

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MONTAJE PARA REALIZAR
ENGRANAJES PLÁSTICOS MEDIANTE EL FRESADO POR GENERACIÓN
PARA EL LABORATORIO DE LA MATERIA DISEÑO DE MAQUINAS II**

**JHON ALFONSO MESA TRISTANCHO
NESTOR LEONARDO ESTUPIÑAN RIAÑO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MONTAJE PARA REALIZAR
ENGRANAJES PLÁSTICOS MEDIANTE EL FRESADO POR GENERACIÓN
PARA EL LABORATORIO DE LA MATERIA DISEÑO DE MAQUINAS II**

**JHON ALFONSO MESA TRISTANCHO
NESTOR LEONARDO ESTUPIÑAN RIAÑO**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Director
RICARDO ALFONSO JAIMES ROLON
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

A Dios primero que todo, por la oportunidad diaria de conocer, aprender, seguir intentándolo y ponerme retos para ser cada vez mejor persona y profesional.

A mis Padres Alfonso Mesa y Dorys Tristanco: por su amor profundo, la paciencia y el orgullo que reflejan sus ojos. A mi papá por ser ejemplo de lucha y perseverancia. A mi mamá siempre presente para brindarme su amor e incondicionalidad.

A Magda Martínez: que pasó a formar parte de mi vida en los momentos en que más necesitaba de la amistad, el amor, la tierna mirada de quien te dice: aquí estaré para tí. Por su apoyo y siempre creer en mí.

A los que sin llevar el mismo apellido, se han convertido en familia y parte importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Ricardo Alfonso Jaimes director de proyecto, quien siempre ha estado apoyando nuestra labor académica, por la confianza depositada y la disposición siempre en pro de la educación como excelente maestro que es.

A Nestor Leonardo Estupiñan compañero y amigo en parte de la carrera y en esta travesía llena de enseñanzas que significó la realización de nuestro proyecto de grado.

DEDICATORIA

El tiempo variable independiente que no descansa esta denotado en las experiencias vividas a lo largo de mi vida. Felizmente en esta etapa de conocimiento deseo agradecer:

A la bendición, cuidado, apoyo, vida y amor recibido por parte de mi Dios

A mis padres Nestor Jaime Estupiñan y Luz Mariela Riaño por su incondicional entrega, amor, apoyo, esfuerzo, confianza, seguridad y alegría que me regalaron siempre

A la grandísima labor y trabajo de mis maestros en el regalo invaluable del conocimiento científico

Al tiempo y cariño compartido con grandes amigos, muy especialmente de Juan Carlos Acuña y Laura Isabel Polentino

Al trabajo, esfuerzo, tiempo y apoyo de mi compañero de grado Jhon Alfonso Mesa

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	20
1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA	20
1.2 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo general.....	23
1.3.2 Objetivos especificos	23
2. ENGRANAJES, FALLAS Y FABRICACIÓN.....	25
2.1 HISTORIA.....	25
2.2 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN	27
2.2.1 Para ejes paralelos	28
2.2.2 Para ejes que se cortan	28
2.2.3 Para ejes que se cruzan	29
2.2.4 Mecanismo especiales.....	29
2.3 GEOMETRÍA Y MATERIALES PARA ENGRANAJES	30
2.3.1 Nomenclatura del diente	30
2.3.2 Materiales	32
2.3.2.1 Aceros, Bronce y Hierro	33
2.3.2.2 Polímeros. Tipos y características	35
2.3.3 Fallas en engranajes Plásticos	38
2.3.3.1 Desgaste adhesivo	38

2.3.3.2 Desgaste Abrasivo	39
2.3.3.3 Flujo Plástico.....	39
2.3.3.4 Fractura.....	39
2.3.3.5 Picadura.....	40
 2.4 MÉTODOS DE FABRICACIÓN DE ENGRANAJES	 40
2.4.1 Historia.....	40
2.4.2 Clasificación.....	41
2.4.2.1 Fabricación sin arranque de viruta.....	42
2.4.2.2 Fabricación con arranque de viruta.....	44
 2.5 DEFINICIÓN FRESA MADRE	 48
2.5.1 Geometría básica de una fresa madre.....	49
2.5.2 Tipos de Fresa Madre según su construcción	51
2.5.2.1 Fresa integral	51
2.5.2.2 Fresa Madre compuesta	54
2.5.3 Factores que influyen en la fabricación.....	59
2.5.3.1 Diámetro de la herramienta.....	59
2.5.3.2 La longitud	60
2.5.3.3 Número de cuchillas	61
2.5.3.4 Temperatura de trabajo.....	62
 3. DISEÑO DE CONCEPTO DEL MÓDULO	 63
3.1 ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO	63
3.2 COMPONENTES MECÁNICOS	65
3.3 CONSIDERACIONES DE LA HERRAMIENTA DE CORTE	68
3.3.1 Cargas en un mecanismo tornillo sinfín-corona.....	69
3.4 COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS	70

4. DISEÑO DE DETALLE DEL MÓDULO.....	74
4.1 ANÁLISIS DE FRESA MADRE COMO TORNILLO SIN FIN	74
4.1.1 Análisis de fresa madre según el método ortogonal	77
4.1.2 Cálculo de potencia y velocidad de corte	79
4.2 DISEÑO Y CÁLCULO DEL EJE DE LA FRESA POR FATIGA.....	82
4.2.1 Diseño del eje - pieza base	89
4.3 ANÁLISIS Y DISEÑO CONJUNTO DE ELEVACIÓN	91
4.4. DISEÑO DE TORNILLO PRINCIPAL	94
4.4.1 Tornillo de elevación	96
4.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	98
5. SISTEMA ELECTRÓNICO Y COMPONENTES	101
5.1 INTERFAZ LABVIEW	105
6. PRUEBAS Y ACABADO GENERAL	107
6.1 TRATAMIENTO DE PIEZAS.....	109
7. MANUAL DE USUARIO DE LA MÁQUINA.....	111
8. CONCLUSIONES	120
9. RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFÍA.....	123
ANEXOS	124

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Engranajes cónicos rectos.....	25
Figura 2. Engranajes cónicos rectos.....	27
Figura 3. Engranaje cilíndrico helicoidal	28
Figura 4. Engranaje helicoidal cruzado	29
Figura 5. Nomenclatura del perfil de un diente	31
Figura 6. Endurecimiento superficial por flama	34
Figura 7. Fractura de dientes en engranajes	39
Figura 8. Máquina cortadora de engranajes de Richard Roberts	40
Figura 9. Máquina de mecanizado de engranajes por fresa madre	41
Figura 10. Clasificación de los métodos de fabricación de engranajes.....	42
Figura 11. Extrusión.....	43
Figura 12. Maquinado de Fresa de forma.....	45
Figura 13. Tallado con piñón generador	46
Figura 14. Movimiento de fresa madre y pieza base	48
Figura 15. Perfil de tornillo y fresa de hélice derecha.	49
Figura 16. Partes principales de una fresa madre	50
Figura 17. Clases de creadores por construcción.....	51
Figura 18. Limitación de la longitud total del diente y su zona útil	52
Figura 19. Fresa Madre torneada de precisión	53
Figura 20. Cuerpo base y cuchilla de una Fresa Madre	54

Figura 21. Fresa Madre con dientes unidos por tornillos al cuerpo base	55
Figura 22. Fresa madre de cubo recuperable	57
Figura 23. Fresa madre con insertos de acero soldados	58
Figura 24. Fresa Madre de discos ensamblados	58
Figura 25. Fresa madre construida	59
Figura 26. Relación entre el diámetro y esfuerzo de corte de una fresa madre.....	60
Figura 27. Zona de trabajo efectivo de una fresa madre	61
Figura 28. Componentes mecánicos del módulo de fresado	64
Figura 29. Carro principal y soporte inferior en proceso de construcción	65
Figura 30. Mecanismo de elevación en construcción	66
Figura 31. Placa rectangular y circular del módulo terminado	67
Figura 32. Motor en posición de trabajo.....	68
Figura 33. Fuerzas presentes en un tornillo sinfín-corona.....	69
Figura 34. Conexiones de los principales componentes eléctricos y electrónicos .	70
Figura 35. Placa auxiliar - conexiones de componentes electrónicos.....	71
Figura 36. Proceso y/o funcionamiento de los componentes electrónicos.....	73
Figura 37. Fuerza resultante en la acción de corte	77
Figura 38. Método ortogonal (fuerzas y ángulos en material y herramienta)	78
Figura 39. Parámetros de fresado en diferentes materiales plásticos	80
Figura 40. Valores fuerzas ejercidas entre la fresa y el polímero a maquinar	82
Figura 41. Fuerzas en el eje de la fresa y torques generados	83
Figura 42. Diagrama de fuerzas y momentos del eje de la fresa en el plano XY...	83

Figura 43. Diagrama de fuerzas del eje de la fresa en el plano XZ	84
Figura 44. Fuerzas obtenidas en el eje de la fresa por solidworks.	85
Figura 45. Diagrama de esfuerzo cortante en el eje Plano XY	85
Figura 46. Diagrama de esfuerzo cortante en el plano XZ.....	86
Figura 47. Diagrama de momentos en el eje plano X-Y:	86
Figura 48. Diagrama de momentos en el plano XZ.....	87
Figura 49. Fuerzas generadas tanto en la fresa como en la pieza a maquinar.	89
Figura 50. Mecanismo de elevación con sus componentes.....	91
Figura 51. Carga normal sobre la placa superior del conjunto de elevación.....	92
Figura 52. Deflexión del conjunto de elevación realizado por solidworks	93
Figura 53. Tornillo de bolas recirculantes	94
Figura 54. Geometría tornillo de potencia principal.....	96
Figura 55. Geometría del tornillo de potencia vertical.....	97
Figura 56. Motor monofásico del módulo/ placa del motor	98
Figura 57. Transmisión de potencia por cadena del módulo	100
Figura 58. Módulo L293N	101
Figura 59. Sensores usados en el módulo de fresado.....	102
Figura 60. Bloques iniciales en LabVIEW	103
Figura 61. Bloques en LabVIEW programa módulo.....	103
Figura 62. Parte encargada del encendido del motor principal.....	104
Figura 63. Secuencia de corte fresa en LabVIEW	105
Figura 64. Interfaz gráfica para control módulo	106

Figura 65. Pruebas de maquinado de piezas en los tres materiales.....	107
Figura 66. Engranajes producto de varias pruebas	108
Figura 67. Fragua en proceso de endurecimiento de algunas piezas.....	109
Figura 68. Calentamiento de la fresa madre y control de temperatura.	110
Figura 69. Registro de temperatura de enfriamiento.....	110

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Materiales plásticos utilizados para fabricación de engranajes.....	37
Tabla 2. Geometría fresa madre como tornillo sin fin	75
Tabla 3. Fuerzas calculadas en la fresa como si fuera un tornillo sin fin	76
Tabla 4. Ángulos y fuerzas en la herramienta de corte	79
Tabla 5. Cálculo de potencia y velocidad de corte en la fresa	81
Tabla 6. Fuerzas equivalentes en los rodamientos	84
Tabla 7. Factores de diseño para el material del eje de la fresa.....	88
Tabla 8. Fuerzas resultantes en la transmisión	89
Tabla 9. Factores de diseño para el material en el eje del polímero	90
Tabla 10. Propiedades del material mostradas en el análisis estático.....	92
Tabla 11. Cargas en el mecanismo de elevación. Información análisis estático ...	93
Tabla 12. Dimensionamiento calculado en el tornillo de potencia principal	96
Tabla 13. Dimensionamiento del tornillo de potencia subconjunto de elevación ...	97

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Diferentes vistas Pcb placa auxiliar de conexión.....	124
Anexo B. Parámetros de fresado en diferentes materiales plásticos	125
Anexo C. Teoría y análisis del comportamiento de una herramienta de corte	126
Anexo D. Lista de precios de lcomponentes principales del circuito electrónico .	128
Anexo E. Tabla elegida para obtener el número de la cadena	129
Anexo F. Práctica propuesta para su implementación.....	133

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MONTAJE PARA REALIZAR ENGRANAJES PLÁSTICOS MEDIANTE EL FRESADO POR GENERACIÓN PARA EL LABORATORIO DE LA MATERIA DISEÑO DE MAQUINAS II *.

AUTORES: ESTUPIÑAN RIAÑO NESTOR LEONARDO
MESA TRISTANCHO JHON ALFONSO **.

PALABRAS CLAVES:

Fresa madre, fresado por generación, engranajes rectos, módulo, polímeros, LabVIEW.

DESCRIPCIÓN:

Con el propósito de complementar lo aprendido en el aula de clase en las diferentes materias y poner a prueba los conceptos desarrollados mediante la experimentación. Este proyecto de grado permite interactuar con un módulo de fresado por generación de engranajes rectos plásticos.

Debido a la escasa información encontrada actualmente referente al tema, surge la necesidad de dar las bases acerca del diseño y construcción de una herramienta de corte (fresa madre) y las características del maquinado de tres tipos de materiales plásticos: nylon, acetal y cloruro de polivinilo (Pvc). Finalmente, se espera que el estudiante adquiera una formación integral a través de las diferentes pruebas y ensayos que se puedan realizar en el módulo, el cual gracias a su versatilidad y mediante un manejo adecuado podrá ser de gran ayuda para el docente en el área de diseño como para el alumno.

La adquisición y el manejo de datos mediante el software LabVIEW gracias al control de algunos componentes mecánicos hacen de este proyecto un banco de pruebas ideal para impartir y generar conocimiento.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ricardo Alfonso Jaimes Rolon

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MONTAGE TO PERFORM PLASTIC GEARS THROUGH MILLING BY GENERATION FOR THE LABORATORY OF THE MACHINE DESIGN COURSE II *.

AUTHORS: ESTUPIÑAN RIAÑO NESTOR LEONARDO
MESA TRISTANCHO JHON ALFONSO **.

KEY WORDS:

Mother milling machine, milling by generation, straight gears, module, polymers, LabVIEW.

Description:

With the purpose of fulfill the things learnt in the classroom in the different assignments and to try on the developed concepts through experimentation. This project degree allows to interact with a module of milling by generation of plastic straight gears.

Due to the lack of the currently found information refereeing this topic, it comes outs the necessity to provide the founds about the design and construction of a cutting machine (Mother milling machine) and the features of the three-type machining of plastic materials: Nylon, Acetal and polyvinyl chloride (PVC). Finally, it's expected that the student acquires an integral formation through the different tests and rehearsals that could be make in the module, in which, thanks to its versatility and through an adequate handling could be of great help for the teacher in the field of design as for the student as well.

The acquisition and handling of data through the software LabVIEW thanks to the control of some mechanic components make this project an ideal test target to impart and generate knowledge.

* *Degree work*

** *Faculty of Mechanical and physical engineering. School of Mechanical Engineering. Eng. Ricardo Alfonso Jaimes Rolon.*

INTRODUCCIÓN

En medio de los avances tecnológicos que se desarrollan constantemente en el campo de la ingeniería, los procesos de fabricación de los distintos componentes mecánicos resultan de gran interés por varios factores como: mayor calidad del producto final, disminución de tiempos de producción y optimización de recursos entre otros. Para el estudiante de ingeniería mecánica es importante estar al tanto de cualquier tipo de innovación que se presente en los diferentes campos de su carrera con el objetivo de reforzar y complementar los conocimientos impartidos en el aula.

El diseño y la fabricación como rama importante en la formación del estudiante de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander exige la interacción del ingeniero en formación con los diferentes procesos estudiados, y para esto; la creación de módulos y maquinaria de prueba que permita relacionar lo visto en clase con la experimentación.

Por esto, la necesidad de implementar un módulo para el tallado de engranajes plásticos rectos mediante fresa madre, el cual suministrará a un banco de pruebas creado anteriormente para medir las propiedades de engranajes y permitirá ver al estudiante de diseño de manera práctica conceptos como: engranajes rectos plásticos y su diferencia con los metálicos, ventajas y desventajas del tallado de engranajes con fresa madre. Al final el profesor y el estudiante podrán ver una serie de variables con las cuales el módulo permite interactuar y que conlleva a una retroalimentación académica, que es el objetivo principal del mismo.

1. FORMULACION DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

El desarrollo a nivel mundial en cuanto a innovación industrial en la parte de fabricación de máquinas, ha llevado a una constante investigación en materiales, herramientas y en general cualquier recurso que permita mejorar un determinado proceso y lo lleve a un nivel óptimo en cuanto a servicio, confiabilidad y calidad. Dicho cambio es motivado por la creciente globalización e industrialización de procesos, en especial aquellos que puedan presentar riesgos o dificultades que el ser humano no pueda resolver de manera inmediata. Factores como la conservación del medio ambiente y la automatización industrial, han sido en los últimos años prioridades determinantes en la elaboración e implementación de nuevos diseños y procesos de fabricación de todo tipo de maquinaria.

Los engranajes han tenido un lugar importante desde los inicios de nuestra civilización, según existen registros de las primeras ruedas dentadas en parte de la literatura china y griega, así como Aristóteles en el siglo IV a.C mencionó aplicaciones con ruedas dentadas y Arquímedes (287-212 a.C) al cual se le atribuye el origen de los tornillos sinfín¹. Hoy en día siguen siendo componentes importantes de innumerables máquinas y productos en la industria metalmecánica, automotriz, aeroespacial y en muchas otras áreas de fabricación, lo cual resalta la necesidad de conocer sus principios básicos de funcionamiento como punto de partida para conocer sus ventajas y alcances con el propósito firme de aprovechar dichos recursos y complementarlos con la tecnología actual.

¹ RODRÍGUEZ, Felipe Díaz. Cuautitlán Izcalli. Engranajes: Historia, Fabricación y Fallas En: Lecturas de Ingeniería 22.Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.Pág. 3. Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Engranes%20historia%20fabricacion%20fallas.pdf

Siguiendo la línea de investigación en cuanto a engranajes rectos fabricados en materiales plásticos se conocen aplicaciones interesantes; así como escasa información en cuanto a propiedades y comportamiento de los engranajes bajo condiciones especiales de carga. Por esto y motivados a complementar la información y estudio otorgado en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, se quiere construir un montaje que permita interactuar directamente con la fabricación de engranajes plásticos mediante fresado por generación, concepto que en los últimos años ha ganado terreno por sus características.

Además del estudio de las propiedades y el comportamiento de los engranajes en el banco de pruebas para análisis de fallas² ubicado en el laboratorio de la materia Diseño de Máquinas II, el cual fue construido en el año 2015 con el objetivo de ver los resultados combinando variables como: el tipo de material (acetal, Policloruro de vinilo y nylon) y el módulo de los engranajes a fabricar, es necesario proporcionar un complemento para dicho banco que permita a los estudiantes ahorrar dinero en el mecanizado de los éstos, los cuales servirán para las prácticas de la materia, que generalmente eran mandados a hacer en talleres generando inconvenientes de tipo económico en la mayoría de los estudiantes.

² CRISTANCHO Alvaro. HIDALGO Jean Pierre. DESARROLLO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EL ANÁLISIS DE FALLAS EN ENGRANAJES PLASTICOS, Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2015

1.2 JUSTIFICACION PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Con el fin de integrar el conocimiento dado en las materias de diseño, materiales y procesos de manufactura entre otras, se quiere realizar un montaje que permita al estudiante poner a prueba el concepto desarrollado en clase mediante el conocimiento y fabricación de engranajes rectos plásticos; todo esto con dos propósitos importantes. El primero es aportar en gran medida al cumplimiento de la misión de la escuela de Ingeniería Mecánica formando profesionales con bases sólidas en cuanto a aprendizaje e investigación. La segunda razón en especial, es proporcionar al laboratorio de la materia de Diseño de Maquinas II un módulo que mediante la interacción del estudiante en fabricación de engranajes por fresado por generación, termine por comprobar con dicha pieza diseñada por él su estudio en cuanto a fallas en engranajes plásticos; la cual ya se venía llevando a cabo por medio de la adquisición de engranajes mandados a fabricar en diferentes tipos de plásticos para su estudio.

Lo descrito anteriormente representaba limitantes económicas o de tiempo para programar y llevar a cabo las prácticas propuestas por el docente, dejando muchas veces atrás la parte experimental de la materia, siendo ésta de vital importancia para la formación del futuro ingeniero mecánico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Aportar con la formación educativa de los estudiantes de Ingeniería Mecánica; mediante el diseño y construcción de una máquina para la fabricación de engranajes rectos plásticos necesaria en el estudio del diseño, propiedades mecánicas y fabricación de éstos, temas estudiados en la materia de diseño de Máquinas II.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ▶ Diseñar y construir un módulo para la fabricación de engranajes rectos plásticos, utilizados en un banco de pruebas para el estudio de sus propiedades mecánicas en el laboratorio de Diseño de Máquinas que cumpla con las siguientes características:
 - Implementación de un sistema de transmisión adecuado para la sincronización de la velocidad de rotación entre los ejes principales de la herramienta y el cilindro base del engranaje.
 - Pruebas con engranajes de materiales plásticos como Nylon, Acetal y Policloruro de vinilo.
 - Ensayos con engranajes de módulo 4 milímetros.

- ▶ Diseñar y construir una herramienta para tallado de engranajes rectos plásticos por fresado por generación.

- ▶ Implementar una práctica donde se puedan ver los resultados en cuanto a mecanizado de los engranajes rectos y el funcionamiento de las herramientas.
- ▶ Desarrollar el manual de uso y las guías respectivas para la adecuada utilización de la máquina, donde se establecen los procedimientos de montaje, funcionamiento y capacidad de la misma.

2. ENGRANAJES, FALLAS Y FABRICACIÓN

2.1 HISTORIA

Desde hace siglos se tenía conocimiento sobre la transmisión de movimiento por medio de poleas, cuerdas y engranajes. Y precisamente hablando de estos últimos, se conoce que entre el año 150 y el 100 a.C fue fabricada una calculadora astronómica hecha de engranajes de bronce con dientes en forma triangular, conocida con el nombre de Anticitera. Registros también indican una máquina antigua en China (120 – 250 d. C) conocida como “carro que apunta al sur” creada por el ingeniero chino Ma Jun, el cual estaba compuesta de una serie de engranajes montados en un sistema diferencial, con el objetivo de mantener mecánicamente una figura señalando siempre hacia el sur (ver figura 1). Además de manuscritos encontrados en el siglo XI donde se tienen registros de fabricación de relojes mecánicos que a su vez se emplearon para su construcción en grandes edificios y catedrales para la época del renacimiento, existen bosquejos de Leonardo da Vinci (1452 -1519) de mecanismos que en la actualidad tienen mucha importancia como lo engranajes tipo sinfín – corona.

Figura 1. Engranajes cónicos rectos



Fuente: Antecedente mecánico de la brújula. Disponible en: <http://www.cabovolo.com>

Solo hasta el año 1695 se emplean engranajes para transmitir movimientos de rotación con velocidad angular uniforme, y todo gracias el astrónomo Olaf Roemer (1644 – 1710) que propuso el perfil de diente en epicicloide; donde consiste en generar una curva por medio de la trayectoria de un punto que pertenece a una circunferencia (generatriz) que rueda, por el exterior de otra circunferencia que hace de base o (directriz), todo estos sin deslizamiento alguno y fue un profesor de Cambridge llamado Robert Willis (1800 -1875) quien empleo la epicicloide en la construcción de engranajes intercambiables.

Se cree que en 1695 Phillipe de Lahire dió a conocer el perfil de diente en evolvente, donde el físico e inventor Leonard Euler (1707- 1783) usó dicho conocimiento en una invención práctica en 1767 y el también ingeniero mecánico nombrado anteriormente Robert Willis quien inventó el odontógrafo, aparato que sirve para el trazado del perfil de evolvente. A medida que pasaron las décadas, las máquinas para la fabricación de engranajes fueron apareciendo, por ejemplo, en 1844 Joseph Whitworth con una para crear engranajes con perfil de evolvente con fresa de forma. Luego de la Primera Guerra Mundial se impulsó el uso de las máquinas herramientas con control numérico, donde se pretendía combinar los movimientos de la herramienta y la pieza a generar.

En 1947 John Parsons, con la idea de un mando automático mediante la utilización de cintas perforadas y un lector de señales crea un sistema, el cual en conjunto con Massachusetts Institute of Technology (MIT) y el gobierno norteamericano impulsan el desarrollo de una fresadora de tres ejes con control digital. Luego de cinco años de trabajo aparece el término oficial “Numerical control”. Por otro lado, en 1959 se presentó la fresadora Milwaukke-Matic-II, la cual se convertiría en la primera máquina herramienta con intercambiador de herramienta.

2.2 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Un engranaje se define como un elemento mecánico de forma cilíndrica o cónica que posee dientes o ranuras usados para transmitir potencia o movimiento giratorio. Generalmente la transmisión de movimiento se produce entre dos ejes, gracias al contacto de dos engranajes que comparten la misma línea de acción, generando así una relación de velocidades constante o si es el caso aumentar el par generado. Por denominación por cada par de engranajes, al más pequeño involucrado en la transmisión se le llama piñón y al otro se le conoce como rueda. El tipo de engranaje (forma y montaje) usado en una transmisión dada se define según los requerimientos del sistema como son la orientación de los respectivos ejes, del movimiento a generar, la eficiencia del sistema, equipos para su fabricación, limitación de espacio, entre otros. Por ejemplo, si se quiere una transmisión con poca pérdida de potencia, se prefieren los engranajes cilíndricos rectos o si los ejes de la transmisión se interceptan; resulta recomendable usar engranajes cónicos.

Figura 2. Engranajes cónicos rectos



Fuente: Havlik engranajes, Agosto 2018. Disponible en: <http://www.engranajes-havlik.com>

Para ver de una manera simplificada los diferentes tipos de engranajes a continuación se nombran algunas características, según su clasificación de acuerdo a la orientación de los ejes así:

2.2.1 Para ejes paralelos. En este grupo se encuentran los engranajes cilíndricos rectos y los cilíndricos helicoidales. Los engranajes cilíndricos rectos son los de mayor uso en la industria debido a su simplicidad y bajo costo de fabricación. De dientes rectos y paralelos al eje de giro, usados normalmente a velocidades bajas y medias de operación y presentan un alto nivel de ruido.

En los engranajes helicoidales sus dientes se encuentran a un ángulo definido con respecto a su eje de rotación (ver figura 3). En comparación con los anteriores, su fabricación es más costosa y compleja, suelen operar a grandes velocidades teniendo la ventaja de transmitir mayor potencia y ser silenciosos en operación, además que pueden transmitir movimiento entre ejes que se corten.

