene que la vida útil antes de producirse la falla es de 75346 km, valor superior al tomado como parámetro de diseño. La página completa de resultados se encuentra en el anexo D.

3.1.2 Selección de los husillos roscados con rodamientos de bolas.

La selección de los husillos roscados con rodamiento de bolas considera las cargas que se aplican a cada uno de los ejes de la máquina cuando se encuentra realizando el maquinado y cuando no está ejecutando ningún trabajo. De esta se determina cuál es el husillo que está más exigido y en base a éste se dimensionarán los tres husillos de la máquina.

3.1.2.1 Consideraciones metrológicas para tornillos de bolas

Para el diseño y selección de estos elementos nos basaremos en las recomendaciones y teoría desarrollada por THK®, fabricante de este tipo de elementos de alta precisión. Ver anexo E.

3.1.2.2 Análisis de la precisión del sistema.

Para el tipo de aplicación en estudio, el fabricante recomienda un grado de precisión de C3 y/o C5, según la tabla 3.1, que se muestra a continuación:

Esto es, de acuerdo al fabricante:

Tabla 3.1 Grados de precisión para diferentes tipos de aplicación⁴⁷.

Aplicación		Máquinas Herramientas CNC																		
		Torno		Centro de Maquinado		Fresadora		Punteadora Jigs		Pulidora Plana		Pulidora Cilíndrica		Maq. Descarga Elect.		Punzonadora				
Axial		X	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	X	Z	X	Z	XY	Z	XY	Z	UV	XY	
Grado de Precisión	C0							○	○				○		○		○	○		
	C1	○						○	○		○	○	○	○	○	○	○	○		
	C2	○		○	○					○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	C3	○	○	○	○	○				○	○	○		○		○		○	○	○
	C5	○	○	○	○	○	○			○	○	○				○				○
	C7						○													○
	C8																			
	C10																			

La tolerancia según el proveedor viene dada por la tabla 3.2:

Tabla 3.2 Fluctuación por 300 mm de longitud roscada y por giro del husillo roscado (Tolerancia)⁴⁸.

Unidad: μ m

Grado Precisión	C0	C1	C2	C3	C5	C7	C8	C10
Fluctuación/300	3.5	5	7	8	18	-	-	-
Fluctuación/2 π	3	4	5	6	8	-	-	-

Para el presente diseño se considera suficiente un grado de precisión C3 y se procede a verificar, en la siguiente tabla, los diámetros de los tornillos que fabrica el proveedor en base a las longitudes y el grado de precisión, requeridos para este proyecto.

⁴⁷ Catálogo de productos THK. Ball Screw. Tabla 19. Num. 8.2

⁴⁸ Catálogo de productos THK. Ball Screw. Tabla 3. Num. 4.1

Tabla 3.3 Límite de longitud para tornillos de bolas producidos de acuerdo al grado de precisión del tipo tornillos de bolas de precisión⁴⁹.

Unidad: mm

Diámetro OD	Longitud total del eje-tornillo					
	C0	C1	C2	C3	C5	C7
4	90	110	120	120	120	120
6	150	170	210	210	210	210
8	230	270	340	340	340	340
10	350	400	500	500	500	500
12	440	500	630	680	680	680
14	530	620	770	870	890	890
15	570	670	830	950	980	1100
16	620	730	900	1050	1100	1400
18	720	840	1050	1220	1350	1600
20	820	950	1200	1400	1600	1800
25	1100	1400	1600	1800	2000	2400
28	1300	1600	1900	2100	2350	2700
30	1450	1700	2050	2300	2570	2950
32	1600	1800	2200	2500	2800	3200
36		2100	2550	2950	3250	3650
40		2400	2900	3400	3700	4300
45		2750	3350	3950	4350	5050
50		3100	3800	4500	5000	5800
55	2000	3450	4150	5300	6050	6500
63			5200	5800	6700	7700
70				6450	7650	9000
80		4000	6300	7900	9000	
100				10000	10000	10000

De la tabla anterior, se tiene que los diámetros de los tornillos que son aplicables para la presente diseño son OD = 12 y 14, ya que para éstos, la longitud es de 680 y 870 mm respectivamente, para un grado de precisión C3.

⁴⁹ Catálogo de productos THK. Ball Screw. Tabla 15. Num. 5.1

3.1.2.3 Selección de longitud de los husillos, diámetro exterior y paso

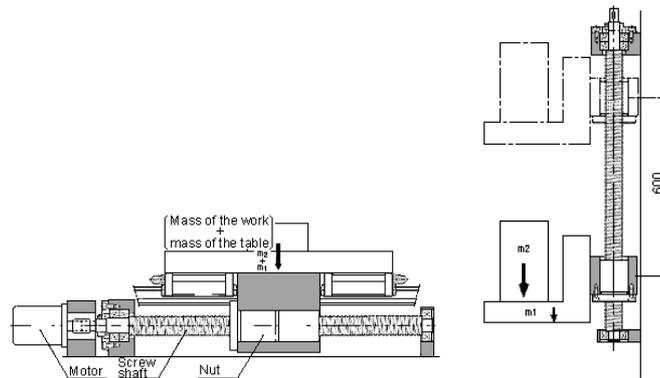


Fig. 3.14: Diagrama de posición de tornillo de bolas en el eje Y y Z

3.1.2.3.1 Definición del paso requerido:

De parámetros de diseño se tiene que la precisión del maquinado es de 0.02 mm, estimando trabajar con motores de paso de 200 [p / rev] comunes en el mercado se tiene que:

$$l = a \times NP \quad (3.1)$$

Donde:	a	avance requerido	[mm]
	NP	número de pasos del motor	[p / rev]
	l	paso del tornillo	[mm/rev]

$$l = 0.02 \times 200$$

$$l = 4 \quad [mm]$$

Con el valor de l en la tabla del fabricante, que se muestra a continuación, se observan las posibles alternativas de diámetro.

Tabla 3.4 Diámetro externo del eje y combinaciones de paso⁵⁰

Diámetro OD	Paso																					
	1	2	4	5	6	8	10	12	15	16	20	24	25	30	32	36	40	50	60	80	90	100
4	●																					
6	●																					
8	●	●						○														
10		●	●				●	○														
12		●		●																		
13											○											
14		●	●	●		●																
15							●			●			○			○						
16			○	●	○		○			●												
18							●															
20			○	●	○	○	●	○		●							○		○			
25			○	●	○	○	●	○		○	●		○					○				
28				○	●	○	○															
30																			○		○	
32			○	●	●	○	●	○			○					○						
36					○	○	●	○		○	○	○				○						
40				○	○	○	●	●		○	○						○			○		
45					○	○	○	○			○											
50				○		○	●	○		○	○							○				○
55							○	○		○	○											
63							○	○		○	○											
70							○	○			○											
80							○	○			○											
100											○											

Nota:

Los productos marcados con un "●" existen en stock (como el ensamble Tornillo de Bolas Estándar con un eje estandarizado disponible en dos tipos: con los terminales del eje terminados o sin terminar)

⁵⁰ Catálogo de productos THK. Ball Screw. Tabla 2. Num. 1.3

El diámetro para los tornillos que cumple con las condiciones de:

- Grado de precisión (C3),
- Fabricación por parte del proveedor de acuerdo a la longitud del tornillo (hasta 870 mm), y
- Paso de 4mm

$$\Rightarrow OD = \text{diámetro exterior} = 14 \text{ [mm]}$$

3.1.2.3.2 Selección del juego Axial

Como parámetro de diseño se tiene que el juego presente en los ejes será de 0.02 mm

Tabla 3.5 Juego en la dirección axial del tornillo de bolas de precisión⁵¹.

Unidad: mm					
Símbolo de Juego	G0	GT	G1	G2	G3
Juego en la dirección axial	hasta 0 (incl.)	0~0.005	0~0.01	0~0.02	0~0.05

De la tabla anterior se tiene que el juego axial para el sistema debe ser máximo G2 (desde 0 hasta 0.02 mm).

Se confirma con la tabla 3.6 la producción de tornillos de bolas por parte del fabricante que cumpla con la longitud y el juego axial requeridos para el equipo en diseño.

⁵¹ Catálogo de productos THK. Ball Screw. Tabla 6. Num. 4.2.1

Tabla 3.6 Límite de longitud de tornillos de bolas producidos vs. Juego axial en varias direcciones para tornillos de bolas de precisión⁵².

Diámetro OD	Longitud roscada del eje-tornillo						
	Juego GT		Juego GT1		Juego GT2		
	C0~C3	C5	C0~C3	C5	C0~C3	C5	C7
4~6	80	100	80	100	80	100	120
8~10	250	200	250	250	250	300	300
12~16	500	400	500	500	700	600	500
18~25	800	700	800	700	1000	1000	1000
28~32	900	800	1100	900	1400	1200	1200
36~45	1000	800	1300	1000	2000	1500	1500
50~70	1200	1000	1600	1300	2500	2000	2000
80~100	-	-	1800	1500	4000	3000	3000

Por lo tanto, para un tornillo de diámetro de 14 mm, con grado de juego axial G2 y con un grado de precisión de C3, su longitud máxima de roscado es de 700 mm, lo cual satisface los requerimientos del presente diseño.

3.1.2.3.3 Métodos de soporte recomendados para el husillo roscado.

Según el fabricante, para las condiciones del presente diseño, los métodos de soporte recomendados son:

- Fijo – Soportado, y
- Fijo – Fijo

Para la minifresadora, según el diseño, el método más adecuado para el montaje es fijo - soportado.

⁵² Catálogo de productos THK. Ball Screw. Tabla 7. Num. 4.2.1

3.1.2.3.4 Selección de la tuerca

Del listado de tuercas proporcionado por el fabricante se pre – selecciona la tuerca BNT – 1404 – 3.6 por ajustarse al eje – tornillo antes definido.

- Características de la Tuerca

$$Carga\ Dinámica = Ca = 6.8\ KN$$

$$Carga\ Estática = C_0a = 12.6\ KN$$

3.1.2.3.5 Cálculo del torque rotacional

De acuerdo al diseño propuesto el mayor torque rotacional en los tornillos de bolas se presenta en el eje Z, ya que éste eje se aplican las mayores cargas de la máquina en diseño.

El torque rotacional requerido para convertir el movimiento rotacional del tornillo de bolas en movimiento lineal viene dado por⁵³:

- Durante la aceleración hacia arriba

$$T_{K1} = T_1 + T_3 \quad (3.2)$$

Donde:

T_{K1}	Torque rotacional requerido durante la aceleración hacia arriba	[N.mm]
T_1	Torque de fricción debido a carga externa durante el movimiento uniforme hacia arriba	[N.mm]
T_3	Torque requerido para la aceleración	[N.mm]

⁵³ Catálogo de productos THK. Ball Screw. Num. 9.1

- **Durante el movimiento uniforme hacia arriba**

$$T_{i1} = T_1 \quad (3.3)$$

- **Durante la desaceleración hacia arriba**

$$T_{g1} = T_1 - T_3 \quad (3.4)$$

- **Durante la aceleración hacia abajo**

$$T_{K2} = T_2 - T_3 \quad (3.5)$$

Donde:

T_2 Torque requerido durante el movimiento uniforme hacia abajo [N.mm]

- **Durante el movimiento uniforme hacia abajo**

$$T_{i2} = T_2 \quad (3.6)$$

- **Durante la desaceleración hacia abajo**

$$T_{g2} = T_2 + T_3 \quad (3.7)$$

Cálculo del torque de fricción debido a una carga externa

Durante el movimiento uniforme hacia arriba

$$T_1 = \frac{F a_2 \cdot \ell}{2\pi \cdot \eta} \cdot A1 \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow T_1 = 489.412 \quad [N \cdot mm]$$

Durante el movimiento uniforme hacia abajo

$$T_2 = \frac{F a_5 \cdot \ell}{2\pi \cdot \eta} \cdot A1 \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow T_2 = 613.914 \quad [N \cdot mm]$$

Para el cálculo del torque de fricción requerido para la aceleración se tiene que:

$$T_3 = J \cdot \omega' \cdot 10^3 \quad (3.10)$$

Donde:

T_3	Torque requerido en la aceleración	[N.mm]
J	Momento de inercia	[Kg m ²]
ω'	Aceleración angular	[rad / s ²]

El momento de inercia vienen dado por:

$$J = (m_1 + m_2) \cdot \left(\frac{\ell}{2\pi} \right)^2 \cdot A^2 \cdot 10^{-6} + J_s \cdot A^2 \quad (3.11)$$

Donde:

J	Momento de inercia	[N.mm]
A	Relación de transmisión = 1	
J_s	Momento de inercia del eje tornillo	[Kg m ²]

Tomando $J_s = 2.96 \times 10^{-4} \text{ kg cm}^2 / \text{mm}$ como dato de proveedor se tiene:

$$\Rightarrow J_s = 2.96 \cdot 10^{-4} \times 675 = 1.99 \times 10^{-5} \quad [kg \cdot m^2]$$

Por lo tanto, resolviendo la ecuación 3.11:

$$\Rightarrow J = 5.646 \times 10^{-5} \quad [kg \cdot m^2]$$

La aceleración angular dada por:

$$\omega' = \frac{2\pi \cdot N}{60 \cdot t_1} \quad (3.12)$$

Donde:

N	Velocidad del motor de paso = 1500	[rpm]
t ₁	Tiempo de aceleración = 0.005	[s]

$$\omega' = 3142 \quad [rad/s^2]$$

Por lo tanto el torque requerido para la aceleración, ecuación 3.10 es:

$$\Rightarrow T_3 = 177.361 \quad [N \cdot mm]$$

Así entonces, se tiene los siguientes resultados:

- Torque requerido durante la aceleración hacia arriba, ecuación 3.2 es:

$$\Rightarrow T_{k1} = 666.77 \quad [N \cdot mm]$$

- Torque requerido durante el movimiento uniforme hacia arriba, ecuación 3.3 es:

$$\Rightarrow T_{t1} = 489.412 \quad [N \cdot mm]$$

- Torque requerido durante la desaceleración hacia arriba, ecuación 3.4 es:

$$\Rightarrow T_{g1} = 312.051 \quad [N \cdot mm]$$

- Torque requerido durante la aceleración hacia abajo, ecuación 3.5 es:

$$\Rightarrow T_{k2} = 436.553 \quad [N \cdot mm]$$

- Torque requerido durante el movimiento uniforme hacia abajo, ecuación 3.6 es:

$$\Rightarrow T_{t2} = 613.914 \quad [N \cdot mm]$$

- Torque requerido durante la desaceleración hacia abajo, ecuación 3.7 es:

$$\Rightarrow T_{g2} = 791.274 \quad [N \cdot mm]$$

Por lo tanto, el mayor torque obtenido en el eje Z, que es el eje en el que actúan las cargas y esfuerzos mayores, se presenta en la desaceleración hacia abajo con un valor de 791.274 N.mm. Este valor servirá más adelante para la selección del motor que proporcionará el movimiento al eje.