Figura 3. Engranaje cilíndrico helicoidal



Fuente: Metalmecánica fácil. Agosto 2018. Disponible en: <http://www.metalmecanica-facil.mahtg.com>

2.2.2 Para ejes que se cortan. Aquí se tienen engranajes cónicos rectos, engranajes cónicos de dientes helicoidales y los engranajes cónicos hipoides. Los cónicos de dientes rectos son usados para conectar ejes que se cortan y que generalmente lo hacen a 90°, aunque dicho ángulo puede variar. Son fabricados en parejas, pues no son intercambiables.

Para reducción de velocidad se utilizan los cónicos de dientes helicoidales, los cuales tiene mayor superficie de contacto y en operación son más silenciosos con

respectos a los cónicos rectos. Finalmente, los cónicos hipoides son más resistentes que sus similares helicoidales, gracias a que el piñón está descentrado con respecto a su respectiva rueda, de igual manera reduciendo el ruido en operación.

2.2.3 Para ejes que se cruzan. Existen engranajes helicoidales cruzados y el mecanismo tornillo sinfín-corona. Los primeros se conocen también como engranes espirales y aunque en apariencia son similares a los helicoidales tradicionales; su diferencia está en que los dientes que se encuentran o casan se deslizan sobre los otros a medida que giran, generándose una velocidad de deslizamiento que aumenta al crecer el ángulo de los ejes (ver figura 4). El tornillo sinfín-corona se emplea para ejes que se cruzan y lo hacen normalmente a 90° . Tiene la ventaja de transmitir grandes potencias y el ruido en operación es bajo aunque presenta poca eficiencia como mecanismo. Tiene la desventaja de no ser reversible y de sufrir de desgaste excesivo.

Figura 4. Engranaje helicoidal cruzado



Fuente: Industria e ingeniería. Junio 2018. Disponible en: <http://www.sitenordeste.com>

2.2.4 Mecanismo especiales. Uno de los más importantes es el piñón-cremallera formado por un engranaje de dientes rectos y una barra dentada la cual se considera como un engranaje de diámetro infinito, los cuales en conjunto sirven para transformar el movimiento de rotación en movimiento lineal o viceversa.

El engranaje planetario o epicicloidal es un sistema, formado por un engranaje central y uno o varios engranajes externos que rotan alrededor del planetario o central ubicados en una corona con dientes internos. El tren de engranajes se monta sobre un brazo móvil que gira libremente. La relación de transmisión depende principalmente de los tres componentes que forma el epicicloidal: el sol o engranaje central, el porta-planetas o brazo móvil y la corona o anillo.

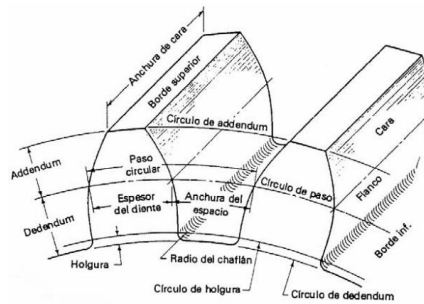
2.3 GEOMETRÍA Y MATERIALES PARA ENGRANAJES

Con respecto al perfil del diente de los engranajes se pueden distinguir dos tipos importantes y estandarizados como son el perfil epicicloidal y el de involuta.

Una de las diferencias importantes entre estos dos perfiles consiste en que los engranajes con dientes en evolvente pueden seguir en correcto funcionamiento; es decir con velocidad angular constante al modificar la distancia entre centros. La facilidad en cuanto a fabricación gracias a la curva continua en los flancos del diente y la solidez del mismo, han propiciado su consolidación en los distintos tipos de engranajes fabricados a nivel industrial.

2.3.1 Nomenclatura del diente. La generación del perfil de diente de involuta se encuentra de manera explícita en textos de ingeniería y diseño, donde gracias a estos procedimientos se logra tener las magnitudes que definen el diente, como el espesor del mismo. Con respecto a las dimensiones más importantes que permiten definir el diente y mediante un esquema (ver figura 6) a continuación, se presenta la nomenclatura:

Figura 5. Nomenclatura del perfil de un diente



Fuente: Teoría de mecanismos. Julio 2018. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica>

Módulo (m): valor que indica cuántos milímetros corresponden en el diámetro primitivo a cada diente. Usado en el SI para determinar el tamaño del diente y normalización de los engranajes.

Ángulo de presión (α): es el ángulo formado por una línea normal común en el punto de contacto de dos engranajes con la perpendicular a la línea de centros en dicho punto sobre el diámetro primitivo.

Diámetro primitivo (D_p): es la circunferencia clave para los cálculos entre dos rueda que engranan. Se define como el producto del módulo por el número de dientes.

$$D_p = m \cdot z$$

Diámetro exterior (D_e): o círculo de Addendum que limite los dientes por el exterior.

Diámetro de raíz (D_r): círculo de Dedendum que limita los dientes por el interior.

Paso circular (p_c): distancia sobre la circunferencia primitiva entre dos puntos iguales de dientes consecutivos. Se expresa en función del diámetro primitivo y el número de dientes del engranaje.

$$p_c = \pi \cdot m$$

Espesor del diente: medida del ancho del diente sobre la circunferencia primitiva.

Adendum (a): también llamado altura de cabeza, es la distancia radial entre la circunferencia primitiva y la circunferencia de exterior (de cabeza).

Deddendum (b): o altura de pie de diente comprendida entre la circunferencia de raíz y la circunferencia primitiva.

Holgura: es la diferencia entre el Addendum del diente de la rueda y el Dedendum del diente del piñón.

Cara del diente: parte de la superficie lateral del diente por encima de la circunferencia primitiva

Flanco del diente: parte de la superficie lateral del diente por debajo de la circunferencia primitiva.

Anchura de espacio: distancia entre dos dientes consecutivos medida sobre el diámetro primitivo.

Profundidad del diente (h_t): es la altura del diente. La suma del Adendum y el Dedendum.

2.3.2 Materiales. En muchos casos la elección del material para fabricar un engranaje está en sus propiedades mecánicas como la resistencia al desgaste, tenacidad, resistencia al impacto y en la función que dicho elemento vaya a desempeñar; es decir si será sometido a grandes cargas, grandes velocidades o a las necesidades del entorno de trabajo como un nivel de ruido permisibles, bajo peso, resistencia a la corrosión, etcétera.

Todas estas características permiten evaluar qué clase de material es el indicado y además mejorar ciertas de sus propiedades con la ayuda de tratamientos térmicos como en el caso de aceros, hierros fundidos y aleaciones donde el endurecimiento superficial resulta importante para la optimización de su funcionamiento.

2.3.2.1 Aceros, Bronce y Hierro. El acero se utiliza cuando los esfuerzos a transmitir, la durabilidad en operación y la resistencia al desgaste requieren un valor alto. Los aceros más usados son los bajo y medio carbono que son sometidos a endurecimiento superficial mediante flama, endurecimiento por inducción, carburización o nitruración con el objetivo de dar una alta dureza a los dientes del engrane.

En el endurecimiento por flama e inducción, utilizado generalmente en aceros de medio carbono consiste en un calentamiento a nivel local por toda la superficie de los dientes mediante flamas generadas por gas a valores elevados de temperatura o por bobinas de inducción eléctrica donde finalmente la dureza debe estar entre [50 – 54] HRC (Rockwell C). La carburación consiste en calentar acero con carbono a un promedio de 900°C durante 4 o 6 horas, al final el carbono penetra la superficie de la pieza a endurecer proporcionando una dureza de [55 – 64] HRC. En la nitruración se obtiene una superficie muy dura, aunque delgada por lo que no es recomendable para operaciones donde el engranaje esté sometido a grandes cargas y a un desgaste excesivo. Este proceso se lleva a cabo en horno donde la pieza se calienta con amoníaco a temperaturas cercanas a los 500°C.

Figura 6. Endurecimiento superficial por flama



Fuente: Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=APUSolKgBY0>

Cabe destacar que la gran variedad de bronce se definen por el contenido de los componentes de cobre y estaño, además de los posibles elementos añadidos como el fósforo, estaño, manganeso, aluminio entre otros. Poseen características favorables como mínimo desgaste, bajo coeficiente de fricción y resistencia a la corrosión. La fundición gris que es una aleación de hierro con más de 1.7% de carbono, es económica y muy empleada en construcción de máquinas. A pesar de la baja capacidad de carga que tiene, no es sensible a la entalladura y posee una resistencia a la tracción en caliente estable hasta los 400°C. El hierro maleable que se obtiene por fusión del hierro blanco y un recocido posterior a la fundición presenta tenacidad adecuada y es de fácil maquinado.

Finalmente Faires³ recomienda: por economía los engranajes en fundición gris, si el ambiente exige alta resistencia seleccionar un tratamiento térmico adecuado para dicho material. Los aceros forjados y con contenido de carbono entre [0.30 - 0.50] % son también económicos, aunque no son muy resistentes al desgaste. Si los engranajes van a someterse a temple, se prefiere que su contenido de carbono esté entre [0.35 - 0.6] %, donde los más empleados son el AISI 5140, 4037, 4140, 8640, 8740 y el 3135. El proceso de temple por flama para dientes de engranajes necesita ensayos. Las raíces de los dientes templados por inducción pueden no ser completamente endurecidas y por tanto, los dientes pueden disminuir su

³ MORING FAIRES, Virgil. Diseño de Elementos de Máquinas. Barcelona: Montaner y Simon. 4 edición. cap 13

resistencia a la fatiga por flexión. El rectificado tiene a dejar esfuerzos residuales de tracción.⁴ A pesar de su alto costo, en caso engranajes con altas exigencias de operación se recomienda emplear la nitruración.

2.3.2.2 Polímeros. Tipos y características. Son compuestos presentes en la naturaleza generalmente formados por largas cadenas de moléculas de carbono, el más conocido es el hule natural que en 1839 se vulcanizó por primera vez por Charles Goodyear. En 1870 fue registrado el celuloide gracias a John Hyatt quien utilizó los conocimientos previos realizados por Alexander Parkes en 1862, el celuloide fue un compuesto de nitrato de celulosa y alcanfor con el que se desarrollaron aplicaciones como en películas de fotografía y en parabrisas de los primeros automóviles.

El primer plástico sintético fue la bakelita, descubierto a principios del siglo XX. En 1912 un inventor ruso llamado I. Ostromislensky dio a conocer las bases para la polimerización de cloruro de polivinilo pero sólo hasta 1927 fue comercializado como recubrimiento en paredes. En 1928 la compañía DuPont en estados Unidos, dio a conocer la síntesis de una poliamida que recibió el nombre de Nylon, producida y llevada al mercado a finales de los años treinta. Años después vendría el desarrollo de polímeros de gran importancia en la industria como el teflón, los poliuretanos (1943), las resinas epóxicas (1947), el propileno (1957). Los polímeros utilizados en la industria actualmente se sintetizan gracias a diversos procesos químicos y se clasifican de acuerdo a su estructura molecular como termoplásticos, termofijos o elastómeros, los cuales se describen a continuación.

- Termoplásticos (TP): Son polímeros económicos y fáciles de maquinar. A temperatura ambiente se encuentran en estado sólido pero luego de someterse a un aumento de cientos de grados se convierten en líquidos viscosos.

⁴ MORING FAIRES, Virgil. Diseño de Elementos de Máquinas. Barcelona: Montaner y Simon. 4 edición. cap 13, pagina 502.

Permiten ser llevados a ciclos de calentamiento y enfriamiento volviendo a su estado original, sin que se degrade el material.

Los termoplásticos típicos con respecto a los metales y cerámicos tienen menor rigidez, ya que el módulo de elasticidad es entre dos y tres veces más bajo. Su resistencia a la tensión es 10% menor comparándola con la de los metales, ductilidad alta y valores de dureza bajos. En general sus propiedades mecánicas dependen de la temperatura.

Comparando los valores en cuanto a las propiedades físicas con los metales tienen densidades bajas, coeficientes de expansión térmica aproximadamente de cinco veces más, temperaturas de fusión bajas, valores de calores específicos de tres a cuatro veces mayores, la conductividad térmica alrededor de valores tres veces más bajos. Además de propiedades de aislamiento eléctrico.

- Termofijos (TS): Los caracteriza su estructura molecular en forma de cadenas que forman enlaces covalentes tridimensionales. A diferencia de los termoplásticos estos no resisten ciclos de calentamiento y enfriamiento repetidos, son más rígidos, tienen módulos de elasticidad más grandes. Son polímeros frágiles; es decir con valores de ductilidad muy bajos, soportan temperaturas más altas que los termoplásticos y no pueden ser refundidos pues tienden a quemarse o degradarse.
- Elastómeros: o hules como se les conoce, son polímeros que pueden someterse a grandes deformaciones elásticas, con esfuerzos bajos capaces de retornar a su forma original. Se divide generalmente en hule natural, derivado de algunas plantas y polímeros sintéticos.

Tabla 1. Materiales plásticos utilizados para fabricación de engranajes

Nombre	Polímero y Símbolo	Módulo de Elasticidad	Características
Acetal	Polioximetileno o poliactal (OCH_2) _n POM	3500 Mpa	Valores altos de rigidez, resistentes químicamente, tenacidad y resistencia al desgaste. Baja absorción de la humedad. Bajo punto de fusión.
ABS	Terpolímero de acrilonitrilo ($\text{C}_3\text{H}_3\text{N}$), butadieno (C_4H_6) y estireno (C_8H_8)	2100 Mpa	De muy buenas propiedades mecánicas, como su gran tenacidad inclusive a bajas temperaturas (hasta -40°C). alta resistencia a la abrasión. Además puede recubrirse con baños de metal con facilidad.
Nylon	Nylon 6,6 $[(\text{CH}_2)_6(\text{CONH})_2(\text{CH}_2)_4]_n$ PA-6,6	700 Mpa	Miembro de la familia de las poliamidas. Resistente, altamente elástico y tenaz, resistente a la abrasión y autolubricante. Mantiene sus propiedades mecánicas a temperaturas cercanas a los 125°C . De los mejores materiales para engranajes y cojinetes donde la fricción y la resistencia sean baja.
PTFE	Politetrafluoroetileno (C_2H_4) _n	425 Mpa	También conocido como teflón. Tiene alta resistencia a ambientes corrosivos. Coeficientes de fricción bajos. Buenas propiedades eléctricas, buena resistencia al calor.
Polipropileno	Polipropileno (C_3H_6) _n PP	1400 Mpa	Usado especialmente para moldeo por inyección. Tiene tendencia a ser oxidado.
Cloruro de polivinilo	Cloruro de polivinilo ($\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl}$) _n - PVC	2800 Mpa	Inestable al calor y la luz. Dúctil y de gran tenacidad. Elevada resistencia a la abrasión. Amplios valores de dureza.

Fuente: GROOVER, MIKELL. Fundamentos de manufactura moderna. México: Editorial Prentice Hall, 1997.p. 232

En la tabla 1 se muestran los plásticos más usados en la industria para fabricación de engranajes junto su fórmula química y características generales. El uso creciente de los plásticos en la industria es gracias a las propiedades que exhiben

frente a los metales; por ejemplo, los plásticos se pueden moldear sin la necesidad de mecanizados posteriores. El proceso más empleado para fabricar engranajes resulta el moldeo por inyección. Debido a la baja resistencia que presentan los engranajes plásticos, son una opción adecuada gracias a su baja densidad, alta resistencia a la corrosión y su peso ligero. Además, requieren menos energía que los metales en cuanto a fabricación, debido a que las temperaturas de operación son más bajas en los plásticos.

2.3.3 Fallas en engranajes Plásticos. Como se mencionó anteriormente el funcionamiento de engranajes plásticos difiere de sus similares metálicos debido a sus propiedades mecánicas. Ahora se hace referencia a las modificaciones geométricas en la forma del diente que se presentan en el diseño con materiales plásticos, y el tipo de fallas que son propias en estos engranajes y que se explican a continuación.

La norma AGMA 1106 – A97 “Proporciones en los dientes de engranajes plásticos”, establece un perfil de diente para engranajes y propone incluir un factor de corrección estimado para ser considerado en el diseño el cual afectará la resistencia a la flexión de los engranajes.

2.3.3.1 Desgaste adhesivo. Se produce generalmente cuando en el contacto de dos engranajes en funcionamiento hay partículas de material que se une de una rueda a otra debido al contacto entre ellos. Cuando se tiene engranes de materiales distintos, dicho desgaste es menos probable, en cambio para ruedas en plásticos se recomienda recubrir una de éstas con (PTFE) el cual disminuye el desgaste sin la necesidad de usar lubricación.

2.3.3.2 Desgaste Abrasivo. Ocurre arranque de material que afecta la superficie del engranaje debido a partículas propias del mismo o de suciedad presente en el ambiente. Para prevenirlo se recomienda evaluar las condiciones de funcionamiento del sistema como condiciones de operación, fuerzas generadas, ambiente externo.

2.3.3.3 Flujo Plástico. Este tipo de desgaste suele ocurrir cuando las condiciones de funcionamiento son demasiado exigentes dando lugar a altas fuerzas de contacto generando así deformación plástica de la superficie del engrane. La fluencia del material, la alta temperatura de operación hace que los dientes y las superficies cercanas tiendan en los peores casos a fundirse. Para prevenir este fenómeno se recomienda en algunos casos una adecuada lubricación o revisar las velocidades de operación para reducir la cantidad de calor generado por fricción.

2.3.3.4 Fractura. Falla provocada por sobrecargas de trabajo que afectan la resistencia del material en los dientes generando tensiones (ver figura 9), usualmente ocurren en la raíz del diente y tiende a propagarse por este. El desgaste se puede reducir en operación mediante adecuada lubricación del montaje.

Figura 7. Fractura de dientes en engranajes



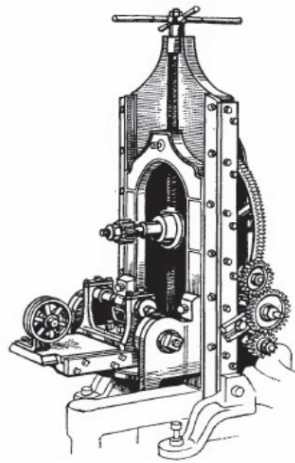
Fuente: MOYA, Jorge. Influencia de la geometría del diente en la resistencia de los engranajes plásticos

2.3.3.5 Picadura. Producida en la superficie del engrane debido a cargas altas y ciclos de esfuerzos repetitivos que exceden el límite de resistencia del material, donde al final se desprende material. Es una falla que en materiales plásticos no se suele presentar.

2.4 MÉTODOS DE FABRICACIÓN DE ENGRANAJES

2.4.1 Historia. La producción de engranajes en masa surgió con la invención de máquinas y patentes de dispositivos de corte que tenían como objetivo mecanizar piezas en forma económica. Este fenómeno comenzó con herramientas que usaban un cortador de forma con la función de fresar el espacio entre dientes, generando al final el perfil del diente. Fue entre 1810 y 1850 Richard Roberts el primero en fabricar una máquina cortadora de engranajes⁵ (ver figura 8), mediante cortadores giratorios.

Figura 8. Máquina cortadora de engranajes de Richard Roberts



Fuente: DÍAZ DEL CASTILLO, Felipe. Engranajes: Historia, Fabricación y Fallas. Departamento de Ingeniería. Lecturas de ingeniería, 2013, volumen 22

⁵ DÍAZ DEL CASTILLO, Felipe. Engranajes: Historia, Fabricación y Fallas. Departamento de Ingeniería. Lecturas de ingeniería, 2013, volumen 22. Disponible en: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Engranajes%20historia%20fabricacion%20fallas.pdf

También se destaca el fresado de engranajes rectos mediante fresa madre descubierto en 1856 por Christian Schiele. En 1874 William Gleason inventó la primera fresadora de engranes cónicos, el cual años más tarde se convertiría junto a sus hijos en unos de los fabricantes más importantes en el mundo de máquinas herramientas. En 1897, Robert Hermann Pfauter (1885 – 1914) inventó una máquina universal para fabricar engranajes rectos y helicoidales mediante fresa madre (ver figura 9). Dicha patente fue el comienzo de una multinacional reconocida a nivel mundial por sus desarrollos en cuanto a máquinas-herramientas.

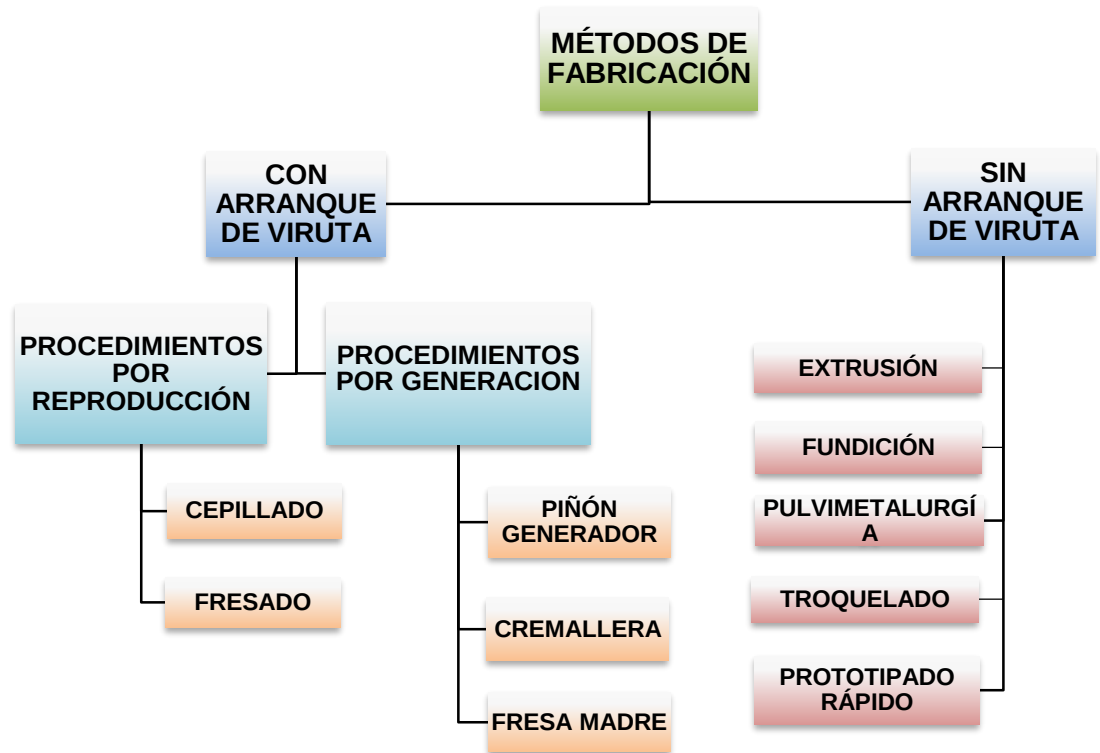
Figura 9. Máquina de mecanizado de engranajes por fresa madre



Fuente: DÍAZ DEL CASTILLO, Felipe. Engranajes: Historia, Fabricación y Fallas. Disponible en:
<http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx>

2.4.2 Clasificación. Según la técnica empleada para el maquinado de engranajes, se presenta en la siguiente figura los principales procesos:

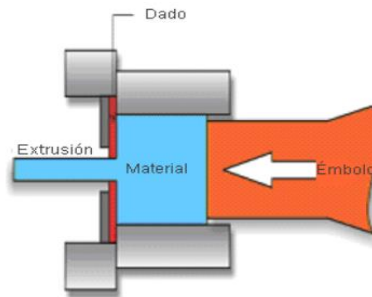
Figura 10. Clasificación de los métodos de fabricación de engranajes



2.4.2.1 Fabricación sin arranque de viruta

- Extrusión. Es un proceso de formado en el cual el material base de la pieza o engrane es desplazado a presión a través de uno o varios dados (pieza con la forma deseada) donde al final se obtiene el dimensionamiento del engranaje. Se pueden fabricar engranajes con diferentes formas, lo primordial es definir el dado o matriz con la geometría requerida. Se recomienda usar materiales maleables como aluminio, bronce, plásticos, aceros al carbono; ya sea en frío o en caliente.

Figura 11. Extrusión



Fuente: GROOVER, MIKELL. Fundamentos de manufactura moderna. México: Editorial Prentice Hall, 1997.p.331

- Fundición. Consiste en el vaciado del material del engrane en un molde mediante el calentamiento previo del material. También está el moldeo por inyección, proceso usado con metal fundido donde bajo presión se llena un molde o matriz dejando que se solidifique el metal. Dentro de las variaciones posibles de la fundición está el tipo de molde y sus características (molde cerrado o abierto, molde desechable o permanente) encontrando procedimientos como colado en arena, moldeo en cáscara, entre otros. Una desventaja al obtener el engranaje fundido es la rebaba o sobrantes que el molde pueda dejar. Para ello es necesario rectificar o pulir la pieza final.
- Pulvimetalurgia. Es un tipo de moldeo por inyección en el que se utiliza polvos metálicos mezclados con aglomerantes para la formación de pellets, los cuales se calientan a una temperatura establecida y se inyectan en un molde donde finalmente se extraen los aglomerantes de la mezcla y se sinteriza el producto final.

- Troquelado. Es un conformado realizado por la acción de un troquel que tiene la forma y dimensiones que se quieren realizar sobre una matriz con el material del engrane o pieza final. Como proceso industrial es bastante limitado, debido su precisión y características mecánicas.
- Prototipado rápido. Consiste en la impresión de material capa por capa mediante su sinterizado por medio de rayos láser de infrarrojos con la previa configuración de la forma de la pieza deseada (prototipo) mediante un software. Gracias a este proceso se prescinde de moldes que muchas veces resultan ser de elevado costo. Se permiten obtener piezas en distintos materiales como plásticos, metales o cerámicas.

2.4.2.2 Fabricación con arranque de viruta. Dentro de esta categoría están los procesos de maquinado que utilizan herramientas de corte para la conformación de los dientes de engranajes. el procedimiento por reproducción o copia se caracteriza porque la forma de la herramienta define parte de la geometría del engrane, generalmente es el espacio entre dientes. en los procedimientos de tallado por generación la característica en común es la obtención del perfil del diente que se da por medio de la generación del perfil de evolvente con una herramienta de corte de perfil rectilíneo.

- Cepillado. Es realizado con los perfiles cortantes de una cuchilla, que corresponden con el contorno del hueco interdental del engranaje a tallar⁶. A medida que se va maquinando cada espacio la pieza base va girando, ubicándose en su próxima posición con la ayuda de un divisor. Debido a la precisión necesaria en cada movimiento del engranaje en proceso y a los largos tiempos de mecanizado no suele ser muy empleado en producción en masa.
- Fresado. En este procedimiento se usa una herramienta estandarizada, “la fresa de forma” (ver figura 12) de igual manera cumple con la función de maquinar los espacios interdentales de los engranajes para un módulo determinado en la medida que la pieza base gira un ángulo igual a $1/z$ de vuelta terminando un hueco.

Figura 12. Maquinado de Fresa de forma



Fuente: Sandvik Coromant. Julio 2018. Disponible página web
<https://www.sandvik.coromant.com/>

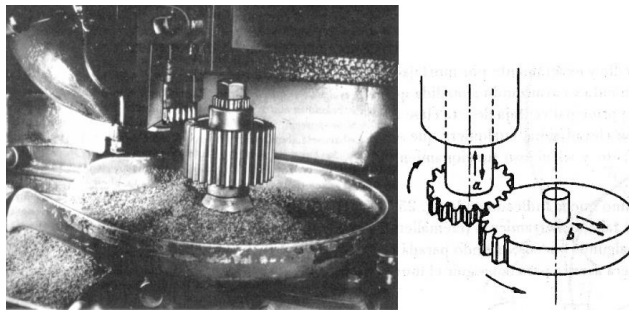
La gran desventaja es que cada fresa se fabrica para un número de dientes y módulo definido, así para cada engranaje es necesario cambiar el tipo de fresa pues el espacio entre dientes también varía, además que resulta económicamente inviable.

⁶ Ibíd, pág 45.

- Piñón generador. Como lo señala su nombre, en este caso se elige una rueda dentada como herramienta de corte aprovechando el perfil de evolvente que ésta tiene en sus dientes. Mientras el piñón rueda sobre la pieza y se mueve axialmente para cubrir el ancho del engrane la pieza, la pieza gira obedeciendo la relación de velocidades entre ellos, logrando al final el perfil completo de los dientes en la pieza base.

Como ventaja, cabe señalar que el proceso de maquinado es continuo y permite fabricar engranajes de igual módulo con diferente número de dientes. De otro lado el piñón generador exige una alta precisión en cuanto a su diseño y elaboración, lo cual puede generar costos elevados.

Figura 13. Tallado con piñón generador

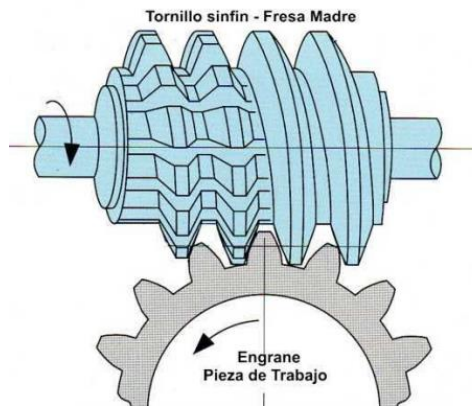


Fuente: Teoría de mecanismos. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en:
<http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica>

- Generación con cremallera. El movimiento de la herramienta en dirección del eje de la pieza base le permite maquinar el ancho completo de los dientes del engranaje y al mismo tiempo la pieza gira para que el perfil de evolvente del cortador en forma de cremallera vaya generando los dientes. Una característica importante en cuanto al posicionamiento de pieza- herramienta es que la circunferencia de la pieza sea tangente con la línea primitiva de la cremallera. Al cortar un tramo de la rueda, ésta se hace girar levemente y la herramienta se desplaza y se reposiciona para el siguiente movimiento de corte, lo cual se repite hasta dar por maquinado un diente. Gracias a la sencillez en la fabricación de la herramienta es un método utilizado actualmente, aunque el maquinado no sea continuo debido al cambio de posición de la cremallera.
- Generación con fresa madre. Su mayor característica está en que es una operación continua de corte en el que fresa y pieza base giran en sincronía para la obtención final de los dientes del engrane. Se describe la fresa madre como una herramienta de forma cilíndrica, con una ligera inclinación de sus dientes. Geométricamente similar a un tornillo sinfín (ver figura 13) pero con ranuras paralelas a su eje de rotación que definen las superficies de corte como herramienta.

Por la acción del perfil básico de la fresa, es decir la forma recta de los dientes en su vista frontal y el sucesivo corte de los filos de la herramienta siguiendo el perfil de evolvente se termina por crear la geometría final de los dientes en la pieza base. Además del movimiento axial de la fresa, en ocasiones es necesario que la pieza se desplace en dirección de su eje para permitir el maquinado de los dientes en todo el ancho del engrane.

Figura 14. Movimiento de fresa madre y pieza base



Fuente: DÍAZ DEL CASTILLO, Felipe. Disponible en: <http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx>

2.5 DEFINICIÓN FRESA MADRE

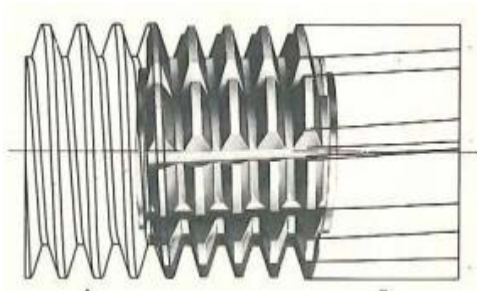
De la elección adecuada de la herramienta de corte o fresa madre y del movimiento de la misma en relación con la pieza base radica el éxito de este tipo de fresado, garantizando de este modo la creciente exigencia de un dentado de precisión, la productividad en su mecanizado, la duración de las herramientas empleadas, así como la disponibilidad de distintos y mejores materiales para dichas herramientas de corte. La forma de los dientes de la fresa, su construcción, las dimensiones y el material, además de otras variables que deben tenerse en cuenta para obtener una herramienta de corte óptima, se describen más adelante con detalle.

Para entender mejor su proceso de mecanizado se puede optar por visualizar la forma de un tornillo sinfín, considerando sus características como el ángulo de hélice, el diámetro exterior, paso axial, diámetro de raíz, número de entradas, ya que la fresa madre tiene en común todos estos parámetros; en el caso de fresa madre para dientes con perfil de evolvente son comunes también los diámetros de

la circunferencia primitiva y de la circunferencia base⁷. En otras palabras, el tornillo es la forma básica con la cual se empieza a diseñar la herramienta.

Posteriormente se divide el tornillo en varios tramos mediante la formación de ranuras; y es su intersección con la hélice del tornillo lo que determina los nuevos bordes de corte en la cabeza de los dientes de la herramienta (ver figura 18). Los flancos de los dientes se diferencian dependiendo del tipo de dentado y de los ángulos de corte. Es importante destacar que éstos bordes de corte ubicados en los flancos, en la cabeza y en la parte inferior de los espacios entre dientes (vanos) de la fresa conllevan a errores individuales o desviaciones, los cuales afectan de alguna manera la geometría de la fresa con respecto a la del tornillo.

Figura 15. Perfil de tornillo y fresa de hélice derecha.



Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 189

Las dimensiones básicas de una fresa con perfil de evolvente se establecen en la Norma DIN 867 (1963), y la Norma DIN 8000 (1962) recomienda un rango de valores para el número de ranuras, cantidad de cuchillas y total de dientes.

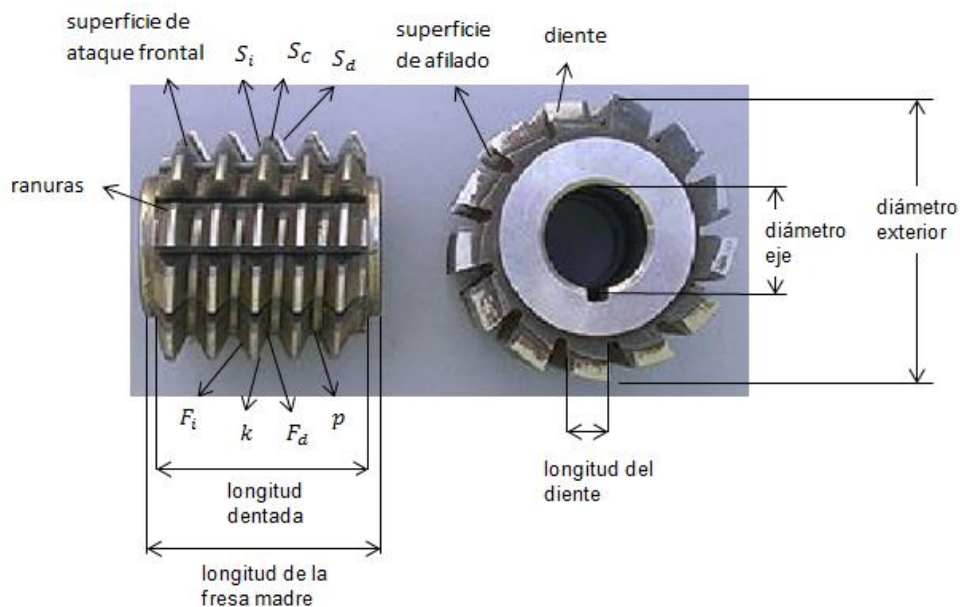
2.5.1 Geometría básica de una fresa madre. Es importante tener claro que el tipo de diente que se requiera en una pieza a fabricar; por ejemplo, en engranajes cilíndricos con perfil de evolvente, la forma básica del tornillo de la fresa en su

⁷ HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore. Per l'edizione italiana 1980.pag. 190,

sección transversal, debe tener también el perfil de evolvente del diente. Por otro lado, al hacer las ranuras al tornillo y formar los dientes de la fresa madre quedan definidos los bordes de corte de la herramienta y la superficie de ataque frontal, paralela a cada ranura realizada.

En la figura 18 se muestran las partes de la fresa madre que se tienen en cuenta en las normas establecidas para su diseño y construcción. Los bordes de corte (S_i , izquierdo; S_d , derecho y S_c , de cabeza). En cada uno de los dientes se señala su cabeza y pie (k y p) y sus flancos izquierdo y derecho (F_i y F_d)

Figura 16. Partes principales de una fresa madre



Fuente: Definición engranaje. Diciembre 2018. Disponible en <http://www.wikiwand.com>

En una fresa madre también se diferencian tres tipos de pasos: el del tornillo base y la fresa, el de las ranuras y el de los lados derecho e izquierdo de los dientes; de los cuales se hablan con detalle más adelante.

2.5.2 Tipos de Fresa Madre según su construcción. Se especifican dos grupos: fresas “integrales o enteras” es decir conformadas a partir de una sola pieza de material y fresas compuestas que como lo indica su nombre está dividida en varias partes. De igual manera en la figura 19, se nombran los distintos tipos.

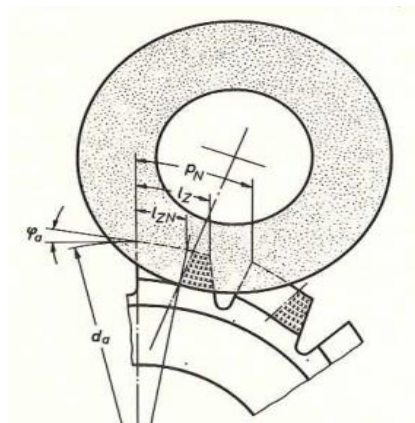
Figura 17. Clases de creadores por construcción



2.5.2.1 Fresa integral. La construcción de una herramienta de este tipo no es fácil, entre otras cosas por el endurecimiento de la misma lo cual resulta costoso y complejo. Si la fresa es de acero rápido: es necesario tener cuidado con el fin de evitar la generación de tensiones en la zona de unión entre los dientes y el cuerpo de la herramienta y reducir el peligro de rotura prematura de los dientes. También se debe verificar el perfil de los dientes y sus ángulos de corte, lo cual no siempre resulta ser una tarea sencilla. Según el tipo de mecanizado utilizado para obtener su forma final se tiene:

- Fresa Madre integral rectificada en tiras. Son herramientas de alta calidad. Se recomiendan para el acabado de dientes donde la necesidad es la ausencia de ruido de trabajo. La gran diferencia con respecto a las fresas torneadas en tiras es que son rectificadas luego de un endurecimiento superficial; lo que permite eliminar imprecisiones generadas en los procesos de mecanizado anteriores. Además, se obtienen unos valores de rugosidad menores en los flancos de los dientes lo que resulta ventajoso para la vida de la herramienta. Dentro de las desventajas que presentan está: la longitud de trabajo útil del diente, debido a que al final de cada uno de éstos se mantiene generalmente una “zona nula” en la cual la muela abrasiva utilizada para el rectificado no puede actuar sobre el perfil del diente (ver figura 21) con el fin de no interferir con los dientes de la siguiente hoja. La longitud del tramo ($L_Z - L_{ZN}$) depende del diámetro d_a (diámetro exterior) de la fresa, de la altura de los dientes, del paso, de las ranuras, de la longitud L_Z , de los dientes, de la inclinación de hélice γ^0 , del ángulo de inclinación de cabeza φ_a y del diámetro de la pieza base. Esta longitud es más pequeña cuando se hace más pequeño el ángulo de ataque del diente y el diámetro de pieza base.

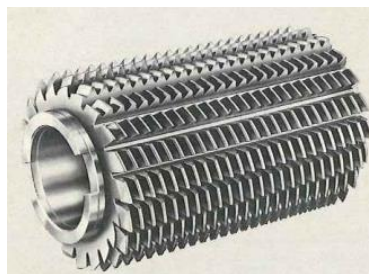
Figura 18. Limitación de la longitud total del diente y su zona útil



Fuente: Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 193.

- Fresa Madre integral torneada en tiras. Si la exigencia en cuanto a precisión es menor para maquinado de los dientes o si es el caso para el desbaste de ruedas que van posteriormente terminadas con otras herramientas, se puede emplear fresas torneadas en tiras en lugar de las rectificadas. En comparación con las rectificadas en tiras, la longitud útil de los dientes es mayor dado que la herramienta de torneado en el mecanizado puede acercarse mucho más al siguiente diente debido a su forma. De igual manera para módulos pequeños se obtiene un ahorro en su fabricación con respecto a las rectificadas en tiras. Para fresas torneadas, los ángulos de ataque pueden tener valores superiores, lo que facilita una mejor eliminación de viruta. En comparación con las rectificadas, las fresas torneadas en tiras tienen como desventajas la presencia de errores geométricos considerables y un aumento de la rugosidad de las superficies de corte.
- Fresa Madre torneada en tiras de precisión. Preferiblemente empleados en el mecanizado de dientes de engranajes de mayores exigencias. Son herramientas que se utilizan principalmente en pre-procesamiento de ruedas dentadas producidas en grandes series. Estas herramientas presentan un diente prolongado con un apoyo anterior (ver figura 19). Las ranuras pasantes proporcionan suficiente volumen libre para la viruta pero su ancho se reduce por el torneado en forma de tiras del diente.

Figura 19. Fresa Madre torneada de precisión



Fuente: Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 194

2.5.2.2 Fresa Madre compuesta. Uno de los principales objetivos con esta clase de fresas es la realización de herramientas cuyas diferentes partes se construyan con mayor facilidad y su tratamiento térmico se lleve a cabo por separado de acuerdo a las necesidades de las mismas.

- **Fresa Madre de cuchillas insertadas.** Como lo indica su nombre en este tipo de fresa las cuchillas con sus dientes se insertan en el cuerpo base de la herramienta (ver figura 20). La principal ventaja es que al momento de querer rectificar los dientes las cuchillas se sitúan sobre otro cuerpo base de acuerdo a la dirección de la hélice. Con este proceso se facilita la obtención de superficies de baja rugosidad, mayor precisión geométrica y dimensional. Además, la distancia entre las ranuras puede ser reducida con respecto a la fresa integral de tamaño similar, dado que no es requisito la carrera de entrada y retorno de la herramienta de corte. El ancho de las ranuras se puede determinar de acuerdo con la necesidad de dejar suficiente volumen libre para la salida de la viruta y para permitir el paso de herramienta de reafileado.

Figura 20. Cuerpo base y cuchilla de una Fresa Madre



Fuente: Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 199

La fresa madre con cuchillas insertadas se pueden construir con los dientes de mayor longitud que las integrales de igual diámetro y número de ranuras; la mayor

longitud del diente le permite un mayor número deafilados y por lo tanto una mayor duración de la herramienta. Con respecto al tratamiento térmico de la fresa, con las cuchillas de acero se obtiene una estructura más uniforme y un grano más fino, lo cual resulta favorable para la vida de la herramienta. Por ejemplo, el control de la temperatura de las piezas durante un templado de las cuchillas individuales (de masa relativamente pequeña), se puede conseguir con mayor precisión que en el temple de una fresa integral de igual forma.

Aunque actualmente ha cambiado el diseño de las fresas de cuchillas insertadas, el principio es el mismo en cuanto al montaje sobre un cuerpo base de distintos tipos de cuchillas, lo que cambia es la sujeción de las cuchillas o dientes al cuerpo base (ver figura 21).

Figura 21. Fresa Madre con dientes unidos por tornillos al cuerpo base



Fuente: Direct Industry. Enero 2019. Disponible en: [www. Directindustry.es](http://www.Directindustry.es)

Para cada módulo se ofrecen herramientas de distintas dimensiones, pero los tamaños intermedios no se producen o sólo en casos de fuertes cantidades, dado que se requiere de equipo especial.

Sus propiedades se pueden resumir de la siguiente manera:

Ventajas:

- La cuchilla es fácilmente construida y resulta de una estructura metalúrgicamente uniforme.
- Los bordes de corte resultan de calidad superior (con un menor número de muescas o discontinuidades).
- Elevada longitud útil del diente.
- Posibilidad de utilizar más veces el mismo cuerpo base, sustituyendo las cuchillas usadas.
- Bordes de corte planos en los flancos de los dientes.

Desventajas:

- Diámetro de cabeza mayor de aquel correspondiente al creador integral, sin tener en cuenta en número de entradas.
- Dependencia de determinadas dimensiones constructivas.
- A causa de las ranuras rectas (paralelas al eje) en el caso de herramientas de varias entradas pueden generarse ángulos de desprendimiento de valores negativo excesivamente grandes

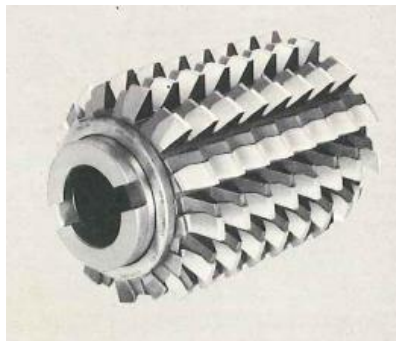
➤ Fresa Madre de cuchillas insertadas con cubo recuperable

Se caracterizan también por las cuchillas insertadas en el cuerpo base (Figura 25). En este sentido, se asimilan a las fresas ya descritas con la diferencia en la forma del montaje de las cuchillas y la herramienta especial usada para su acabado y posterior reafilado, lo cual puede traer problemas económicamente hablando. El uso de estas fresas es conveniente sobretodo en el campo de módulos grandes.

En el caso de fresas de módulo grande, conlleva a un espesor indeseable entre el agujero y el pie del dentado. Por esta razón las cuchillas no están simplemente

retenidas en las ranuras longitudinales del cubo como en el tipo de creador visto anteriormente, éstas también vienen sostenidas en la parte posterior de los dientes por medio de dientes de soporte obtenidos en el cubo de herramienta. De esta manera la cuchilla puede venir reafilada y utilizada hasta que la longitud del diente se reduzca a unos pocos milímetros.

Figura 22. Fresa madre de cubo recuperable



Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 201
Los creadores de cuchillas insertadas y con cubo recuperable vienen para módulos finos de hasta 40 mm.

- Fresa Madre con insertos de acero por soldadura. En este tipo de herramienta se tienen filos unidos por soldadura de acero rápido con un espesor de algunos milímetros, colocados en el cuerpo base y junto a los dientes. El material insertado por soldadura sobresale ligeramente con respecto a los dientes del cuerpo base para que los ángulos de ataque se puedan obtener con el valor deseado (ver figura 26). A la hora de adecuar nuevos insertos el agujero de la herramienta debe ser reelaborado, por lo tanto; debe tener material sobrante para poder ser maquinado con respecto a la misma forma original.

Se trata de herramientas muy económicas y ventajosas, especiales para el mecanizado de piezas en serie limitada.

Figura 23. Fresa madre con insertos de acero soldados

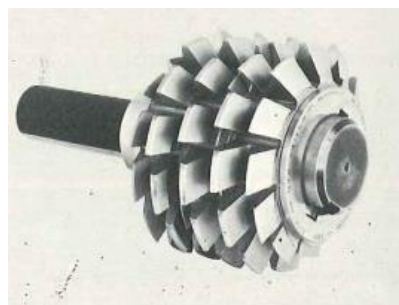


Fuente: Direct Industry. Enero 2019. Disponible en: [www. Directindustry.es](http://www.Directindustry.es)

- Fresa Madre compuesta de varios discos ensamblados. Son herramientas formadas mediante el acoplamiento de varios discos y utilizadas como fresas de desbaste. Los discos que la componen son girados con respecto a su posición normal (ver figura 24).

Debido a que los bordes de corte de los discos adyacentes se acoplan en el material de la pieza de trabajo con un cierto desplazamiento de fase uno con respecto al otro, se tiene una carga en la herramienta y en el dentado favoreciendo el funcionamiento uniforme de la fresa.

Figura 24. Fresa Madre de discos ensamblados

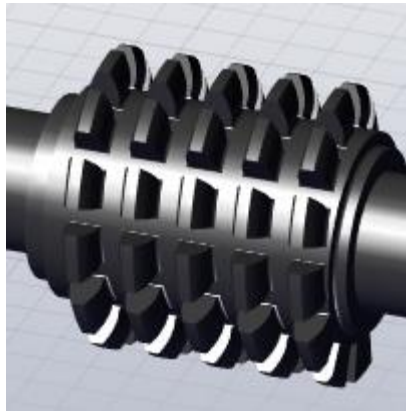


Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 204.

2.5.3 Factores que influyen en la fabricación. El funcionamiento y el rendimiento de una fresa madre, dependen directamente de la clase de herramienta, del material, de las dimensiones y del tipo de aplicación para la cual es requerida. Además del precio como un factor determinante para la calidad del dentado generado en la pieza; en este apartado se habla de la relación que existe con variables como: el diámetro, la longitud, el número de cuchillas, y la temperatura de trabajo de la herramienta de corte.

2.5.3.1 Diámetro de la herramienta. El diámetro de una fresa madre tiene un valor mínimo sugerido, por ejemplo, para la construcción de fresas con cuchillas insertadas, el cubo debe ser lo bastante robusto para soportarla y garantizar un trabajo adecuado de la misma.

Figura 25. Fresa madre construida

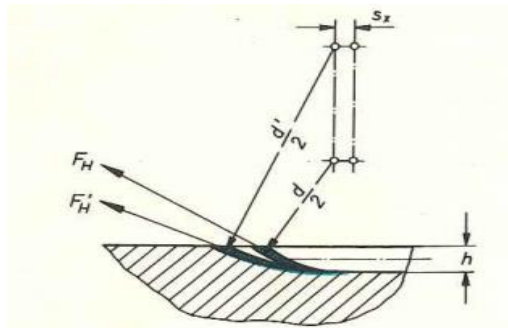


Por otro lado, al aumentar el diámetro de la herramienta también estará aumentando la longitud útil de los dientes (ver figura 16); en otras palabras, la responsable del maquinado de los dientes de la rueda base. Así mismo el diámetro está relacionado con el esfuerzo cortante y la viruta del material. Al tener dos herramientas de corte similares en todas sus características a excepción del

diámetro; los bordes de corte de la fresa de mayor diámetro trabajan en un arco de círculo de curvatura menos acentuado, con respecto a la fresa más pequeña. Como consecuencia la viruta que se desprende será distinta, siendo de menor espesor con la herramienta de mayor diámetro.

Al aumentar el diámetro, dicho esfuerzo actúa de manera pronunciada en la dirección del eje de la pieza y de esta forma el esfuerzo de corte disminuye. Un menor esfuerzo de corte garantiza: menor deformación, menores errores generados en los dientes del engranaje maquinado. Al generar un esfuerzo de corte y un espesor menor en la viruta, menor será la temperatura de eliminación de la misma.

Figura 26. Relación entre el diámetro y esfuerzo de corte de una fresa madre



Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 208

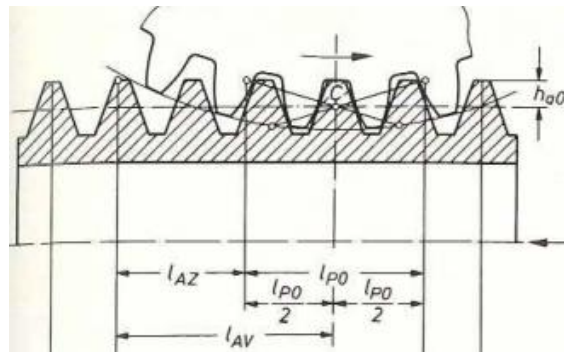
2.5.3.2 La longitud. Una longitud adecuada de la fresa es importante para utilizar el material estrictamente necesario para su fabricación y necesidad, lo que se convierte al factor económico una variable importante a la hora de analizar un posible material y si es viable su costo.

La longitud de una fresa madre se compone de la longitud útil o donde se distribuyen los dientes y el huelgo entre los extremos de la fresa y la longitud útil.

Debido a que el contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo sólo se lleva a cabo en una zona específica de la circunferencia de la pieza a la hora del mecanizado; es importante definir una longitud de fresa garantizando que se utilizará dicha longitud en todo momento durante el tiempo de trabajo.

La localización de ésta “área” se ubica partiendo del punto medio de la herramienta y pieza de trabajo, como se muestra en la figura 26, definiendo igualmente una zona de pre-posicionamiento, una longitud de pre-perfilado y una de longitud de generación de perfil del diente, la cual define de manera total la geometría del diente.

Figura 27. Zona de trabajo efectivo de una fresa madre



Fuente: HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La dentatura a creatore.p. 215

2.5.3.3 Número de cuchillas. Cuando se habla de cuchillas en una fresa madre, se hace referencia a la cantidad de dientes que hay en una hilera o perfil de está. Por tanto, al aumentar el número de cuchillas también crece el número de dientes de la herramienta que participan en el mecanizado de los espacios entre dientes, generando los dientes o perfil de la pieza de trabajo contribuyendo a una formación más precisa del contorno de los dientes y disminuyendo el esfuerzo de corte; lo que resulta favorable.