3.1.2.3.6 Cálculo de la vida útil de los husillos roscados con rodamientos de bolas.

Como parámetro de diseño para el presente proyecto se tiene que la vida útil de los husillos roscados no puede ser inferior a los 75000 km.

Para verificar si se cumple con el parámetro de diseño, los cálculos se ejecutan bajo algoritmos propios del fabricante THK en su página web <https://tech.thk.com/index.html>, como se muestra a continuación.

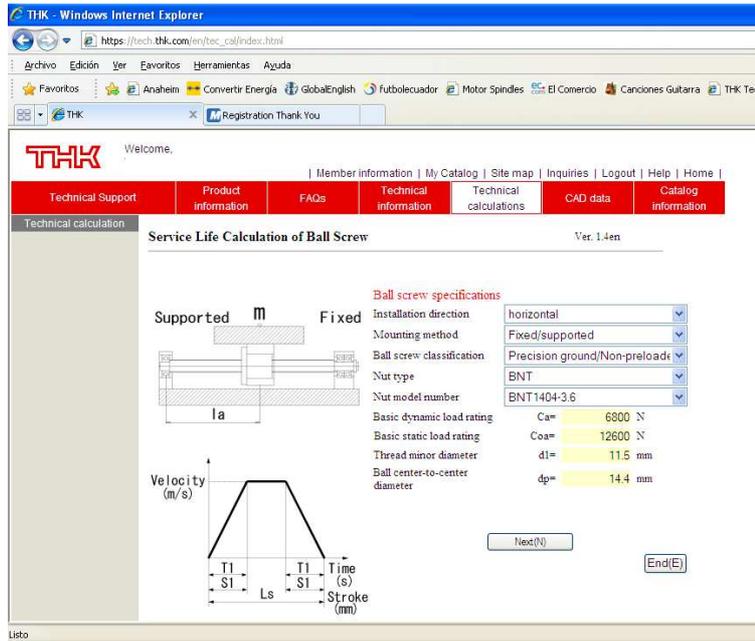


Fig. 3.15: Ingreso de datos de montaje del eje Y.

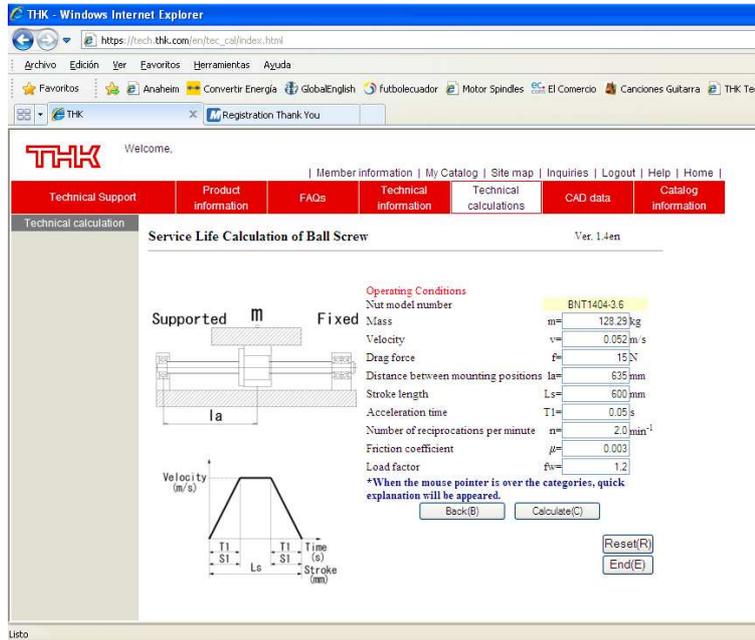


Fig. 3.16: Ingreso de condiciones de trabajo del eje Y.

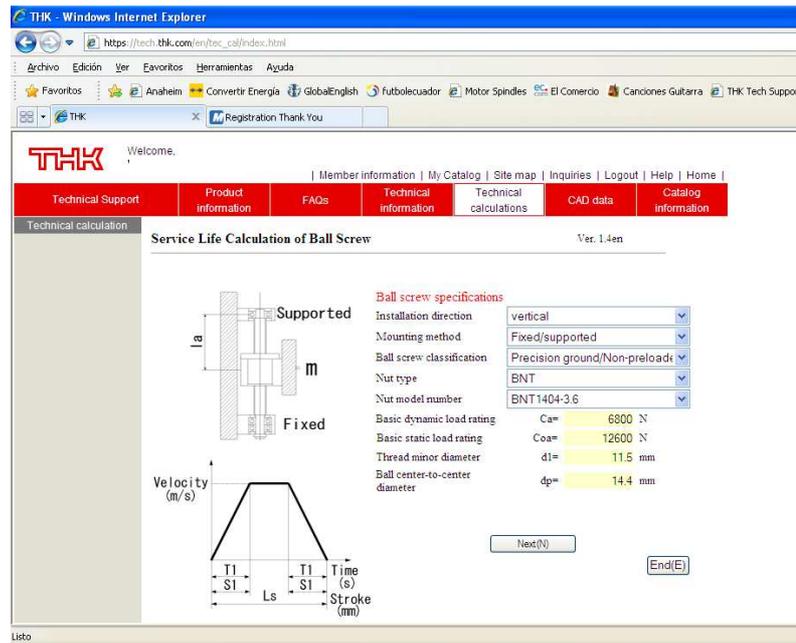


Fig. 3.17: Ingreso de datos de montaje del eje Z.

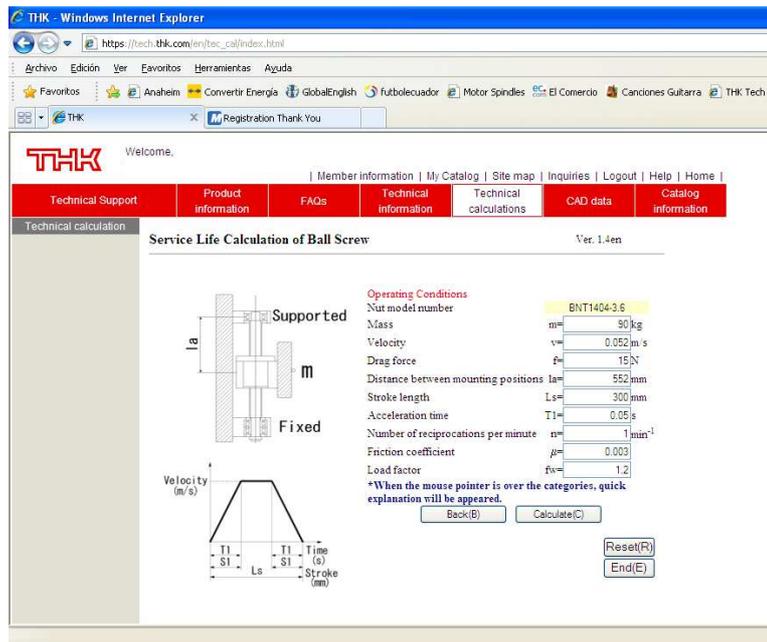


Fig. 3.18: Ingreso de condiciones de trabajo del eje Z.

Los resultados obtenidos indican que la vida útil del husillo roscado del eje Y es de 83'200.000 km mientras que el del eje Z es de 105.000 km, cumpliendo

así con los requerimientos del proyecto. Las hojas con los resultados generados por el proveedor se encuentran en los anexos F y G.

3.1.3 Selección de acoples para transmisión de potencia: motores de paso – tornillo de bolas

Utilizando el procedimiento de selección de acuerdo a catálogo 1090 Martin Sproket & Gear Inc. Ver anexo H, y de acuerdo a las características de alta precisión de la máquina herramienta, se selecciona acoples de mordaza flexible ya que tienen las siguientes características:

- No necesitan lubricación
- Fácil instalación
- No existe contacto metal a metal
- Resistentes al aceite, polvo, arena, humedad y grasa
- Fácil inspección de carga en el elemento para levantar cargas
- La flexibilidad en la desalineación angular o paralela de los ejes mediante elemento Buna-N que permite una suave Transmisión de Potencia

El acople seleccionado es: **ML050** con el elemento **Buna – N SRL050**

3.1.4 Cálculo de resistencia de soldadura

Para el cálculo de la soldadura se considera el método que trata a la soldadura como una línea sin espesor.

El tipo de soldadura a realizar corresponde a doble cordones vertical, de acuerdo a gráfico mostrado a continuación.

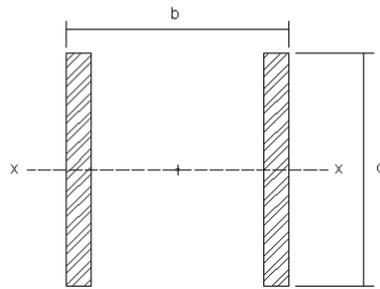


Fig. 3.19: Tipo y dimensiones de soldadura

Para este caso se ha tomado como caso crítico en el diseño la soldadura que sujeta la platina de soporte de mesa de movimiento en la dirección X.

Las fuerzas a la que se encuentra sometido el cordón de soldadura son:

- Fuerza de corte, F_c
- Fuerza debido a flexión F_f , y,
- Fuerza debido a torsión F_t .

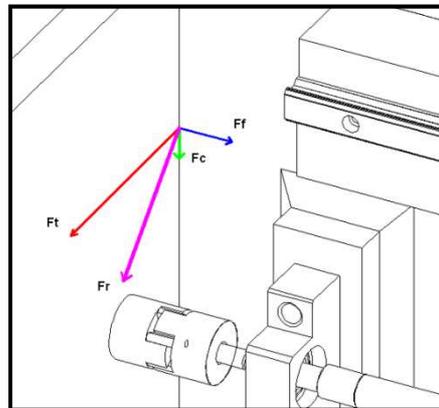


Fig. 3.20: Fuerzas en un punto de soldadura

3.1.4.1 Cálculo de la fuerza de corte f_c ⁵⁴

$$f_c = \frac{V}{A_w} \quad (3.13)$$

⁵⁴ Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da. Ed. Pág.: 771.

Donde	f_c	Fuerza de corte [lb / plg]
	V	Carga aplicada 200 [lb]
	A_w	Longitud de la soldadura ³⁸ [plg]
	d	Distancia entre cordones de soldadura 3 [plg]

$$A_w := 2 \cdot d$$

$$A_w = 6 \text{ in} \tag{3.14}$$

Reemplazando estos valores en ecuación 3.13] se tiene:

$$F_c = 33.33 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

3.1.4.2 Cálculo de la fuerza de flexión f_f ⁵⁴

Esta dada por la ecuación:

$$F_f := \frac{M}{Z_w} \tag{3.15}$$

Donde	M	Momento generado por la fuerza aplicada	[lb plg]
	d	Distancia entre cordones de soldadura 3	[plg]
	Z_w	Factor de soldadura	[plg ²]
	P	Carga aplicada 200	[lb]
	a	Distancia desde soldadura a carga aplicada 13.78	[plg]

$$Z_w := \frac{d^2}{3} \tag{3.16}$$

$$Z_w = 3 \text{ in}^2$$

$$M := P \cdot a \tag{3.17}$$

$$M = 2756 \text{ lb}\cdot\text{in}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 3.15 se tiene:

$$F_f = 918.67 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

3.1.4.3 Cálculo de la fuerza debido a torsión⁵⁴

Esta dada por la ecuación:

$$F_t := \frac{(T1 \cdot C1)}{J_w} \quad (3.18)$$

Donde	T1	Torsión debido a fuerza aplicada	[lb plg]
	C1	Distancia entre centroide hasta cordones de soldadura	[plg]
	J _w	Momento de inercia en soldadura	[plg ²]

$$T1 := P \cdot (r + xm) \quad (3.19)$$

Donde	r	Distancia de soldadura a carga aplicada 11.22	[plg]
	xm	Distancia de centroide de soldadura 1.5	[plg]
	P	Carga aplicada 200	[lb]

Reemplazando estos valores en ecuación 3.19 se tiene:

$$T1 = 2544 \text{ lb}\cdot\text{in}$$

$$C1 := \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (3.20)$$

Donde	d	Distancia entre cordones de soldadura 3	[plg]
	b	Distancia entre cordones de soldadura 0.75	[plg]

Reemplazando estos valores en ecuación 3.20 se tiene:

$$C1 = 1.546 \text{ in}$$

$$J_w := \frac{[d \cdot (3 \cdot b^2 + d^2)]}{6} \quad (3.21)$$

$$J_w = 0.088 L$$

Reemplazando estos valores en ecuación 3.18 se tiene:

$$F_t = 736.08 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

3.1.4.4 Cálculo de fuerza total aplicada sobre la soldadura⁵⁴.

La fuerza total F_r que se ejerce sobre la soldadura está dada por la suma vectorial de sus componentes, por lo tanto la fuerza resultante total será:

$$F_r := \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_t^2} \quad (3.22)$$

Reemplazando los valores en ecuación 3.22 se tiene que la fuerza resultante es:

$$F_r = 1177.66 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

Considerando el electrodo E60 y material a soldar acero estructural A36 de $\frac{3}{4}$ plg (19.05 mm) de espesor y utilizado la fuerza máxima permisible por pulgada de lado, se obtiene el ancho de la soldadura.

$$W_s := \frac{F_r}{F_p} \quad (3.23)$$

Donde F_p Fuerza permisible por pulgada de lado 9600^{55} [lb / plg]
 W dimensión de garganta de soldadura
 F_r Fuerza total aplicada sobre soldadura [lb / plg]

Reemplazando los valores en ecuación 3.23 se tiene:

$$W_s = 0.123$$

Considerando tamaño mínimo de soldadura para placas de gran espesor, se tiene para placa de $\frac{3}{4}$ plg un ancho de cordón de soldadura de $\frac{1}{4}$ plg, valor mayor al requerido por la carga aplicada⁵⁶.

Por lo cual W de $\frac{1}{4}$ plg cumple con requerimiento de carga aplicada.