Si el diámetro de la fresa aumenta, el número de cuchillas que puede tener una herramienta aumentará, lo cual puede ser beneficioso como ya se explicó antes, siempre y cuando se garantice un espacio mínimo para la salida de viruta

Un aumento del número de cuchillas no siempre genera ventajas, debido a su relación con el desgaste de la herramienta. Por lo tanto, un aumento en el número de cuchillas de una fresa madre se hace necesario si:

1. Es una herramienta de varias entradas, sólo si no se utiliza para pre-desbastado de los dientes que luego serán rectificadas.
2. Se utilizan para el acabado final de cualquier tipo de piezas.
3. Son herramientas destinadas al mecanizado de piñones, especialmente si son de dentadura recta. Dado el tamaño muy limitado de la zona de desbaste, los primeros dientes de la fresa serían excesivamente cargados.

2.5.3.4 Temperatura de trabajo. Como es usual en las operaciones de mecanizado donde existe desprendimiento de viruta, en la cara donde se efectúa la formación de los dientes, se produce calor como consecuencia de la viruta que va saliendo de la pieza y calor que nace por la fricción entre la viruta, la pieza de trabajo y la herramienta. Para procesos de corte de metales la mayor parte de este calor, sale de la máquina en la viruta y en el líquido refrigerante.

La temperatura de la herramienta aumenta proporcionalmente con el tiempo de mecanizado de la pieza; sin embargo, la transferencia de calor al líquido refrigerante y al aire se ve facilitada por el aumento de la superficie de trabajo, la cual se consigue al aumentar el diámetro de la fresa.

3. DISEÑO DE CONCEPTO DEL MÓDULO

Para entender mejor el desarrollo del módulo a continuación se realiza una explicación general de las partes principales, teniendo en cuenta la parte estructural, los elementos mecánicos presentes y los componentes eléctricos y electrónicos que permiten un montaje óptimo en cuanto a funcionamiento y objeto de enseñanza.

3.1 Especificaciones del módulo

El objetivo consiste en diseñar y construir un módulo que permita fabricar los dientes de engranajes rectos plásticos mediante fresado por generación, de acuerdo a los siguientes requerimientos:

- ▶ Sistema de transmisión para sincronizar la velocidad de giro entre los ejes de la herramienta de corte (fresa madre) y la pieza base del engrane.
- ▶ Fresa madre diseñada y construida con módulo 4 mm para la realización de engranajes rectos en materiales plásticos como: Nylon, Acetal y Policloruro de vinilo.
- ▶ Módulo compacto, acompañado de su respectivo manual de uso para garantizar una adecuada utilización y tener en cuenta su capacidad; reflejada igualmente en una práctica sugerida. Obteniendo como resultado la interacción entre el estudiante y el módulo como principal objetivo de su aprendizaje.

Para cumplir con los requerimientos establecidos, se diseñó y construyó un módulo para realizar engranajes mediante fresado por generación con una

velocidad de rotación de herramienta de corte de 458 rpm, la cual se logró con una relación de transmisión por cadena y una fuente de alimentación eléctrica con motor trifásico de 0.75 Hp. El cilindro base se desplaza en dos direcciones: horizontal (eje x) mediante un tornillo de potencia y un motoreductor metálico de 12Vdc que desplaza el carro principal, que a su vez contiene un mecanismo de elevación que mueve verticalmente (eje y) la pieza a maquinar en conjunto con un segundo motoreductor. Y finalmente, cuenta con un tablero de conexiones que permite controlar la acción de los motores con arduino y mediante la programación desarrollada en Labview. La figura 29, muestra los componentes mecánicos del módulo.

Con el fin de facilitar el desplazamiento y la protección de los componentes externos del módulo, se diseña una caja en madera con cuatro ruedas industriales previamente escogidas según el peso total del módulo. En la medida en que abordemos cada subsistema específico se ampliarán los detalles en cuanto a funcionamiento y construcción; así como el manejo de cada componente (ver Manual de usuario).

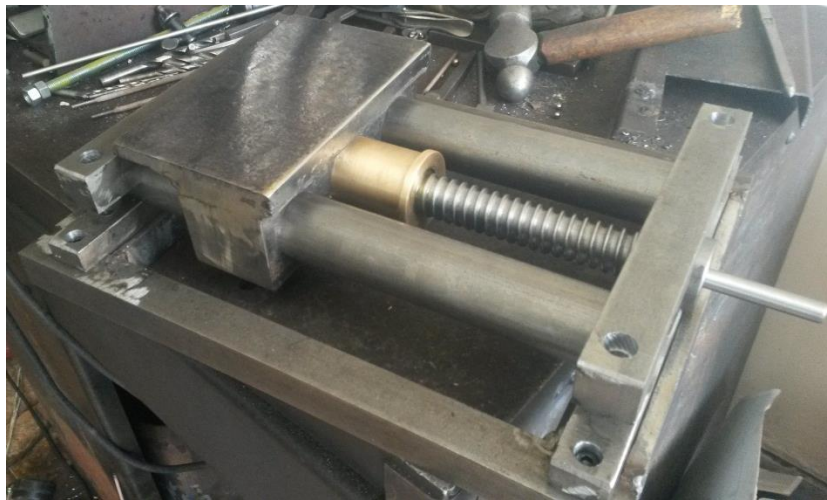
Figura 28. Componentes mecánicos del módulo de fresado



3.2 COMPONENTES MECÁNICOS

Una gran variedad y cantidad de elementos de máquina hacen parte de la estructura total del módulo usado para realizar engranajes plásticos mediante fresado por generación. Como se puede ver la figura 26, la base o soporte inferior principal es un rectángulo hecho con perfiles cuadrados soldados entre sí soportados por cuatro niveladores. La base tiene en sus extremos un espacio para encajar los módulos inferiores encargados del soporte de las guías; que son dos cilindros de diámetro de 41mm y del tornillo de bolas principal; encargado del movimiento del carro principal en el eje x. Para completar un adecuado soporte y aseguramiento, los módulos superiores se fijan en los extremos de las guías y tornillo con la ayuda de tornillos Bristol sin cabeza, con el fin de mantener estable esta parte de la estructura y que sea de fácil desmontaje.

Figura 29. Carro principal y soporte inferior en proceso de construcción



El carro principal tiene en su interior la tuerca que facilita mediante balineras el desplazamiento de éste a través de la longitud del tornillo. Dicho tornillo cuenta con dos apoyos, ubicados en la misma posición de los módulos.

Sobre la parte superior del carro principal, está soldada la estructura que contiene el mecanismo de elevación que garantiza el desplazamiento en el eje Y de la pieza base (rueda a dentar); formada por unas platinas rectangulares a los lados que direccionan el movimiento. La forma en que funciona el mecanismo de elevación (ver figura 27) o tijera es gracias también al giro de un tornillo que en los lados tiene unas guías y sobre éstos tres se tiene un mecanismo de tijera que realiza el proceso de elevación o descenso según se requiera.

Figura 30. Mecanismo de elevación en construcción



En la parte posterior del módulo encontramos una placa rectangular (ver figura 28) que tiene las siguientes funciones: darle equilibrio y rigidez al módulo, llevar el subsistema de corte; en el cual se ubica la fresa y mantener el motor trifásico en posición de operación. El subsistema de corte está comprendido primero, por una placa circular (ver figura 28) ubicada en la parte superior de frente al mecanismo de elevación; el cual se posiciona gracias a un eje roscado al final que sirve como apriete con su respectiva tuerca y la orientación deseada se establece según dos orificios ubicados en la parte baja de la placa circular que a su vez conectan con la placa rectangular.

Ese ajuste se logra gracias un tornillo Bristol sin cabeza ubicado en cualquiera de las dos posiciones establecidas. Segundo, un perfil rectangular en forma de “L” soldado a la placa circular responsable en gran parte de sostener y ubicar correctamente la fresa madre y apoyado finalmente por un bloque rectangular auxiliar que se une al perfil mediante dos tornillos Bristol sin cabeza obteniendo una extracción rápida y fácil.

Figura 31. Placa rectangular y circular del módulo terminado

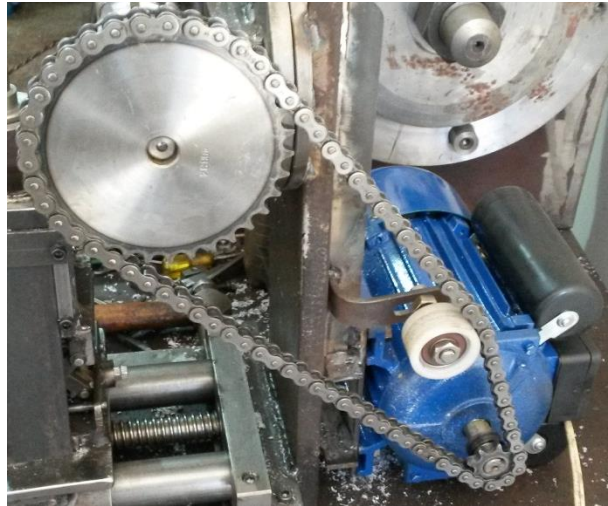


Lo anterior resulta importante, debido a que el eje de la fresa madre se logra posicionar solamente colocando ese bloque auxiliar. Para definir y garantizar que la fresa no se desplazará por ningún motivo en dirección axial sobre el eje, a los lados tendrá dos anillos de fijación asegurados adecuadamente al eje con tornillos.

El motor principal se ubica en una placa rectangular cuadrada mediante el apriete de 4 tornillos. Dicha placa está soldada y es parte de una lámina en forma de “u” que se une a la placa rectangular de la que hemos hablado. El eje de salida del

motor cuenta con un piñón, que hace parte del sistema de transmisión por cadena que permite aprovechar la velocidad del motor y reducirla obteniendo un valor estimado para el movimiento de la herramienta de corte (fresa madre).

Figura 32. Motor en posición de trabajo.

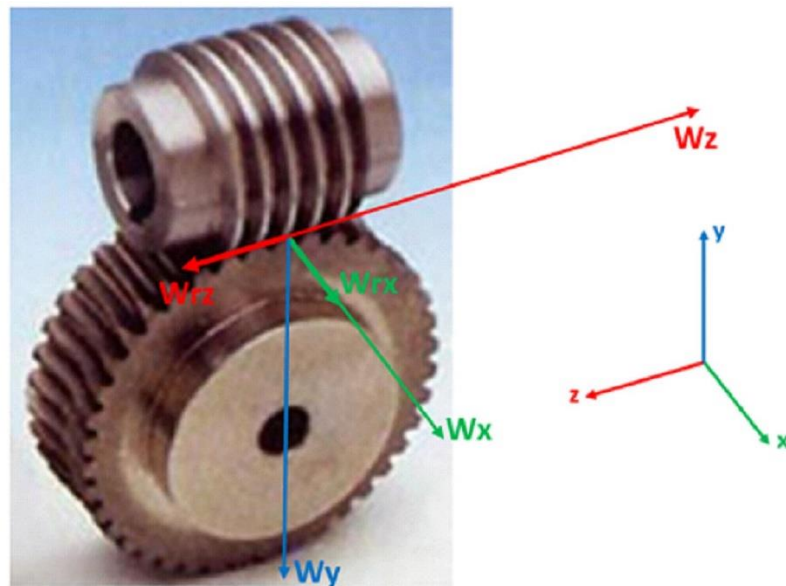


3.3 CONSIDERACIONES DE LA HERRAMIENTA DE CORTE

Como se ha explicado antes existen en el mercado herramientas de fresado por generación, las cuales se diferencian del resto en gran parte por su geometría y el principio del funcionamiento, el cual es similar al mecanismo de transmisión que conocemos como tornillo sin fin-corona. Por lo general estas herramientas de corte se fabrican para la construcción de engranajes metálicos; en este caso no será así, los materiales a maquinar son tres tipos de polímeros lo cual es importante resaltar ya que la mayor parte del diseño y fabricación de la fresa madre estará basada en investigaciones previas, las cuales estarán apoyadas por pruebas y consideraciones por parte de los autores de este libro.

3.3.1 Cargas en un mecanismo tornillo sinfín-corona. Existen fuerzas de contacto entre la herramienta y el engranaje a fabricar durante el proceso de corte. En la figura 19, se muestran dichas cargas de igual sentido y dirección contraria. Se observa que la fuerza tangencial actúa sobre el contacto entre los dientes del tornillo y la corona; que la fuerza radial se ejerce en la línea perpendicular al eje de la herramienta y finalmente la fuerza axial se aplica en dirección al eje de la herramienta.

Figura 33. Fuerzas presentes en un tornillo sinfín-corona



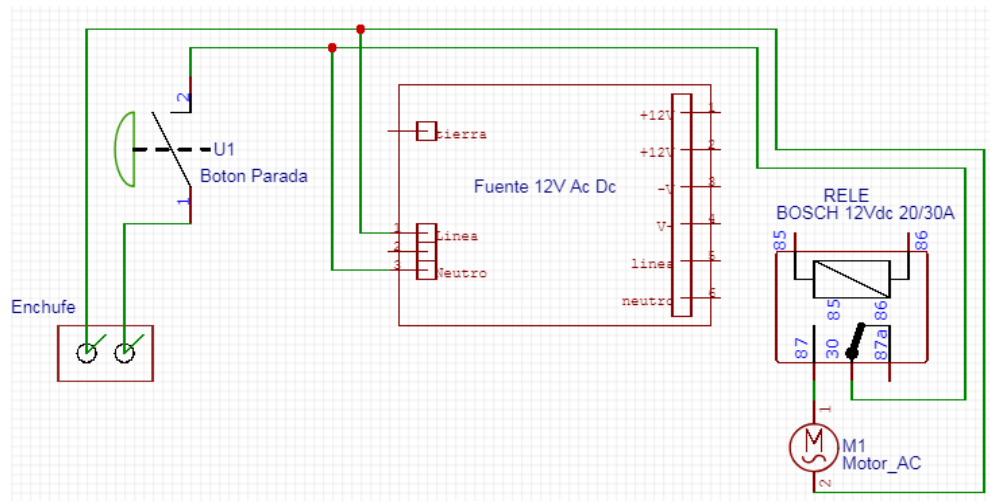
Fuente: Hernández, D. (16 de Agosto de 2015). Disponible en:
<https://dhernaiez73.wordpress.com>

La teoría anterior será tomada en cuenta a la hora de calcular las fuerzas de corte entre la fresa madre y la rueda base.

3.4 COMPONENTES ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

El movimiento de los elementos mecánicos que hacen parte integral del módulo y su adecuado manejo se da debido a un sistema eléctrico/electrónico definido, el cual protege diferentes componentes como: el motor principal (motor trifásico), la fuente de alimentación AC a DC, el módulo L298n, los motorreductores de 12Vdc gracias a la conexión entre ellos y un Relé (ver figura 30) que optimiza el funcionamiento de los elementos en el circuito y evita posibles daños en el mismo.

Figura 34. Conexiones de los principales componentes eléctricos y electrónicos



El accionamiento de un botón de parada de emergencia permite interrumpir dicho circuito evitando cualquier complicación, por ejemplo: verificación inadecuada de conexiones, mal funcionamiento o daño de componentes como sensores o errores de adquisición y procesamiento de datos por parte de la tarjeta arduino o el software en Labview. Dentro de los componentes que también hacen parte del circuito electrónico encargados del movimiento y la adquisición de datos están el módulo L298N que controla el giro de los motorreductores mediante su alimentación con 5V por medio de la tarjeta Arduino Uno.

Figura 35. Placa auxiliar - conexiones de componentes electrónicos



► Software LabVIEW

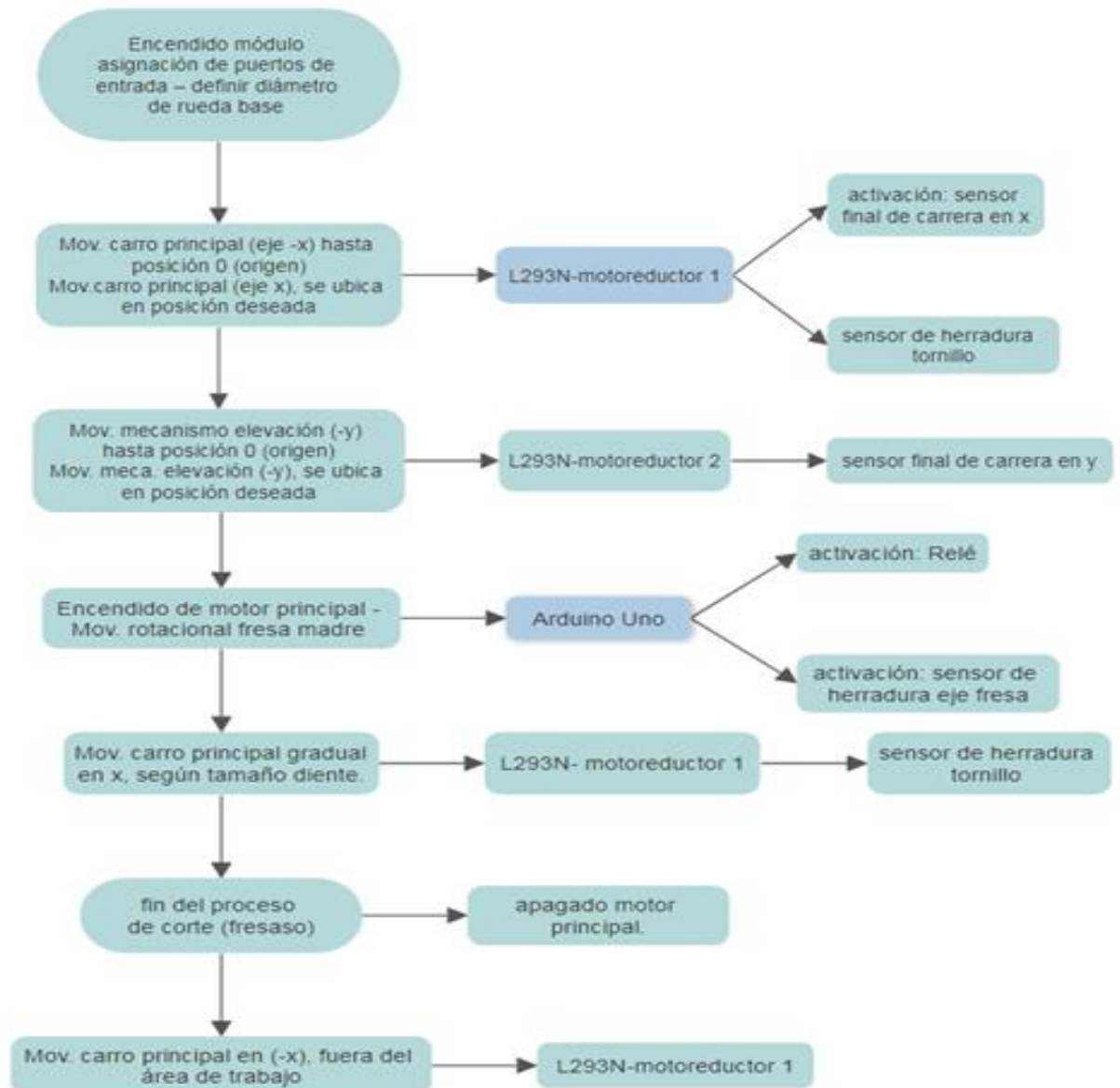
Mediante LabVIEW Interface for Arduino, paquete que permitirá manipular el Arduino Uno desde la ventana de LabVIEW, y una vez terminada la conexión y programación del Arduino; se integrarán los sensores de herradura, finales de carrera, motorreductores y el módulo L293N siguiendo el procedimiento descrito a continuación. Una vez conectado el enchufe al tomacorriente, se ejecuta el programa y el carro principal se mueve teniendo en cuenta el valor de la rueda base a maquinar hasta que hace contacto con el primer final de carrera produciendo una señal digital, con lo cual se activa un contador de tiempo donde se ha relacionado el valor en mm que debe moverse en milisegundos mediante una regresión, y posiciona correctamente la rueda base a una distancia muy pequeña de la fresa. Inmediatamente se activa el motoreductor dos, poniendo en funcionamiento el mecanismo de elevación en dirección contraria a la fresa (-y) haciendo contacto con el segundo final de carrera, para conocer la distancia que ahora debe desplazarse hacia arriba; logrando ubicar la rueda base justo en la mitad de la herramienta de corte.

En conclusión, de la figura 35: las resistencias, el diodo y el transistor, permiten proteger las diferentes conexiones que se establecen en la placa auxiliar, además de mejorar las señales recibidas de los sensores en el módulo evitando interferencias. Las posiciones de los sensores finales de carrera, son el origen (punto 0) para cada eje. Los cuales sirven para determinar cuánto tiempo debe moverse el carro principal o el mecanismo de elevación para recorrer una distancia x , lo cual se logra adecuadamente mediante regresión lineal.

Para saber la distancia en el eje x que debe moverse el carro principal según el tamaño del diente, se realiza un cálculo en base al número de giros del tornillo principal y el tiempo que gasta en hacerlo; pero antes se programa el encendido de la fresa madre y la cantidad de revoluciones dadas para un período de tiempo

lo cual se controla con un segundo sensor de herradura que permite establecer el maquinado total en todo el diámetro del futuro engrane. Se muestra en la figura 36 un diagrama del proceso descrito y los componentes electrónicos responsables.

Figura 36. Proceso y/o funcionamiento de los componentes electrónicos.



4. DISEÑO DE DETALLE DEL MÓDULO

4.1 ANÁLISIS DE FRESA MADRE COMO TORNILLO SIN FIN

Recordando que los engranajes a fabricar son de material plástico lo cual no afecta el diseño geométrico de la herramienta, aunque si el material a seleccionar y las condiciones de operación debido a la diferencia de propiedades físicas, térmicas y mecánicas. El método en este caso particular es basado en el diseño de tornillo sinfín de HAMROCK (1).

Las ecuaciones que relacionan los parámetros geométricos se definen a continuación:

- Avance [L]: distancia que avanza la herramienta (fresa) relativa al engranaje en una rotación.

$$L = Z_F * P_{aF} \quad \text{Ecuación 1}$$

- Paso axial de la fresa [P_{aF}]: distancia entre dos dientes consecutivos de la fresa medidos en el mismo punto. Proporcional al diámetro del engranaje a maquinar e inverso al número de dientes a fabricar.

$$P_{aF} = (\pi * d_e) / Z_e \quad \text{Ecuación 2}$$

- Angulo de avance [λ]: ángulo formado entre la tangente a la hélice primitiva y el plano de rotación de la herramienta.

$$\tan \lambda = L / (\pi * d_F) \quad \text{Ecuación 3}$$

- Modulo [M_F]: relación que existe entre el diámetro primitivo de la herramienta y el número de dientes. Se puede expresar proporcional al paso circular.

$$M_F = Pc/\pi$$

Ecuación 4

El sistema de operación como se mencionó, cumple el análisis y funcionamiento de la transmisión de un tornillo sin fin corona; se debe garantizar entonces en el diseño que el módulo de la herramienta sea equivalente al módulo del engranaje a fabricar. La tabla 1, muestra los cálculos geométricos determinados considerando un módulo de 4; ya que los engranajes a fabricar tienen este módulo, el número de entradas de la herramienta como si fuera un tornillo de un hilo ($Z_t = 1$).

Tabla 2. Geometría fresa madre como tornillo sin fin

Variable	Valor	Unidades
Avance [L]	12,57	[mm]
Paso axial [Pa]	12,57	[mm]
Ángulo de hélice [λ]	6	[grados]
Modulo [M]	4	-
Paso diametral [Pd]	0,25	[mm]
Addendum [a]	4	[mm]
Dedendum [b]	4,8	[mm]
Diámetro de cabeza [d_{cf}]	60	[mm]

El diámetro del cilindro base para la construcción del engrane dependerá del número de dientes a fabricar ya que se relacionan junto con el paso axial de la herramienta calculada como tornillo sin fin.

$$P_{at} = \frac{\pi * d_e}{Z_e}$$

Siendo P_{at} el paso axial del tornillo, d_e el diámetro exterior y Z_e , número de dientes del engranaje a fabricar.

Ahora para describir el comportamiento del conjunto (herramienta de corte y engranaje) se calculan las fuerzas sobre la fresa con las ecuaciones mostradas a continuación:

- Velocidad de corte: es la velocidad lineal medida en la periferia del acople entre fresa y engranaje a fabricar.

$$v = w * r \quad \text{Ecuación 5}$$

- Fuerza tangencial [F_{tF}]: fuerza que actúa sobre el contacto entre las cuchillas de la herramienta y el engranaje a fabricar.

$$F_{tF} = Pot/V_l \quad \text{Ecuación 6}$$

- Fuerza radial [F_{rF}]: fuerza que actúa sobre la línea perpendicular al eje de la herramienta.

$$F_{rF} = F_{tF} * \left[\frac{\text{sen}\theta_n}{\cos\theta_n * \text{sen}\lambda + \mu * \cos\lambda} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

- Fuerza axial [F_{aF}]: fuerza que actúa sobre el eje de la herramienta.

$$F_{aF} = \frac{\cos\theta_n * \cos\lambda - \mu * \text{sen}\lambda}{\cos\theta_n * \text{sen}\lambda + \mu * \cos\lambda} \quad \text{Ecuación 8}$$

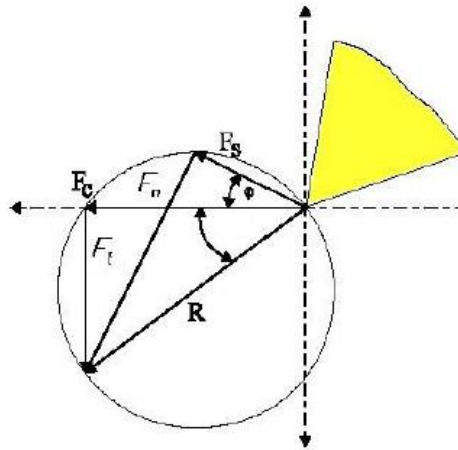
Tabla 3. Fuerzas calculadas en la fresa como si fuera un tornillo sin fin

Fuerzas		Valor
Fuerza tangencial	F_t	360 [N]
Fuerza radial	F_r	272 [N]
Fuerza axial	F_a	7900 [N]

4.1.1 Análisis de fresa madre según el método ortogonal. Para la determinación de la fuerza de corte o cizalladura se debe mencionar que la longitud del espesor de la viruta a_c , no deformada lleva la misma dirección de avance de la pieza t_0 , por revolución de la herramienta.

Gracias a la teoría y análisis del ángulo de cizalladura en herramientas de corte, presentadas por Ernest y Merchant se supone que la viruta se comporta como un cuerpo rígido y que se mantiene en equilibrio en acción de las fuerzas que se generan en la zona de contacto entre la viruta y la herramienta en el plano de cizalladura⁸. Y la determinación de estas fuerzas se determina por medio del método de corte ortogonal presentado en el libro Fundamentos del corte de metales y de las máquinas-herramienta⁹ (ver anexo C):

Figura 37. Fuerza resultante en la acción de corte



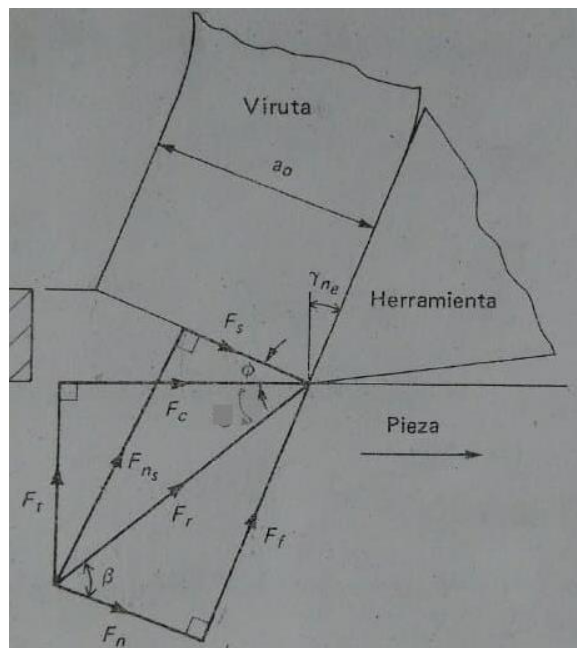
Fuente: (Ardila & Rincon Herreño, 2006) software para el diseño y modelamiento graficas de herramientas de fresado.

⁸ (Ardila & Rincon Herreño, 2006) Ardila, C.H, & Rincón Herreño, O.F. (2006). software para el diseño y modelamiento graficas de herramientas de fresado utilizado en el maquinado de piezas. Bucaramanga.

⁹ Ibit 8

En la figura 38 se observa dos planos de referencia para representar las componentes que conforman una fuerza resultante, la cual actúa sobre la herramienta; un plano que va en dirección del plano de cizalladura donde actúa F_s y su fuerza normal F_n y el plano donde actúan las componentes F_c de corte y normal a esta la fuerza de empuje F_t . La sumatoria vectorial en cualquiera de los dos sistemas conlleva a una fuerza resultante F_r .

Figura 38. Geometría del método ortogonal (fuerzas y ángulos entre material y herramienta)



Fuente: (Boothroyd, 1978) Fundamentos del corte de metales y de las máquinas-herramienta. Massachusetts.

El método de corte ortogonal permite determinar el valor de la fuerza de corte F_c y la fuerza de empuje F_t teniendo como referencia la fuerza de cizalladura F_s , mediante las ecuaciones mostradas a continuación, del libro Fundamentos del Corte de Metales y de las Máquinas-Herramienta.

$$F_t = F_s * \frac{1}{\cos(\phi + \beta - \gamma_{ne})}$$

$$F_c = F_s * \frac{\cos(\beta - \gamma_{ne})}{\cos(\phi + \beta - \gamma_{ne})}$$

Una relación importante fue derivada por Eugene Merchant en la suposición de corte ortogonal donde la importancia del ángulo de cizalladura ϕ , radica que en éste ángulo el esfuerzo cortante es igual a la resistencia al corte del material a cortar, (en este caso del engranaje a maquinar); mientras que en los otros ángulos el esfuerzo cortante será menor que la resistencia al corte; por esta razón la formación de la viruta ocurre en este ángulo. La expresión obtenida por Merchant permite relacionar los tres ángulos presentes en el corte:

$$2\phi + \beta - \gamma_{ne} = \frac{\pi}{2}$$

Tabla 4. Ángulos y fuerzas en la herramienta de corte

Variable		Valor	Unidad
Ángulo de cizalladura	ϕ	66	[grados]
Ángulo de inclinación normal efectivo	γ_{ne}	7,8 $\approx$ 8	[grados]
Ángulo medio de fricción	β	15,8 $\approx$ 16	[grados]
Fuerza de corte	F_c	648	[N]
Fuerza de empuje	F_t	1130	[N]
Fuerza de cizalladura	F_s	450	[N]

4.1.2 Cálculo de potencia y velocidad de corte

Se necesita una potencia necesaria para realizar el corte de la pieza a maquinar; al igual que una velocidad tangencial de la herramienta adecuada para evitar el daño del material, sabiendo que los materiales son: acetal, PVC y nylon y parte de la energía utilizada en el proceso de fresado se consume en producción de calor

debida a la fricción entre materiales.

Queda claro que existe una relación directa entre las dos variables, la cual se muestra en la siguiente ecuación, que relaciona la fuerza de corte y los parámetros anteriores: $Potencia = F_c * v$.

La velocidad tangencial esta estandarizada en tablas de corte para diferentes materiales al igual que el avance de la pieza a fabricar.

Figura 39. Parámetros de maquinado en fresado en diferentes materiales plásticos

ANGULOS, AVANCES Y VELOCIDAD DE CORTE					
fresado					
		NYLON 6	ACETAL	PE/PP	PTFE
Ángulo de incidencia a	°	10-20	5-15	10-20	10-20
Ángulo de virutas g	°	5-15	5-15	5-15	5-20
Avance S	mm/t	>0,03	>0,02	>0,05	>0,03
Velocidad de corte V	m/min	<1000	<1000	>1000	>800

Fuente:<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/mecanizado-de-plasticos.html>.

En la tabla escogida (ver Anexo B) se ve un rango de velocidades de corte recomendadas para el fresado de diferentes polímeros, ubicada entre [60-100] m/min para el material plástico más crítico de dicha empresa, lo cual sirve como parámetro de referencia para la selección adecuada del valor que se manejará en el módulo.

En cuanto a la velocidad de rotación de la fresa madre, su valor nominal no debía exceder los 465 rpm, debido a que la rueda base en cada uno de los materiales

plásticos seleccionados presentaban un calentamiento excesivo que conducía a quemar el material (ver prueba 1- capítulo 6). Se realizaron los cálculos con: $F_c = 648\text{ N}$, $\omega = 465\text{ rpm}$ Y $r = 36\text{ cm}$ fuerza tangencial, velocidad de rotación y el radio de circunferencia de la fresa, mediante la ecuación (5) y (6) se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 5. Cálculo de potencia y velocidad de corte en la fresa

Velocidad de corte	V_c	16.74 [m/min]
Potencia	pot	180.792 [N-m/s]
Potencia		0.181 [kw]

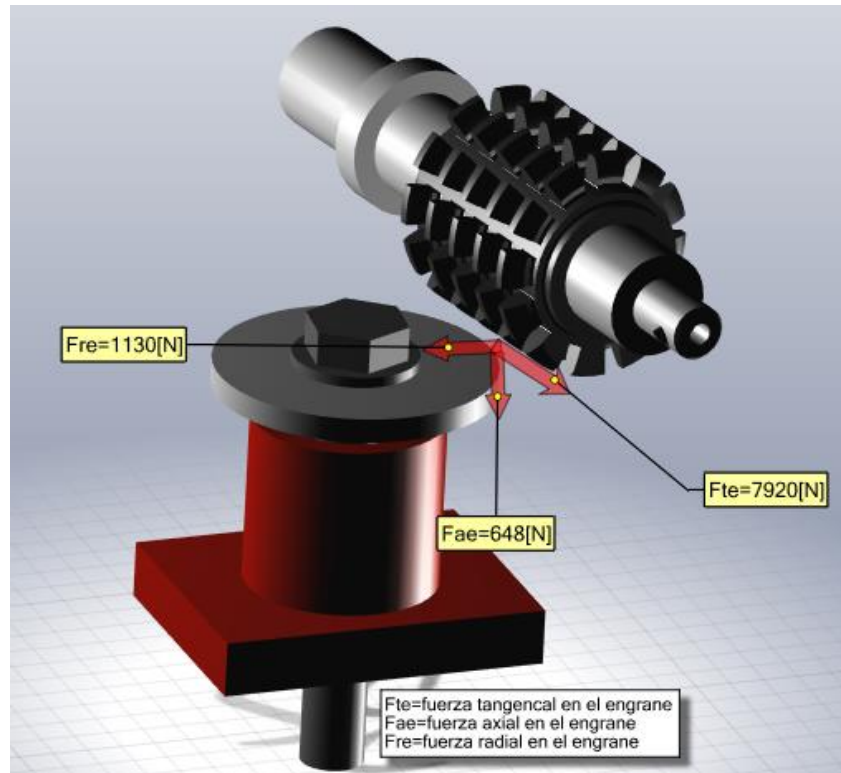
El valor mostrado en la tabla anterior es la potencia que debe transmitirse a la fresa para garantizar el maquinado de un engranaje en cualquiera de los materiales definidos. Teniendo presente que una transmisión por cadena tiene una eficiencia entre [95 - 98] %, el valor de la potencia suministrada por el motor principal deberá ser mayor a 0.20 [kw]. Es importante en el montaje diferenciar esta velocidad angular y potencia que se genera a la salida del motor con la potencia y velocidad angular en la herramienta de corte (fresa madre); ya que existe un sistema de transmisión de movimiento entre dos ruedas unidas por una cadena donde se reducen dichos valores, debido a la eficiencia de la transmisión y del motor.

Como el objetivo es tener un módulo que, con el paso del tiempo y la interacción de los alumnos de la escuela con éste, pueda brindar la flexibilidad de cambiar variables como el material de las ruedas a mecanizar, el diseño de nuevas herramientas de corte, etcétera. Por tanto, se seleccionará en el mercado un motor con potencia entregada entre [0.25 – 0.5 kw], sus demás características serán analizadas más adelante.

4.2 DISEÑO Y CÁLCULO DEL EJE DE LA FRESA POR FATIGA

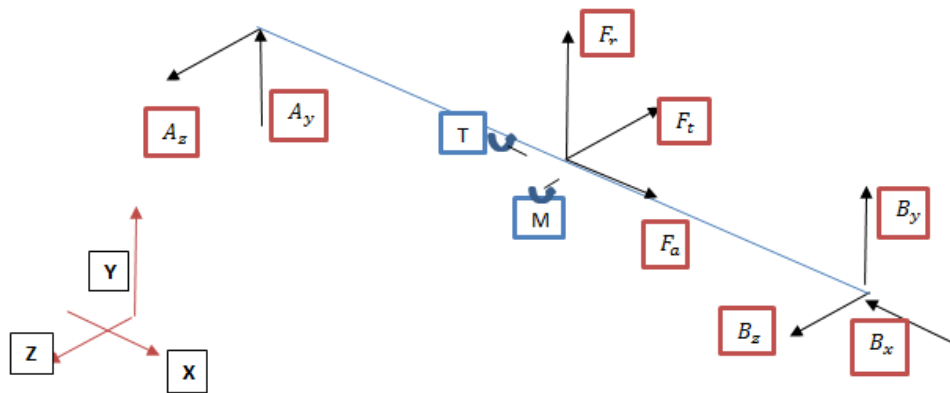
El eje en el que se ubica la fresa madre esta soportado por dos rodamientos en sus extremos y se deberá hacer un análisis de fuerzas cortantes en el plano xy y un análisis de momentos en el plano xz, debido al torque generado por el traslado de la fuerza tangencial al centro del eje.

Figura 40. Valores de las fuerzas ejercidas entre la fresa y el polímero a maquinar



Las fuerzas que se analizaron anteriormente (figura 43) se presentan en el punto de contacto entre herramienta y pieza a maquinar. Pero para analizar el eje y los diagramas de fuerza cortante y momentos, se deben trasladar éstas fuerzas al centro del eje generando un momento debido al traslado de la fuerza axial como se aprecia en la siguiente figura.

Figura 41. Fuerzas en el eje de la fresa y torques generados



La determinación de las fuerzas soportadas por los rodamientos; es fundamental para el análisis del diagrama de cortante y de momentos en el eje que soporta la herramienta al igual que el eje que soporta el polímero a maquinar. El traslado de la fuerza tangencial sufrida en la periferia de la herramienta de corte al centro del eje genera un torque en él mismo; de manera continua el traslado de la fuerza axial genera en el eje un momento, los cuales se calculan con las ecuaciones mostradas y analizando el eje como se muestra a continuación:

$$M = F_{af} * \frac{D_f}{2} \quad y \quad T = F_{tf} * \frac{D_f}{2}$$

Figura 42. Diagrama de fuerzas y momentos del eje de la fresa en el plano XY

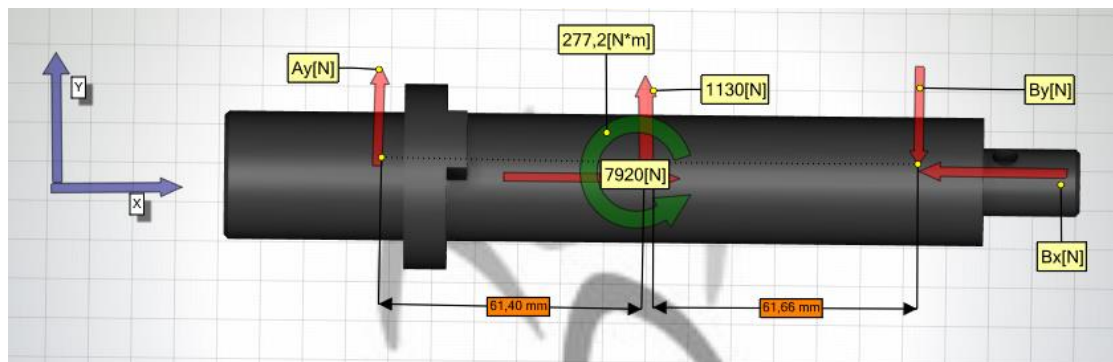
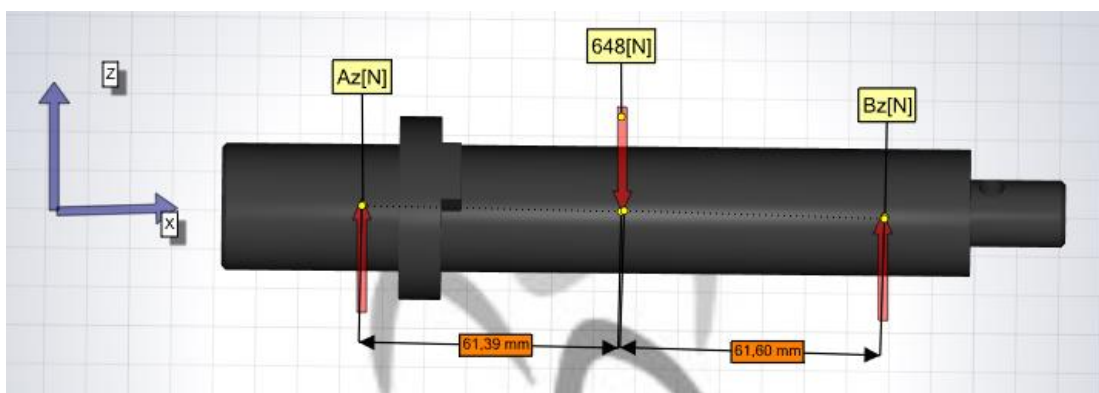


Figura 43. Diagrama de fuerzas del eje de la fresa en el plano XZ



Fuente: Los Autores

Para facilitar la nomenclatura y presentación de resultados, el punto de inicio del eje tomara nombre A. El final del eje, punto B y el centro donde se ubica la fresa madre, será F. A continuación, se muestran los resultados obtenidos gracias al análisis del eje para las fuerzas que deben soportar los rodamientos:

Tabla 6. Fuerzas equivalentes en los rodamientos

Reacción	Valor	Dirección
A_Y	1845 [N]	Y(+)
A_Z	324[N]	Z (+)
B_Y	2975[N]	Y (-)
B_Z	324[N]	Z (+)
B_X	7920[N]	X (-)

Además, el software de diseño SOLIDWORKS, afirma el valor de los resultados obtenidos:

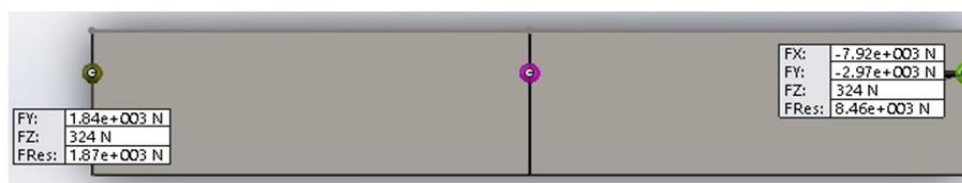
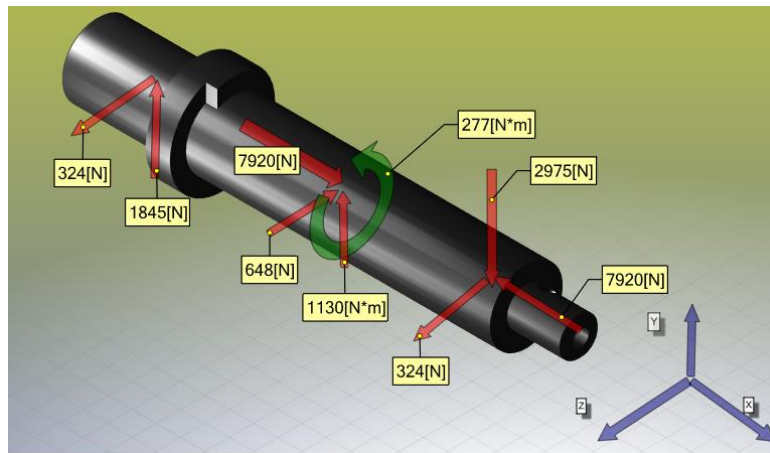
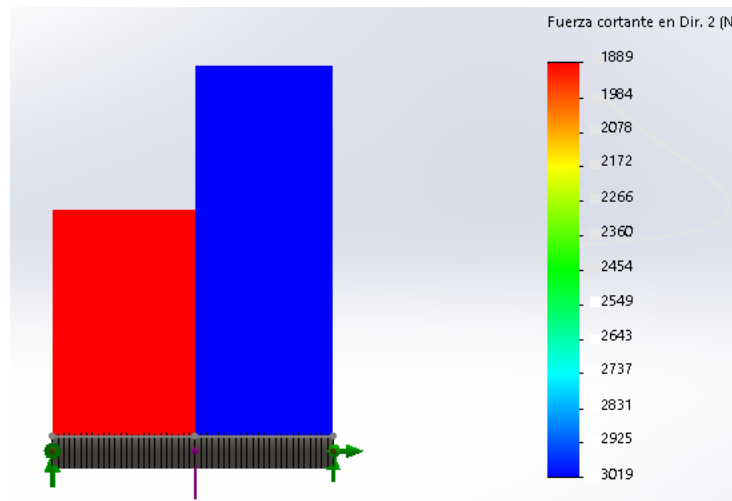


Figura 44. Fuerzas obtenidas en el eje de la fresa por solidworks.



El análisis por fatiga del eje se muestra a continuación, mostrando primero los diagramas de fuerza cortante y momentos:

Figura 45. Diagrama de esfuerzo cortante en el eje Plano XY



En la figura 45, se observa un esfuerzo cortante cerca de los **1900 [N]** en la zona del inicio del eje al centro del mismo; donde está ubicada la herramienta. Desde allí comienza el valor de mayor esfuerzo hasta el final del eje con un valor alrededor de los **3000[N]**.

Figura 46. Diagrama de esfuerzo cortante en el plano XZ

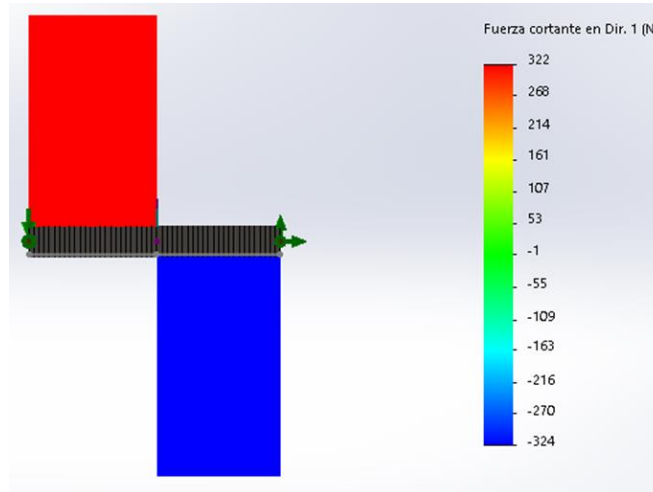
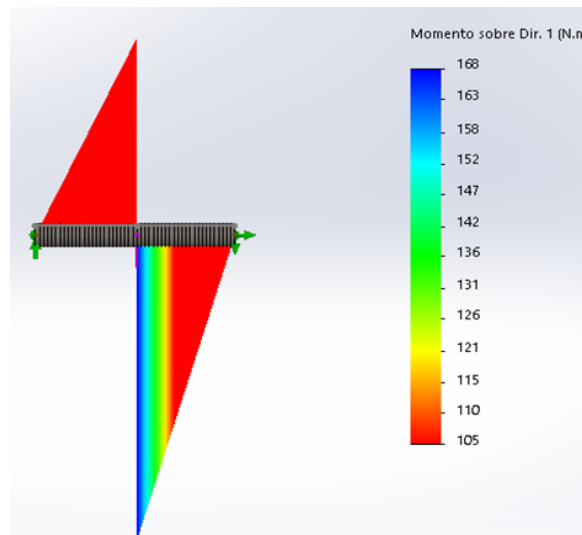
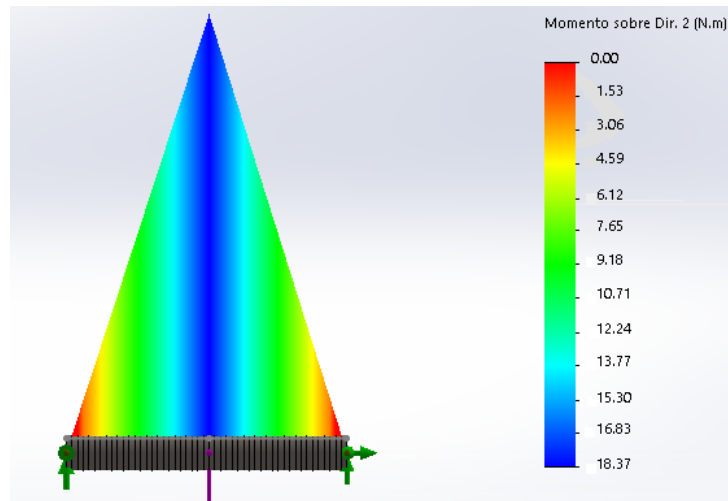


Figura 47. Diagrama de momentos en el eje plano X-Y:



La figura 47 muestra que el punto central del eje donde se ubica la fresa madre, al igual que en plano xy el mayor esfuerzo cortante con un valor de los 324[N]. Se tiene entonces un momento de mayor valor en el punto de soporte de la fresa madre cuyo valor es: $M_z = 170[\text{N}\cdot\text{m}]$.

Figura 48. Diagrama de momentos en el plano XZ



En el plano XZ, se genera momento en dirección Y, con un valor mayor de 18.4 [N-m] en la zona central del eje. La determinación del diámetro del eje se realizará en este caso con la ecuación y teoría de Misess-Goodman; de máxima energía y carga de distorsión:

$$\frac{1}{N} = \left[\left(\frac{\sigma_m}{S_{ut}} + K_f * \frac{\sigma_a}{S_e} \right)^2 + 3 \left(\frac{\tau_m}{S_{ut}} + K_{fs} * \frac{\tau_a}{S_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$S'_e = S_e * K_L * K_S * K_d * K_C * K_T * K_m \quad \text{Ecuación 10}$$

En la determinación del factor de concentración de esfuerzos y del factor de tamaño se debe suponer un diámetro de diseño.

$$K_f = 1 + q * (K_t - 1) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$K_d = 1.189 * d^{-0,112}. \quad \text{Ecuación 12}$$

Cabe mencionar que las cargas son reversibles y que la potencia en la entrada del eje es constante debido a que es entregada por medio del sistema de transmisión de cadena; impulsada por la potencia del motor principal. Es necesario para conocer el esfuerzo alterno (σ_a) en determinado punto del eje; saber el momento

generado en él mismo; al igual que la determinación del torque para encontrar el esfuerzo de corte medio (τ_m). A continuación, se muestran los cálculos de diferentes factores.

$$\sigma_a = \frac{32 * M f}{\pi * d^3} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\tau_m = \frac{16 * T f}{\pi * d^3} \quad \text{Ecuación 14}$$

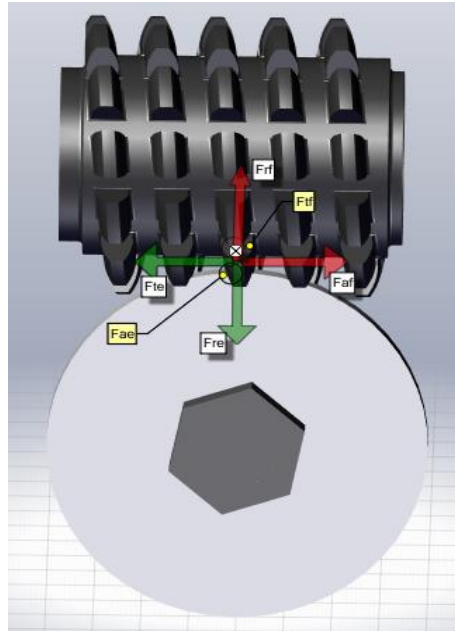
Tabla 7. Factores de diseño para el material del eje de la fresa

Símbolo	Nombre	Valor
S_{ut}	Resistencia última a tracción	661,8[Mpa]
S_e	Limite a fatiga como material ideal	330,9[Mpa]
K_L	Factor de carga	1,4
K_S	Factor de acabado superficial	0,87
K_d	Factor de tamaño	0,9
K_C	Factor de confiabilidad	0,836
K_T	Factor de efectos de temperatura	1
K_m	Factor de efectos misceláneos	1,8
S'_e	Limite a fatiga como material afectado	483,1[Mpa]
M_F	Momento generado en el punto de la fresa madre	171[N*m]
T_F	Torque generado en la fresa madre	22,5[N*m]
q	Tabla Alfredo Parada	0,62
K_t	Factor concentración de esfuerzos estáticos	1,1
K_f	Factor de concentración de esfuerzos	1,062
N	Factor de seguridad	2

Para un diseño más conservativo se recomienda utilizar un diámetro mayor al hallado por teoría (aproximadamente $d = 23 \text{ mm}$) soportando mayores cargas; en este caso en particular, el diámetro del eje de la fresa madre será de $d = 30 \text{ mm}$.