3.2 DISEÑO ELÉCTRICO

3.2.1 Selección del husillo motorizado

De acuerdo a cálculos realizados en capítulo dos, se requiere un husillo motorizado para accionamiento de la herramienta principal, el mismo que debe cubrir con los requerimientos de potencia de fresado y taladrado siguientes:

	Fresado	Taladrado
Potencia	1.14 hp	1.86 hp
No. de Revoluciones	11140 rpm	4800 rpm

La potencia del motor requerido para la mini fresadora está dada por la ecuación:

⁵⁵ Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da. Ed. Pág.: 769.

⁵⁶ Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da. Ed. Pág.: 771.

$$Potencia_{motor} = \frac{Potencia_{maquina}}{\eta} \quad (3.24)$$

Donde:

$$Potencia_{máquina} = Potencia_{taladrado} = 1.86 \text{ [hp]}$$

$$\eta = 0.8$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 3.24, se tiene:

$$\Rightarrow Potencia_{motor} = 2.32 \text{ [hp]} \approx 2.5 \text{ [hp]}$$

Considerando catálogo de husillos motorizados IBAG, se selecciona el husillo motorizado **HF 100 A 30/24 (220V)**, que cumple con las condiciones indicadas y que tiene las siguientes características:

Torque Pico:	6.3 kW (8.45 hp)
Velocidad Máxima:	30000 rpm
Voltaje:	220 VAC
Frecuencia Máxima:	500 Hz
Corriente Max. del Motor:	17.6 A
Sistema de Herramienta:	SKI25 / HSK-E32. Ver anexo I.

Por recomendación de fabricante de husillo motorizado, éste debe tener un sistema de refrigeración con agua, con una capacidad de 800 W. El sistema de refrigeración corresponde al código **KCH0800/990W** y tiene las siguientes características:

Potencia nominal	990 W
Bomba tipo	LDY 2851.0073
Capacidad de Almac. Agua	18 L
Voltaje	1x220 V / 50-60 Hz

Amperaje Max	5.6 A
Peso Aproximado	15 Kg
Tipo de Termistor:	PTC (Pre setting)

Las especificaciones y características del husillo motorizado y sistema de refrigeración seleccionados se detallan en el anexo J.

3.2.2 Selección de los motores de paso

De acuerdo a los cálculos realizados en el presente capítulo, el mayor torque requerido es de 791.27 N.mm correspondiente al torque requerido durante la desaceleración hacia abajo del tornillo del eje Z.

Por lo tanto, el torque requerido en el motor viene dado por:

$$T_{motor} = \frac{T_{g2}}{\eta} = \frac{791.27}{0.9} = 879.19 \text{ [N} \cdot \text{mm]} = 124.44 \text{ [onz} \cdot \text{plg]}$$

Donde:

$$\eta = \text{eficiencia del motor de pasos} = 0.9$$

Considerando el catalogo de productos del fabricante de motores de paso Anaheim Automation, se selecciona el motor de paso estándar con código **34D207** que tiene las siguientes características:

Torque:	210 onz.plg
Número de pasos:	200 pasos por revolución
Precisión:	± 5 % de un paso
Voltaje:	3,5 V/ fase
Resistencia:	1 ohm / fase
Corriente:	3,5 Amp / fase
Diámetro eje:	3 / 8 (0,375) plg

Las especificaciones y características de los motores de paso seleccionados se detallan en el anexo K.

3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de la mini fresadora está dividido en las partes siguientes:

- Controlador de husillo motorizado,
- Controlador de posición y avance de los motores de paso, que a su vez transmiten movimiento a los mecanismos de los ejes X, Y y Z.
- Control General de operación.

El diagrama de control se especifica en anexo L.

3.3.1 Control de Husillo Motorizado.

Considerando las características del husillo motorizado HF 100 A 30/24 (220V) se selecciona el Altivar (variador de frecuencia) **ATV31HU40M3X** con las siguientes características:

Frecuencia de salida	0 – 50 Hz
Rango de velocidades	1 a 50
Grado de protección	IP21
Entradas analógicas	3 EA configurables
Entradas lógicas	6 EL programables
Salidas analógicas	1 de corriente / 1 de tensión
Salidas de relé	2 Salidas de relé

Para garantizar el funcionamiento adecuado dentro de los rangos de temperatura de operación del husillo motorizado se ha considerado adicionalmente un sensor de flujo FS6-1 y un contactor LC1-D12BD. La

información técnica completa del variador y los dispositivos indicados se encuentran en el anexo M.

3.3.2 Control de posición y avance de motores de paso – Ejes X, Y y Z.

Considerando el catálogo de productos del fabricante de motores de paso Anaheim Automation, se selecciona el controlador de los motores de paso con código **DPJ72LC3** que tiene las siguientes características:

- Controlador para 3 o 4 ejes
- Contiene controlador DBL72LC3
- Contiene fuente de poder integrada de 600 W
- Interpolación lineal y circular 3 ejes.
- Código “G” y código “M”
- Opera bajo Sistema operativo Windows 3.1, 95, 98 y XP.
- Menú desplegable y pantallas gráficas.
- Control en tiempo real vía Mouse y teclado.
- Interfaz de reconocimiento de archivos DXF.
- Cortes tridimensionales de partes en código industrial G.
- Controlado de paradas de emergencia mediante Software.
- Control de posicionamiento de fácil programación.
- Verificador automático del programa.
- 8 entradas y 8 salidas manuales.
- Control gráfico y vista preliminar.

Para el control de desplazamiento de las mesas X e Y, y la torre porta herramienta Z, se han seleccionado sensores de proximidad inductivos, marca Telemecanique con código **XS612B1MAL2**. La información correspondiente a este controlador y los sensores de proximidad se encuentra en el anexo N.

3.3.3 Control general de operación

Para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina y evitar cualquier posible daño por su mala operación se seleccionan los siguientes dispositivos de control.

Relé programable Telemecanique	SR3B261BD
Módulo de expansión Telemecanique	SR3XT141BD
Botonera de parada de emergencia Telemecanique	XB4-BS542.
Luces piloto Telemecanique	XB4-BV64.
Relé Auxiliar de 24V Telemecanique	RUM-C3AB1BD
Supervisor de tensión Telemecanique	RM4-TR31
Fuente de Poder Telemecanique	ABL7RE2403
Conector (Socket) Telemecanique	RUZ-C3M
Fusibles	

Las especificaciones y características de los elementos seleccionados se detallan en anexo O.

El software de programación y simulación del controlador (Zelio) se adjunta en anexo P, al igual que la programación lógica (diagrama de Ladder) elaborada para el control de mini fresadora se adjunta en anexo Q.

3.3.4 Bombeo del fluido de corte

En el presente proyecto se ha contemplado la instalación de una pequeña bomba y sus accesorios correspondientes para el almacenamiento, recirculación y salida del fluido de corte. La información de estos equipos se encuentra en el anexo R.

CAPITULO IV

SIMULACIÓN, DIAGRAMAS DE ELABORACION Y MONTAJE

4.1 PLAN DE CONSTRUCCIÓN MECÁNICA.

Para fabricar los diferentes elementos de la fresadora propuesta se debe utilizar un taller que cuente con las siguientes herramientas, máquinas herramientas e instrumentos de metrología.

- Equipo de oxicorte (mecánico).
- Fresadora vertical.
- Rectificadora.
- Taladro de pedestal.
- Suelda eléctrica.
- Equipo de pintura: Compresor, mangueras, reservorio de pintura, pistola de aplicación con aspersor para esmaltes.
- Herramientas manuales: Juego de llaves, martillo, punto, rayador, juego de machuelos métricos, etc.
- Instrumentos de metrología: pie de rey, reloj comparador, regla de ingeniero, escuadra, etc.
- Equipos de ajuste: Limatones, limas.
- Mesa de trabajo y entenalla.
- Varios: Lijas, elementos de limpieza, alcohol izo propílico.

Considerando que las piezas se van a fabricar por primera vez el número de horas destinadas a la fabricación de las mismas aproximadamente serán:

- 5.85 Horas de Trazado / Rayado
- 4.70 Horas de Oxicorte.
- 14.20 Horas de Fresadora.
- 5.85 Horas de Rectificadora.

- 9.45 Horas de Taladrado.
- 10.85 Horas de Suelda eléctrica.
- 8.30 Horas de Roscado / Machuelado.

Para la elaboración del plan de construcción se ha dividido a la máquina en 4 partes principales, de acuerdo al plan de montaje:

- Bastidor.
- Mesa de trabajo
- Mesa de movimiento horizontal
- Torre porta herramienta.

La materia prima seleccionada para el bastidor y torre porta herramienta está catalogada como un acero suave, con la finalidad de facilitar el proceso de oxicorte.

Una vez adquiridos todos los componentes y transportados al taller se pondrá en ejecución los diagramas de proceso de cada uno de los componentes, indicados a continuación.

4.1.1 Diagramas de proceso

Diagramas de proceso de fabricación de bastidor:

Diagramas de proceso de fabricación de Mesa de trabajo:

Diagramas de proceso de fabricación de Mesa de Movimiento horizontal

Diagramas de proceso de fabricación de Torre porta herramienta:

4.2 PLAN DE ARMADO ELÉCTRICO

Para el armado eléctrico se debe considerar dos etapas, la primera corresponde al ensamble del tablero de control y la segunda a las conexiones de tablero de control con elementos a controlar y sensores externos. Los pasos para el correcto ensamblaje y conexiones se describe en el plan de montaje eléctrico.

Los respectivos diagramas de potencia y eléctricos se adjuntan en el anexo S.

4.3 PLAN DE MONTAJE MECÁNICO

Una vez fabricados y adquiridos los componentes del equipo, se procede con el montaje, para lo cual es necesario el uso de las siguientes herramientas e instrumentos de metrología:

- Martillo de goma, Juego de destornilladores, Juego de llaves de corona, Juego de llaves de copa, Comparador de reloj, Soporte magnético para reloj comparador, Soporte de riel en H para reloj comparador.

Para la elaboración del diagrama de montaje, se considera al bastidor, mesa de trabajo, mesa de movimiento horizontal y torre porta herramienta, partes fundamentales o sub-ensambles que al juntarse mediante procesos de comprobación metrológica conformarán la máquina. El tiempo estimado para el montaje es:

- 10.91 Horas de montaje manual.
- 13.50 Horas de comprobación metrológica.

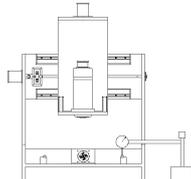
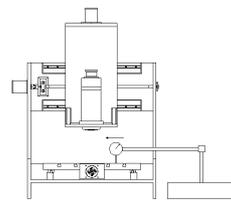
Una vez elaboradas las partes que conforman la máquina se procederá con el montaje de sus componentes de acuerdo a diagrama de montaje de la continuación indicado:

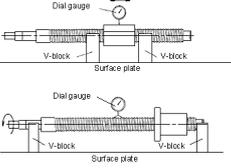
Como parte de las operaciones manuales de montaje se consideran:

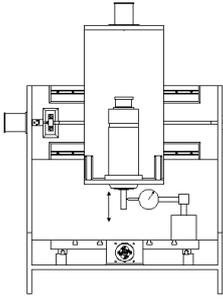
Operación:	Descripción de Operación
Operación A:	Ensamble con Pernos Ajuste de pernos
Operación B:	Ensamble manual
Operación D:	Montaje de Acople Ajuste prisionero de acople

Dentro de las operaciones de montaje se ha definido un conjunto de operaciones básicas de medición o comprobación metrológica, las que muestran a continuación.

Tabla 4.1: Operaciones metrológicas recomendadas para montaje

Operación:	Prueba a efectuar	Norma Referencia
Operación C: 	Comprobación de planitud y paralelismo sobre guías de movimiento lineal	Fabricante THK DIN 876 DIN 8615
	Instrumentos recomendados:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Comprador reloj 0.001 mm 2. Soporte magnético
Operación D: 	Comprobación de nivelación y planitud de mesa de trabajo	DIN 876 DIN 8615
	Instrumentos recomendados:	<ol style="list-style-type: none"> 1. Comprador reloj 0.001 mm 2. Soporte magnético 3. Nivel de burbuja

Operación B1: 	Comprobación de concentricidad y perpendicularidad de tornillo de bolas (eje, tuerca y tornillo)	Fabricante THK DIN 8615
	Instrumentos recomendados:	1. Comprador reloj 0.001 mm 2. Soporte magnético

Operación F: 	Comprobación de perpendicularidad entre mesa de trabajo y herramienta.	DIN 875 DIN 8615
	Instrumentos recomendados:	1. Comprador reloj 0.001 mm 2. Soporte magnético

4.4 PLAN DE MONTAJE ELÉCTRICO

Para montaje eléctrico de la mini fresadora es necesaria la utilización de las siguientes herramientas e instrumentos:

- Multímetro digital, Cautín, Huevo de destornilladores
- Guates de goma (aislantes), Cinta aislante

Para el armado eléctrico se han considerado dos etapas, la primera de ensamble de tablero y la segunda de conexiones de tablero con periféricos con tiempos estimados de:

- 5.5 Horas de ensamble panel de control
- 1.57 Horas de conexiones con periféricos.

El diagrama se muestran a continuación:

4.5 Elaboración de modelo

El modelo ha sido elaborado en Solid Works, programa informático especializado en diseño mecánico que permite realizar diseño de elementos, ensambles, simulación de movimiento, análisis de esfuerzos entre otros.

La Mini fresadora se encuentra elaborada como un ensamble, en donde se puede observar como sub ensambles principales al bastidor, mesa de trabajo, mesa de movimiento en eje X y torre porta herramienta.

Todos los elementos, sub ensambles y la mini fresadora se encuentran adjuntos en carpeta “partes” dentro de anexo T.

4.6 Simulación del modelo propuesto

En elaboración de simulación se ha elaborado 4 videos, los mismos que corresponden a:

- Movimiento mesa Eje X
- Movimiento mesa Eje Y
- Movimiento torre porta herramienta Eje Z
- Movimiento 3 ejes.

Los archivos respectivos se encuentran en el anexo U.