4.2.1 Diseño del eje - pieza base. En la fabricación del engranaje como ya se describió, se generan fuerzas de contacto entre la herramienta y el material base.

Figura 49. Fuerzas generadas tanto en la fresa como en la pieza a maquinar.



Se denota que en la herramienta de corte la magnitud de la fuerza tangencial corresponde a la fuerza axial del engrane a fabricar; así como su fuerza axial a la fuerza tangencial del mismo con direcciones opuestas, así:

Tabla 8. Fuerzas resultantes en la transmisión

Fuerza axial fresa = fuerza tangencial del engrane.	$F_{af} = F_{te}$	7920[N]
Fuerza tangencial fresa = fuerza axial del engranaje.	$F_{tf} = F_{ae}$	648[N]
Fuerza radial de la fresa = fuerza radial del engranaje.	$F_{rf} = F_{re}$	1130[N]

El traslado de la fuerza tangencial sufrida en la periferia del polímero (material base para el mecanizado) al centro del eje, genera un torque en él mismo; de manera continua el traslado de la fuerza axial genera en el eje un momento de manera proporcional al radio del engranaje que se quiera fabricar. De igual forma se analiza el eje y los resultados de los factores y diferentes términos de la ecuación de Misess-Goodman (ecuación 9) se muestran en la tabla siguiente

Tabla 9. Factores de diseño para el material en el eje del polímero

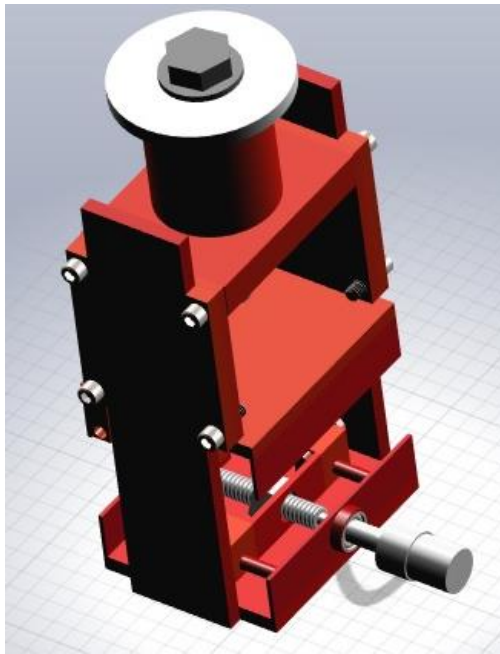
Símbolo	Nombre	Valor
S_{ut}	Resistencia última a tracción	661,8 [Mpa]
S_e	Limite a fatiga como material ideal	330,9 [Mpa]
K_L	Factor de carga	1
K_S	Factor de acabado superficial	0,76
K_d	Factor de tamaño	0,7984
K_C	Factor de confiabilidad	0,8696
K_T	Factor de efectos de temperatura	1
K_m	Factor de efectos misceláneos	1,8
S'_e	Limite a fatiga como material afectado	483,1 [Mpa]
M_e	Momento generado en la pieza base con el diámetro mayor	32,4 [N-m]
T_e	Torque generado en la fresa madre con el diámetro mayor	396 [N-m]
q	Tabla Alfredo Parada	0,62
K_t	Factor concentración de esfuerzos estáticos	1,2
K_f	Factor de concentración de esfuerzos	1,124
N	Factor de seguridad	2

Al igual que el eje de la herramienta de corte; la recomendación en el diámetro del eje que soporta al polímero para maquinar es que sea un tanto mayor al hallado por teoría de diseño; en este caso el diámetro será de: 20 [mm].

4.3 ANÁLISIS Y DISEÑO CONJUNTO DE ELEVACIÓN

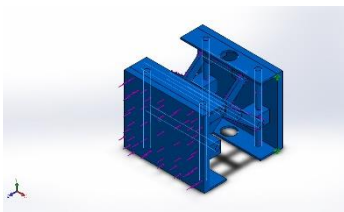
El sistema de elevación está compuesto por un mecanismo de brazos tipo tijera sujetos por medio de una placa interna soldada a un mecanismo de tornillo de potencia. El tornillo se mueve gracias a la acción de un torque generado por un motor de corriente continua que permite el desplazamiento vertical del conjunto. El conjunto que soporta el peso de la placa superior del eje de la pieza base que sirve para posicionarla y de un rodamiento seleccionado que permite el giro de la pieza por la acción de las hélices inclinadas de la fresa.

Figura 50. Mecanismo de elevación con sus componentes



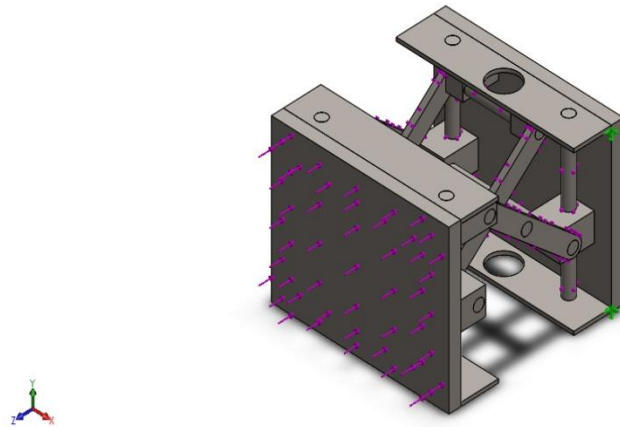
El peso distribuido que carga la placa superior del mecanismo de elevación se estimó gracias a sus dimensiones y al material del que está hecho. Con un valor cercano a 1.5 kg. Para garantizar el perfecto funcionamiento de éste mecanismo se realizó un análisis del comportamiento mediante el software solidworks.

Tabla 10. Propiedades del material mostradas en el análisis estático.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: $5.3e+08 \text{ N/m}^2$ Límite de tracción: $6.25e+08 \text{ N/m}^2$ Módulo elástico: $2.05e+11 \text{ N/m}^2$ Coefficiente de Poisson: 0.29 Densidad: 7850 kg/m^3 Módulo cortante: $8e+10 \text{ N/m}^2$ Coefficiente de dilatación térmica: $1.15e-05 \text{ /Kelvin}$	Placa superior Placa inferior Guías laterales Brazos tijera Ejes guía Tornillo de potencia tuerca

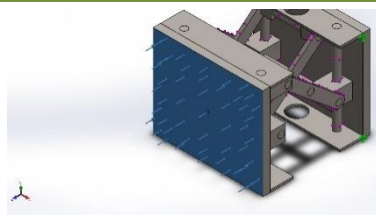
La carga se aplica en dirección normal con respecto a la placa superior del conjunto. Los diferentes componentes mecánicos que lo forman, sufren esta carga de pandeo lo cual lleva al sistema a flexionarse. El objetivo del análisis estático es garantizar la no fractura de ningún elemento y que la flexión sea mínima.

Figura 51. Carga normal sobre la placa superior del conjunto de elevación



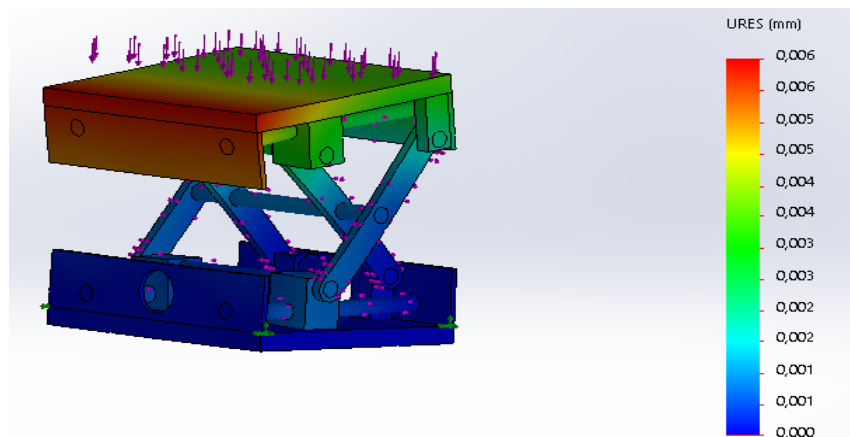
De presentar en los resultados un fallo por resistencia de materiales en alguna pieza mecánica o un pandeo considerable; se procede aumentar las dimensiones del conjunto o seleccionar un material con una resistencia mayor.

Tabla 11. Cargas en el mecanismo de elevación. Información análisis estático

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades: 4 vértice(s) Tipo: Geometría fija			
Fuerzas resultantes					
Componentes		X	Y	Z	Resultado
Fuerza de reacción(N)		8.33273e-05	-9.12547e-05	14.9999	14.99

Las cargas presentadas en dos direcciones se consideran nulas; y es la carga resultante distribuida de 15[N] la responsable de producir pandeo. En la figura se ven los resultados de deflexión del conjunto de elevación.

Figura 52. Deflexión del conjunto de elevación realizado por solidworks



La máxima deformación se ve reflejada en la placa superior del mecanismo; sin embargo, es un valor bastante aceptable el arrojado por Solidworks de 0.006 [mm]. Además, se muestra la deformación en los brazos de la tijera; elementos que junto con la placa superior son puntos críticos, donde también es aceptable con valores de 0.004[mm].

4.4. DISEÑO DE TORNILLO PRINCIPAL

Se define como un actuador lineal que convierte el movimiento de rotación del tornillo en el movimiento lineal de la tuerca, con pocas pérdidas por fricción. El eje roscado facilita el movimiento de esferas o bolas ubicadas en el interior de la tuerca, actuando como un tornillo de precisión. Gracias a sus características tienen ventajas como: el rozamiento entre los componentes principales es menor, puede fabricarse con tolerancias estrechas, y como mecanismo de alta precisión se pueden usar en aplicaciones que así lo requieran. Además, como el esfuerzo se reparte entre la cantidad de bolas, es capaz de aplicar o resistir altas cargas de empuje.

Figura 53. Tornillo de bolas recirculantes



Fuente: disponible en: https://www.thk.com/?q=es_es/node/10716

Su funcionamiento radica en el movimiento de las bolas sobre el eje

desplazándose entre la rosca de tornillo y la tuerca. Las bolas se encuentran en una cámara dentro de la tuerca y con la ayuda de un circuito interno que permite la recirculación de las bolas, se genera el desplazamiento de la tuerca.

En la transmisión de potencia por medio de tornillos; se recomienda utilizar roscas de filete cuadrado y de diente de sierra; aunque esta última solo transmite potencia en una dirección. Hay que tener en cuenta que el carro principal se desplazara en la dirección horizontal hacia adelante y en reversa; así que su diseño se calcula para una rosca de perfil cuadrado.

La carga (W) a desplazarse incluye el peso de varios componentes mecánicos: carro principal que soporta al conjunto de elevación conformado por: la plataforma inferior y superior del mecanismo, tornillo y tuerca de potencia interno, brazos y guías de elevación, porta eje y eje de la pieza base. Las ecuaciones que se muestran a continuación sirven para calcular el torque que se debe suministrar al tornillo para garantizar su movimiento, respecto al peso que soporta y su geometría.

$$T_s = \frac{dm \cdot W}{2} * \left[\frac{\pi \cdot dm \cdot f_s + h \cdot p \cdot \cos \theta}{\pi \cdot dm \cdot \cos \theta - h \cdot p \cdot f_s} \right]. \quad \text{Ecuación 15}$$

$$T_b = \frac{dm \cdot W}{2} * \left[\frac{\pi \cdot dm \cdot f_s - h \cdot p \cdot \cos \theta}{\pi \cdot dm \cdot \cos \theta + h \cdot p \cdot f_s} \right]. \quad \text{Ecuación 16}$$

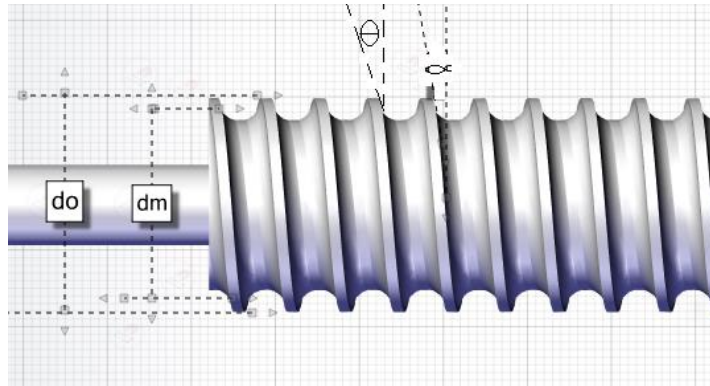
En la figura 54 se muestra la geometría básica de un tornillo, se denota el ángulo del filete como θ y el ángulo de hélice α , donde el valor de éste último es muy pequeño y cumple la condición:

$$\cos(\alpha) \simeq 1 \quad \text{Ecuación 17}$$

El coeficiente dinámico μ recomendado según Alfredo Parada es basado en el tipo de material del tornillo y de la tuerca; que en este caso son aceros lubricados.

$$f_s = 1.33 * \mu \quad \text{Ecuación 18}$$

Figura 54. Geometría tornillo de potencia principal



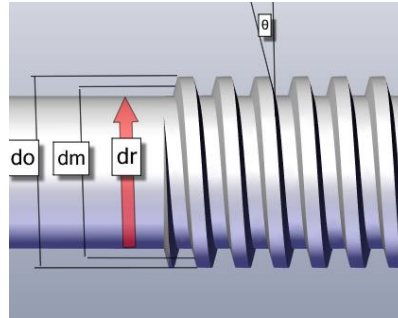
A continuación, se muestran los valores calculados para el tornillo.

Tabla 12. Dimensionamiento calculado en el tornillo de potencia principal

Símbolo	Nombre	Valor
<i>de</i>	Diámetro externo	25.4 [mm]
<i>dr</i>	Diámetro de raíz	18 [mm]
<i>dm</i>	Diámetro medio	22.8 [mm]
<i>h</i>	Altura del diente	2.6 [mm]
<i>W</i>	Carga maxima a desplazar	118 [N]
<i>fs</i>	Coeficiente estático entre tornillo – tuerca	0.2
<i>P</i>	Paso	6.35 [mm]
θ	Ángulo del filete	15 grados
α	Ángulo de hélice	8 grados
<i>Ts</i>	Torque de subida	630 [N-mm]
<i>Tb</i>	Torque de bajada	28[N.mm]

4.4.1 TORNILLO DE ELEVACIÓN. La carga soportada por el mecanismo de elevación (subiendo y bajando) incluye el peso total de los componentes mecánicos: eje porta-pieza, soporte superior, plataforma vertical que soporte al eje, pieza a mecanizar, tuerca de apriete, anillos de sujeción y placa superior de la estructura de tijera.

Figura 55. Geometría del tornillo de potencia vertical



Las ecuaciones para el cálculo del diseño son las mismas que las ecuaciones 15, 16, 17 y 18; que describen el análisis de un tornillo de potencia de rosca trapezoidal para ángulos de hélice menores a 12 grados. A continuación, se muestran los resultados para el diseño del tornillo de potencia interno (tornillo responsable del desplazamiento vertical del conjunto de tijera).

Tabla 13. Dimensionamiento del tornillo de potencia subconjunto de elevación

Símbolo	Nombre	Valor
<i>de</i>	Diámetro externo	14[mm]
<i>dr</i>	Diámetro de raíz	10[mm]
<i>dm</i>	Diámetro medio	12[mm]
<i>n</i>	Altura del diente	2[mm]
<i>W</i>	Carga a subir y bajar	20[N]
<i>Fs</i>	Coefficiente estático entre tornillo – tuerca	0.266
<i>P</i>	Paso	1[mm]
<i>θ</i>	Ángulo del filete	12 grados
<i>α</i>	Ángulo de hélice	0.1 grados
<i>Ts</i>	Torque de subida	32[N.mm]
<i>Tb</i>	Torque de bajada	25.8[N.mm]

4.5 TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Un requisito clave para la definición del tipo de transmisión fue la velocidad de rotación máxima con la que debía girar la fresa madre. Su valor nominal no debía exceder los 465 rpm, debido a que la rueda base en cada uno de los materiales plásticos seleccionados presentaban un calentamiento excesivo que conducía a quemar el material (ver prueba 1- capítulo 6). Por lo tanto, comenzamos con la selección de un motor eléctrico teniendo en cuenta consideraciones y requerimientos del módulo.

Analizando las condiciones ambientales, el índice de protección, el espacio de instalación, la potencia nominal y el ciclo de trabajo. Se concluye que la temperatura de trabajo no se excederá según la normativa debido al propósito didáctico que tiene el módulo; es decir, no se utilizará para producción de engranajes. De igual modo las condiciones externas (humedad, temperatura ambiente no serán extremas. Teniendo presente lo anterior y los productos ofrecidos en el comercio, se escoge un motor monofásico marca Kemmer de 0.55 kw de potencia con una velocidad de salida de 1730 rpm.

Figura 56. Motor monofásico del módulo/ placa del motor



Las demás características del motor como el factor de potencia [0.92 – 0.95] y el índice de protección: 44, garantizan tranquilidad y cumplimiento con nuestra selección. Recordando que el valor de la potencia calculada para garantizar el maquinado de las piezas fue mucho menor, la decisión de adquirir este motor influye en su economía y que se tiene potencia suficiente para sugerir cambios a futuro con el manejo del módulo por parte de los estudiantes de la escuela como fabricación de engranajes metálicos, diseño de otro tipo de fresa madre, etcétera.

Teniendo definidos los valores de potencia y velocidad de rotación que suministra la fuente de energía principal, se plantea la opción de calcular un sistema de transmisión de potencia mediante cadenas, ya que la velocidad de rotación del motor es bastante alta para el valor máximo que queremos (458rpm).

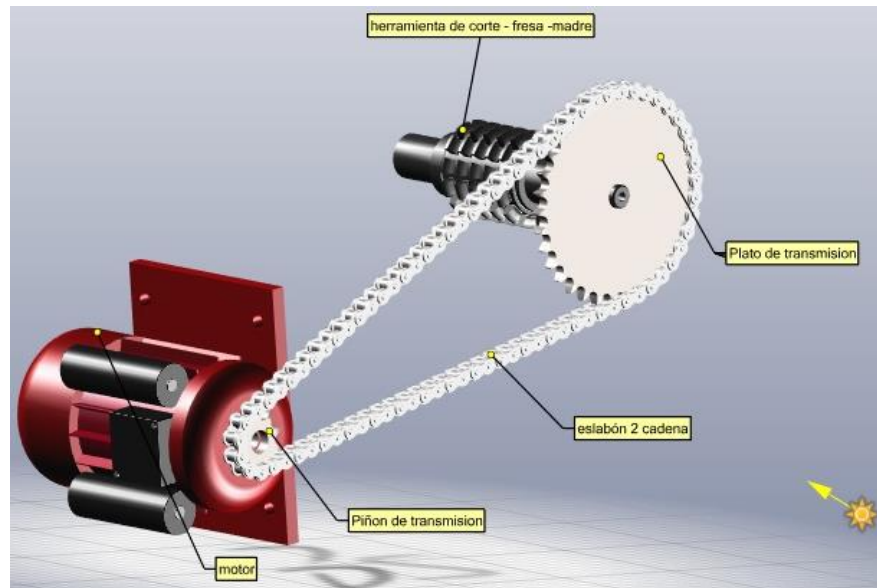
Gracias a un cálculo más sencillo de la rueda y el piñón necesarios para la transmisión, y como se conoce la velocidad de cada uno, se tiene que:

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{z_2}{z_1}$$

Donde la relación entre una rueda dentada y un piñón para las velocidades de rotación que tenemos será de: $w_1/w_2 = 3.7772$. A manera de prueba y error, encontramos dos valores de número de dientes para piñón y rueda que su cociente sea cercano al valor mostrado anteriormente. Los valores tomados serán de $z_1 = 9$ y $z_2 = 34$.

Al finalizar la iteración de valores, recalculamos la velocidad de rotación que tendrá la fresa: $w_2 = 457.94 \text{ rpm}$; valor ideal para el funcionamiento de la fresa.

Figura 57. Transmisión de potencia por cadena del módulo



La longitud recomendada por fabricantes para la cadena se encuentra primero con la potencia del motor, el factor de servicio y las rpm en el eje del piñón. Según las tablas (ver Anexo D) para una velocidad de 1800 rpm, una potencia de diseño de 0,75 hp se obtiene:

Una cadena # 35 con $p = 3/8 \text{ in}$. Además se recomienda una distancia entre centros en el intervalo de: $30p \leq C_d \leq 50p$. Según el espacio establecido, la distancia entre centros es de 35.5 cm, y se tiene: $C_d/p = 37.25$ siguiendo la recomendación.

Finalmente, la longitud óptima de la cadena en función del número de pasos se calcula con la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{p} = \frac{2 * C_d}{p} + \frac{(z_2 + z_1)}{2} + \frac{(z_2 - z_1)^2}{4\pi^2 * \left(\frac{C_d}{p}\right)}$$

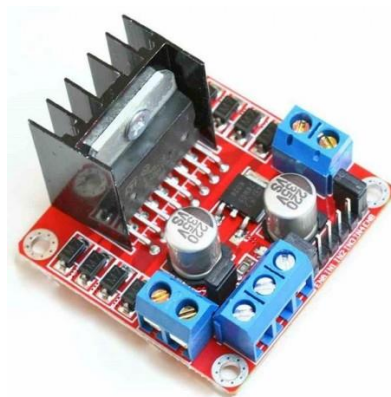
Al resolver se tiene: $L = 96.42 * P = 37 \text{ in} \equiv 94 \text{ cm}$

5. SISTEMA ELECTRÓNICO Y COMPONENTES

A nivel mundial automatizar un proceso específico es tan común, debido a las ventajas que trae. En muchos casos la calidad y el servicio mejoran notablemente reduciendo costos. Para el módulo de fresado por generación se hace importante, ya que los diferentes componentes de este sistema son los encargados de recopilar, organizar y mostrar información valiosa para su correcto funcionamiento.

Gracias a la tarjeta Arduino UNO, una placa que cuenta con entradas/salidas analógicas y digitales que solo necesita ser conectada e instalar su software para manejar diferentes elementos electrónicos como los motores de corriente directa de 12 Vc, que son los encargados mover los tornillos de potencia en conjunto con el módulo L293n. Un módulo L293N puente H (figura 58) es una tarjeta diseñada para el control de motores de corriente directa, motores paso a paso, solenoides, entre otros. Los valores de corriente que manejará para el desplazamiento del tornillo principal y el mecanismo de elevación están entre los [2 - 3.5] amperios, valores que están en su rango de operación. Escogido por permitir la función requerida, su bajo costo y fácil adquisición en el mercado.

Figura 58. Módulo L293N



Fuente: Disponible en: <https://www.electronicainsurgentes.com/>

Una vez en movimiento los motores, los encargados de definir los puntos de salida y llegada del carro principal y del mecanismo de elevación son los sensores (finales de carrera y de herradura); ya que éstos envían la información a la tarjeta Arduino la cual procesa y transfiere según su tiempo de respuesta y según la rueda colocada (material) en el eje de mecanizado ubicado en la parte superior del mecanismo de elevación.

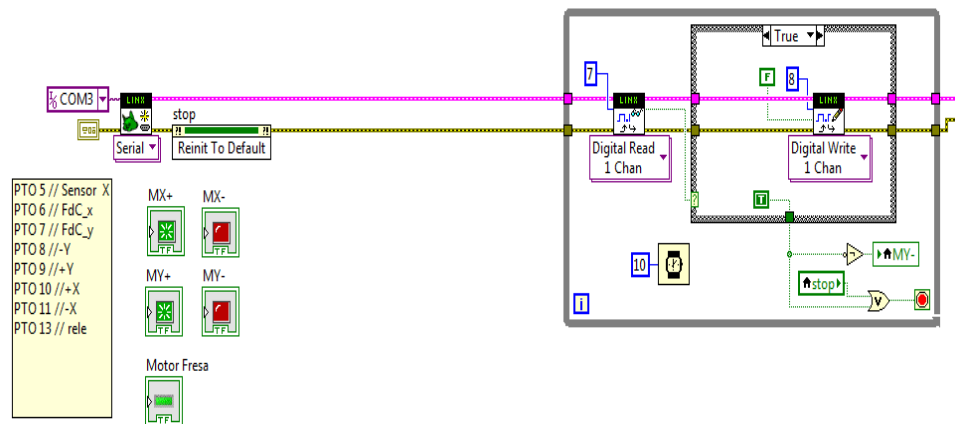
Figura 59. Sensores usados en el módulo de fresado



Disponible en: <https://moviltronics.com.co/sensores/411-sensor-infrarrojo-de-herradura-klh512.html>

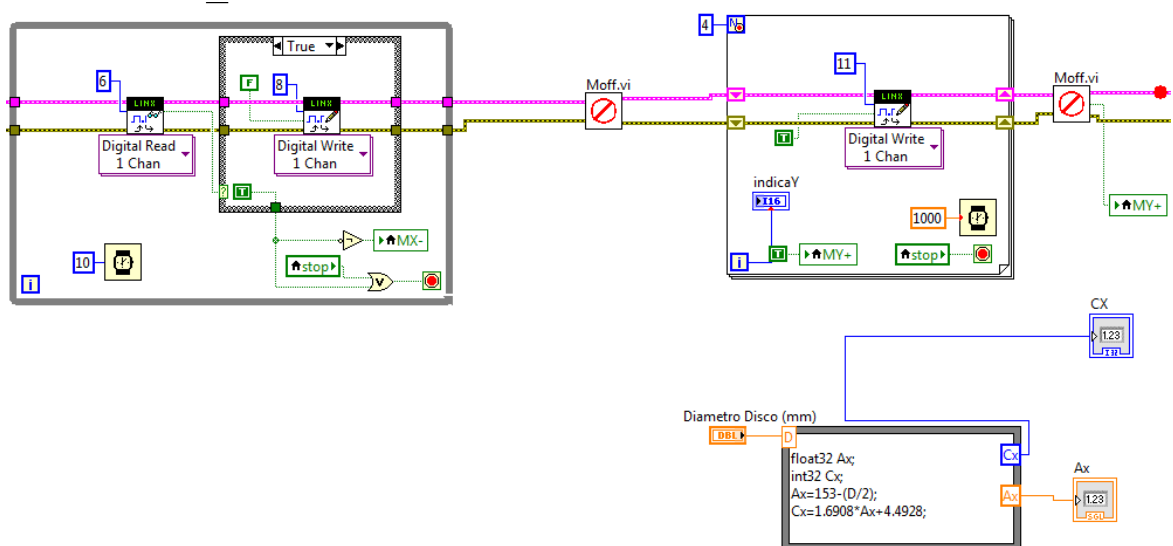
Una vez procesadas las señales el software de LabVIEW sigue la secuencia establecida en su programa base, la cual ya se describió en otro apartado de este libro. A continuación en la figura 66, se muestra la primera parte del diagrama de bloques de la interfaz de LabVIEW en el cual se asignan los puertos de entrada de la tarjeta Arduino Uno (8, 9, 10 y 11) encargados del movimiento de los tornillos en ambas direcciones (+x, -x) , (+y, -y). En el puerto (6 y 7) se alimentan los dos sensores finales de carrera para detectar las posiciones límites del carro principal y la tijera. El cuadro de la derecha permite el movimiento del mecanismo de elevación según una relación en función de la cantidad de vueltas y la distancia que debe bajar la pieza base hasta el punto de origen; en el cual está ubicado el final de carrera (FdC_y).