4.7 Análisis de esfuerzos y deformaciones en base a Simulación

Para realizar el análisis de esfuerzo y deformaciones se han calculado las fuerzas de corte en dos instancias, durante el fresado y durante el taladrado. Los valores de las mismas se manifiestan en la tabla siguiente:

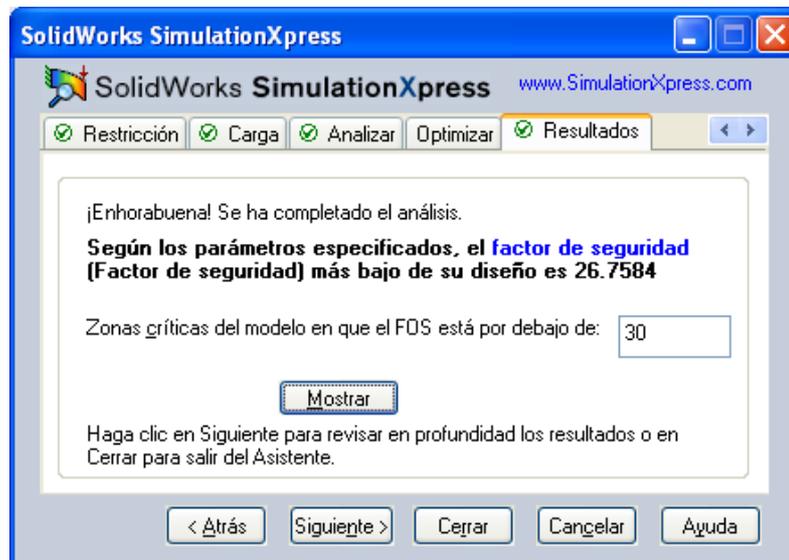
Tabla 4.2: Fuerzas consideradas para simulación

	Magnitud (N)
Fuerza de Corte de fresado (Ft)	147
Fuerza de corte en Taladrado	531

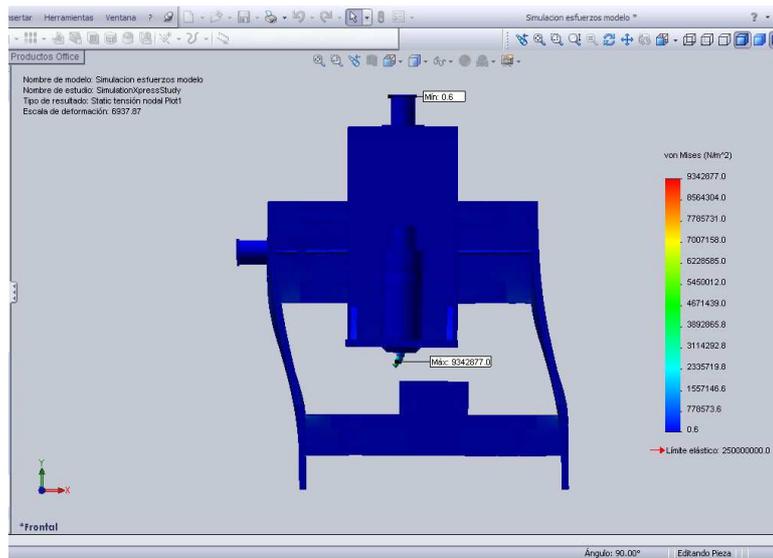
El cálculo de estos valores se detalla en anexo V.

4.7.1 Análisis de esfuerzo y deformación debido a la carga de fresado

A continuación se presentan los resultados debido a la carga de fresado:

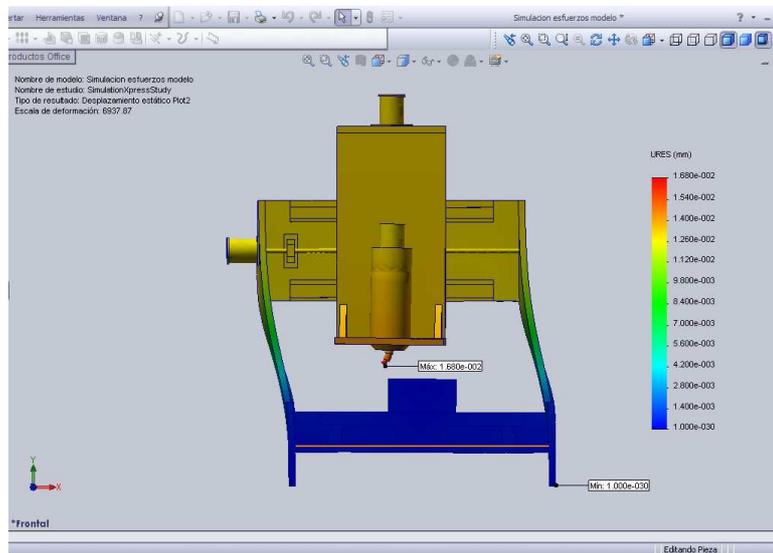


El factor de seguridad obtenido del modelo es de 26.75



Como resultados de análisis de esfuerzos de Von Mises se obtiene que el esfuerzo máximo es de 9.34 MPa.

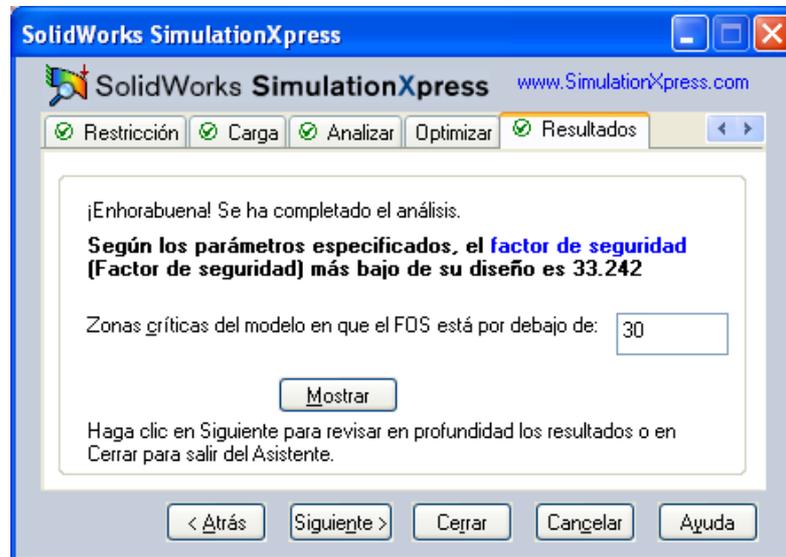
De esta manera, el esfuerzo máximo es menor al S_y del material seleccionado, que es de 248 MPa. Es decir, $\sigma < S_y$ por lo cual no se produce una falla debido a esfuerzos.



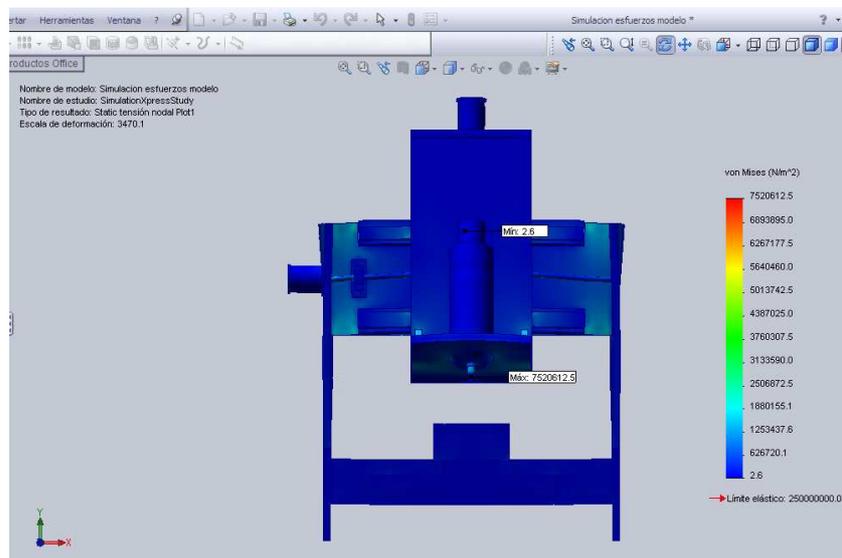
El análisis de deformación por esfuerzo determina que la deformación máxima del modelo es de $1,68 \times 10^{-2}$ mm.

4.7.2 Análisis de esfuerzo y deformación debido a carga de taladrado

A continuación se presentan los resultados debido a la carga de taladrado:

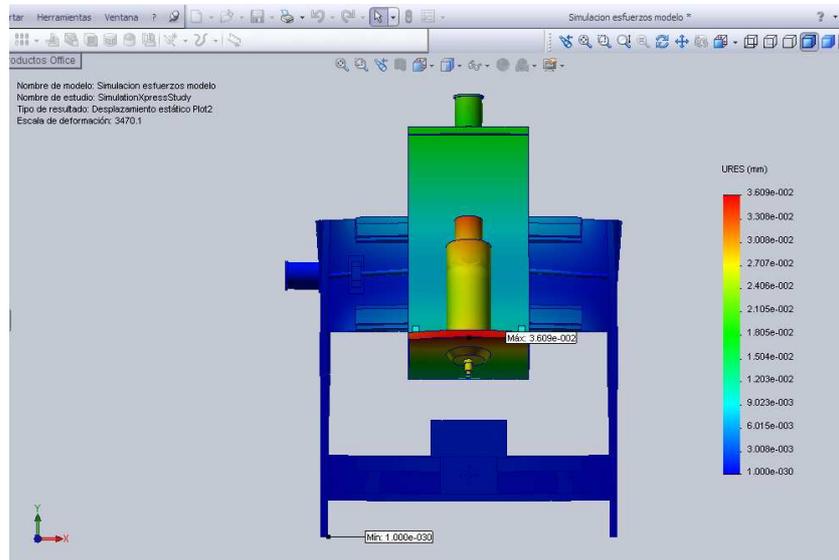


El factor de seguridad del modelo es de 33.242



Como resultados de análisis de esfuerzos de Von Mises se obtiene que el esfuerzo máximo es de 7.53 MPa.

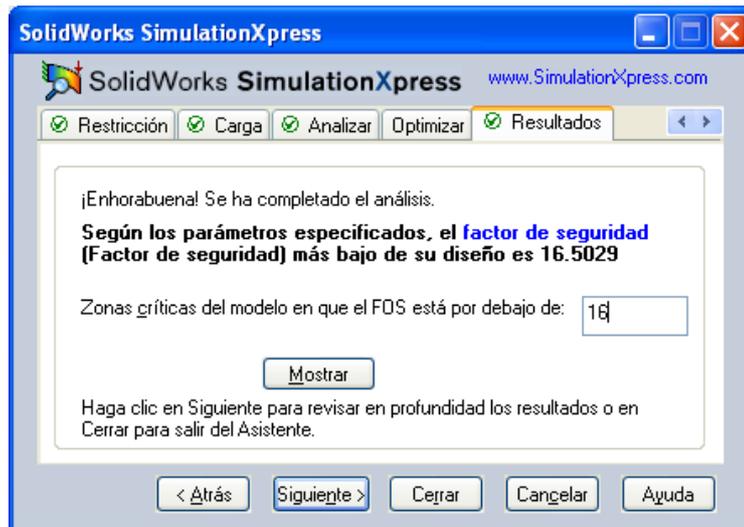
De esta manera, el esfuerzo máximo es menor al S_y del material seleccionado, que es de 248 MPa. Es decir, $\sigma < S_y$ por lo cual no se produce una falla debido a esfuerzos.



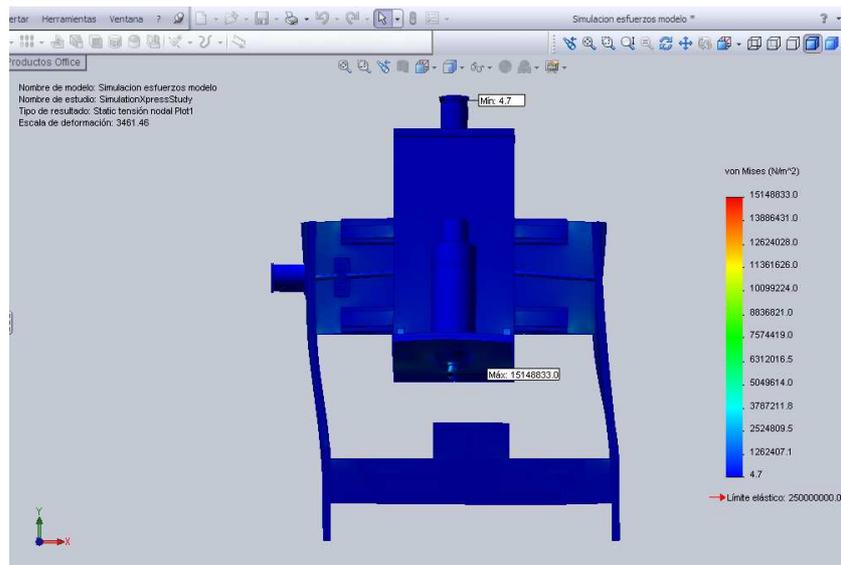
El análisis de deformación por esfuerzo determina que la deformación máxima del modelo es de $3,61 \times 10^{-2}$ mm.

4.7.3 Análisis de esfuerzo y deformación debido a las cargas de taladrado y fresado combinadas

A continuación se presentan los resultados debido a las cargas de taladrado y fresado combinadas:

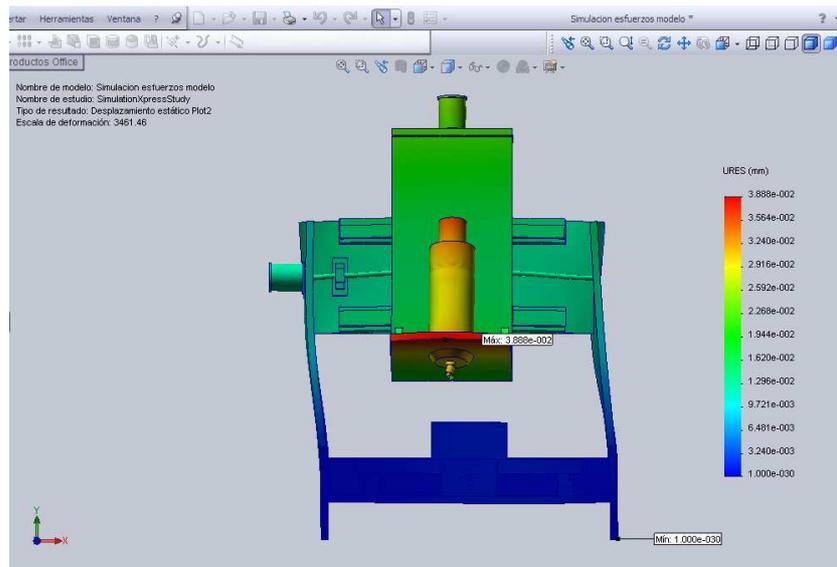


El factor de seguridad del modelo es de 16.5029



Como resultados de análisis de esfuerzos de Von Mises se obtiene que el esfuerzo máximo es de 15.14 MPa.

De esta manera, el esfuerzo máximo es menor al S_y del material seleccionado, que es de 248 MPa. Es decir, $\sigma < S_y$ por lo cual no se produce una falla debido a esfuerzos.



El análisis de deformación por esfuerzo determina que la deformación máxima del modelo es de $3,88 \times 10^{-2}$ mm.

4.8 Simulación del sistema de control y movimiento.

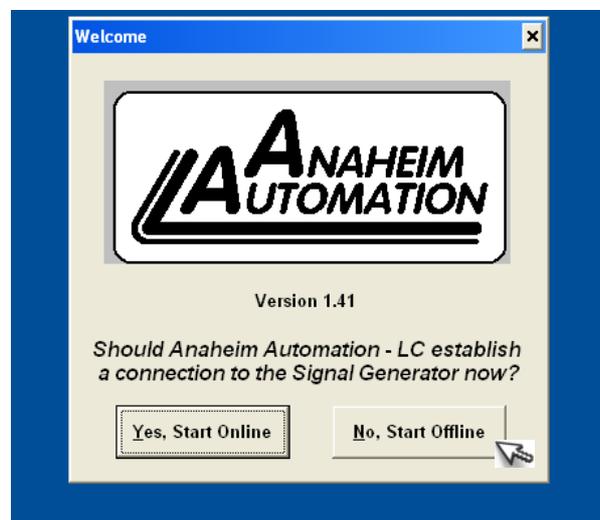
De acuerdo a lo establecido en los capítulos anteriores, se utilizará el software Anaheim Automation – LC, versión 1.41 que, conjuntamente con el driver DPJ72LC3, controlarán los motores de paso de la máquina. El manual de usuario y el programa se encuentran en el anexo W.

4.8.1 Inicio del programa

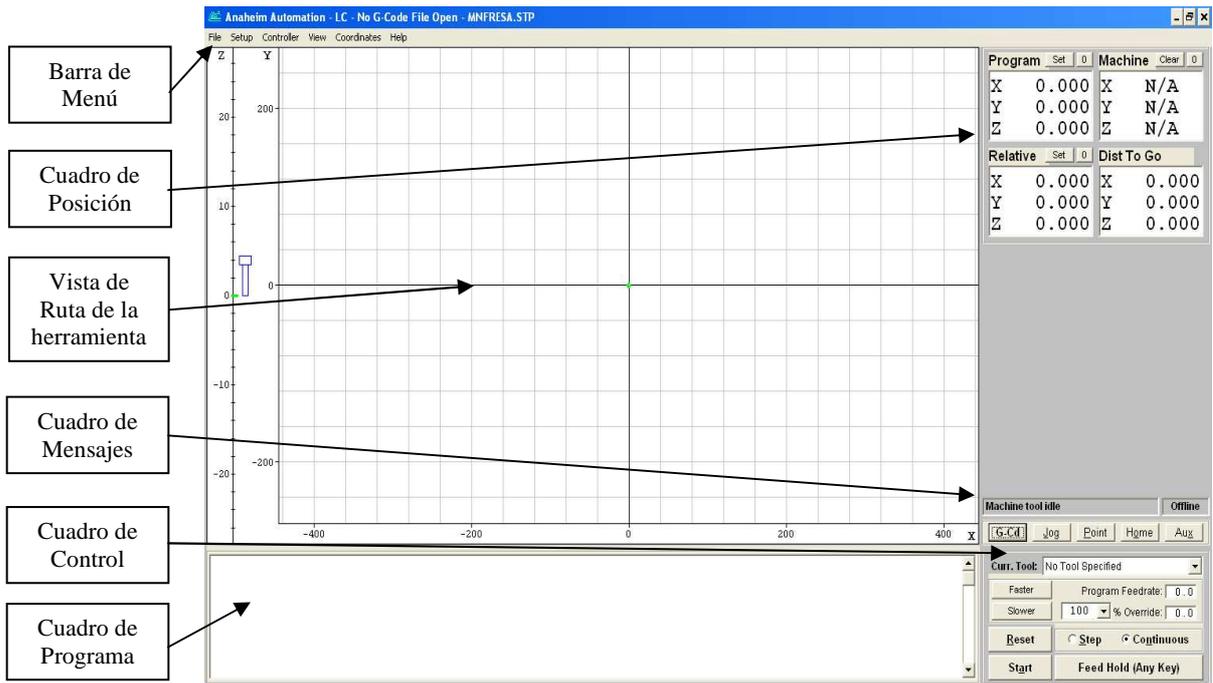
Paso 1. Ingresar al programa, haciendo doble click en el ícono.



Paso 2. El programa para iniciar, consulta si se desea establecer conexión con el driver. Se recomienda trabajar Offline para efectos de simulación.

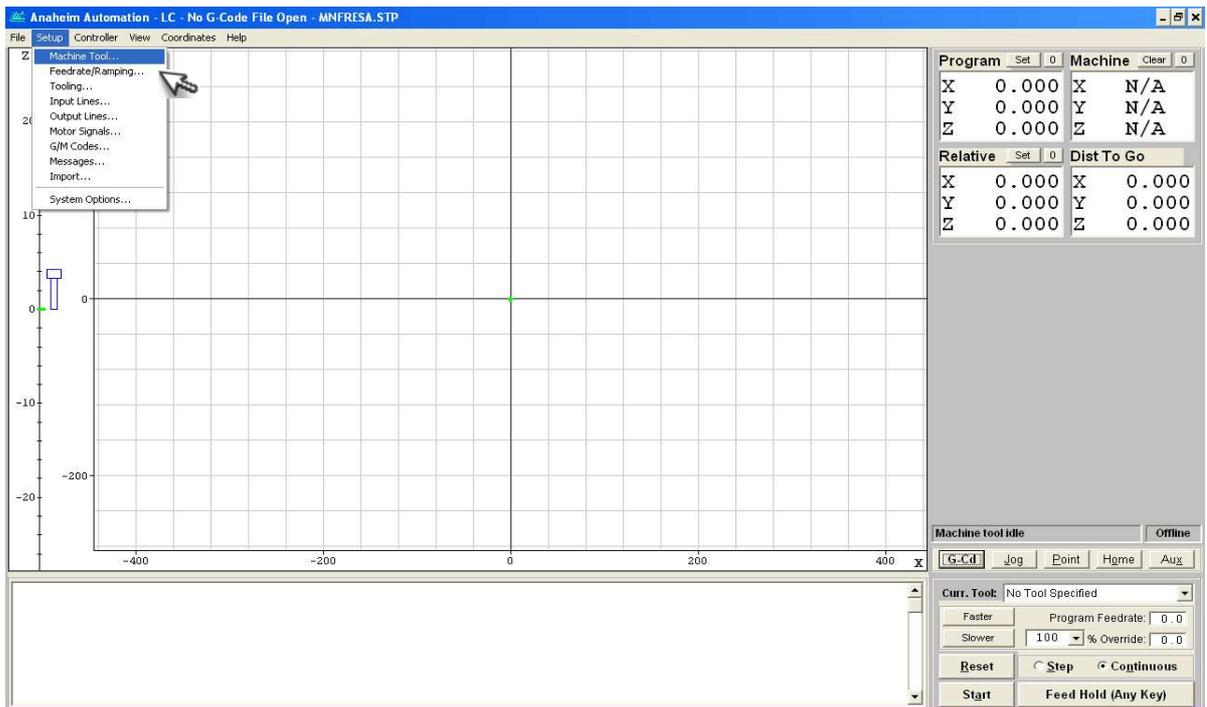


Paso 3. El programa se inicia. Se muestra en gráfico pantalla principal.



4.8.2 Configuración del programa

Paso 1. Se comprueba que la configuración de la máquina sea la correcta. Ingresar al "Setup" en la barra de menú.



Paso 2. Verificar la correcta configuración de la máquina herramienta seleccionando “Tool Machine” en el menú desplegable.

Resolution					
	Step Mode (steps/full step)	Motor Res. (full steps/ motor rev)	Gear Ratio (motor/axis)	Screw Thread (turns/mm)	Tool Positioning Resolution (mm, calculated)
X Axis	2	200	1,00000	0,2500	0,010000000000
Y Axis	2	200	1,00000	0,2500	0,010000000000
Z Axis	2	200	1,00000	0,2500	0,010000000000
A Axis	2	200	72,00000	N/A	0,012500000000

General								
	Axis Length (mm)	Home End	Home Order	Home Axis	Home Switch Offset (mm)	Pt. Move Linear Interp.	Comp Backlash (mm)	Tool Chg. Position (mm)
X Axis	400,0	X-	2	Yes	0,100	Yes	0,000	0,000
Y Axis	200,0	Y-	3	Yes	0,100	Yes	0,000	0,000
Z Axis	25,0	Z+	1	Yes	0,100	No	0,000	0,000
A Axis	N/A	A-	4	No	2,000	No	0,000	0,000

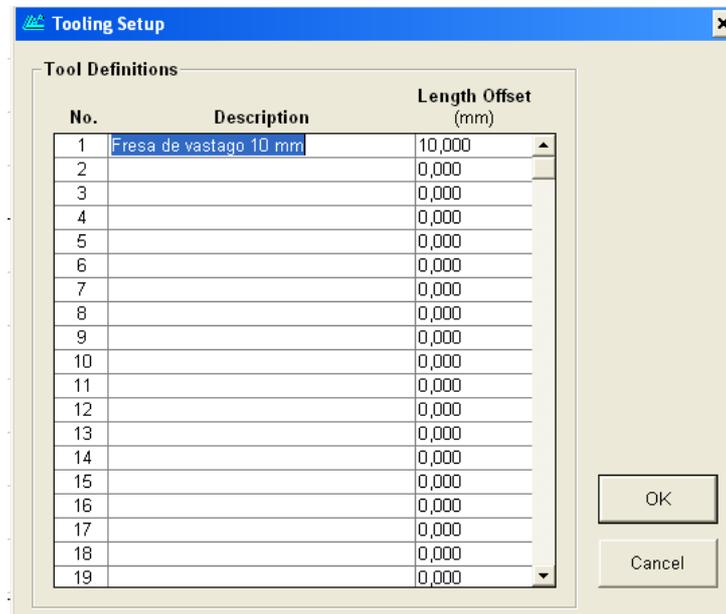
Paso 3. Verificar la correcta configuración de las velocidades de avance de los motores en cada uno de los ejes y de la máquina herramienta. Seleccionar “Feedrate/Ramping” en el menú desplegable.

Axis Setup					
	Max Unramped Feedrate (mm/min)	Maximum Feedrate (mm/min)	Ramping Rate (full steps/ sec/sec)	Direction Change Delay (sec)	Continuous Contouring Feedrate Tol. (mm/min)
X Axis	10,0	80,0	3000	0,010	10,0
Y Axis	10,0	80,0	3000	0,010	10,0
Z Axis	8,0	60,0	3000	0,010	8,0
A Axis	360,0 %/min	1440,0 %/min	3000	0,010	360,0 %/min

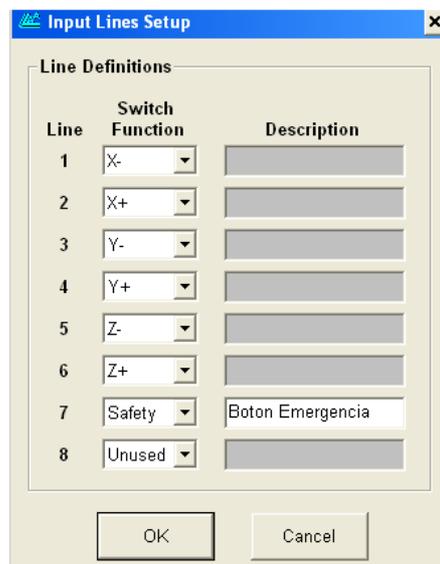
Jog Rate Setup		
	Linear	Rotary
Slow	1,0 (mm/min)	360,0 (%/min)
Med	10,0 (mm/min)	720,0 (%/min)
Fast	80,0 (mm/min)	1440,0 (%/min)

General	
Max Arc Feedrate:	50,0 (mm/min)
Pt. Feedrate - Linear:	50,0 (mm/min)
Pt. Feedrate - Rotary:	360,0 (%/min)
<input type="checkbox"/> Continuous Contouring On	

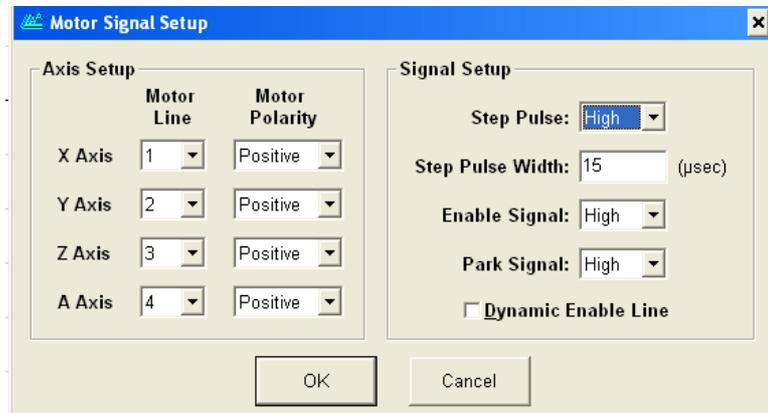
Paso 4. Seleccionar “Tooling” en el menú desplegable y especificar la herramienta a ser utilizada en el proceso y su longitud.



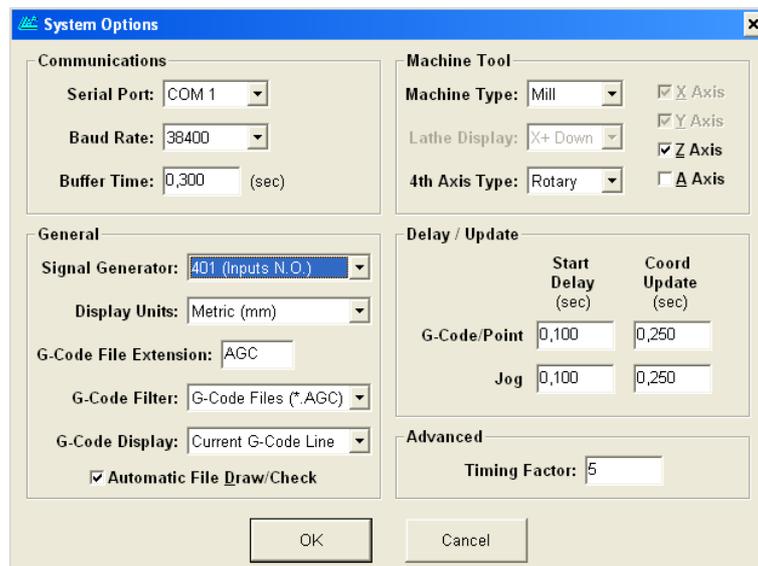
Paso 5. Seleccionar “Input Lines” para comprobar la correcta conexión de los switches finales de carrera de cada uno de los ejes y el botón de emergencia.