Figura 60. Bloques iniciales en LabVIEW



La siguiente figura muestra en su parte izquierda los diagramas de bloque que generan el movimiento del motor uno y el carro principal desde el punto de origen donde se ubica el final de carrera hasta un punto final posicionando el engranaje justo debajo de la fresa madre; lo cual el software realiza conociendo previamente como un dato de entrada el diámetro exterior de pieza base.

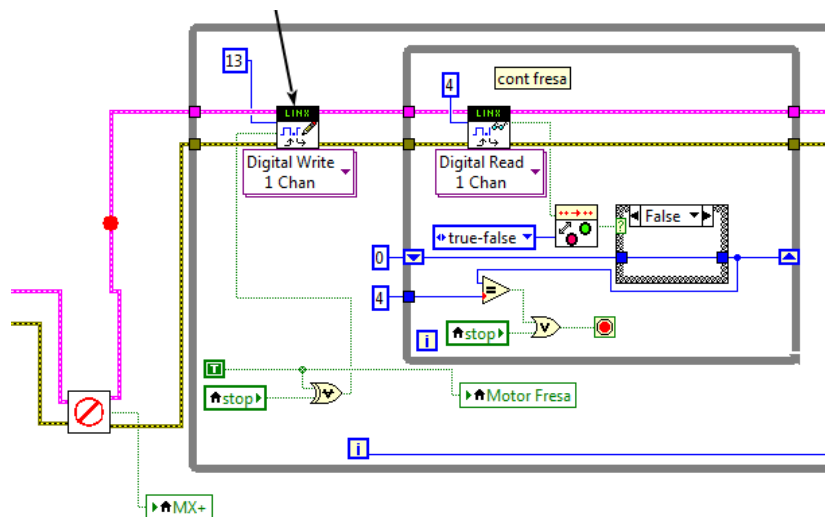
Figura 61. Bloques en LabVIEW programa módulo



El bloque de la parte derecha de la figura 61, hace posible mover el mecanismo de elevación calculando la posición indicada según el ancho de la pieza base; mediante una relación establecida mediante pruebas que determina el número de giros que debe dar el tornillo de elevación para desplazarse una distancia fija en centímetros. El bloque de la parte inferior derecha, lee como dato de entrada el diámetro de pieza base y le resta la distancia que hay entre el punto de origen y un punto justo debajo del primer diente de la herramienta.

En la figura 62 se programa el encendido de la fresa luego de tener la pieza base en un punto cercano a la fresa (justo en frente a unos milímetros). El circuito eléctrico y electrónico, permite al motor principal encenderse mediante la programación hecha para una cantidad determinada de revoluciones; las cuales fueron fijadas mediante pruebas que garantizaban el maquinado total de los dientes de la pieza base.

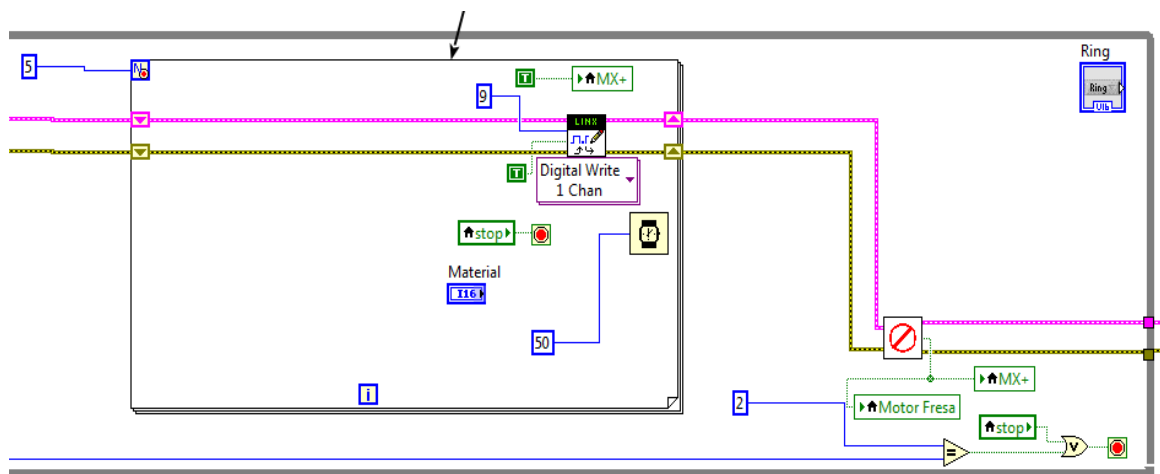
Figura 62. Parte encargada del encendido del motor principal



La figura 63 muestra el bloque quizá más importante; pues es el encargado de mover el carro principal y con ello, empezar el maquinado de los dientes; teniendo

y bajo un cierto número de revoluciones la fresa en movimiento. La distancia que se mueve el motor uno es calculada en base al número de revoluciones que debe girar dicho motor para desplazarse una distancia longitudinal de 9mm; que es el alto de los dientes de la fresa. Una vez culminado el tiempo de fresado; se ordena al motor principal parar.

Figura 63. Secuencia de corte fresa en LabVIEW



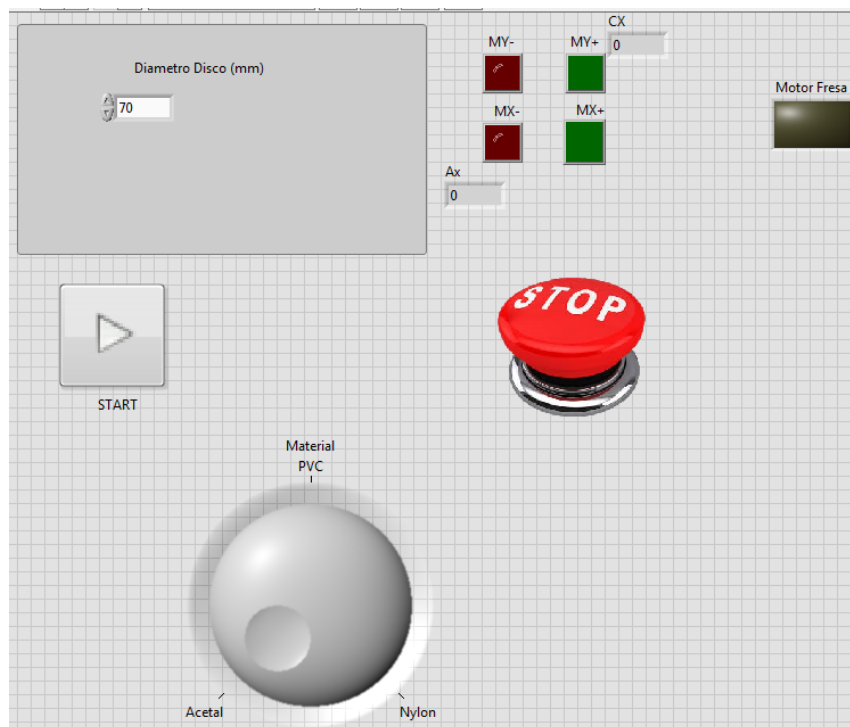
Finalmente retrocede el carro principal hasta tocar el final de carrera, ubicado en la posición de origen del eje x. De esta manera el módulo queda listo para repetir el ciclo de trabajo, ingresando un nuevo diámetro de pieza.

5.1 Interfaz LabVIEW

La interfaz gráfica me permite introducir como dato de entrada el diámetro de la pieza base en milímetros y el material del que está hecha. Además de seguir el movimiento en los respectivos ejes mediante el encendido de los cuadros ubicados en la parte derecha, agregando el tiempo que trabaja la fresa.

Y finalmente el botón de emergencia que permite accionar frente a cualquier irregularidad en la programación del módulo y como apoyo al botón físico, ubicado en la máquina.

Figura 64. Interfaz gráfica para control módulo



6. PRUEBAS Y ACABADO GENERAL

El comportamiento de los polímeros según la investigación realizada tiende a ser diferentes en cuanto a sus propiedades físicas y químicas según el tipo de fabricante que los lance al mercado. Es por esto, que antes de definir la velocidad de rotación de la fresa y para estar seguros, se decidió adquirir Nylon, Acetal y PVC a un proveedor de la ciudad de Bogotá y probar el comportamiento de varias ruedas bajo el corte de la fresa madre, en ese momento ya diseñada y fabricada.

Como no se tenía el montaje de la fresa fabricado (en proceso de diseño por esa época), la fresa madre se logró ubicar en un torno y realizar pruebas de corte para observar el comportamiento del material de las ruedas bajo ciertas variaciones, como: ir incrementando la velocidad angular y el avance de la pieza.

Figura 65. Pruebas de maquinado de piezas en los tres materiales



Comenzamos desde 300 rpm con avance de pieza muy pequeños, donde lo primero que se concluyó, fue que para dichos materiales en un proceso de fresado por generación el PVC era el más crítico en cuanto a la velocidad mínima que necesitaba (por encima de 380 rpm para garantizar la acción de corte de la fresa).

Por otro lado, cuando llegamos a valores por encima de 480 rpm, el acetal se calentaba formando quemaduras en la rueda base, originando dientes de forma irregular al terminar el proceso.

Finalmente, al encontrar un equilibrio con la velocidad de rotación de la fresa y un avance rápido de la pieza hacia la herramienta de corte y luego de varias pruebas, se obtuvo que con valores menores de 464 rpm los tres materiales se dejaban maquinar de forma satisfactoria sin presentar calentamiento excesivo en las caras o flancos de los dientes en formación. De igual manera, se observó que los avances de pieza hacia la herramienta; reducen considerablemente los tiempos de trabajo y ayudan a la formación de los dientes en los engranajes en fabricación tengan un mejor acabado; reduciendo la imprecisión en la geometría de cada uno de los dientes formados.

Figura 66. Engranajes producto de varias pruebas



Con el objetivo de mejorar el aspecto de la mayoría de componentes mecánicos que forman el módulo de fresado, se pintaron en negro con un esmalte especial acrílico que aporta a cada elemento de máquina una resistencia química y un acabado resistente tipo galvanizado evitando prematuras modificaciones en el aspecto por corrosión y oxidación.

6.1 Tratamiento de piezas

Como un complemento al proceso de fabricación de las piezas más importantes del módulo, es decir; aquellas que a futuro presentarán algún tipo de desgaste por el tiempo de trabajo y utilización de las mismas. Se realizó de manera rústica darles un tratamiento térmico, llevándolas al calentamiento cercano a los 650 C por medio de una fragua.

Figura 67. Fragua en proceso de endurecimiento de algunas piezas



Una fragua es una estructura utilizada para forjar metales, hecha de manera artesanal en ladrillo o piedra en la cual se hace circular aire de manera manual o mecánica hacia un recipiente donde se coloca algún tipo de combustible, por lo general carbón con el objetivo de prender el combustible y calentar o ablandar el metal que se quiera trabajar.

A medida que el carbón se quemaba por el aire que circulaba por el motor ubicado en la parte inferior de la fragua, la temperatura en la cámara interior de la fragua

aumentaba gradualmente, registrando dichos incrementos mediante un sensor infrarrojo que dio a conocer los valores de temperatura al que fueron sometidos la mayoría de piezas encargadas directamente del fresado, (fresa madre, eje porta-fresa, anillos de fijación, entre otros). Luego de llevarlas a la temperatura deseada por unos segundos, el proceso de enfriamiento se dio por medio de aceite frío, generando el choque térmico necesario para el endurecido de los elementos mecánicos del módulo.

Figura 68. Calentamiento de la fresa madre y control de temperatura.



Al final, se obtuvo un proceso de temple o endurecido de las piezas, mejorando sus propiedades físicas y químicas; reflejado en una mejor apariencia.

Figura 69. Registro de temperatura de enfriamiento

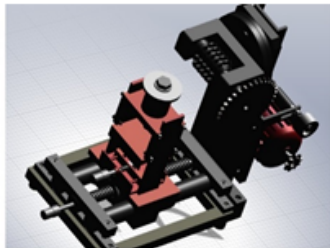


7. MANUAL DE USUARIO DE LA MÁQUINA

Como recomendación a la hora de manejar el módulo de fresado, se entrega un manual con las principales características de cada subsistemas mecánico, eléctrico y electrónico del mismo; el cual se recomienda leer detenidamente junto a los capítulos previos para facilitar su comprensión.



HERRAMIENTA -FRESA MADRE



ENCENDIDO DE LA MAQUINA

CONECTAR CORRIENTE ALTERNA:

El motor de transmisión de potencia a la herramienta de corte debe estar conectado a la línea trifásica 120v- 220v. **1**

Al finalizar el proceso de fabricación se debe desconectar la línea al motor principal de transmisión. **2**

La fuente de alimentación electrónica debe estar conectada a línea AC

La sincronización es debida al control electrónico

PRECAUCION

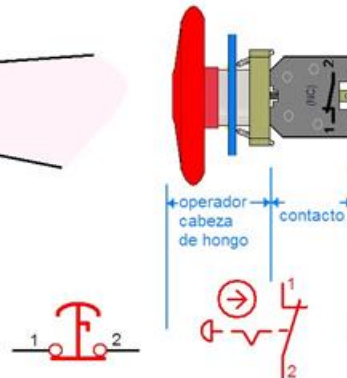


Símbolo es utilizado para dar información que puede ignorar; y así evitar lesiones

Cortes
Quemaduras

BOTON-SEGURIDAD MANUAL

Interrumpe el flujo de corriente que le da la potencia a la herramienta de corte; para su detención. 3



Motor:

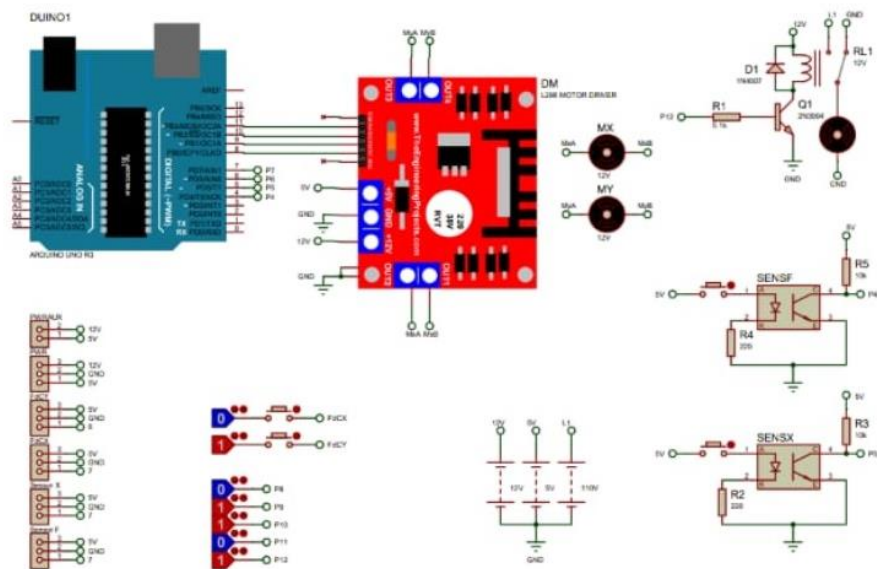
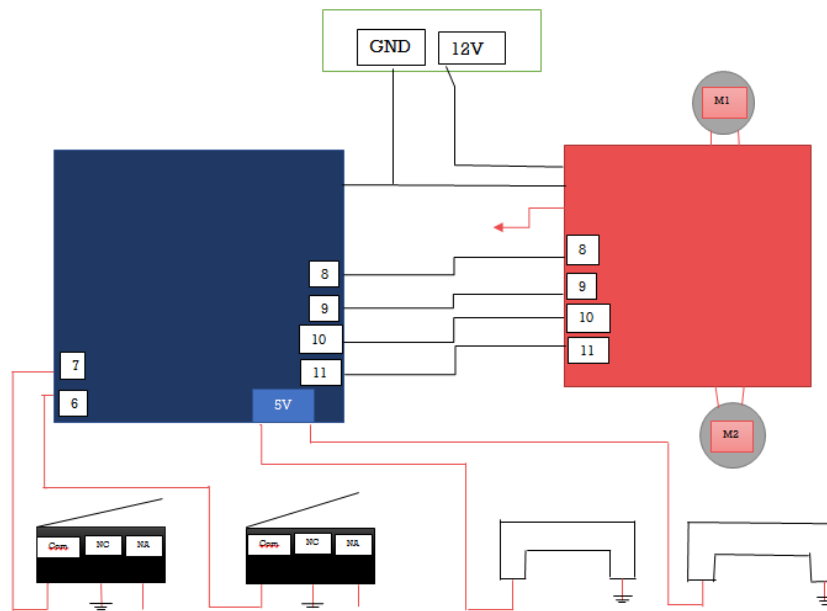
- No dejar el motor conectado a la línea de corriente posterior a su operación.
- Nunca utilice elementos inflamables cerca de su conexión.
- mantenga la posición del motor en un lugar (plataforma, base, suelo) bastante estable y rígido que reduzca las vibraciones del mismo.

- Conecte debidamente los polos de conexión.
- En funcionamiento evite el contacto total con el motor.
- En caso de revisión, asegurar que se encuentra en movimiento cero de revolución.

PRECACUIONES DE EMPLEO

- Asegurarse del alineamiento de la cadena de transmisión.
- Mantener la distancia de mínimo un metro en la operación de corte.
- La operación de corte debe estar supervisada por el docente apropiado.
- La máquina debe estar disponible en un lugar nivelado antes, durante y posterior de su operación.
- Bajo ninguna circunstancia de operación poner en contacto cualquier parte del cuerpo con la herramienta de corte.
- Bajo ninguna circunstancia de operación poner algún elemento ajeno en contacto con la herramienta de corte.
- En condición de operación, nunca acercar ninguna parte del cuerpo a la cadena de transmisión.
- En condición de operación, nunca poner algún elemento ajeno en la cadena de transmisión.
- Nunca acercar elementos ajenos en el trabajo que realizan los tornillos de potencia.
- Asegurarse de indicar el número de dientes que se desea fabricar en operación.
- Asegurarse de seleccionar el diámetro correcto del material base para la fabricación del engranaje.

Paso 1 conexión: Revisar conexiones de puertos en la tarjeta arduino, módulo l293n y sensores de herradura y finales de carrera.



Paso 2 componentes generales electronicos:

1. El interruptor POWER enciende el motor
El cable debe estar conectado a tensión de 120 -220 v
El botón de emergencia corta la corriente alterna del motor

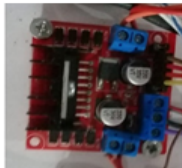
2. FUENTE



Alimentada por corriente alterna de [110-220 v]

- 10 pin conectado como puente a la placa electrónica 2
- 11 pin conectado como puente a la placa electrónica 2
- 5v pin de salida de voltaje de la tarjeta Arduino (alimentación de los sensores ópticos)

4. Placa electrónica 2



Puenteada con los pines 8, 9 10 y 11 de la Arduino.

Conexión directa con los motores de corriente continua
Recibe el voltaje de la fuente

5. Finales de carrera



Responsables de interrumpir la corriente que energizan los motores de 12 v
Puestos adecuadamente en el conjunto durante el recorrido de desplazamiento en ambos ejes.

Da una salida de voltaje de 12v
Entrega un amperaje de 2.5 A

3. Arduino UNO



6pin conectado al final de carrera **x**
7pin conectado al final de carrera **y**
8pin conectado como puente a la placa electrónica 2
9 pin conectado como puente a la placa electrónica 2

6. Sensores ópticos

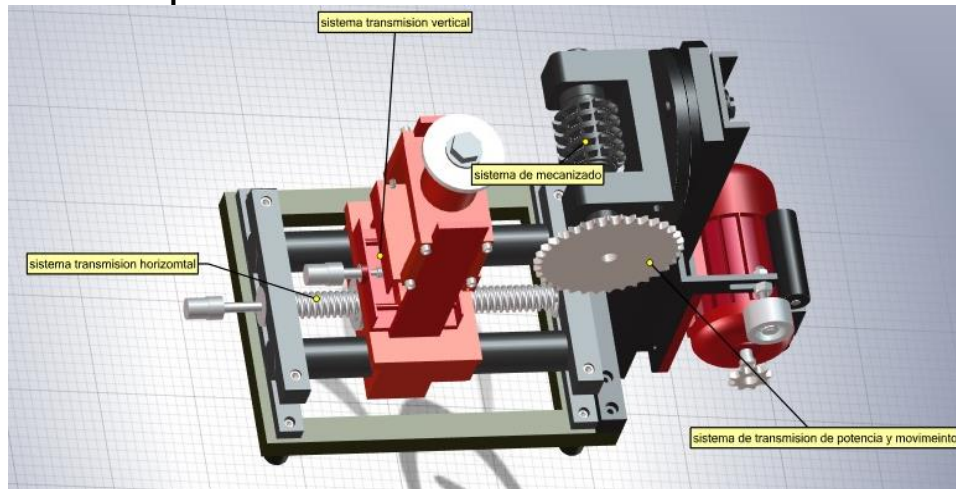


Censan la rotación (revoluciones) de los tornillos de potencia encargados de realizar los respectivos desplazamientos y colocar la pieza de trabajo en posición correcta para el inicio de mecanizado

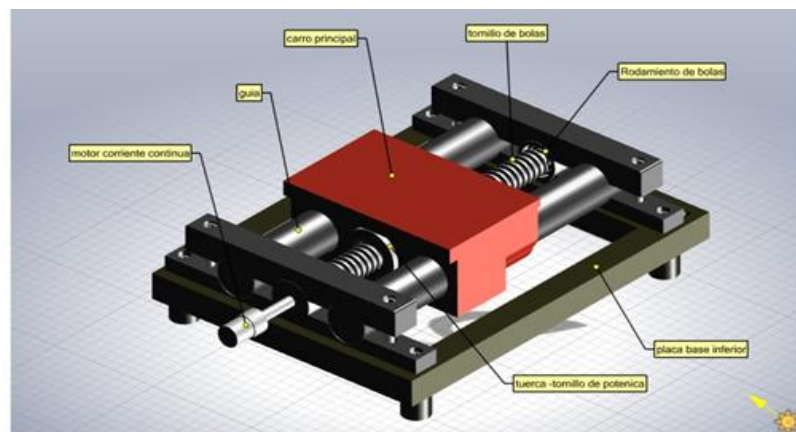
7. Motores de corriente continua alimentados por la fuente a 12 voltios
Entregan la rotación a los tornillos de potencia



Paso 3. Componentes mecánicos:

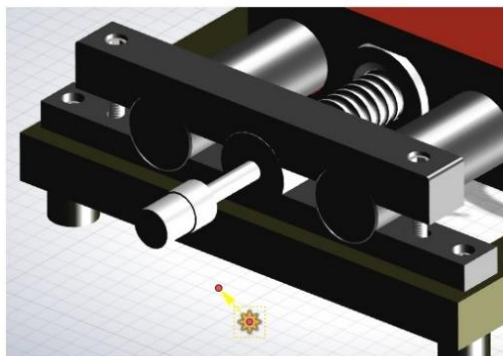


- **Sistema desplazamiento horizontal:**



- Carro principal
- Guías
- Motor de corriente continua
- Tornillo de potencia de bolas

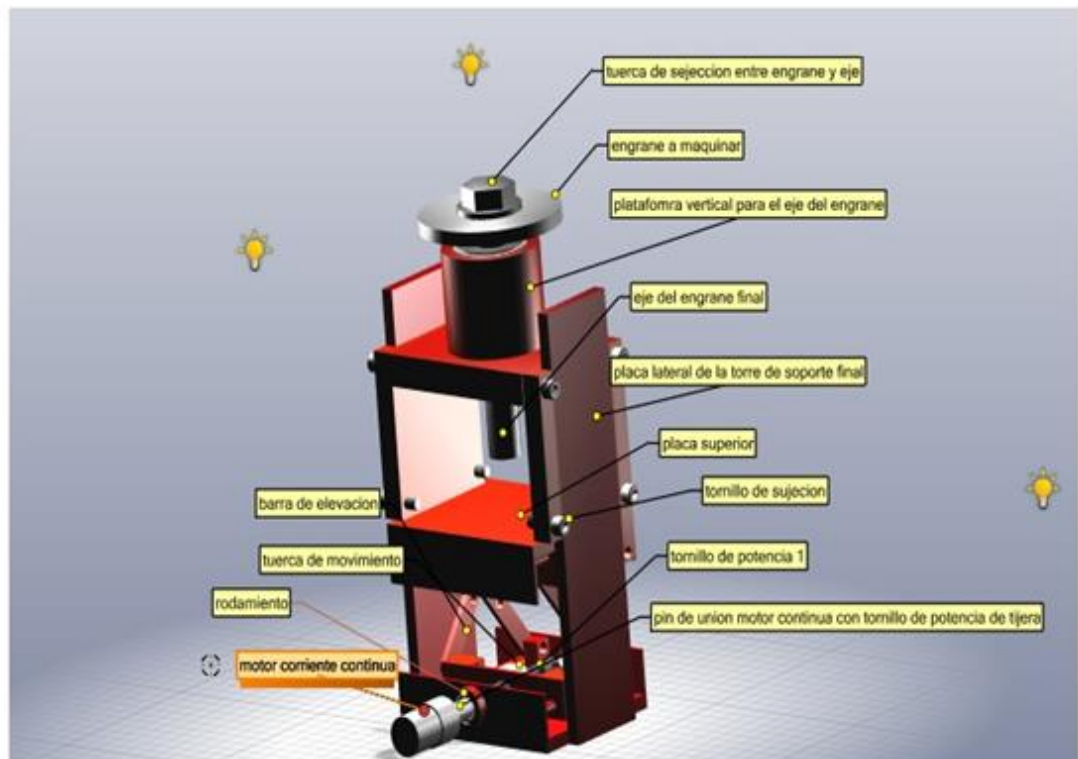
- Tuerca de potencia
- Rodamientos de bolas
- Placa inferior de soporte