Paso 6. Seleccionar “Motor Signals” para comprobar la correcta configuración de los motores de paso.



Paso 7. Finalmente seleccionar “System Options” para comprobar la correcta configuración del sistema.



La configuración se debe realizar una sola vez, en inicio de operación de máquina.

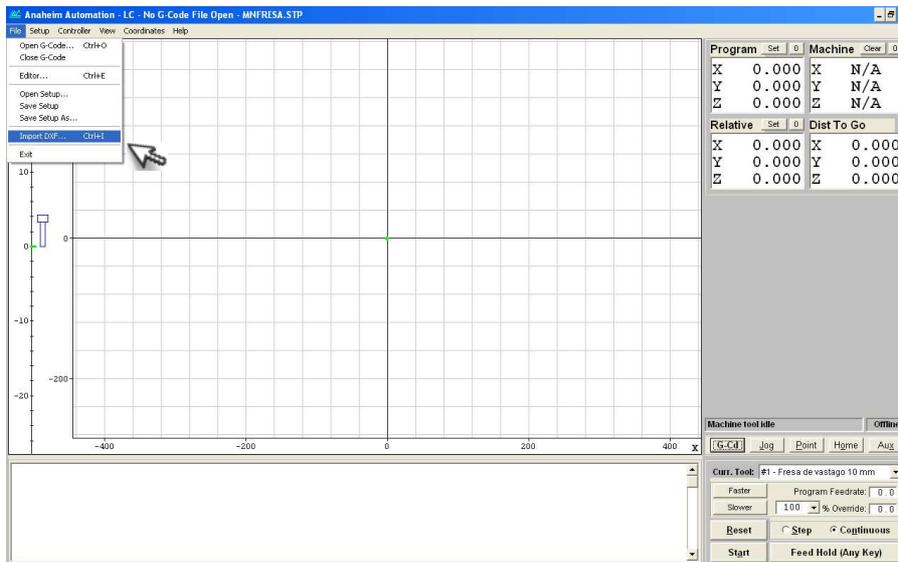
4.8.3 Programación del Sistema

El software Anaheim Automation LC permite ingresar un archivo en Código G, de 3 maneras:

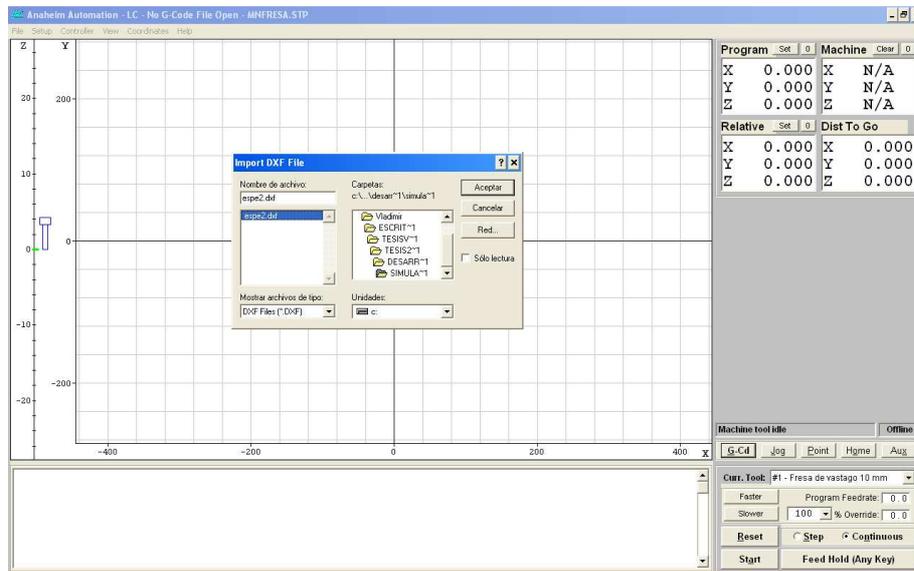
1. Abrir un archivo en Código G existente creado por un programa CAM, o cualquier otra fuente,
2. Importar un archivo DXF creado por una programa CAD o de dibujo, y,
3. Escribir un programa en Código G directamente en el Cuadro de Programa.

Para el presente caso, se importará un archivo DXF, que contiene el dibujo de la pieza a ser maquinada.

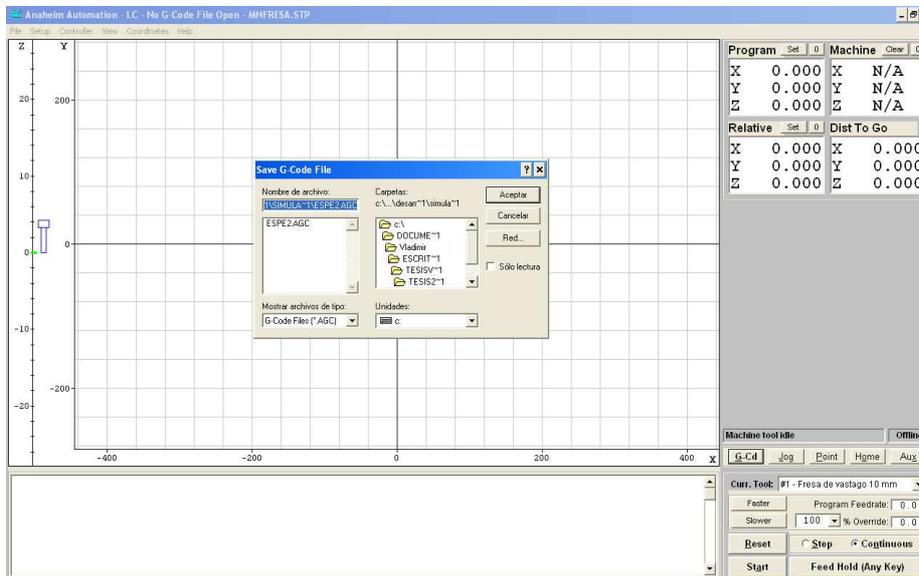
Paso 1. Seleccionar “Import DXF” en el menú “File” de la barra de menú.



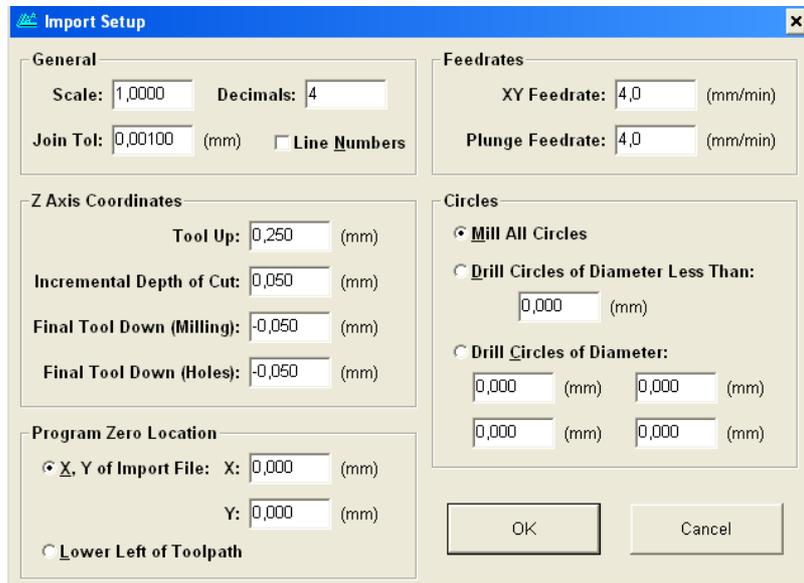
Paso 2. Buscar y seleccionar el archivo DXF que se va a importar.



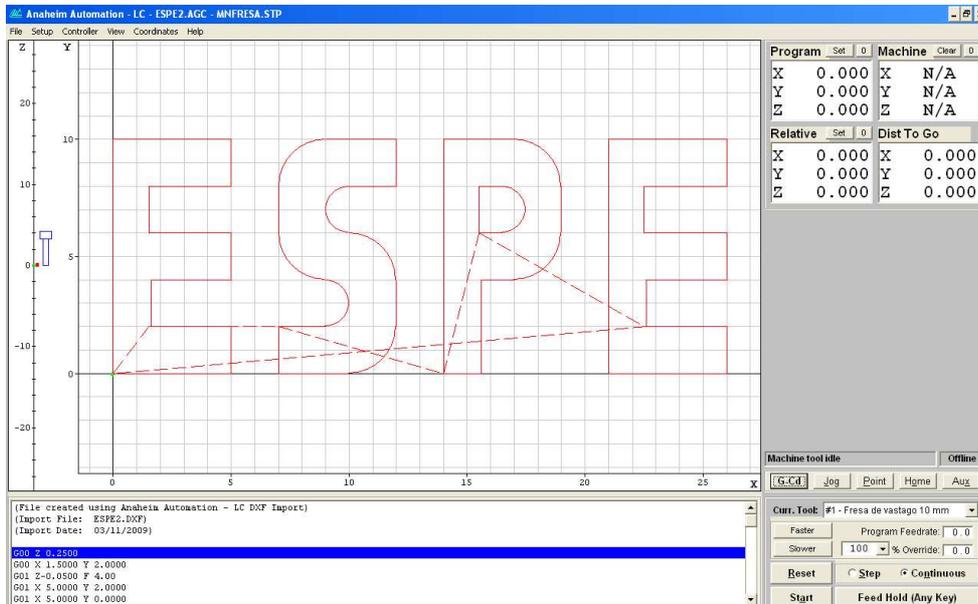
Paso 3. El programa solicita crear y guardar un archivo AGC, el cual contendrá la programación en Código G autogenerada.



Paso 4. Aparece la siguiente ventana. En ésta se debe comprobar algunos parámetros del sistema.



Paso 5. Una vez revisada la pantalla anterior y luego de hacer click en "OK", aparece el dibujo y el programa en Código G de la pieza a ser maquinada.



4.8.4 Simulación del control y movimiento

La simulación del control de los motores y el movimiento se realiza al momento de ejecutar el programa en Código G de la pieza a ser maquinada.

El programa en Código G a ser ejecutado es el siguiente:

File created using Anaheim Automation - LC DXF Import)
(Import File: ESPE2.DXF)

```
G00 Z 0.2500
G00 X 1.5000 Y 2.0000
G01 Z-0.0500 F 4.00
G01 X 5.0000 Y 2.0000
G01 X 5.0000 Y 0.0000
G01 X 0.0000 Y 0.0000
G01 X 0.0000 Y10.0000
G01 X 5.0000 Y10.0000
G01 X 5.0000 Y 8.0000
G01 X 1.5000 Y 8.0000
G01 X 1.5000 Y 6.0000
G01 X 5.0000 Y 6.0000
G01 X 5.0000 Y 4.0000
G01 X 1.6111 Y 4.0000
G01 X 1.6111 Y 2.0000
G00 Z 0.2500
G00 X 7.0000 Y 2.0000
G01 Z-0.0500
G01 X 7.0000 Y 0.0000
G01 X10.0000 Y 0.0000
G03 X12.0000 Y 2.0000 I 0.0000 J 2.0000
G01 X12.0000 Y 4.0000
G03 X10.0000 Y 6.0000 I-2.0000 J 0.0000
G02 X10.0000 Y 8.0000 I-0.0000 J 1.0000
G01 X12.0000 Y 8.0000
G01 X12.0000 Y10.0000
G01 X 9.0000 Y10.0000
G03 X 7.0000 Y 8.0000 I 0.0000 J-2.0000
G01 X 7.0000 Y 6.0000
G03 X 9.0000 Y 4.0000 I 2.0000 J 0.0000
G01 X 9.0000 Y 4.0000
G02 X 9.0000 Y 2.0000 I 0.0000 J-1.0000
G01 X 7.0000 Y 2.0000
G00 Z 0.2500
G00 X14.0000 Y 0.0000
G01 Z-0.0500
G01 X14.0000 Y10.0000
G01 X17.0000 Y10.0000
```

```

G02 X19.0000 Y 8.0000 I 0.0000 J-2.0000
G01 X19.0000 Y 6.0000
G02 X17.0000 Y 4.0000 I-2.0000 J 0.0000
G01 X15.6111 Y 4.0000
G01 X15.6111 Y 0.0000
G01 X14.0000 Y 0.0000
G00 Z 0.2500
G00 X15.5000 Y 6.0000
G01 Z-0.0500
G01 X16.5000 Y 6.0000
G01 X16.5000 Y 6.0000
G03 X16.5000 Y 8.0000 I 0.0000 J 1.0000
G01 X16.5000 Y 8.0000
G01 X15.5000 Y 8.0000
G01 X15.5000 Y 6.0000
G00 Z 0.2500
G00 X22.5000 Y 2.0000
G01 Z-0.0500
G01 X26.0000 Y 2.0000
G01 X26.0000 Y 0.0000
G01 X21.0000 Y 0.0000
G01 X21.0000 Y10.0000
G01 X26.0000 Y10.0000
G01 X26.0000 Y 8.0000
G01 X22.5000 Y 8.0000
G01 X22.5000 Y 6.0000
G01 X26.0000 Y 6.0000
G01 X26.0000 Y 4.0000
G01 X22.6111 Y 4.0000
G01 X22.6111 Y 2.0000
G00 Z 0.2500
G00 X 0.0000 Y 0.0000

```

Para ejecutar el programa en Código G, se debe seleccionar cualquiera de las dos opciones que se encuentran en el Cuadro de Control:



1. **STEP** Realiza la simulación por pasos, cada paso ejecuta una línea del programa en Código G.
2. **CONTINUOUS** Realiza la simulación de manera continua y termina cuando se ejecuta todo el programa en Código G.

Para el presente caso, se ejecuta con la opción “STEP” seleccionada, con el fin de mostrar la representación gráfica del programa en la ejecución del maquinado de la pieza.