Motor corriente continua impulsa el movimiento del tornillo haciendo girar la tuerca

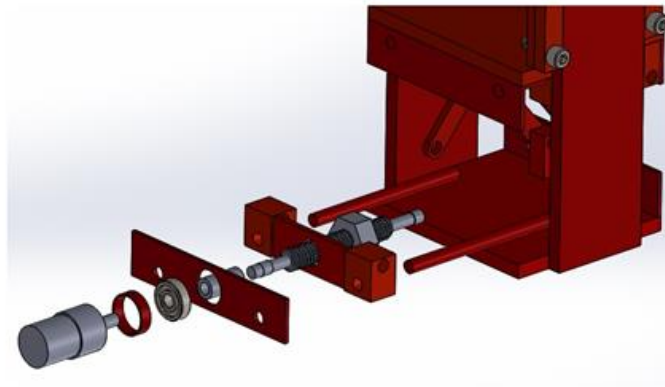
que esta acoplada al módulo de desplazamiento en dirección X

♦ **Sistema desplazamiento vertical:**

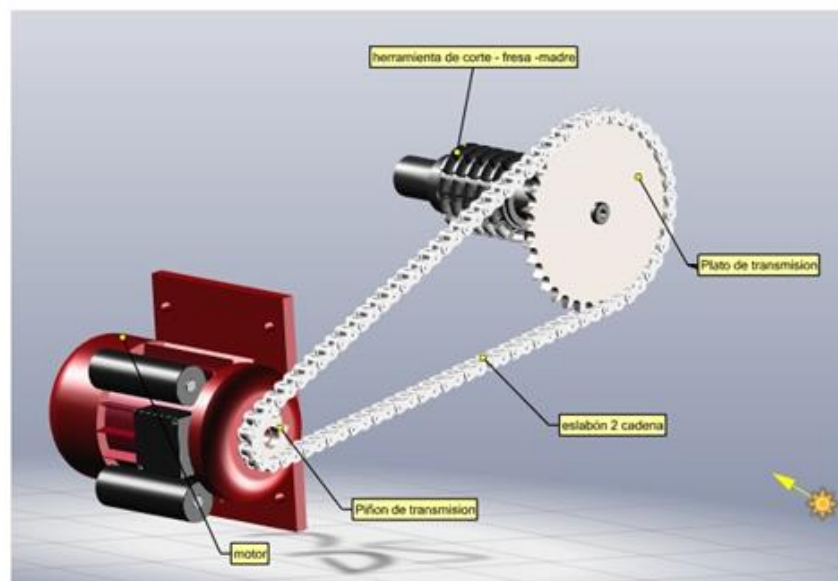


- ♦ Sistema de elevación tipo tijera
- ♦ Accionado por el movimiento de un tornillo de potencia
- ♦ Los brazos de la tijera se encuentran soldados a una guía unida a la tuerca de giro

- ♦ Las placas laterales soportan vibraciones en los tiempos de operación
- ♦ El polímero es puesto en su eje y apretado con tuerca
- ♦ En el giro del eje del polímero esta soportado por dos rodamientos de bolas



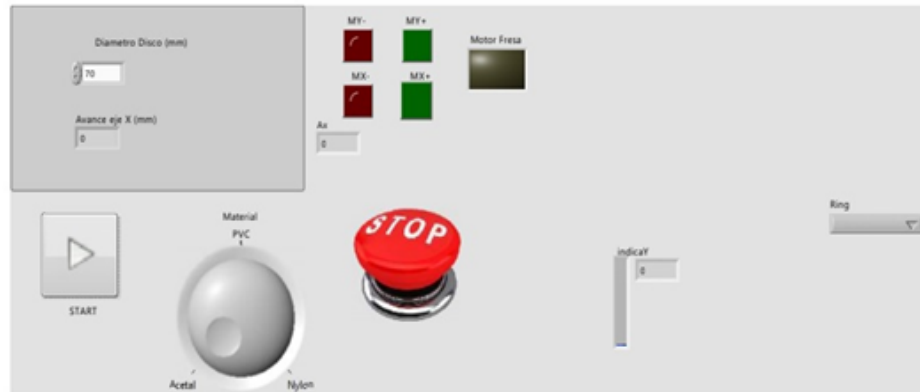
Sistema de transmisión de movimiento:



- ♦ Motor de corriente altera:
1730[rpm]
0.75[hp]
- ♦ La transmisión es debida a una cadena que une Piñón-plato
- ♦ El plato disminuye las rpm en la salida del eje de la fresa:
- ♦ 458[rpm]

4. indicaciones de mando:

Pantalla de inicio interfaz LabVIEW:



1. Se introducen datos de diámetro exterior del engranaje que se quiere fabricar
2. Se selecciona el material de la pieza que se va a maquinar
PVC
Nylon
Acetal
3. Se pone en START para el inicio del proceso de control electrónico
4. Tener presente el botón STOP para parar el proceso de sincronización electrónica.
5. La herramienta de corte (fresado madre) únicamente fabrica engranajes rectos.

En la pantalla de control de mando existe el botón de seguridad **STOP**:

- ♦ Interrumpe el proceso electrónico de mando



8. CONCLUSIONES

1. Se realiza un módulo de fresado por generación bastante completo, en el sentido que los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica podrán comprobar y reforzar sus conocimientos en cuanto a geometría de engranajes rectos, la influencia del material de diseño y las características principales de la fresa madre como herramienta de corte.

Además de la programación y secuencia a través de componentes electrónicos para llevar a cabo un determinado proceso. En este caso la obtención de un engranaje ideal y listo para ser estudiado, mediante el análisis de sus propiedades físicas lo cual era parte importante de los objetivos de éste módulo.

2. La experimentación y la investigación previa llevaron a comprobar la diferencia entre el maquinado, las propiedades físico-químicas y los procesos de manufactura que se emplean en engranajes rectos en materiales plásticos y los comercialmente industriales: metales. La escasa información disponible en cuanto al estudio de fresado de engranajes plásticos, nos llevó a realizar pruebas específicas antes de diseñar y elegir componentes mecánicos necesarios para el funcionamiento del módulo.

3. Gracias a las características geométricas de la herramienta de corte (fresa madre) la sincronización entre pieza de trabajo y herramienta resultó ser menos compleja, debido a la similitud de su movimiento con el mecanismo tornillo sin fin-corona. Al final el diseño de la fresa depende de características como su longitud, diámetro, número de cuchillas entre otros que permiten al fabricante optimizar recursos y aprovechar al máximo las dimensiones de la misma.

4. Se fabrica al final un módulo con el propósito de brindarle a los alumnos de la escuela, opciones en cuanto a innovación y desarrollo de propuestas que incentiven la investigación y formulación de nuevos proyectos. Por ejemplo, se fabrica y entrega una fresa madre que con un análisis previo pueda ser utilizada para el maquinado de engranajes en algunos metales, esto gracias al material con que fue fabricado y al endurecido de forma no industrial que se desarrolló.

9. OBSERVACIONES

Para manejar el módulo se deben seguir todas las recomendaciones del manual de uso previas al y durante el funcionamiento del mismo, ya que existen elementos como la herramienta de corte y el motor monofásico principal los cuales con un mal manejo podría dañar la operación normal de la máquina o incluso afectar la integridad de quien la esté operando.

La mayoría de componentes mecánicos de la fresa se diseñaron y construyeron para ser utilizados en diferentes condiciones de trabajo. Por ejemplo, la herramienta de corte (fresa madre de módulo 4 mm) podría tallar dientes de ruedas en materiales diferentes a los utilizados en las pruebas y ensayos. La programación realizada con la ayuda de LabVIEW y Arduino se puede modificar ya sea para optimizar el proceso de tallado o con otros fines académicos.

La interacción con el módulo, el uso adecuado y las posibles mejoras en pro de la investigación y el aprovechamiento óptimo como recurso del laboratorio de diseño de máquinas II queda por cuenta de los futuros profesionales.

BIBLIOGRAFÍA

ARDILA, C.H y RINCON, O.F. Software para el diseño y modelamiento graficas de herramientas de fresado utilizado en el maquinado de piezas. 2006, 423p. Tesis de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander.

BOOTHROY, Geoffrey. Fundamentos del corte de metales y de las máquinas-herramienta. Bogotá: McGraw-Hill Latinoamericana, 1978. 379p.

HAMROCK, J. Bernard. MachineElements. México: McGraw Hill/interamericana,2000. 380p.

HERMANN PFAUTER, Ludwigsburg. La Dentatura a Creatore. Per l'edizione italiana. Capítulo 3. ISBN 88 85009 36 0.

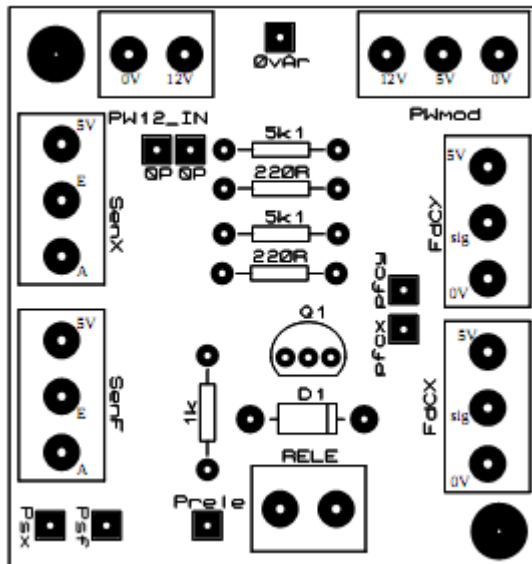
KIBBE, Richard y NELLY Jhon. Manual de Maquinas Herramienta vol2, México: Limusa, 1992. 488p.

PARADA, Alfredo. Fatiga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1990.72.p.

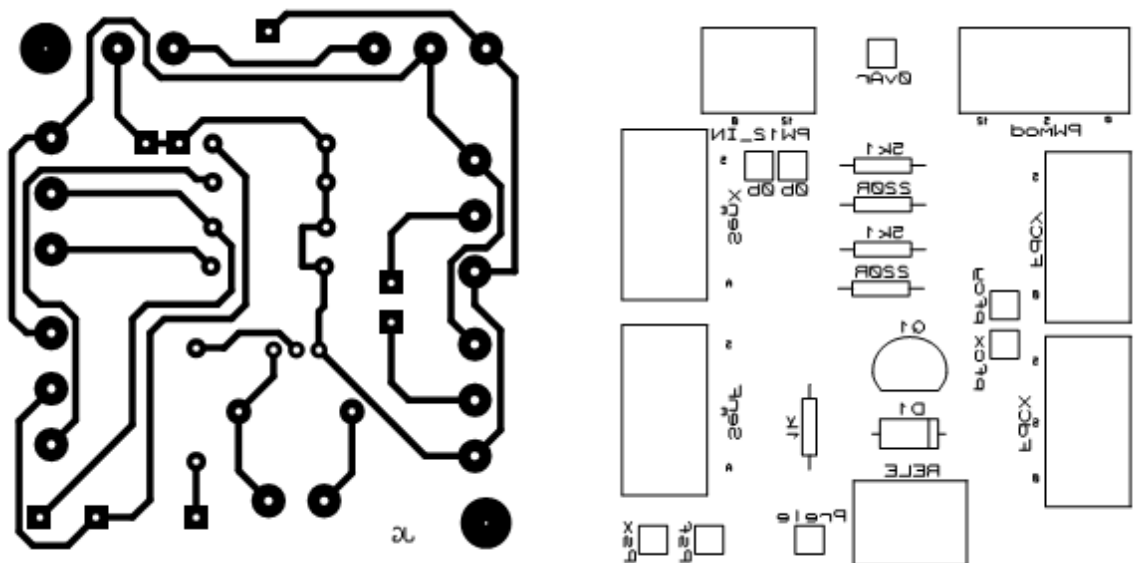
PARADA, Alfredo. Tornillos de Potencia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1990.25.p.

ANEXOS

Anexo A. Diferentes vistas Pcb placa auxiliar de conexión.



Vista frontal



Vista posterior Pcb

Anexo B. Parámetros de maquinado en fresado en diferentes materiales plásticos

		PA6, PA66		PE, PP		DELFIN		ARNITE		POLICARBONATO		PTE, PI/DE		PEEK		POLIAMIDAS (GFR)	
		α		α		α		α		α		α		α		α	
 α Clearance angle (°) γ Side angle (°) φ Front angle (°) V Cutting speed (m/min) f Pitch (mm)	CORTE	20-30	20-30	20-30	20-30	15-30	15-30	20-30	15-30	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10
		2	2	0	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0
		5	5	5	8	8	8	8	8	5	3	3	3	3	3	3	3
		500	500	500-800	300	300	300	300	300	500	100	500	100	800	200	500	100
 α Clearance angle (°) γ Side angle (°) φ Front angle (°) V Cutting speed (m/min) S Feed (mm/rev) The point angle β of the drill bit should be approx. 12° to 18°	TALADRADO	5-15	5-15	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10	5-10
		10	10	15	10	10	10	10	10	5	10	5	10	5	10	5	10
		20	20	30	20	20	20	20	20	20	30	10	30	10	30	10	30
		50	50	50	50	50	50	50	50	150	50	60	50	60	50	60	50
 α Clearance angle (°) γ Side angle (°) φ Front angle (°) V Cutting speed (m/min) S Feed (mm/rev) The feed can be up to 0.5 mm/tooth	FRESADO	10-20	10-20	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15	5-15
		5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	0	5	6	0	5	6
		15	15	15	15	15	15	15	15	15	10	5	15	10	5	15	10
		250	250	250	300	300	300	300	300	250	250	60	250	250	60	250	250

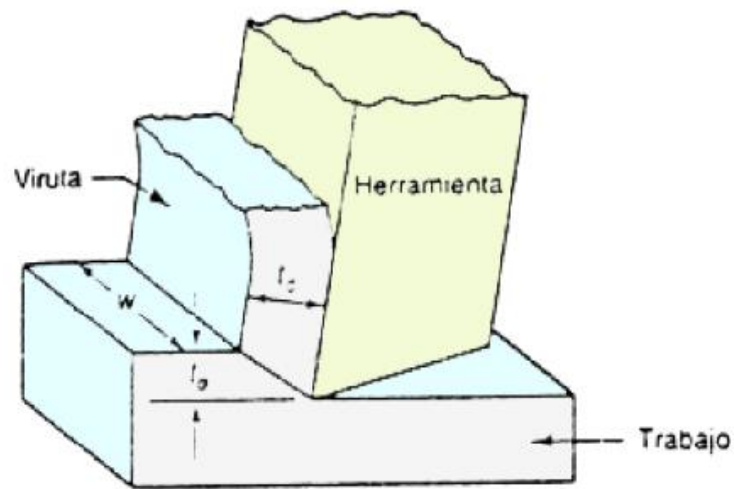
Parámetros para diferentes mecanizados en materiales plásticos. Industria

INGEMPLAS. Disponible en:

<http://www.ingemmeplas.com/CATALOGO/CATPLASTICOS.pdf>.

Anexo C. Teoría y análisis del comportamiento de una herramienta de corte

El análisis de cargas entre una herramienta de corte (en este caso fresa madre) y un engrane a maquinar se debe considerar diferente:



Viruta ocasionada en el material de trabajo debida a la herramienta de corte

Fuente: (Ardila & Rincon Herreño, 2006) (2006). software para el diseño y modelamiento graficas de herramientas de fresado utilizado en el maquinado de piezas. Bucaramanga.

Para un análisis más exacto del sistema de corte se deben considerar otros factores ya que como se observa en la figura existe una zona llamada plano de cizalladura, al igual que ángulo de cizalladura y espesor de la viruta:

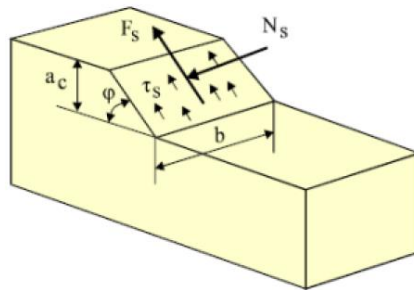
- Longitud del plano de cizalladura l_s ; proporcional al espesor de la viruta e inversamente proporcional al ángulo de cizalladura.

$$l_s = \frac{a_c}{\sen \phi}$$

- Espesor de la viruta no deformada a_c ; se considera la longitud del plano de cizalladura como una diagonal del material a maquinar; es decir se toma está longitud como una diagonal leve del total del ancho del diente a fabricar.
- Angulo de cizalladura ϕ
- Angulo de inclinación normal efectivo γ_{ne} ; comprendido entre la cara de la cuchilla de desprendimiento de la viruta y la normal al avance del engranaje a maquinar.
- Angulo medio de fricción; sobre la cara de la herramienta β .

Para realizar el fresado se debe garantizar superar el nivel de esfuerzo cortante $\tau_s = \frac{F_s}{A_s}$; ya que la fuerza de cizalladura F_s esta actuado en el plano de cizalladura sobre un área A_s que se puede calcular como:

$$A_s = \frac{t_0 * b}{\text{sen}\phi}$$



Planos de corte ejercidos en la remoción de la viruta y la herramienta de corte

Fuente: (Ardila & Rincon Herreño, 2006) Ardila, C.H, & Rincón Herreño, O.F. (2006). software para el diseño y modelamiento graficas de herramientas de fresado utilizado en el maquinado de piezas. Bucaramanga.

Anexo D. Lista de precios de los componentes principales del circuito electrónico

Bill Of Materials for Fresadora

Design Title Fresadora
Author
Document Number
Revision
Design Created lunes, 22 de octubre de 2018
Design Last Modified lunes, 22 de octubre de 2018
Total Parts In Design 23

5 Resistors			
Quantity	References	Value	Precio Unitario
1	R1	5.1k	\$200
2	R2,R4	220	\$200
2	R3,R5	10k	\$200
Sub-totals:			\$1,000
1 Transistores			
Quantity	References	Value	Precio Unitario
1	Q1	2N3904	\$1,000
Sub-totals:			\$1,000
1 Diodos			
Quantity	References	Value	Precio Unitario
1	D1	1N4007	\$1,000
Sub-totals:			\$1,000
16 Miscelaneo			
Quantity	References	Value	Precio Unitario
4	B1,MX,MY,RL1	12V	\$60,000
1	B2	5V	\$0
1	B3	110V	\$0
1	DM	L298 MOTOR DRIVER	\$20,000
1	DUINO1	ARDUINO UNO R3	\$30,000
1	J1	PWR	\$2,000
1	J2	Sensor X	\$1,500
1	J3	FdCX	\$1,500
1	J4	FdCY	\$1,500
1	J5	Sensor F	\$1,500
1	J6	PWRAUX	\$1,500
2	SENSF,SENSX	PC817	\$8,000
Sub-totals:			\$315,500
Totals:			\$318,500

lunes, 22 de octubre de 2018 10:04:45 p. m.

Anexo E. Tabla elegida para obtener el número de la cadena

Paso de la cadena 3/8 in

	No. of Teeth Small Splt.	Revolutions per Minute — Small Sprocket ^a												
		50	100	300	500	700	900	1200	1500	1800	2100	2500	3000	3500
		Horsepower Rating												
3/8-inch Pitch Standard Single-Strand Roller Chain — No. 35	11	0.10	0.18	0.49	0.77	1.05	1.31	1.70	2.08	2.45	2.82	3.30	2.94	2.33
	12	0.11	0.20	0.54	0.85	1.15	1.44	1.87	2.29	2.70	3.10	3.62	3.35	2.66
	13	0.12	0.22	0.59	0.93	1.26	1.57	2.04	2.49	2.94	3.38	3.95	3.77	3.00
	14	0.13	0.24	0.63	1.01	1.36	1.71	2.21	2.70	3.18	3.66	4.28	4.22	3.35
	15	0.14	0.25	0.68	1.08	1.47	1.84	2.38	2.91	3.43	3.94	4.61	4.68	3.71
	16	0.15	0.27	0.73	1.16	1.57	1.97	2.55	3.12	3.68	4.22	4.94	5.15	4.09
	17	0.16	0.29	0.78	1.24	1.68	2.10	2.73	3.33	3.93	4.51	5.28	5.64	4.48
	18	0.17	0.31	0.83	1.32	1.78	2.24	2.90	3.54	4.18	4.80	5.61	6.15	4.88
	19	0.18	0.33	0.88	1.40	1.89	2.37	3.07	3.76	4.43	5.09	5.95	6.67	5.29
	20	0.19	0.35	0.93	1.48	2.00	2.51	3.25	3.97	4.68	5.38	6.29	7.20	5.72
	21	0.20	0.37	0.98	1.56	2.11	2.64	3.42	4.19	4.93	5.67	6.63	7.75	6.15
	22	0.21	0.38	1.03	1.64	2.22	2.78	3.60	4.40	5.19	5.96	6.97	8.21	6.59
	23	0.22	0.40	1.08	1.72	2.33	2.92	3.78	4.62	5.44	6.25	7.31	8.62	7.05
	24	0.23	0.42	1.14	1.80	2.44	3.05	3.96	4.84	5.70	6.55	7.66	9.02	7.51
	25	0.24	0.44	1.19	1.88	2.55	3.19	4.13	5.05	5.95	6.84	8.00	9.43	7.99
	26	0.25	0.46	1.24	1.96	2.66	3.33	4.31	5.27	6.21	7.14	8.35	9.84	8.47
	28	0.27	0.50	1.34	2.12	2.88	3.61	4.67	5.71	6.73	7.73	9.05	10.7	9.47
	30	0.29	0.54	1.45	2.29	3.10	3.89	5.03	6.15	7.25	8.33	9.74	11.5	10.5
	32	0.31	0.58	1.55	2.45	3.32	4.17	5.40	6.60	7.77	8.93	10.4	12.3	11.6
	35	0.34	0.64	1.71	2.70	3.66	4.59	5.95	7.27	8.56	9.84	11.5	13.6	13.2
	40	0.39	0.73	1.97	3.12	4.23	5.30	6.87	8.40	9.89	11.4	13.3	15.7	16.2
	45	0.45	0.83	2.24	3.55	4.80	6.02	7.80	9.53	11.2	12.9	15.1	17.8	19.3
		Type A				Type B				Type C				

Fuente: Elementos de Máquinas. Transmisión por cadenas. Unidad 2. Disponible en:
<http://files.cesarruiz.webnode.com.co/200000094-cec46d0fac/TransmisionPorCadenas.pdf>

Anexo F. Práctica propuesta para su implementación



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Laboratorio de Diseño de Máquinas II

PRÁCTICA No. 1

Fecha de realización:

Fecha de entrega:

Nombre:

Código:

Nombre:

Código:

OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

1. Entender el método de fresado por generación y sus características por medio del estudio de los materiales a manejar y la herramienta de corte seleccionada.
2. Reforzar la teoría aprendida en el salón de clases mediante la fabricación de engranajes rectos plásticos en acetal, PVC y Nylon.
3. Encontrar las variables presentes al maquinar una rueda de un material específico y enunciar las posibles fuentes de error.
4. Obtener engranajes en diferentes materiales para su posterior análisis de fallas.

MATERIALES

1. Módulo de fresado por generación
2. Ruedas de distintos diámetros de Acetal, Nylon, Pvc.
3. Juego de llaves bristol.
4. Computador portátil (programas instalados: LabVIEW Y Arduino)
5. Hoja de cálculos lista.

CONSIDERACIONES

1. Las ruedas a utilizar, previamente calculadas sus dimensiones (diámetro, ancho) con agujero de 20mm, un ancho recomendado entre $[10 - 3.5]$ mm, y para un diámetro exterior entre $[90 - 170]$ mm.

2. Verificar que todas las conexiones estén en orden y revisar con anterioridad el manual del usuario para conocer mejor el módulo antes de su uso.
3. Recuerde que la fresa madre (herramienta de corte) tiene un módulo de 4 mm; por tanto, los engranajes a obtener tendrán dicho módulo. Revise las ruedas que trae y los cálculos obtenidos en clase antes de interactuar con el módulo.

PROCEDIMIENTO

1. Seleccione el tipo de rueda que utilizará (material y ancho) y posicónela en su respectivo eje.



2. Verifique la posición de la fresa madre y que todos los componentes mecánicos responsables de su movimiento estén en su lugar.
3. Inicie la secuencia de trabajo en la interfaz de labVIEW manteniéndose atento a cualquier anomalía. Si algo inusual se presenta, accione el botón de emergencia de la interfaz o el botón físico ubicado al costado izquierdo de la máquina.
4. Cuando termine la secuencia de trabajo, suelte el engranaje tallado de la posición de trabajo y verifique sus características (forma y acabado superficial del diente, tamaño y número de dientes esperados según los cálculos realizados previamente).
5. De acuerdo al proceso obtenido para cada material y los cálculos realizados, indique las posibles causas de error o diferencia (si las hubo) en el tallado de los dientes de los engranajes.

Nota: Recuerde que la velocidad de la fresa fue calculada para el tallado de los tres materiales antes mencionados. Si desea usar otro tipo de polímero, deberá calcular un nuevo valor de avance para el carro principal.

6. Registre en la siguiente tabla, los tiempos de trabajo de la fresa madre para diferentes diámetros de ruedas y materiales

Diámetro/Tiempo de tallado	Acetal	Nylon	PVC
96 mm			
100 mm			
104mm			
116mm			
140mm			

- Enuncie algunas posibles variables que afecten o puedan afectar el tallado de engranajes, aparte del tiempo trabajo.
- ¿Qué ventajas tiene el fresado por generación frente a otros procesos de fresado que logró observar mediante la práctica?
- ¿Qué desventajas o limitaciones con respecto a la teoría encontró en el tallado realizado con este módulo?
- Al ver la herramienta en operación, ¿qué variables cree que podrían mejorar el diseño de la fresa madre y su proceso de corte?

CONCLUSIONES