The screenshot shows the Anaheim Automation software interface. The main window displays a 2D coordinate system with X and Y axes ranging from 0 to 25. A part outline is shown with the letters 'ESPA' in a stylized font. The part is divided into two regions: a blue region on the left and a red region on the right. A tool icon is shown on the left side of the coordinate system, and a dashed line indicates the tool's path. The bottom panel shows the G-code program with the following lines:

```

G01 X15.5000 Y 6.0000
G00 Z 0.2500
G00 X22.5000 Y 2.0000
G01 Z-0.0500
G01 X26.0000 Y 2.0000
G01 X26.0000 Y 0.0000
G01 X21.0000 Y 0.0000
G01 X21.0000 Y10.0000
G01 X26.0000 Y10.0000

```

The right panel shows the 'Program' and 'Machine' status tables:

Program	Set	0	Machine	Clear	0
X	15.500	X	N/A		
Y	6.000	Y	N/A		
Z	-0.050	Z	N/A		

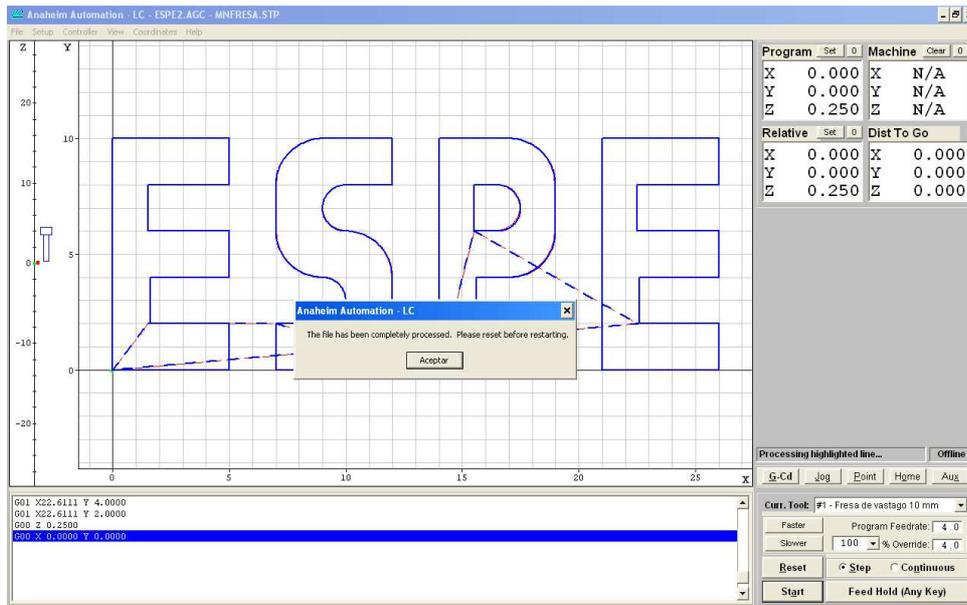
Relative	Set	0	Dist To Go
X	15.500	X	0.000
Y	6.000	Y	0.000
Z	-0.050	Z	0.000

The bottom right panel shows the 'Machine tool idle' status and the 'Step' button selected in the execution mode. The 'Start' button is also visible.

Callouts in the image explain the following:

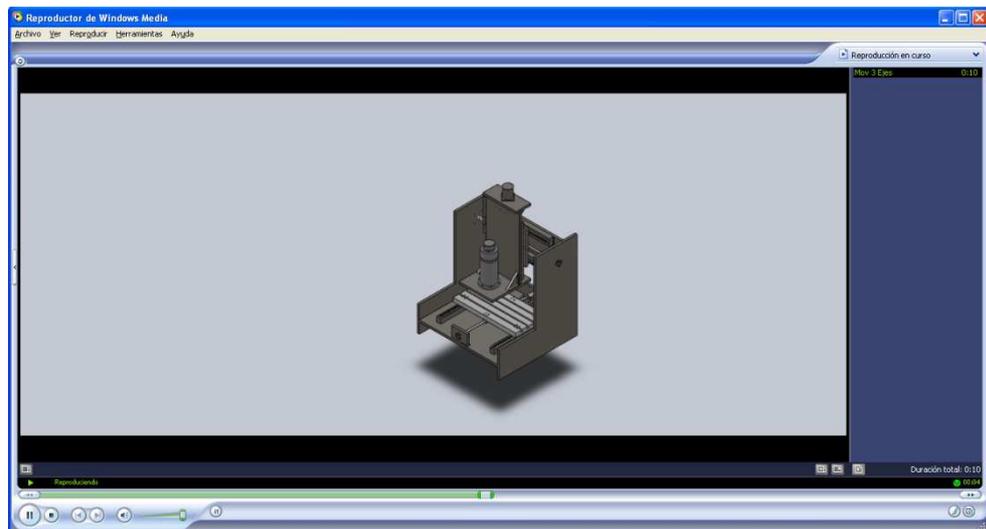
- En AZUL se muestra el trabajo ya realizado (In BLUE, the work already done is shown).
- En ROJO se muestra el trabajo por realizar (In RED, the work to be done is shown).
- Posición de herramienta en eje Z (Tool position on Z-axis).
- Movimiento rápido sin trabajo de la herramienta (Fast movement without tool work).
- Línea de programa a ejecutarse (Line of program to be executed).
- Ejecución en Modo STEP (Execution in STEP mode).
- Posición de herramienta en eje X-Y (Tool position on X-Y axis).

Terminada la ejecución del programa en Código G, esto es, ejecutada la última línea del programa, se presenta la siguiente pantalla.

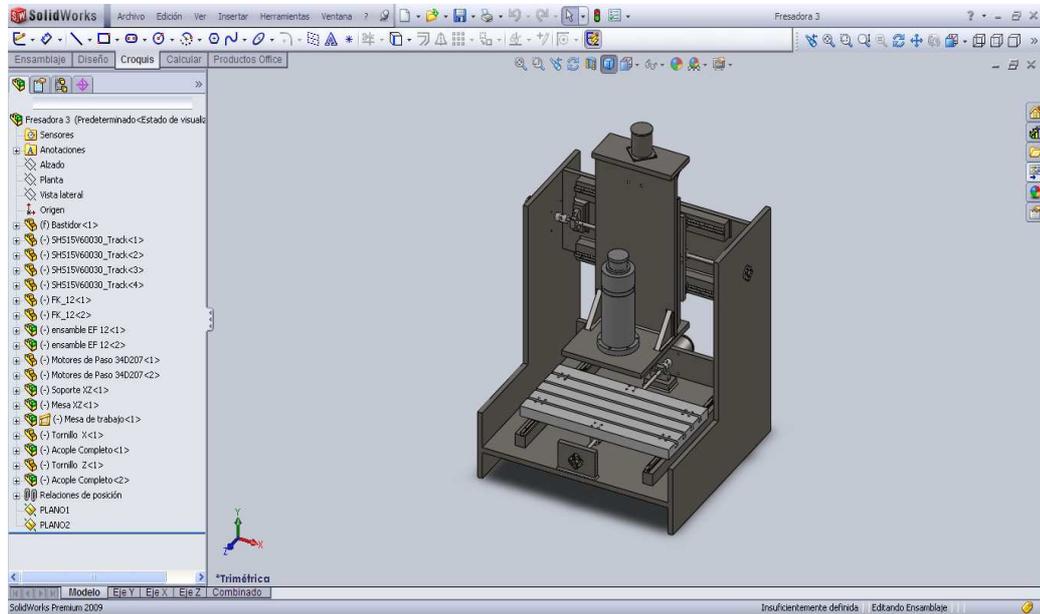


4.9 Resultados.

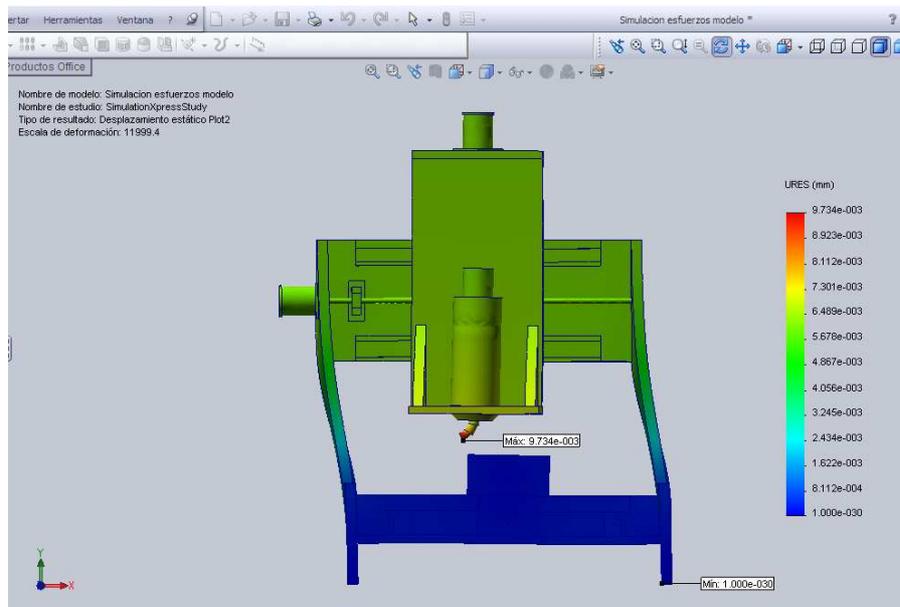
- Para efectos de diseño mecánico, Solid Works permite simular el movimiento simultáneo de la máquina propuesta en los 3 ejes, donde se observa que no existen interferencias y el modelo es viable cinemáticamente.



- Solid Works presenta gran flexibilidad para hacer modificaciones al modelo propuesto y así para cumplir con requerimiento de precisión, reduciendo costos y tiempo en el proyecto.

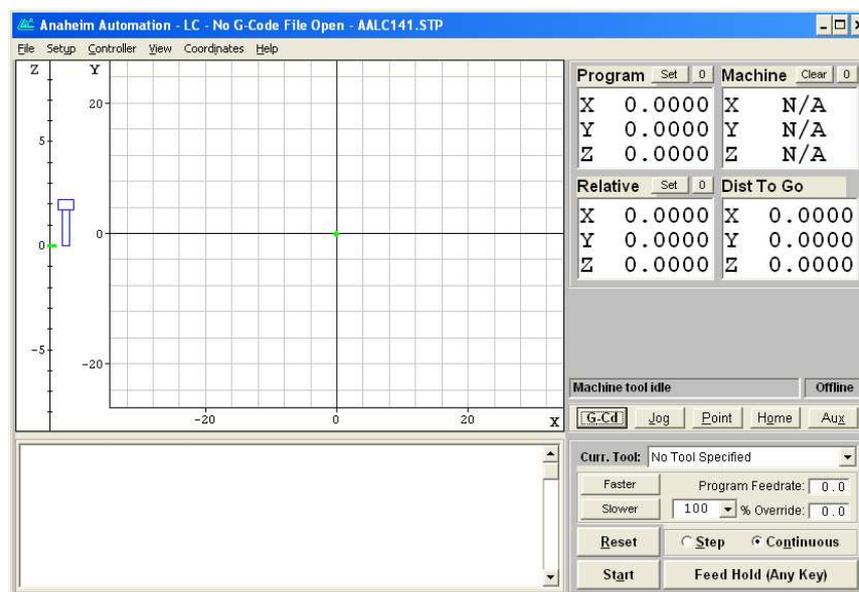


- Como se pudo observar en los tres casos expuestos anteriormente, los valores de esfuerzo debido a las cargas son menores al S_y del material, por lo cual no se tendrá falla por esfuerzo, pero al analizar las deformaciones se puede observar que éstas se encuentran fuera de los parámetros de diseño, motivo por el cual y considerando criterio fundamental de diseño de maquinas herramientas, se modifica diseño propuesto para mejorar rigidez de forma que no afecte a la precisión requerida. La modificación propuesta contempla el aumento del espesor de las paredes laterales y trasera del bastidor de $\frac{3}{4}$ de pulgada a 1 pulgada, lo que brindará mayor rigidez a la minifresadora.
- Una vez modificado el diseño, se vuelve a correr la simulación de esfuerzos y deformaciones en Solid Works y se analiza únicamente deformación debido a esfuerzo del equipo, teniendo como resultado:

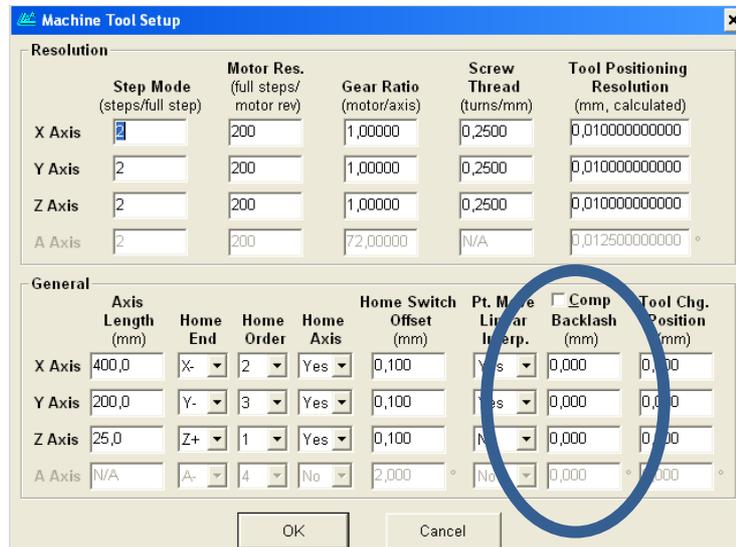


El análisis de deformación por esfuerzo determina que la deformación máxima del nuevo modelo es de $9,73 \times 10^{-3}$ mm. Este valor de deformación está dentro del rango de precisión de la máquina

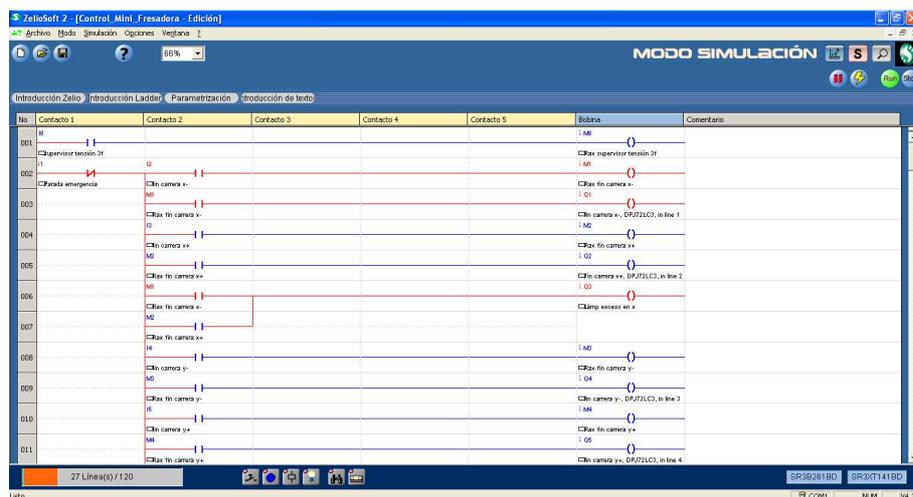
- El programa computacional seleccionado para el manejo de la máquina, cumple con el requerimiento definido, permitiendo el control de las tres dimensiones en el proceso de fresado con gran precisión.



- El programa computacional como bondad adicional permite ingresar valores de deflexión del equipo en sus 3 ejes, con la finalidad de compensar esta deflexión de forma que la precisión se vea menos comprometida.



- La simulación del programa lógico del PLC, puede ser evaluado mediante el software del fabricante permitiendo detectar errores tempranos en su programación y sus correspondiente modificaciones.



- Los procesos de evaluación metrológica se puede efectuar utilizando equipo metrológico del laboratorio de Metrología de la ESPE.

CAPITULO V

ANALISIS ECONÓMICO

5.1 COSTOS DE CONSTRUCCIÓN

Se ha estimado el costo de construcción en base al desglose indicado a continuación:

5.1.1 Costos directos

Tabla 5.1: Costos de materiales y equipos

Ítem	Descripción	Cant.	Valor Unit	Valor Total
1	Supervisor de tensión	1	216,40	216,40
2	Fuente de poder 24 V	1	225,65	225,65
3	Breaker General BRP	1	32,89	32,89
4	Botonera parada de emergencia	1	21,00	21,00
5	Relé Auxiliar 24V	1	14,19	14,19
6	Conector / Socket 11 pines	1	5,21	5,21
7	Relé Zelio	1	249,47	249,47
8	Módulo de expansión	1	102,11	102,11
9	Computador personal	1	890,00	890,00
10	Cable de conexión a PC	1	97,21	97,21
11	Software Programación Zelio Soft	1	28,02	28,02
12	Luz Piloto Roja	6	8,97	53,82
13	Sensor de proximidad inductivo	6	118,03	708,18
14	Altivar / Variador de frecuencia	1	740,61	740,61
15	Sensor de caudal	1	198,25	198,25
16	Contacto KCH	1	31,29	31,29
17	Luz Piloto Verde	2	8,97	17,94
18	Porta fusibles (10x38 mm)	3	5,94	17,82
19	Fusibles (10x38 mm) 0,5 A / 240V	2	1,50	3,00
20	Fusibles (10x38 mm) 3 A / 240V	1	3,80	3,80
21	Tablero Modular B 40x60x20	1	68,64	68,64
22	Riel DIN Montaje Eléctrico	2	1,71	3,42
23	Canaleta Plástica ranurada (30x55 bxa) x 2m	1	12,41	12,41
24	Tapa Canaleta	1	4,33	4,33

Subtotal importados	28.896,30
Subtotal locales	5.890,40
TOTAL:	34.786,70

El valor estimado de 35% correspondiente a importación incluye, impuestos para ingreso al país (30%), transporte desde origen(4.5%), seguro de transporte (0.5%).

Tabla 5.2: Costos de maquinaria (MQ) y Mano de obra (MO)

Descripción	Tipo	Cantidad	Valor Unit	Valor Total
Hora Oxicorte	MQ	4,70	\$ 15,00	\$ 70,50
Hora de fresado	MQ	14,20	\$ 13,00	\$ 184,60
Hora Rectificado	MQ	5,85	\$ 12,00	\$ 70,20
Hora de taladrado	MQ	9,45	\$ 6,00	\$ 56,70
Hora de soldadura*	MQ	10,85	\$ 16,00	\$ 173,60
Horas roscado	MQ	8,30	\$ 6,00	\$ 49,80
Horas Montaje mecánico	MO	10,91	\$ 7,00	\$ 76,37
Horas comprobación metrológica	MOE	13,50	\$ 30,00	\$ 405,00
Ensamble y montaje de tablero	MOE	5,50	\$ 25,00	\$ 137,50
Conexiones periféricos a tablero	MOE	1,57	\$ 25,00	\$ 39,25
				\$
Subtotal:				1.263,52
12% IVA:				\$ 151,62
				\$
TOTAL:				1.415,14

Para descripción de costos de mano de obra se considera a Mano de Obra de un técnico industrial (MO) y además se considera mano de obra especializada para actividades de comprobación metrológica, ensambles de tablero y conexiones de periféricos (MOE), motivo por el cual el valor de tarifa de mano de obra es diferenciado.

5.1.2 Costos indirectos

Tabla 5.3: Costos indirectos

Descripción	Valor
Costo tramite en aduanas	150,00
Transporte a taller	70,00

Suministros y Consumibles varios	40,00
Gastos administrativos	120,00
TOTAL:	380,00

5.1.3 Costo Total

Tabla 5.4: Costo total de fabricación de mini fresadora didáctica controlada por un PC

Descripción	Valor
Costo Materiales y Equipo	\$ 34.786,70
Costo Mano de obra y maquinaria	\$ 1.415,14
Costos indirectos	\$ 380,00
Imprevistos 10%	\$ 3.658,18
Costo Total	\$ 40.240,03

5.1.4 Análisis porcentual de costos

El análisis porcentual de los costos se expresa en las siguientes tablas:

Tabla 5.5: Tabla de distribución de porcentaje de costo de materiales

Descripción	Costo	%
Materiales y Equipos importadas	28.896,30	83%
Materiales y Equipos adquiridos localmente	5.890,40	17%

Tabla 5.6: Tabla de relación porcentual de costos directos.

Descripción	Valor	%
Costos Materiales	\$ 34.786,70	96%
Costos Mano de obra	\$ 1.415,14	4%

Tabla 5.7: Tabla de distribución de porcentaje de costo total

Descripción	Valor	%
Costos directos	\$ 36.201,85	90%
Costos indirectos	\$ 4038,18	10%

En concordancia con los valores de costos directos antes descritos, se puede observar que el mayor rubro pertenece a los elementos importados, siendo considerablemente incrementados por los costos de importación, pago de impuestos y seguros de transporte.

Los costos indirectos en relación a los costos directos son de menor valor, correspondiendo al pago de mano de obra y uso de máquinas herramientas.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El presente proyecto cumple el objetivo de diseñar una minifresadora didáctica controlada por un PC utilizando elementos y piezas con tecnología de punta y de alta precisión, lo que hace que este proyecto sea novedoso en nuestro medio.
- El diseño de la mini fresadora controlada por un PC, se realizó con conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería mecánica e información recopilada durante el periodo de ejecución del proyecto de grado.
- La elaboración de proyectos de grado permiten ampliar los conocimientos adquiridos durante la formación universitaria.
- Se concluye que la minifresadora didáctica controlada por un PC es viable de construir y ensamblar en nuestro medio, utilizando elementos fabricados y adquiridos localmente y otros importados.
- El beneficio de construir esta máquina viene dado por crear la posibilidad de iniciar una nueva industria en el Ecuador, la de construir máquinas herramientas de alta precisión y última tecnología, para ofrecerlas en el mercado interno y externo. De igual manera, permitiría desarrollar nuevas tecnologías de producción y abrir una amplia gama de nuevas industrias, por ejemplo, para la fabricación de tornillos de bolas y guías lineales.
- La sistematización de procesos es cada día más común y accesible, gracias al desarrollo tecnológico en elementos eléctricos y electrónicos de control disponibles comercialmente en nuestro medio.
- La deflexión en los elementos que conforman una fresadora y la rigidez del conjunto juegan un papel importante, siendo el principal criterio en el diseño para máquinas herramientas.
- El manejo de conceptos y procesos de metrología, son determinantes en el montaje de equipos de precisión, siendo una herramienta indispensable para lograr la precisión requerida.
- La utilización de programas computacionales y algoritmos lógicos aplicados a PLC's, ayudan a mejorar el control y operación de las máquinas herramientas, colaborando con la mejora en precisión de éstas.

- El sistema de interface entre la minifresadora y el computador seleccionado permite los movimientos de los ejes al controlar con alta precisión los motores de paso seleccionados para cada uno de los ejes. Esto se logra utilizando un driver pack que permite controlar los 3 motores con un software de control creado con este fin, que hace que el control sea sencillo y amigable para el usuario. Los motores, el driver pack y el software son creados por el mismo proveedor, lo que elimina la posibilidad de tener incompatibilidad entre los dispositivos indicados y nos asegura el funcionamiento del sistema.
- La simulación de movimiento, deformaciones y esfuerzos de la minifresadora didáctica controlada por un PC se logra al utilizar el software SolidWorks, el cual en la actualidad es una herramienta muy utilizada en el diseño mecánico. Este programa permite el desarrollo de modelos, análisis gráfico de movimientos, deformaciones y esfuerzos, que brinda al diseñador de máquinas, tener un mejor criterio en la selección de formas y materiales y verificar el funcionamiento. En el presente proyecto, tanto el modelo como las deformaciones y los esfuerzos satisfacen y cumplen con los parámetros establecidos de diseño.
- En el capítulo V se detalla el costo total estimado para la construcción de la minifresadora didáctica controlada por un PC, el cual suma US\$ 40.240,03 y corresponde a las partes y piezas que se deben construir, otras que se pueden adquirir localmente y otras que se deben importar. Dentro de estas últimas se consideran los tornillos de bolas y las guías lineales, que son elementos indispensables para asegurar la precisión de la máquina.
- Del costo total estimado para la fabricación en nuestro país, el 90% corresponde a costo directo y 10% a costos indirectos.
- Del costo total de materiales y equipos, el 83% corresponde a importación, mientras que el 17% corresponde a los materiales y equipos de adquisición local.
- Debido a los altos valores correspondientes a ítems importados y al pago correspondiente de aranceles, se puede observar que el costo de producción no es competitivo frente a equipos similares de procedencias extranjeras.
- Se ha desarrollado una metodología para la construcción de este tipo de máquinas mediante la elaboración de diagramas constructivos y la generación de planos del equipo.

6.2 RECOMENDACIONES

- Verificar formas y diseños de maquinas herramientas antes de proponer diseño definitivo.
- En diseño mecánico considerar restricciones de longitud y precisión en la selección de tornillos de bolas.
- Definir husillo motorizado en base a requerimiento de potencia y disponibilidad en el mercado.
- Diseñar piezas sencillas en su forma, para facilitar fabricación con máquinas herramientas existentes en el mercado local.
- Tomar en cuenta la interfaz (programa computacional) entre PC, actuadores (motores de paso, motor, husillo motorizado) y sistema de control.
- Considerar procesos metrológicos en montaje, ya que estos son de gran impacto en la precisión de la máquina.
- Tener conocimiento básico de normas DIN 876, DIN 875 y DIN 8615 para procesos de verificación metrológica.
- Debido a que, el husillo seleccionado en la parte del diseño, supera ampliamente los requerimientos, se recomienda utilizar un husillo de menor potencia y velocidad de giro, con el fin de que sea menos costoso. Por esta razón se recomienda, por ejemplo: un husillo motorizado, marca: DPS Colombo, modelo: RV 73 HP y que tiene un costo aproximado de US\$2.000. Ver Anexo Z.

BIBLIOGRAFIA

- Alrededor de las Máquinas – Herramientas. Heinrich Gerling. Ed. Reverté S.A. 3ra ed. 1986.
- Enciclopedia Monitor. Ed. Salvat. Tomo 7.
- Guía para prácticas en máquinas fresadoras quinto curso. Inst. Tec. Salesiano Don Bosco
- Microprocesadores. J. M. ANGULO. Ed. Paraninfo. 3ra ed. 1984.
- Guía de Fresado. Sandvik Coromant.1985
- Metalcutting Technical Guide. Sandvik Coromant.2005
- Principios de Ingeniería de Manufactura. Chiles - Black. Ed. CECSA. 1ra ed. 1999.
- Diseño de Elementos de Máquinas. Robert Mott. Ed. Prentice Hall. 2da ed. 1995
- Manual de Mecánica Industrial. Máquinas y Control Numérico. Tomo IV. Ed. Cultural. 1999
- Manual del Ingeniero Mecánico. Marks. Ed. Mc Graw Hill. 9na ed
- Catálogo Anaheim Automation's motion control products. 2000
- Catálogo de productos THK. Ball Screw
- Normas DIN 786, 786, 8615.
- Normas BS 3800, BS 4656
- Fuentes de Internet varias:
 - http://latheking.tradeindia.com/Exporters_Suppliers/Exporter13139.187631/Horizontal-Milling-Machine.html
 - <http://www.cancelarich.com.ar/fresadorafc3a.htm>
 - www2.ing.puc.cl/icm/docencia/cursos/programas.html
 - www.monografias.com
 - <http://www.analitica.com.mx>

<http://html.rincondelvago.com/materiales-sinteticos.html>

<http://www.ucn.cl/facultadesinstitutos/laboratorio/propiedades%20f%EDsicasm3.htm>

<http://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>

<http://ccc.inaoep.mx/fpgacentral/reconfig/2003/articulos/TCR11.pdf>

<http://www.todorobot.com.ar/documentos/servomotor.pdf>

http://autric.com/Microbotica%20y%20Mecatronica/motores_paso_a_paso.htm

http://autric.com/Microbotica%20y%20Mecatronica/motores_paso_a_paso.htm

<http://www.abcdatos.com/tutoriales/tutorial/19747.html>

<http://www.todopic.com.ar/apuntes/>

<https://tech.thk.com/index.html>

<http://www.anaheimautomation.com/index.php>

<http://www.convertworld.com/es/energia/>

<http://www.spindlesworld.com/milling-spindles-motorized.html>

<http://www.techno-isel.com/H840/HTML/H840p015.html>

<http://www.techno-isel.com/H840/HTML/H840p015.html>

<http://www.sebyc.com/descargas/telesquemario/ManualElecTeleme.pdf>

<http://www.schneider-electric.com.co/sites/colombia/es/clientes/contratistas/entrenamiento/entrenamiento.page>

<http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF10/index.html>

http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/2_mecanizado_fresadora/curso/index.htm#